

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Tesis previa a la obtención del Título de Ingeniero Electrónico

TÍTULO:

ESTUDIO, DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD Y MONITOREO DE CATARATA DE CARGA PARA UN MOLINO DE CERÁMICA MEDIANTE PROCESAMIENTO DE SONIDO EN LA FÁBRICA GRAIMAN DE LA CIUDAD DE CUENCA



AUTOR: Christian Eduardo Romero Haro

DIRECTOR: Ing. Iván Escandón

Cuenca, Abril de 2012

Certificación:

Ing. Iván Escandón.

CERTIFICA:

Haber dirigido y revisado prolijamente cada uno de los capítulos del informe de monografía realizada por el Señor Christian Eduardo Romero Haro y por cumplir los requisitos, Autorizó su presentación..

Cuenca, Abril de 2012

Ing. Iván Escandón
Director

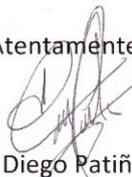
Cuenca, 26 de Marzo de 2012

GRAIMAN
CERTIFICA

Que Christian Eduardo Romero Haro, con C.I. 010462601-5, estudiante de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, ha realizado en la fábrica el proyecto de Tesis denominado *“Estudio, diseño e implementación de un sistema de control de velocidad y monitoreo de catarata de carga para un molino de cerámica mediante procesamiento de sonido en la Fábrica Graiman de la Ciudad de Cuenca”*, durante el periodo que comprende el mes de octubre de 2011 hasta el mes de marzo de 2012, contando con las autorizaciones necesarias para la realización de dicho proyecto.

El Sr. Romero podrá hacer uso del presente de la manera en la que el creyera conveniente.

Atentamente



Ing. Diego Patiño Z.

GRAIMAN Cía. Ltda.

GRAIMAN CUENCA: Fábrica: Parque Industrial Machángara, Panamericana Norte Km. 4 | PBX: (07) 2862255 | Fax: (07) 2800722
GRAIMAN QUITO: Av. Amazonas N 36-99 y Corea (esq.) | Telfs: (02) 2253584 - 2253656 | Fax: (02) 2253638
GRAIMAN GUAYAQUIL: Av. Juan Tanco Marengo Km 1.5 | PBX: (04) 2684279 | Fax: (02) 2682326
GRAIMAN AMBATO: Av. Atahualpa 3278 y Cervantes | Telfs: (03) 847535 / 2843956 / 2840408 / 28848765
GRAIMAN SANTO DOMINGO DE LOS TZACHILAS: Vía a Quevedo Km 3 y Luis Iturralde | Telefax: (02) 3702560
www.graiman.com

Declaratoria de Responsabilidad:

Los conceptos desarrollados, los análisis realizados y las conclusiones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Cuenca, Abril de 2012

Christian Eduardo Romero Haro

Dedicatoria:

Este trabajo está dedicado a mi familia y a mi enamorada, ya que ellos siempre me han brindado su apoyo y han sido el pilar fundamental para la realización del proyecto.

Christian

Agradecimientos:

Por la realización de mi Tesis agradezco primero a Dios. También agradezco a mi familia y a mi enamorada que han estado siempre brindándome su apoyo. Después quiero agradecer a los Ingenieros Jorge Pesántez y Diego Patiño, por darme la oportunidad de realizar mi proyecto en la empresa. Quiero agradecer a los docentes de la universidad que a lo largo de mis estudios me han brindado las herramientas para la consecución de mi objetivo y de manera muy especial a mi director el Ing. Iván Escandón, quien me ha brindado su apoyo y me ha dado apertura para realizar el proyecto.

Christian

Índice general

Certificación	I
Certificación de la Empresa	II
Declaratoria	III
Dedicatoria	IV
Agradecimientos	v
1. Generalidades	1
1.1. Proceso de fabricación de la Cerámica	1
1.1.1. El Gres Porcelánico	1
1.1.1.1. Características Técnicas Del Gres Porcelánico . . .	2
1.1.2. Proceso de Fabricación	2
1.1.2.1. Materias Primas	3
1.1.2.2. Preparación del Polvo	4
1.1.2.3. Prensado	6
1.1.2.4. Secado	7
1.1.2.5. Esmaltado	8
1.1.2.6. Cocido	9

1.1.2.7.	Selección	9
1.2.	Molinos de Minerales	10
1.2.1.	La Molienda	10
1.2.2.	Molinos de Minerales	11
1.2.2.1.	Molinos de Bolas	11
1.2.2.2.	La Velocidad Crítica de los Molinos	12
1.3.	Variadores de Velocidad	13
1.3.1.	Funcionamiento de los variadores de velocidad	15
1.3.2.	Funciones	15
2.	Estudio del Proceso de Molienda	16
2.1.	Análisis Espectral	16
2.1.1.	Consideraciones Previas	16
2.1.2.	Espectrogramas	17
2.1.2.1.	La Transformada de Fourier de Tiempo Reducido	17
2.1.3.	Análisis del Espectrograma	18
2.2.	Comportamientos	19
2.2.1.	Características del Molino	19
2.2.2.	Parámetros del Proceso de Molienda	21
2.2.2.1.	Parámetros de la Barbotina	21
2.2.2.2.	Parámetros del Cuerpo Moledor	22
2.2.3.	Catarata de Carga del Molino	22
2.3.	Modelos Aproximados	23
2.3.1.	Modelo del Umbral de Impacto en función del Desgaste del Cuerpo Moledor.	24
2.3.2.	Modelo Físico	25

2.3.2.1.	Modelado en Movimiento Parabólico	25
2.3.2.2.	Modelo de Elementos Discretos	28
2.3.3.	Modelo Matemático	29
2.3.3.1.	Identificación de Sistemas	29
2.3.3.2.	Modelo General-Lineal	30
2.3.3.3.	Modelo ARMAX	32
2.3.3.4.	Modelo Box-Jenkins	33
2.3.3.5.	Modelo Basado en Filtros Adaptativos	33
2.4.	Calidad del Modelo	36
3.	Sistema de Control	37
3.1.	Modelo de Controlador	37
3.1.1.	Análisis de los Modelos Matemáticos Propuestos	37
3.1.1.1.	Análisis del Modelo ARMAX	37
3.1.1.2.	Análisis del Modelo Box-Jenkins	38
3.1.1.3.	Análisis del Modelo Basado en Filtros Adaptativos	40
3.1.2.	Elección del Modelo Adecuado.	41
3.1.3.	Tipo de Controlador a Emplearse	41
3.1.4.	Ajuste del Controlador	42
3.2.	Sensores Acústicos	44
3.2.1.	Sensores Acústicos Empleados	44
3.2.1.1.	Sensores Acústicos Electrodinámicos	45
3.2.1.2.	Sensores Elegidos	45
3.3.	Hardware para el Procesamiento	46
3.3.1.	Características del Hardware para el Procesamiento	46

4. Diseño y Construcción	48
4.1. Esquema Prototipo	48
4.1.1. Molino y Variador de Frecuencia	48
4.1.2. Esquema de Funcionamiento	50
4.1.3. Estructura de Soporte para los Sensores	51
4.1.4. Placa de Acople para los Sensores	52
4.2. Construcción Electrónica	52
4.2.1. Placa Electrónica	52
4.3. Programación del Dispositivo	53
4.3.1. Código de Adquisición	53
4.3.2. Código de Procesamiento	54
4.3.2.1. Filtrado	55
4.3.2.2. Análisis de Espectro	56
4.3.2.3. Almacenamiento de los Datos del Espectro	57
4.3.2.4. Código de Control	57
4.3.2.5. Comunicación con el Driver	58
4.4. Ensamblaje y Montaje	59
4.4.1. Estructura Mecánica	59
4.4.2. Sistema Completo	60
5. Pruebas de Funcionamiento	63
5.1. Funcionamiento	63
5.1.1. Condiciones Habituales de Funcionamiento	63
5.1.2. Condiciones Modificadas de Funcionamiento	66
5.1.3. Análisis de las Pruebas bajo Modificaciones Fijas en el Sistema	68
5.2. Velocidad en Comparación al Sistema sin el Controlador	69
5.2.1. Curvas de Comportamiento del Sistema con el Controlador Implementado	69

6. Análisis Financiero	72
6.1. Análisis de Factibilidad y Rentabilidad del Sistema	72
6.1.1. Presupuestos	72
6.1.2. Análisis de la Tasa Interna de Retorno y del Valor Actual Neto (TIR y VAN)	73
Conclusiones y Recomendaciones	77
Bibliografía	80

Índice de figuras

1.1. Gres Porcelánico Caribe producido por Cerámicas Graiman	1
1.2. Ciclo de producción del gres porcelánico	3
1.3. Depósito de almacenaje de materias primas	4
1.4. Atomizador ATM 12 del fabricante SACMI	6
1.5. Silos de almacenamiento	6
1.6. Prensa Hidráulica del Fabricante Italiano Welko	7
1.7. Secador Vertical del Fabricante Italiano Welko	8
1.8. Esmaltador	8
1.9. Horno de rodillos del Fabricante Italiano Welko	9
1.10. Clasificador Electrónico del Fabricante Italiano Welko	10
1.11. Molino de bolas del fabricante italiano SACMI	12
1.12. Medios de molienda	12
1.13. Variador Comercial Micromaster del fabricante SIEMENS	13
1.14. Esquema básico de un variador de velocidad trifásico	14
2.1. Espectrograma de una señal RF	17
2.2. Molinos de la planta #2 (El molino 4 a la derecha)	20
2.3. Copa Ford con soporte	21
2.4. Tamiz de 250 μm	22

2.5. Movimiento de las cargas al interior del molino.	23
2.6. . Grafica que describe el modelo físico	26
2.7. . Modelo de catarata de carga usando DEM (ETT Transferencia de Tecnologías)	28
2.8. Esquema de Control	29
2.9. Parametros a considerarse en la identificación	30
2.10. Diagrama de bloques del modelo General-Lineal	31
2.11. Bloque de identificacion de sistemas General-Lineal en LabVIEW . . .	31
2.12. Diagrama de bloques del modelo ARMAX	32
2.13. Bloque de identificacion de sistemas ARMAX en LabVIEW	32
2.14. Diagrama de bloques del modelo Box-Jenkins	33
2.15. Bloque de identificacion de sistemas Box-Jenkins en LabVIEW	33
2.16. Esquema de modelado con un filtro adaptativo	34
2.17. Esquema de un filtro adaptativo	35
2.18. Bloque para crear un Filtro Adaptativo	35
2.19. Bloque para actualizar los coeficientes de un Filtro Adaptativo	36
3.1. Resultado de la identificacion ARMAX	37
3.2. Error de la identificacion ARMAX	38
3.3. Resultado de la identificacion Box-Jenkins	39
3.4. Error de la identificacion Box-Jenkins	39
3.5. Resultado de la identificacion con Filtro Adaptativo	40
3.6. Error de la identificacion con Filtro Adaptativo	40
3.7. Bloque PID de LabVIEW	41
3.8. Diagrama de bloques de simulación del sistema	42
3.9. Respuesta al escalón del sistema sin el controlador.	43

3.10. Respuesta al escalón del sistema sin el controlador.	44
3.11. Esquema Constructivo de un micrófono Electrodinámico	45
3.12. Micrófono Shure SM58.	45
3.13. Computador portátil HP	47
4.1. Vista del Molino con su sistema de Transmisión	48
4.2. Controlador del Variador de Frecuencia	49
4.3. Velocidad del molino en función de la frecuencia del variador	50
4.4. Esquema de la estructura de soporte de los sensores.	51
4.5. Esquema de la placa de acople de los sensores.	52
4.6. Diseño de la placa de acople de los sensores.	52
4.7. Placa de acople de los sensores con los componentes ya soldados.	53
4.8. Placa de acople de los sensores en su contenedor.	53
4.9. Bloque de configuración de adquisición de sonido.	54
4.10. Bloque de lectura de sonido.	54
4.11. Bloque de escritura en disco de un sonido.	54
4.12. Panel Frontal del Software de Procesamiento.	55
4.13. Bloque de Configuración de Filtro	55
4.14. Corte de un espectrograma	56
4.15. Bloque de STFT	57
4.16. Bloque guardar hoja de cálculo.	57
4.17. Panel frontal del control.	58
4.18. Bloque de implementación PID.	58
4.19. Bloque de lectura y escritura USS.	58
4.20. Estructura de soporte para los sensores.	59

4.21. Conector de audio.	60
4.22. Módulo de conversión RS232 a RS485.	60
4.23. Armarios que contienen los variadores de Frecuencia.	61
4.24. Conexión al variador de Frecuencia.	61
4.25. Perspectiva de l sistema implementado en un molino de la planta.	62
5.1. Periodo de catarata a velocidad de funcionamiento habitual	64
5.2. Numero de impactos de catarata a velocidad de funcionamiento habitual	64
5.3. Periodo de catarata a velocidad de funcionamiento habitual con alto nivel de desgaste	65
5.4. Numero de impactos de catarata a velocidad de funcionamiento habitual con alto nivel de desgaste	65
5.5. Periodo de catarata a velocidad de funcionamiento modificado	66
5.6. Numero de impactos de catarata a velocidad de funcionamiento modificada	67
5.7. Periodo de catarata a velocidad de funcionamiento modificado con alto nivel de desgaste	67
5.8. Numero de impactos de catarata a velocidad de funcionamiento modificado con alto nivel de desgaste	68
5.9. Periodo de Catarata con el sistema controlado	69
5.10. Impactos de Catarata con el sistema controlado.	70
6.1. Valor actual neto.	76

Índice de cuadros

1.1. Características técnicas del gres porcelánico	2
3.1. Variaciones del Error del Modelo ARMAX	38
3.2. Variaciones del Error del Modelo Box-Jenkins	40
3.3. Coeficientes del Filtro Adaptativo	40
3.4. Variaciones del Error del Modelo con Filtro Adaptativo	41
3.5. Parámetros del Sistema sin Controlador	43
3.6. Ganancias del Controlador	43
3.7. Parámetros del Sistema sin Controlador	44
3.8. Características de los micrófonos empleados	46
4.1. Características del molino	49
4.2. Características del Motor	49
4.3. Características del Motor	49
5.1. Resultados de las pruebas de velocidad.	68
5.2. Resultados de las pruebas de control.	70
6.1. Presupuesto Personal del Proyecto	72
6.2. Presupuesto para la Implementación Permanente del Proyecto	73
6.3. Valores aproximados de costos de Producción	74
6.4. Ahorro energetico en el motor.	74
6.5. Valor Actual Neto.	76

Capítulo 1

Generalidades

1.1. Proceso de fabricación de la Cerámica

1.1.1. El Gres Porcelánico

El gres (figura 1.1) es un tipo de cerámica muy utilizada para revestir suelos (también conocido como revestimiento). Se presenta en numerosas variedades, tamaños, texturas y colores, por lo que se ha hecho muy popular, además del conveniente precio en comparación con otros materiales. Existe el gres rústico y el porcelánico, siendo este último el más utilizado debido a sus propiedades estéticas en la decoración.



Figura 1.1: Gres Porcelánico Caribe producido por Cerámicas Graiman
Fuente: <http://www.graiman.com/Productos.aspx?gid=1&pid=81>

El gres está formado por alúmina, sílice y álcalis procedentes de arcilla, feldespato, cuarzo y caolines. Este revestimiento se realiza cocinando pasta cerámica rica en fundentes a temperaturas muy altas (de 1200 °C a 1350 °C). Se diferencia de la porcelana

por ser más opaco y sólo parcialmente vitrificado. Generalmente, es café o gris por las impurezas que contiene la arcilla utilizada para su elaboración. Además, el gres es normalmente esmaltado.

El gres porcelánico es el que más se acerca al concepto de roca natural y con él se pueden lograr combinaciones muy originales y llamativas. Es un material totalmente vitrificado y tiene una muy baja porosidad, que lo hace muy resistente. Es por ello que se utiliza especialmente en pavimento y revestimiento, logrando incluso sobrevivir en los climas fríos. También es resistente a los productos químicos como los de limpieza y es muy resistente a la abrasión. Además, es muy higiénico por su fácil limpieza.

Este tipo de recubrimiento ha evolucionado y es posible encontrarlo natural o pulido. El natural es muy cotizado debido a su semejanza con las rocas de la naturaleza, como el mármol y la pizarra; también puede imitar a la madera. El gres pulido logra un efecto muy brillante y puede imitar muy bien al mármol pulido.

1.1.1.1. Características Técnicas Del Gres Porcelánico

Debido a la baja porosidad del gres que se refleja en una baja absorción del agua y a su microestructura, el gres es el recubrimiento cerámico con mejores características técnicas, las cuales se presentan en el cuadro 1.1:

CARACTERÍSTICA	VALOR REQUERIDO
Absorción de agua	menor que 0.5%
Resistencia a la flexión	mayor que 27N/mm ²
Resistencia a la abrasión	menor que 205mm ³
Coefficiente lineal de expansión térmica	menor que $9 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Resistencia al congelamiento	Ningún defecto
Dureza en escala de Mohs	mayor que 5

Cuadro 1.1: Características técnicas del gres porcelánico

Además de las características presentadas, cabe recalcar que el gres tiene un óptimo comportamiento bajo condiciones higiénicas muy diversas al tener una masa impermeable, con lo que no retiene ningún líquido, vapor u olor. Esta es la razón por la que este se utilice en edificaciones públicas e incluso industriales.

1.1.2. Proceso de Fabricación

El gres porcelánico es el resultado de un proceso de producción muy similar a cualquier recubrimiento cerámico. El diagrama de flujo de la figura 1.2 muestra el ciclo de producción del gres.



Figura 1.2: Ciclo de producción del gres porcelánico
Fuente: Autor

En los siguientes temas se irá explicando en orden cada etapa del ciclo de producción del gres porcelánico, haciendo énfasis en los aspectos que le dan sus características especiales.

1.1.2.1. Materias Primas

Las materias primas que se utilizan en el proceso de fabricación del gres porcelánico se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Caolines o arcillas caoliníticas: su función principal es la de proporcionar a la fórmula del gres la plasticidad necesaria para obtener mediante el prensado, los recubrimientos en crudo (previo a la etapa de cocción) con características mecánicas adecuadas, de manera que se facilite la manipulación y transporte del producto previo a la etapa de cocción.
- Materiales con contenido de cuarzo: su función es la de formar una especie de esqueleto del soporte cerámico, le da una función no plástica (que no se deforma permanentemente) y de tipo estructural, la cual contribuye al control de los cambios en las dimensiones del producto durante las etapas de secado y cocido.
- Feldespatos o talcos: la función de estos es la de actuar como fundente (aísla los materiales). Dan la facilidad de producir abundante fase líquida (separación molecular en la mezcla durante la molienda) con unas características adecuadas de

flujo (más uniforme) durante el proceso de cocción. La presencia de esta fase es indispensable para poder obtener las excelentes características del gres porcelánico.

En la figura 1.3 se muestran los depósitos de almacenaje de las materias primas. La manipulación de las mismas se realiza mediante palas mecánicas con la finalidad de transportarlas hasta la siguiente etapa.



Figura 1.3: Depósito de almacenaje de materias primas
Fuente: Autor

Los materiales nombrados anteriormente son considerados los principales, es decir los que nunca salen de la fórmula. Entre los que se utilizan en dosis pequeñas, hay ocasiones en las que no es prioritario su uso están:

- Carbonatos.
- Defloculantes.
- Reciclados.

1.1.2.2. Preparación del Polvo

La preparación del polvo consiste en una serie de operaciones dirigidas a la obtención de un material de composición homogénea (mismas proporciones en varias muestras) y distribución de tamaño de partícula adecuada.

Existen dos clases de tecnologías que pueden ser usadas en esta etapa del proceso de producción del recubrimiento:

- **Molienda en seco y humectación:** Como su nombre lo dicen este tipo de molienda se realiza con el material seco (sin agregar de agua) para finalmente pasar a una etapa de humectación, donde se agrega agua al resultante del proceso. En este tipo de molienda se da una fragmentación del material. Una característica de este tipo de molienda es que resulta ser muy económico, ya que este requiere de pocas cantidades de agua.
- **Molienda en húmedo y atomizado:** En la molienda en húmedo se coloca agua junto con los materiales a moler. Después este material pasa a ser atomizado, donde se elimina gran parte del agua de la mezcla, sin necesidad de volver a agregar agua. En este tipo de molienda se da un proceso de abrasión y fragmentación del material. Este proceso tiene un mayor consumo energético que el anterior.

La opción de molienda en húmedo y atomizado es la menos conveniente viéndola desde un punto de vista energético y por ende económico, a pesar de eso, es la empleada para la producción del gres porcelánico debido a las siguientes razones:

- Este tipo de molienda brinda la posibilidad de alcanzar tamaños de partícula más finos, esto desencadena en un recubrimiento más homogéneo y denso al instante del proceso de cocción.
- En este tipo de molienda se emplean cantidades de agua del 35 al 40% y se logra una homogeneización de las materias primas que conforman el polvo.
- El atomizado produce polvos granulares con morfologías y distribuciones de tamaño de partícula aAutordos. Estas características contribuyen a un correcto llenado de los moldes en la etapa de prensado. Esto desencadena en buenas compactaciones del recubrimiento y con ello favorece la sintetización en la etapa de cocción.

En este proceso de molienda, se utilizan molinos de bolas, llamados así por el cuerpo molidor que son esferas cerámicas o bolas de cuarzo. Al resultante del proceso de molienda en húmedo se le conoce como barbotina, la cual tiene entre el 35 y 40% de agua.

La barbotina se inyecta a alta presión, entre 25 y 30 atmósferas, mediante el empleo de bombas hidráulicas hacia un conjunto de aspersores localizados en la parte superior de un equipo llamado atomizador o secador de aspersión (figura 1.4). En el atomizador la barbotina entra en contacto con aire caliente a temperaturas en el orden de 500 a

600 °C. El agua que se encuentra en la barbotina se evapora y se obtienen los polvos granulares aAutordos para la etapa de prensado. El polvo resultante de la atomización se envía a silos de almacenamiento que se muestran en la figura 1.5, por medio de bandas transportadoras.



Figura 1.4: Atomizador ATM 12 del fabricante SACMI

Fuente: http://www.sacmi.com/System/00/01/06/10601/633568390894062500_1.pdf



Figura 1.5: Silos de almacenamiento

Fuente: <http://www.arqhys.com/construcciones/construccion-silos.html>

1.1.2.3. Prensado

En la etapa de prensado, se transporta el polvo atomizado desde los silos por medio de una banda transportadora. El polvo que tiene una humedad del 4 al 7% y se compri-

me entre dos superficies a presiones de 350 a 500 kg/cm². Estas presiones causan un reacomodo y una deformación parcial del polvo, esto permite un alto grado de compactación en la pieza prensada.

Para este proceso se utilizan prensas hidráulicas, ya que permiten un alto grado de control de la presión (figura 1.6).



Figura 1.6: Prensa Hidráulica del Fabricante Italiano Welko
Fuente: <http://www.welko.it/webadmin/include/fileviewer.asp?ID=223>

1.1.2.4. Secado

El proceso de secado del gres, tiene la función de eliminar el agua de la pieza prensada que en su momento fue necesaria para el moldeado. Las condiciones en las cuales se remueve el agua del recubrimiento son críticas para asegurar la integridad del producto, por lo que deben ser controladas para así prevenir deformaciones o fracturas en el producto.

Para este proceso se emplean secadores verticales (véase figura 1.7), los cuales son los más comunes para la fabricación del gres porcelánico. En los secadores se dan los procesos de:

- Calentamiento del material que promueve la difusión del agua del interior del recubrimiento hacia la superficie.
- Evaporación y transporte de agua de la superficie del recubrimiento.



Figura 1.7: Secador Vertical del Fabricante Italiano Welko
Fuente: <http://www.welko.it/webadmin/include/fileviewer.asp?ID=226>

1.1.2.5. Esmaltado

Lo que sigue es impregnar el diseño serigráfico sobre la parte vistosa de la baldosa. Este proceso se realiza aplicando unos aditivos que ayudan a formar una película semiplástica, la cual impide que el esmalte polvoriento se pegue a las pantallas.

En el proceso de decorado se utilizan serigrafías, el 90 % de fritas (esmaltes cerámicos) y el 10 % de caolinita, y de acuerdo con el diseño deseado se hace la pantalla y un escrito. El tipo de serigrafía, la alimentación del esmalte y la cantidad de colores son controlados automáticamente (véase figura 1.8).



Figura 1.8: Esmaltador
Fuente: Autor

1.1.2.6. Cocido

En los recubrimientos de gres porcelánico, la operación de cocido se lleva a cabo en hornos rápidos y continuos, en los cuales, los recubrimientos son transportados a través del horno por medio de rodillos cerámicos (ver figura 1.9).



Figura 1.9: Horno de rodillos del Fabricante Italiano Welko
Fuente: <http://www.welko.it/webadmin/include/fileviewer.asp?ID=227>

En este proceso, los recubrimientos son precalentados y después llevados hasta la temperatura de cocción, en el caso del gres porcelánico está alrededor de 1200 °C. Ésta temperatura es la más elevada en la fabricación de cualquier tipo de recubrimiento de piso o pared. Posteriormente, se comienza un proceso llamado enfriamiento rápido del material, hasta que baje su temperatura a los 600 °C. Después comienza un enfriamiento lento con el fin de que el recubrimiento pase la transformación alotrópica de la sílica, esta se da a los 573 °C, de esta manera se evitan las fracturas conocidas como rajado fino. De ahí se enfría gradualmente el material hasta que el recubrimiento tenga una temperatura a la que se le pueda manipular una vez salido del horno.

Durante la cocción, una serie de reacciones y transformaciones toman lugar en las materias primas y, en general, las características del producto final dependen no solamente de las reacciones que ocurren, sino también en la forma en que se llevan a cabo.

1.1.2.7. Selección

La etapa de selección es la etapa final del proceso de producción del gres porcelánico y son tres las metas de este proceso:

- Separación de recubrimientos por calidades.
- Formación de lotes de recubrimientos homogéneos en dimensiones y tonos.
- Eliminación de piezas defectuosas.

Estas operaciones se realizan por medio de máquinas clasificadoras altamente automatizadas (ver figura 1.10), En particular, las características dimensionales son controladas en estas máquinas utilizando sistemas electrónicos sofisticados que permiten una rápida y confiable selección. Sin embargo, las intervenciones y el control de los operadores son de fundamental importancia en el proceso.



Figura 1.10: Clasificador Electrónico del Fabricante Italiano Welko
Fuente: <http://www.welko.it/webadmin/include/imgviewer.asp?ID=1058>

Para verificar que el producto cumpla con los estándares internacionales son sometidos a muestreos periódicos y pruebas de calidad.

1.2. Molinos de Minerales

1.2.1. La Molienda

Es una operación donde se produce reducción de tamaño de rocas y minerales de manera similar al proceso de trituración. El resultante son granos más pequeños y de forma más regular que los salidos de trituración. Este proceso se utiliza fundamentalmente en la fabricación de cemento Portland. En cada uno de estos casos, se procesan en el mundo, alrededor de 2.000 millones de toneladas por año. También se utilizan en la preparación de combustibles sólidos pulverizados, molienda de escorias, fabricación de harinas y alimentos balanceados, etc.

1.2.2. Molinos de Minerales

El proceso de molienda es realizado en molinos que giran alrededor de su eje horizontal y que contienen una carga de cuerpos sueltos de molienda conocidos como "medios de molienda", los cuales están libres para moverse a medida que el molino gira produciendo la fragmentación de las partículas de material. Existe una amplia variedad de maquinaria para llevar a cabo los procesos de trituración y molienda. Entre ellos se cuentan con los equipos rotatorios, de gran auge en minería. La gama de molinos cilíndricos principales son:

- Molinos de bolas
- Molinos de barras
- Molinos autógenos

En este caso nos ocuparemos del molino de bolas, del cual se incluye una descripción sobre su funcionamiento en general. Cabe destacar que las empresas que los fabrican, realizan frecuentemente modelos especializados según las necesidades de cada productor y del material a fracturar.

1.2.2.1. Molinos de Bolas

El molino de bolas (figura 1.11) es una carcasa cilíndrica que gira sobre su propio eje. Esta envoltura está llena aproximadamente hasta la mitad de objetos duros (medios de molienda), resistentes a la abrasión y de preferencia más pesados que el mineral a romper. Los medios de molienda se clasifican en:

- Esferas metálicas
- Barras metálicas
- Mineral de mayor tamaño y dureza



Figura 1.11: Molino de bolas del fabricante italiano SACMI

Fuente: http://www.sacmi.com/System/00/00/94/9427/633535541633125000_1.pdf

El “medio de molienda” (Figura 1.12), es aquel medio que permite la reducción del material. Es de mayor tamaño que el mineral a moler, pero de muchísimo menor tamaño que el molino.



Figura 1.12: Medios de molienda

Fuente: Autor

El mineral en su paso por el molino, puede ser fracturado mediante dos formas:

- Ciclo de cascada, el tipo de fractura es vía impacto preferencialmente.
- Cizalle (interior), el tipo de fractura es vía abrasión o atrición.

De esta manera los materiales menos resistentes se fracturan al interior del molino o se desgastan seguidamente hasta llegar al tamaño deseado, debido a los repetidos impactos y la abrasión a la cual están sometidos.

1.2.2.2. La Velocidad Crítica de los Molinos

La velocidad crítica para un molino y sus elementos moledores es aquella que hace que la fuerza centrífuga que actúa sobre los elementos moledores, equilibre el peso de los

mismos en cada instante. Cuando esto ocurre, los elementos molidores quedan “pegados” a las paredes internas del molino y no ejercen la fuerza de rozamiento necesaria sobre el material para producir la molienda, ni la de percusión. Para el caso de medios de molienda esféricos la velocidad se presenta en la ecuación 1.1.

$$n_c(rpm) = \frac{42,3}{\sqrt{\text{Diametro del molino}(m)}} \quad (1.1)$$

La velocidad usual se encuentra entre el 65% y 75% de la crítica, la máxima puede alcanzar hasta el 90%.

1.3. Variadores de Velocidad

Un variador de velocidad es el dispositivo que permite controlar la velocidad y el torque suministrado por un motor eléctrico a fin de adaptarlos a lo requerido para dicha aplicación.

Un variador electrónico de velocidad (figura 1.13) está formado por circuitos que incorporan transistores de potencia como el IGBT (transistor bipolar de puerta aislada) o tiristores, siendo el principio básico de funcionamiento transformar la energía eléctrica de frecuencia industrial en energía eléctrica de frecuencia variable.



Figura 1.13: Variador Comercial Micromaster del fabricante SIEMENS
Fuente: <http://www.irvinsystems.com/wp-content/uploads/2011/05/variador-De-Frecuencia-Micromaster-Siemens.jpg>

Esta variación de frecuencia se consigue mediante dos etapas en serie. Una etapa rectificadora que transforma la corriente alterna en continua, con toda la potencia de entrada en el llamado circuito intermedio y otra inversora que transforma la corriente continua

en alterna, con una frecuencia y una tensión regulables, que dependerán de los valores requeridos. A esta segunda etapa también se le suele llamar ondulator. Todo el conjunto del convertidor de frecuencia recibe el nombre de inversor (figura 1.14).

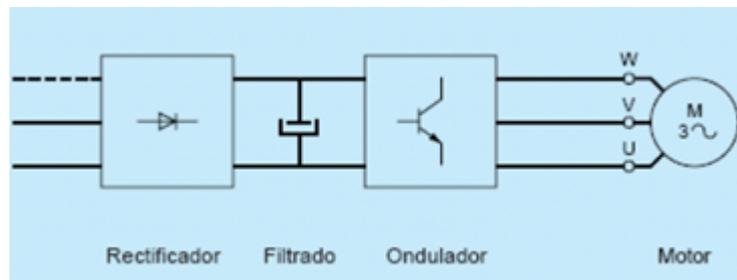


Figura 1.14: Esquema básico de un variador de velocidad trifásico

Fuente: <http://www.infoplc.net/blog4/wp-content/uploads/2010/02/Variador-Frecuencia4.jpg>

Casi todas las marcas incluyen dentro del propio convertidor protecciones para el motor, tales como protecciones contra sobrecorriente, sobretensión, fallo contra desequilibrios, defectos a tierra, etc, también ofrecen procesos de arranque y frenado suave mediante rampas de aceleración y de frenado, lo que redundará en un aumento de la vida del motor y las instalaciones.

Como debe saberse, el uso de convertidores de frecuencia añade un enorme potencial para el control de la velocidad del motor en muchas aplicaciones. Además aportan los siguientes beneficios:

- Mejora el proceso de control y por lo tanto la calidad del producto.
- Se puede programar un arranque suave, parada y freno (funciones de arrancador progresivo).
- Amplio rango de velocidad, par y potencia. (velocidades continuas y discretas).
- Bucles de velocidad.
- Puede controlar varios motores.
- Factor de potencia unitario.
- Respuesta dinámica comparable con los drivers de DC.
- Capacidad de by-pass ante fallos del variador.
- Protección integrada del motor.
- Marcha paso a paso (comando JOG).

1.3.1. Funcionamiento de los variadores de velocidad

El funcionamiento del regulador comienza en el puente rectificador y los condensadores de filtrado que convierten la tensión alterna monofásica o trifásica de la red en tensión continua. A continuación, un puente ondulator de transistores conmuta la tensión continua para generar una serie de impulsos de ancho variable (véase figura 1.14).

Para ajustar la anchura de los impulsos y de su repetición permite regular la tensión y la frecuencia de alimentación del motor para mantener una relación V/f constante y, con esto, el flujo deseado en el motor. La inductancia del motor realiza el alisado de la corriente. El control de la modulación es realizado por medio de un microprocesador y un ASIC (Circuito Integrado para Aplicaciones Específicas). La modulación depende de las tensiones y las frecuencias, por tanto, de las velocidades solicitadas en la salida del regulador.

El variador de frecuencia hace posible que el motor funcione en ambos sentidos de la marcha y permite la opción de frenado. La frecuencia de salida puede ser superior a la de alimentación.

El variador también se utiliza como arrancador o relentizador (cumple la función de frenar) para la puesta en marcha y la parada progresiva adaptada a una rampa. Integra la protección térmica del motor y la protección contra cortocircuitos.

1.3.2. Funciones

Las Principales funciones de los arrancadores y variadores de velocidad electrónicos son:

- Aceleración controlada.
- Variación de velocidad.
- Regulador de velocidad.
- Deceleración controlada.
- Inversión del sentido de giro.
- Frenado.
- Protecciones integradas.

Capítulo 2

Estudio del Proceso de Molienda

El capítulo trata el análisis del proceso de molienda, analizado el sonido que un molino produce. Es importante en este proceso considerar algunos aspectos, los cuales se irán detallando a continuación.

2.1. Análisis Espectral

2.1.1. Consideraciones Previas

Un molino de bolas tiene cuerpos molidores de características similares (generalmente en forma y tamaño) en su interior. Una característica del sonido que producen los impactos del cuerpo molidor en la cara interior del molino es que se pueden escuchar estos sonidos. Esta característica es la que hace posible que se monitoreen los impactos que producen estos cuerpos en la cara interior del molino. Estos sonidos serán llamados los impactos de catarata.

Para poder determinar al valor de frecuencia al que se dan los impactos se han utilizado algunos métodos. Uno de estos métodos es la FFT, pero esta no ha sido de gran ayuda, ya que lo que se requiere para determinar la catarata de carga del molino basándose en sonido es:

- Valores dentro de un ancho de banda de frecuencia.
- Tomar los valores en intervalos cortos de tiempo.
- Tener la capacidad de visualizar estos valores.

El problema de la FFT es que no da información de ningún tipo sobre el eje temporal ya que se hace sobre bloques de señal que pueden no contener información en un instante determinado y es de aquí de donde nace la idea de emplear espectrogramas.

2.1.2. Espectrogramas

Un espectrograma es una representación de una señal de acuerdo a las variaciones de la energía con respecto al tiempo y frecuencia. En el eje X va el tiempo, en el eje Y va la frecuencia, y en el eje Z va la amplitud o magnitud (véase figura 2.1).

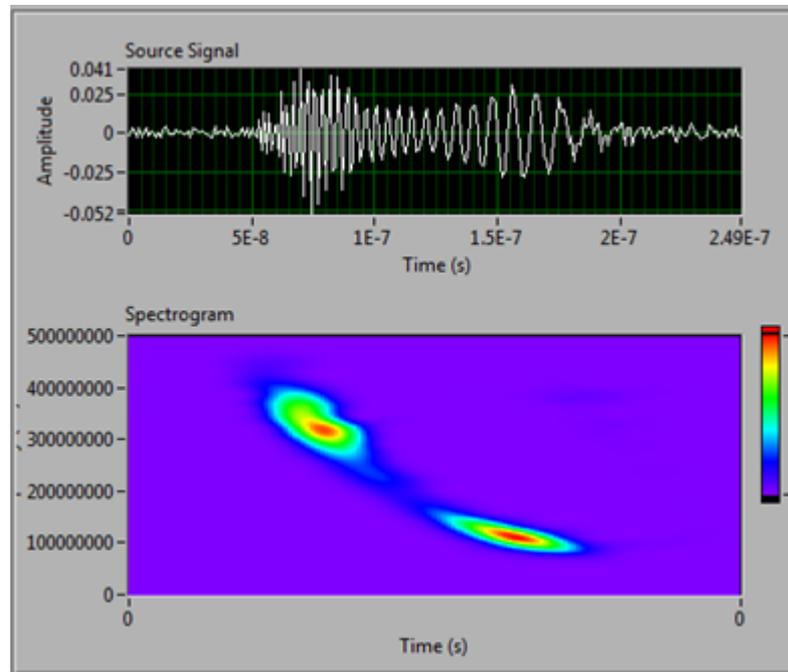


Figura 2.1: Espectrograma de una señal RF
Fuente: Autor

Estos espectrogramas se utilizan a menudo en los sistemas de reconocimiento de voz, identificación de animales, evaluación de instrumentos musicales o sistemas de sonido y, en general, para el análisis de todo tipo de señales incluyendo el tratamiento de imágenes.

El método más común para la generación de espectrogramas es la STFT (Transformada de Fourier de Tiempo Reducido). Este es el método a emplear para el análisis espectral del proceso de molienda.

2.1.2.1. La Transformada de Fourier de Tiempo Reducido

La STFT es una versión modificada de la Transformada de Fourier (FT), pero con la capacidad de analizar pequeños segmentos de la señal. La diferencia entre la STFT y la FT es que la señal se multiplica por una función ventana y luego de ello se hace un análisis en frecuencia.

En la Transformada de Fourier de Tiempo Reducido la función a ser transformada es multiplicada por una función ventana que solo es diferente de cero por un pequeño

período. La transformada de Fourier (una función de una sola dimensión) de la señal resultante es tomada como una ventana que se desliza a lo largo del eje del tiempo, resultando en una representación de dos dimensiones de la señal. Matemáticamente, se escribe como se indica en la ecuación 2.1.

$$STFTx(t) = X(\tau, w) = \int x(t)w(t - \tau)e^{-j\omega t} dt \quad (2.1)$$

Donde $w(t)$ es la función ventana, comúnmente una ventana de Hann o campana de Gauss. Es centrada en cero y $x(t)$ es la señal a ser transformada, $x(t, w)$ es en esencia la Transformada de Fourier de $x(t)w(t - \tau)$. Una función compleja representa la fase y magnitud de la señal sobre el tiempo y la frecuencia.

A menudo la fase instantánea es empleada junto con el eje del tiempo τ y el eje de la frecuencia w para suprimir cualquier discontinuidad por salto en la fase resultante en la STFT. El índice de tiempo τ es normalmente considerado como un tiempo "lento" y usualmente no se expresa con tan alta resolución como con el tiempo t .

En el caso del tiempo discreto, la información a ser transformada podría ser dividida en pedazos o fragmentos. Cada pedazo pasa por la transformada de Fourier, este resultado tiene valores complejos los cuales se colocan en una matriz que contiene la magnitud y fase para cada punto en tiempo y frecuencia. Esto puede ser expresado por la ecuación 2.2.

$$STFTx[n] = X(m, w) = \sum x[n]w[n - m]e^{-j\omega n} \quad (2.2)$$

Donde, $x[n]$ es una señal y $w[n]$ es la ventana. De nuevo, el índice de tiempo discreto m es normalmente considerado como un tiempo "lento" y usualmente no se expresa con tan alta resolución como con el tiempo n .

La magnitud al cuadrado de la STFT origina el espectrograma de la función (ecuación 2.3).

$$espectrogramax(t) = |X(\tau, w)|^2 \quad (2.3)$$

La grafica de un espectrograma se muestra en la figura 2.1.

2.1.3. Análisis del Espectrograma

Es muy importante la manera en que se traten los sonidos producidos por el molinopara ello se requiere del empleo de los espectrogramas que nos permitan visualizar todo un

ciclo de catarata. Con los espectrogramas se pueden localizar varios de los impactos producidos por el cuerpo molidor.

De esta manera se deben analizar algunos aspectos de este espectrograma, los cuales se nombran a continuación:

- Determinar la frecuencia a la que se debe cortar al espectrograma horizontalmente: Esto da una pauta de donde se debe cortar el espectrograma, ya que los cuerpos molidores son del mismo material. El sonido que ellos producen se encuentra en el mismo valor de frecuencia. El valor de frecuencia en el cual se aplica el corte debería mantenerse constante dentro de un mismo valor durante todo el proceso. Pero también hay que tomar en cuenta que el sonido producido por los impactos se maneja en un ancho de banda determinado, centrado en el valor de frecuencia mencionado.
- La detección de que impacto representa un golpe de catarata: Ahora ya conociendo la frecuencia de los impactos, la meta es determinar que impactos del corte obtenido representan un ciclo de catarata. Una forma simple de encontrar esto es mediante un tiempo de muestreo menor e igual a una revolución del molino. De esta manera se debe establecer una relación entre el impacto máximo y el valor medio de los impactos en ese intervalo de tiempo. Se debe tener cuidado con los tiempos de muestreo, ya que estos pueden dar datos erróneos.

Con estas consideraciones se debe realizar un software capaz de identificar estos parámetros y de esta manera llegar a tener variables para considerar en el siguiente capítulo.

2.2. Comportamientos

En esta sección se tratará de los comportamientos y parámetros que se pueden tener de un proceso de molienda y de un molino en específico.

2.2.1. Características del Molino

En la planta se estudiará en un solo molino (ver figura 2.2), ya que todos presentan diversas características en cuanto al tiempo de molienda. El molino es el cuarto de la planta.



Figura 2.2: Molinos de la planta #2 (El molino 4 a la derecha)
Fuente: Autor

Los datos del molino son presentados a continuación:

- Molino #4 (4 existentes en esa seccion).
- Tiempo estimado de molienda: 9 horas.
- Carga seca: 18200Kg.
- Carga bruta: 21207 Kg + 8000lts de agua.
- Diámetro: 3m.
- Largo del molino: 4.5m.
- Nivel de cuerpo moledor: 1.6m.
- Residuo: 11 %.
- Velocidad del molino fija de 12.5 rpm.
- Tiempo entre carga y descarga: 2horas.
- Densidad entre 1.64 y 1.65 g/100cm³.
- Viscosidad entre 35 y 45 seg/copa Ford.

2.2.2. Parámetros del Proceso de Molienda

Esta sección trata de describir los parámetros a considerarse dentro del proceso de molienda y qué relación tienen unos con los otros. Se irán clasificando estos parámetros de la siguiente manera:

- Parámetros de la barbotina.
- Parámetros del cuerpo moledor.

Estos parámetros se describirán en las subsecciones siguientes.

2.2.2.1. Parámetros de la Barbotina

Como se explicó anteriormente (sección 1.1.2.2), la barbotina es el resultado de la molienda, esta debe cumplir con ciertas características para dar por terminado el proceso. Estas se miden luego de un tiempo determinado y son:

- Densidad: se define como el cociente entre la masa de un cuerpo y el volumen que ocupa. La manera en que ésta es medida consiste en retirar un volumen determinado de barbotina y pesarlo para obtener su masa.
- Viscosidad o fluidez: es la propiedad de un fluido que tiende a oponerse a su flujo cuando se le aplica una fuerza. La viscosidad se mide usando una copa de viscosidad llamada “Copa Ford” (Figura 2.3). Su medición consiste en tomar el tiempo en el que una cantidad determinada de barbotina tarda en pasar a través de la parte inferior de esta copa. Este tiempo debe estar en un rango determinado por laboratorio.

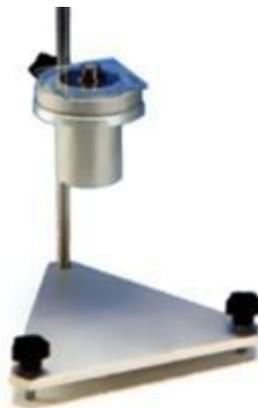


Figura 2.3: Copa Ford con soporte

Fuente: <http://www.neocitec.com.mx/agora/html/images/51890.jpg>

- Residuo: en el caso de la barbotina es el restante que no ha llegado a tener la finura requerida. La cantidad de residuo se obtiene tamizando una cantidad de barbotina por un tamiz de malla fina (figura 2.4), secando lo que queda en éste y obteniendo su peso.



Figura 2.4: Tamiz de 250 μm

Fuente: http://www.insulab.es/images/foto_tamiz200x50_250u.JPG

2.2.2.2. Parámetros del Cuerpo Moledor

En lo que respecta al cuerpo moledor, el parámetro a considerar es su desgaste (midiendo el nivel de vacío del molino). En el proceso que nosotros estamos analizando, el cuerpo moledor son piedras de río. Es importante mencionar algunas de sus características:

- Son económicas frente a otros medios de molienda.
- Son prácticamente esféricas.
- Su desgaste es más rápido que el de los medios de molienda fabricados.

2.2.3. Catarata de Carga del Molino

La catarata se da cuando el molino gira, los medios de molienda son elevados en el lado ascendente del molino hasta que se logra una situación de equilibrio dinámico donde los cuerpos de molienda caen en cascada y en catarata sobre la superficie libre de los otros cuerpos, alrededor de una zona muerta donde ocurre poco movimiento hasta el “pie” de la carga del molino (ver figura 2.5).

En la catarata de carga se pueden distinguir varias características, entre las cuales se pueden nombrar:

- El periodo de tiempo en que los impactos de catarata se repiten.

- La magnitud que tiene este sonido frente al valor medio total.
- Cae en un lugar específico, ya sea en la cara del molino o sobre la misma carga.
- Siempre que cae en una cara del molino, lo hace en una misma sección circular.

Estas características varían de acuerdo a las características del molino, por lo que se hace es consultar directamente con las personas que conocen más acerca del proceso. Estas personas son los operarios, ya que un estudio profundo del proceso está fuera del alcance del proyecto.

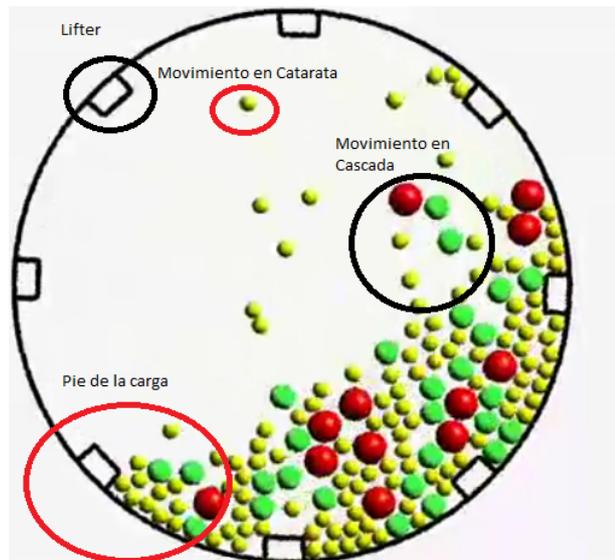


Figura 2.5: Movimiento de las cargas al interior del molino.
Fuente: <http://www.youtube.com/watch?v=n-jt38QMLPc>

- Al girar adherido al molino, el cuerpo molidor mantiene un movimiento circular uniforme.
- Al romper el equilibrio dinámico se produce un movimiento de tiro parabólico.

La catarata de carga se puede monitorear mediante el sonido que los cuerpos moledores producen al golpearse entre sí o con la cara del molino. Con solo acercarse al molino se puede escuchar el sonido de la catarata.

2.3. Modelos Aproximados

Para determinar los modelos se deben establecer variables a considerarse en el proceso, las cuales se presentan y describen a continuación:

- Periodo de catarata de carga (t_c): es el tiempo que separa un impacto de la catarata de carga de otro.
- Angulo del impacto (α_i): indica la posición donde golpea la catarata de carga.
- Vacío del molino (vm): indica cuán vacío se encuentra el molino tanto al instante del inicio como del final de la molienda.
- Umbral de impacto (ui): Indica cuántas veces más grande debe ser un impacto de catarata en comparación de la media de la muestra de los impactos para ser considerado como catarata.

Para la realización de los modelos se requiere de un análisis estadístico basado en varias mediciones en distintas condiciones del sistema. De esta manera se puede tener una idea de que es lo que sucede en el proceso de molienda.

2.3.1. Modelo del Umbral de Impacto en función del Desgaste del Cuerpo Moledor.

De acuerdo a la investigación, el cuerpo moledor sufre un desgaste de tipo lineal, de igual manera que se incrementa el umbral de impacto. Estas dos variables se pueden relacionar para así obtener el umbral correcto que ayude a determinar si ha ocurrido un impacto de catarata en el molino.

Entonces estableceremos como variable de entrada al vacío del molino y como variable de salida al umbral de impacto, debido a que el vacío del molino es un valor ya conocido y el otro es el que queremos determinar en base a análisis de datos propios del molino. De esta manera tenemos la ecuación 2.4.

$$ui - uii = m * (vm - vmi) \quad (2.4)$$

Donde:

vmi es el vacío del molino cuando éste se encuentra relleno con cuerpo moledor.

uii es el promedio del umbral de impactos al estar el molino relleno de cuerpo moledor.

m es la pendiente de la recta y se presenta en la ecuación 2.5.

$$m = \frac{(uif - uii)}{(vmf - vmi)} \quad (2.5)$$

Donde:

v_{mf} es el vacío del molino cuando éste se encuentra en su mínimo de cuerpo moedor.

u_{if} es el promedio del umbral de impactos al estar el molino en su mínimo de cuerpo moedor.

De la ecuación de la pendiente se toman datos basados en experimentos de datos adquiridos en diversos procesos de molienda que cumplen las características deseadas.

2.3.2. Modelo Físico

Para el análisis del comportamiento de la carga se considera solamente una bola (cuerpo moedor), al cual se lo somete a un análisis físico. Este análisis es de gran utilidad cuando se pretende emular la interacción del cuerpo moedor con la carcasa y revestimientos del molino además de la trayectoria que estos tienen.

Para encontrar un comportamiento aproximado de la carga al interior es necesario modelar ecuaciones basadas en tiro parabólico. Existen otros métodos para determinar del comportamiento del material al interior del molino, estos se llaman DEM (Métodos de Elementos Discretos).

2.3.2.1. Modelado en Movimiento Parabólico

Este modelo pretende determinar la trayectoria del cuerpo moedor, considerando solo una bola y su punto final de caída. Se basa en un tiro parabólico como se muestra en la figura 2.6.

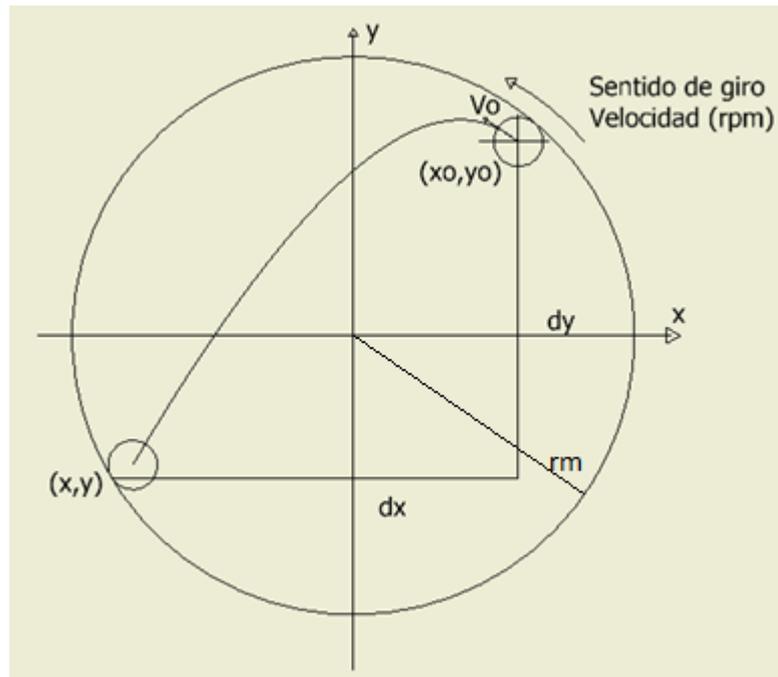


Figura 2.6: . Grafica que describe el modelo físico
Fuente: Autor

Como se observa en la grafica, se pretende determinar el trayecto del cuerpo molidor hasta que este impacta en la cara interna del molino. Para ello debemos partir de las variables que consideraremos para nuestro análisis:

V_o : velocidad del molino en m/s.

(X_o, Y_o) : Posicion inicial del cuerpo molidor.

dx : distancia total viajada en x.

dy : distancia total viajada en y.

(x, y) : coordenadas de impacto.

Las ecuaciones 2.6 y 2.7 nos permitirán determinar nuestro modelo.

$$x = V_{ox} * t + X_o \quad (2.6)$$

$$y = V_{oy} * t - 1/2g * t^2 + Y_o \quad (2.7)$$

Donde las dos ecuaciones presentadas son típicas en el movimiento parabólico y determinan el alcance del cuerpo molidor. A continuación se demostrara el modelo haciendo algunas consideraciones:

- Se pretende visualizar la trayectoria partiendo de las coordenadas finales y de la velocidad con la que el cuerpo molidor parte de un extremo del molino.
- Con ello se encontrara el punto de partida del cuerpo molidor, además del tiempo que éste se mantiene en el aire.

Ahora podemos determinar el modelo, para lo cual descompondremos a la velocidad en sus componentes rectangulares (ecuaciones 2.8 y 2.9):

$$X_o = rm * \text{Cos}(\theta) \quad (2.8)$$

$$Y_o = rm * \text{Sin}(\theta) \quad (2.9)$$

Donde rm es el radio del molino y θ el ángulo de partida.

De igual manera se descompone la velocidad inicial en sus componentes iniciales (ecuaciones 2.10 y 2.11):

$$V_{ox} = V_o * \text{Cos}(\theta + \pi/2) \quad (2.10)$$

$$V_{oy} = V_o * \text{Sin}(\theta + \pi/2) \quad (2.11)$$

Simplificando nos quedan las velocidades (ecuaciones 2.12 y 2.13):

$$V_{ox} = -V_o * \text{Sin}(\theta) \quad (2.12)$$

$$V_{oy} = V_o * \text{Cos}(\theta) \quad (2.13)$$

Reemplazando las velocidades (ecuaciones 2.12 y 2.13) y posiciones iniciales (ecuaciones 2.8 y 2.9) en las ecuaciones de los alcances del sistema (ecuaciones 2.6 y 2.7) tenemos las ecuaciones 2.14 y 2.15:

$$x = -V_o * \text{Sin}(\theta) * t + rm * \text{Cos}(\theta) \quad (2.14)$$

$$y = V_o * \text{Cos}(\theta) * t - 1/2g * t^2 + rm * \text{Sin}(\theta) \quad (2.15)$$

Partiendo de las ecuaciones 2.14 y 2.15, su resolución nos lleva a tener los tiempos de vuelo de la partícula y las coordenadas en las que abandona la cara del molino para realizar su trayectoria parabólica.

Una vez obtenidos estos valores se puede realizar una simulación del comportamiento del cuerpo moedor al interior molino en función de la velocidad del molino y la posición deseada o medida del impacto al otro extremo.

2.3.2.2. Modelo de Elementos Discretos

El método DEM solamente da una aproximación del comportamiento de la carga.

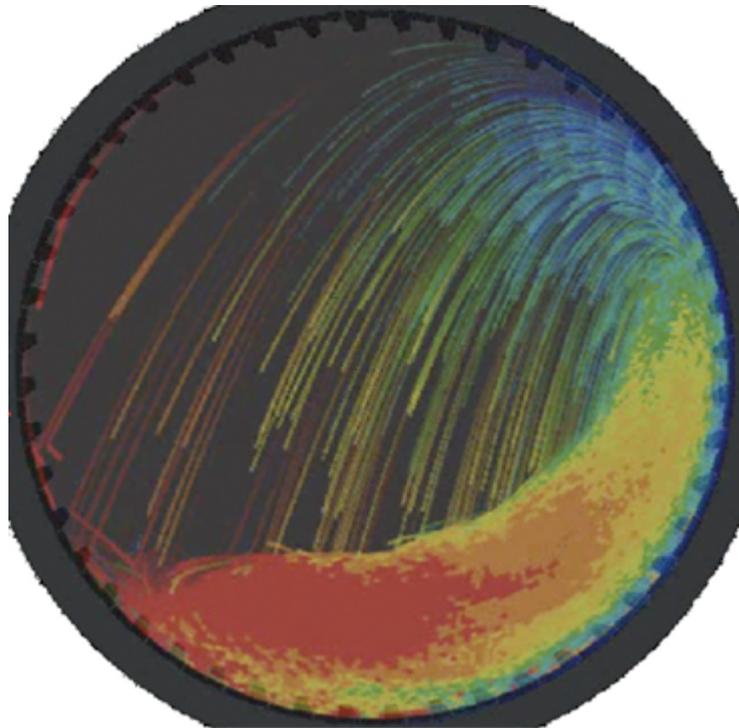


Figura 2.7: . Modelo de catarata de carga usando DEM (ETT Transferencia de Tecnologías)
Fuente: http://sine.ni.com/cms/images/casestudies/load_movement_2.gif?size

Se presentan algunas características del modelo que implica simulación:

- Las simulaciones mediante métodos discretos (DEM), trata a cada bola o roca como una partícula independiente dentro del molino
- Calcula la colisión de cada bola con otras bolas y rocas.
- Calcula la energía de impacto de cada bola con el lifter (levantador del molino).
- Combina los cálculos de todas las colisiones.

- Simulaciones en 2D consideran 10,000 partículas en un molino y pueden demorar entre 2 a 4 horas.
- Simulaciones en 3D, pueden demorar entre 2 a 3 días, con un computador de 3.0 GHz.

2.3.3. Modelo Matemático

Para la obtención del modelo matemático se emplearán algoritmos que permitan determinar la misma, por lo que en esta sección se tratará de explicar cuales son los modelos y los procesos a considerarse para una función de transferencia que describa a nuestro sistema. Previo a la explicación de los modelos se debe explicar el esquema de control que se piensa manejar, el cual se muestra en la figura 2.8.

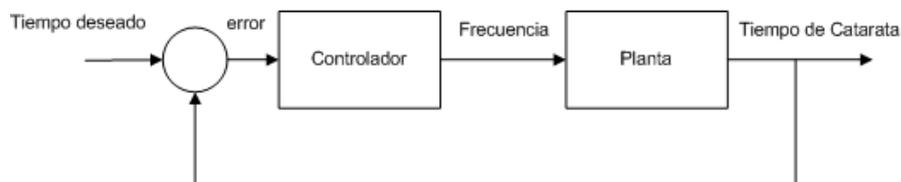


Figura 2.8: Esquema de Control
Fuente: Autor

Donde la función a identificar es la de la planta. En la función de transferencia de la planta se incluye al software de procesamiento que encuentra los periodos de catarata, al molino y su variador de frecuencia. Estos subsistemas están ya incluidos en la planta

Para la identificación del sistema se empleará el toolbox de LabVIEW de Identificación de Sistemas, el cual facilitará nuestro trabajo. Se dará una breve descripción de la identificación de sistemas y los modelos planteados para la identificación.

2.3.3.1. Identificación de Sistemas

La identificación de sistemas es la obtención de forma experimental de un modelo que reproduzca con suficiente exactitud, las características dinámicas del proceso con el cual se trabaja. Los objetivos de la identificación de sistemas son los siguientes:

- Realizar un óptimo modelado del proceso.
- Obtener un controlador eficiente.

Para un correcto proceso de identificación se deben seguir cuidadosamente los siguientes pasos:

- Obtención de datos de entrada - salida.
- Tratamiento previo de los datos registrados.
- Elección de la estructura del modelo.
- Obtención de los parámetros del modelo.
- Validación del modelo.

En el caso del proyecto se requiere de métodos de identificación paramétrica, los cuales son descritos mediante una estructura y un número finito de parámetros que relacionan las señales de interés del sistema. Los parámetros que se consideran para este análisis son: entradas, salidas y perturbaciones. Una grafica que describe lo mencionado anteriormente se presenta en la figura 2.9.

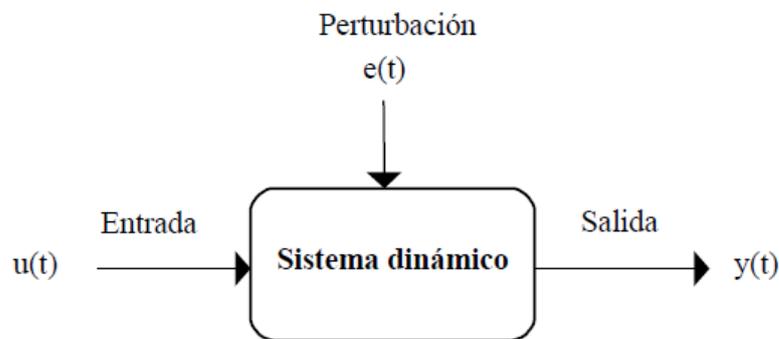


Figura 2.9: Parametros a considerarse en la identificación
Fuente: Autor

Estos modelos requieren la elección de una posible estructura del modelo, de un criterio de ajuste de parámetros, y por último de la estimación de los parámetros que mejor ajustan el modelo a los datos experimentales. Para todos los modelos se emplea el algoritmo de los mínimos cuadrados (LMS) para el ajuste de los coeficientes. Los modelos que se considerarán en nuestro proyecyo se tratarán en las siguientes subsecciones.

2.3.3.2. Modelo General-Lineal

Generalmente, se puede describir un sistema discreto usando un modelo polinomial General-Lineal. Este modelo provee flexibilidad para la dinámica del sistema y flexibilidad estocástica. La flexibilidad se debe a que el modelo incluye polinomios que afectan a los parámetros que relacionan a nuestras señales de interés. La ecuación 2.16 describe al modelo.

$$A(z) * y(k) = \frac{B(z)}{F(z)} \mu(k-n) + \frac{C(z)}{D(z)} e(k) \quad (2.16)$$

Como se observa la ecuacion muestra que tanto las entradas y salidas del sistema se ven afectadas por polinomios. El diagrama de bloques que describe al modelo general lineal se presenta en la figura 2.10.

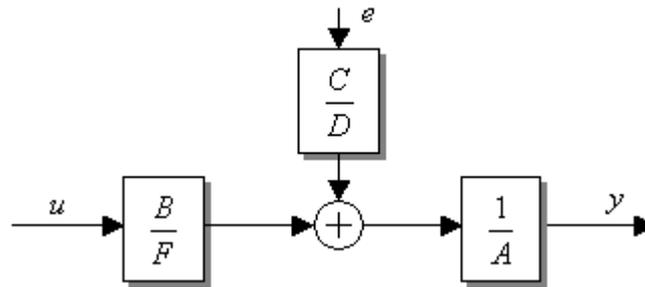


Figura 2.10: Diagrama de bloques del modelo General-Lineal
Fuente: NI LabVIEW Help

$A(z)$, $B(z)$, $C(z)$, $D(z)$ y $F(z)$ son polinomios acompañados por el factor de retardo z^{-1} y están definidos por las ecuaciones 2.17, 2.18, 2.19, 2.20 y 2.21.

$$A(z) = 1 + a_1z^{-1} + \dots + a_{k_a}z^{-k_a} \quad (2.17)$$

$$B(z) = b_0 + b_1z^{-1} + \dots + b_{k_b-1}z^{-(k_b-1)} \quad (2.18)$$

$$C(z) = 1 + c_1z^{-1} + \dots + c_{k_c}z^{-k_c} \quad (2.19)$$

$$D(z) = 1 + d_1z^{-1} + \dots + d_{k_d}z^{-k_d} \quad (2.20)$$

$$F(z) = 1 + f_1z^{-1} + \dots + f_{k_f}z^{-k_f} \quad (2.21)$$

En este modelo se puede observar que las señales de entrada como de error se ven afectadas directamente por el polinomio $A(z)$. El ícono del toolkit de LabVIEW que identifica el modelo general-lineal se muestra en la figura 2.11.

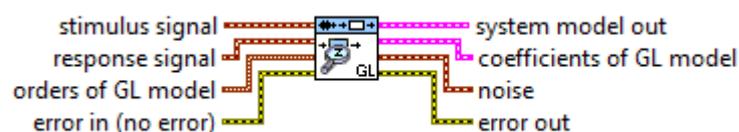


Figura 2.11: Bloque de identificación de sistemas General-Lineal en LabVIEW
Fuente: NI LabVIEW Help

Como se puede observar en la figura 2.11 este bloque requiere de la señal de estímulo, la de respuesta del sistema y los órdenes del modelo, para de esta manera poder rad como resultados el modelo de sistema, los coeficientes del modelo y el ruido.

2.3.3.3. Modelo ARMAX

Cuando $D(z)$ y $F(z)$ son iguales a 1, el modelo polinomial general-lineal se reduce a un modelo Autoregresivo de Promedio Móvil con Términos Exógenos (autoregressive-moving average with exogenous terms). Éste modelo incluye la dinámica estocástica. Los modelos ARMAX son útiles cuando se tienen perturbaciones dinámicas en el proceso. La ecuación 2.22 describe el modelo.

$$A(z) * y(k) = B(z)\mu(k - n) + C(z)e(k) \quad (2.22)$$

Donde los polinomios $A(z)$, $B(z)$ y $C(z)$ se presentaron en la subsección anterior. La figura 2.12 describe la estructura en bloques de este modelo.

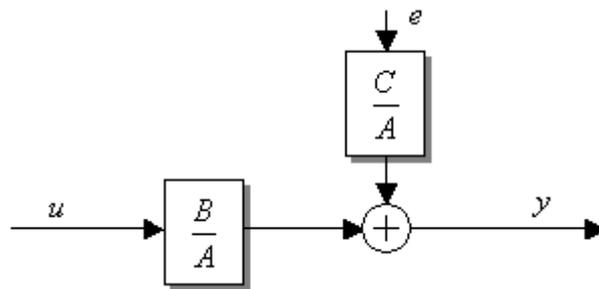


Figura 2.12: Diagrama de bloques del modelo ARMAX
Fuente: NI LabVIEW Help

El ícono del toolkit de LabVIEW que identifica el modelo ARMAX se muestra en la figura 2.13.

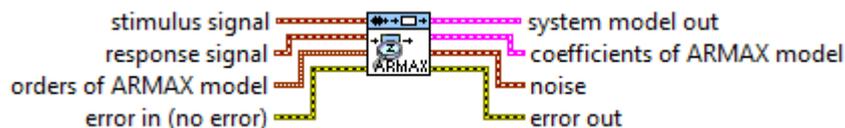


Figura 2.13: Bloque de identificación de sistemas ARMAX en LabVIEW
Fuente: NI LabVIEW Help

Como se puede observar en la figura 2.13 este bloque requiere de la señal de estímulo, la de respuesta del sistema y los órdenes del modelo, para de esta manera poder rad como resultados el modelo de sistema, los coeficientes del modelo y el ruido.

2.3.3.4. Modelo Box-Jenkins

Este modelo se obtiene cuando en el modelo General-Lineal $A(z)$ es igual a 1. Éste modelo provee un modelo completo del sistema, debido a que éste representa las propiedades de las perturbaciones separadamente de la dinámica del sistema. El modelo Box-Jenkins se emplea cuando se tiene sistemas con salidas ruidosas. La ecuación 2.23 describe al modelo.

$$y(k) = \frac{B(z)}{F(z)}\mu(k-n) + \frac{C(z)}{D(z)}e(k) \quad (2.23)$$

Donde los polinomios $B(z)$, $C(z)$, $D(z)$ y $F(z)$ se presentaron en subsecciones anteriores. La figura 2.14 describe la estructura en bloques de este modelo.

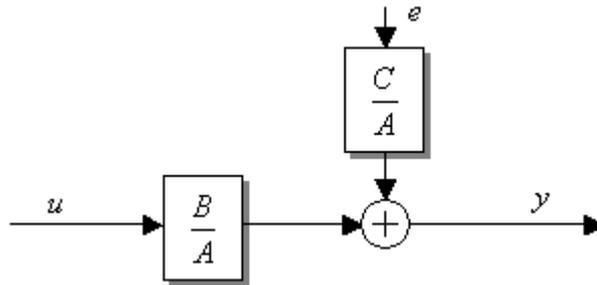


Figura 2.14: Diagrama de bloques del modelo Box-Jenkins
Fuente: NI LabVIEW Help

El ícono del toolkit de LabVIEW que identifica el modelo Box-Jenkins se muestra en la figura 2.15.

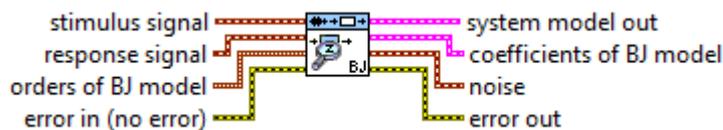


Figura 2.15: Bloque de identificación de sistemas Box-Jenkins en LabVIEW
Fuente: NI LabVIEW Help

Como se puede observar en la figura 2.15 este bloque requiere de la señal de estímulo, la de respuesta del sistema y los órdenes del modelo, para de esta manera poder rad como resultados el modelo de sistema, los coeficientes del modelo y el ruido.

2.3.3.5. Modelo Basado en Filtros Adaptativos

Una aplicación de los filtros adaptativos es la identificación de sistemas (Figura 2.16). El filtro discreto es de tipo FIR (Finite Input Response), ya que emplear un Filtro IIR

(Infinite Input Response) requiere de mayor complejidad debido a que con un filtro FIR se deben ajustar puramente ceros, mientras que con un filtro IIR se deben ajustar tanto polos y ceros.

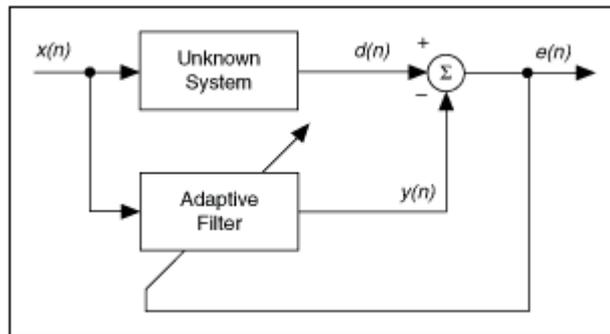


Figura 2.16: Esquema de modelado con un filtro adaptativo
Fuente: NI LabVIEW Help

Como indica la figura 2.16, el filtro adaptativo se coloca en paralelo a la planta a modelar, para de esta manera determinar una señal de error que permita ajustar los coeficientes del filtro mediante el algoritmo de los mínimos cuadrados (LMS). La ecuación 2.24 describe al filtro:

$$y = \sum_{k=0}^{M-1} w(k)x(n-k) \quad (2.24)$$

Donde:

\$y\$ es la respuesta del filtro.

\$w(k)\$ son los pesos de los coeficientes del filtro.

\$M\$ el numero de polos o coeficientes.

El esquema que describe a un filtro adaptativo FIR en cascada se presenta en la figura 2.17.

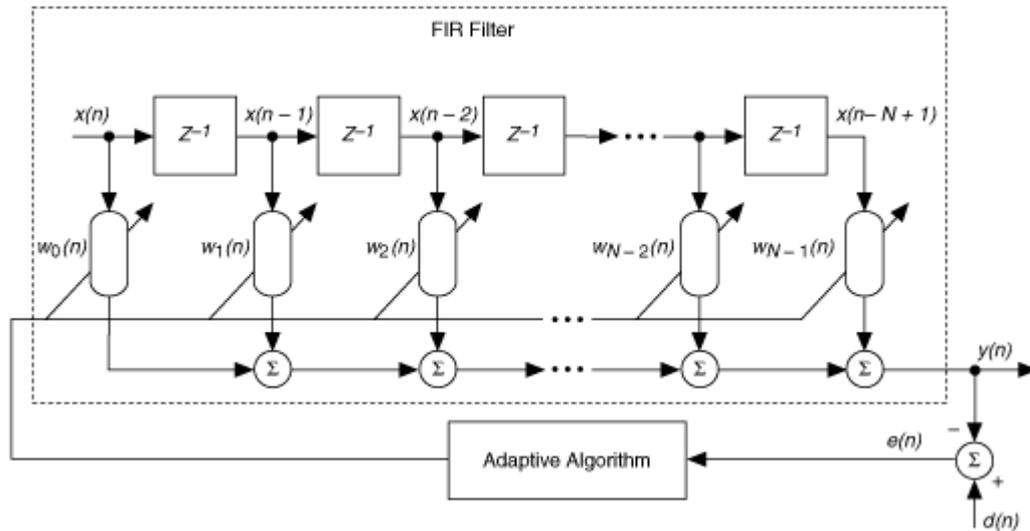


Figura 2.17: Esquema de un filtro adaptativo
Fuente: NI LabVIEW Help

Los coeficientes del filtro se encuentran minimizando el error que se da por la ecuación 2.25 que se presenta a continuación.

$$error = \sum_{n=0}^N \left[y(n) - \sum_{k=0}^{M-1} w(k)x(n-k) \right]^2 \quad (2.25)$$

Donde N es el numero de observaciones. Como ya se especificó anteriormente el método adaptativo para determinar los coeficientes es el LMS de mínimos cuadrados. No se profundizará en este tema, ya que simplemente se pretende dar una vista general del modelo en sí. En LabVIEW el bloque que ayuda a la creación de un filtro adaptativo FIR con algoritmo LMS se presenta en la figura 2.18.

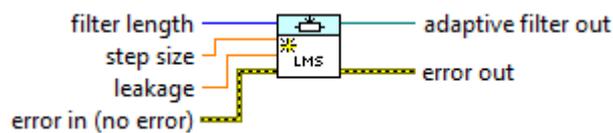


Figura 2.18: Bloque para crear un Filtro Adaptativo
Fuente: NI LabVIEW Help

Como indica la figura 2.18 se requiere indicar el numero de polos o coeficientes, el paso y el leakage se obvia cuando se requiere un filtro con algoritmo LMS. El bloque que actualiza los pesos y coeficientes es el de la figura 2.19.

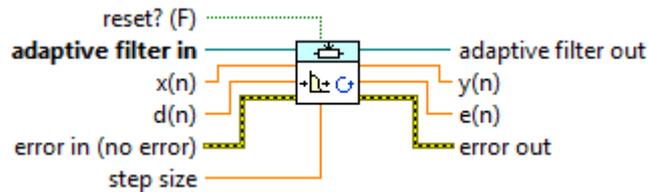


Figura 2.19: Bloque para actualizar los coeficientes de un Filtro Adaptativo
Fuente: NI LabVIEW Help

El bloque de la figura 2.19 indica el proceso que realiza la adaptación de los coeficientes del filtro, una vez empleado el bloque de la figura 2.18, aquí se debe ingresar la señal de estímulo y el error de la salida.

2.4. Calidad del Modelo

Para determinar la calidad del modelo se lo debe someter a una simulación y posterior a ello se debe hacer una medición de error frente a una medición real de la planta. Para identificar el modelo se debe considerar una medición de datos, bajo ciertos parámetros.

Para la validación se someterá el modelo a una simulación, considerando las características bajo las cuales se tomaron los datos que sirvieron para determinar el modelo. Posterior a la simulación se tomarán los datos resultantes y se compararán con nuevos datos tomados del sistema a modelar bajo las mismas condiciones.

Las condiciones que deben cumplir la simulación y de la toma de datos son las siguientes:

- Mismo nivel de cuerpo molidor (de preferencia cuando este se haya cargado nuevamente).
- Mismo tiempo de molienda (Horas).
- Misma carga de material.

Cumplidas estas condiciones se revisarán los resultados medidos de la simulación y de la molienda para encontrar el error. El modelo que presente un error menor al 10% será considerado como válido para la simulación y diseño del controlador del sistema.

Capítulo 3

Sistema de Control

3.1. Modelo de Controlador

Una vez presentados los modelos matemáticos tentativos, se hará un análisis para determinar el más adecuado para nuestros requerimientos. Una vez determinado el modelo se procederá a hacer los análisis de controlabilidad del sistema y finalmente se diseñará el controlador.

3.1.1. Análisis de los Modelos Matemáticos Propuestos

Como se presentó en el capítulo anterior, se disponen de cuatro modelos, de ellos emplearemos los modelos derivados del General-Lineal y al modelado del Filtro Adaptativo.

3.1.1.1. Análisis del Modelo ARMAX

El modelo ARMAX nos proporciona una buena aproximación al modelo del sistema como se presenta en la figura 3.1.

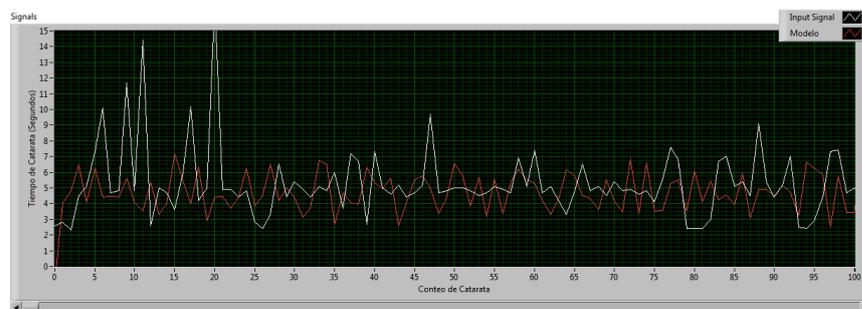


Figura 3.1: Resultado de la identificación ARMAX
Fuente: Autor

La señal de color blanco es la Autor del sistema, mientras que la roja es el resultado de la simulación del sistema, incluyendo el ruido aleatorio que requiere el modelo para su correcta simulación. La ecuacion 3.1 es el resultado de la identificación:

$$\begin{aligned}
 0 & \\
 & (1 + 0,226589z^{-1} + 0,185208z^{-2} + 0,129614z^{-3} + 0,0899168z^{-4} + 0,0800473z^{-5}) * y(k) = \dots \\
 & = \dots (0,0549656z^{-1} + 0,0319144z^{-2} + 0,0284081z^{-3} + 0,0212456z^{-4}) * \mu(k) + \dots \\
 & \dots + (1 - 0,0568162z^{-1} + 0,054887z^{-2} + 0,036054z^{-3} - 0,0229319z^{-4}) * e(k) \quad (3.1)
 \end{aligned}$$

Como se observa en la ecuacion 3.1, el grado de los coeficientes elegidos es el siguiente:

- A(z) es de orden 5
- B(z) y C(z) son de orden 4

Para verificar la calidad del modelo se toma la señal de error entre la aproximación y una medición en las mismas condiciones del sistema, teniendo como error la figura 3.2.

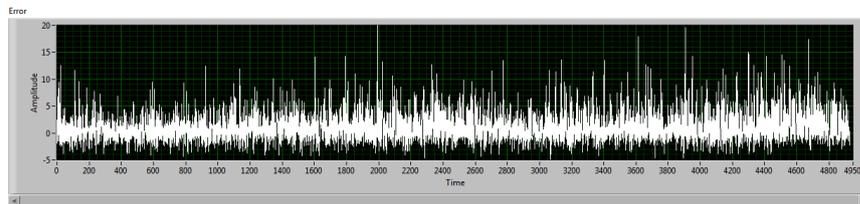


Figura 3.2: Error de la identificación ARMAX
Fuente: Autor

La varianza y desviación estándar del modelo nos indica que tan adecuado es. En el cuadro 3.1 se presentan los valores recientemente mencionados.

DESVIACIÓN ESTÁNDAR	VARIANZA
2.64	6.97

Cuadro 3.1: Variaciones del Error del Modelo ARMAX

3.1.1.2. Análisis del Modelo Box-Jenkins

El modelo Box-Jenkins nos proporciona una buena aproximación al modelo del sistema como se presenta en la figura 3.3.

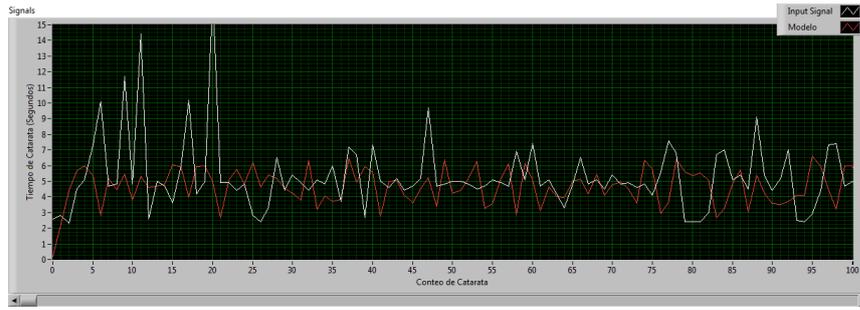


Figura 3.3: Resultado de la identificación Box-Jenkins
Fuente: Autor

La señal de color blanco es la Autor del sistema, mientras que la roja es el resultado de la simulación del sistema, incluyendo el ruido aleatorio que requiere el modelo para su correcta simulación. La ecuacion 3.2 es el resultado de la identificación:

$$y(k) = \frac{0,046258z^{-1} + 0,030722z^{-2} + 0,031355z^{-3} + 0,0261353z^{-4}}{1 + 0,27712z^{-1} + 0,182268z^{-2} + 0,114069z^{-3} + 0,0742125z^{-4} + 0,0589077z^{-5}} * \mu(k) + \dots$$

$$\dots + \frac{1 - 0,11027z^{-1} - 0,07832z^{-2} - 0,042599z^{-3}}{1 + 0,09712z^{-1} + 0,0698929z^{-2} + 0,0374809z^{-3} + 0,0180426z^{-4} + \dots} * e(k) \quad (3.2)$$

Como se observa en la ecuacion 3.2, el grado de los coeficientes elegidos es el siguiente:

- B(z) y D(z) son de orden 4
- F(z) es de orden 5
- C(z) es de orden 3

Para verificar la calidad del modelo se toma la señal de error entre la aproximación y una medición en las mismas condiciones del sistema, teniendo como error la figura 3.4.

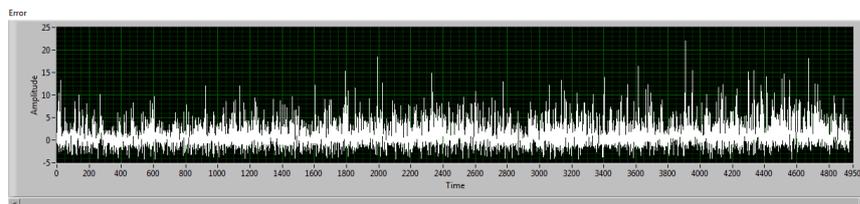


Figura 3.4: Error de la identificación Box-Jenkins
Fuente: Autor

La varianza y desviación estándar del modelo nos indica que tan adecuado es. En el cuadro 3.2 se presentan los valores recientemente mencionados.

DESVIACIÓN ESTÁNDAR	VARIANZA
2.62	6.82

Cuadro 3.2: Variaciones del Error del Modelo Box-Jenkins

3.1.1.3. Análisis del Modelo Basado en Filtros Adaptativos

El modelado con un Filtro Adaptativo nos proporciona una buena aproximación al modelo del sistema como se presenta en la figura 3.5.



Figura 3.5: Resultado de la identificación con Filtro Adaptativo
Fuente: Autor

La señal de color blanco es la Autor del sistema, mientras que la roja es el resultado de la simulación del sistema, incluyendo el ruido aleatorio que requiere el modelo para su correcta simulación. Los coeficientes del Filtro obtenidos se presentan en el cuadro 3.3.

b0	b1	b2
0.0467108	0.0226437	0.0270292

Cuadro 3.3: Coeficientes del Filtro Adaptativo

Para verificar la calidad del modelo se toma la señal de error entre la aproximación y una medición en las mismas condiciones del sistema, teniendo como error la figura 3.6.

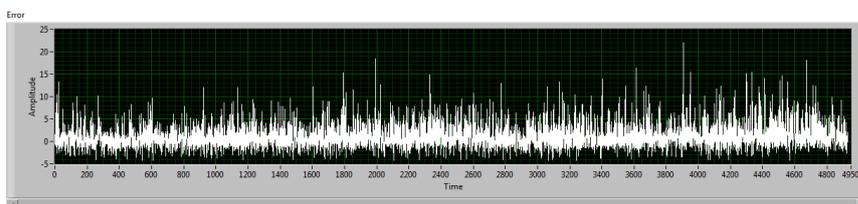


Figura 3.6: Error de la identificación con Filtro Adaptativo
Fuente: Autor

La varianza y desviación estándar del modelo nos indica que tan adecuado es. En el cuadro 3.4 se presentan los valores recientemente mencionados.

DESVIACIÓN ESTÁNDAR	VARIANZA
2.44	5.95

Cuadro 3.4: Variaciones del Error del Modelo con Filtro Adaptativo

3.1.2. Elección del Modelo Adecuado.

Considerando los tres modelos de la sección anterior podemos comparar los errores que se tienen al instante de validarlos. Para ello haremos las siguientes observaciones:

- El modelo ARMAX presenta variación de tipo aleatoria, debido a que para ello se requiere de ruido en la entrada del sistema para simularlo. Su error está dentro de un rango aceptable.
- El modelo Box-Jenkins nos muestra una salida más aproximada a la planta a modelar. Su error es menor al del modelo ARMAX.
- El modelo basado en Filtros Adaptativos nos presenta una salida ideal, lo cual no nos da una buena impresión acerca de la dinámica del sistema. A pesar de que su error es menor a las otras dos identificaciones no la consideraremos como una solución viable.

En base a las observaciones se elige el modelo Box-Jenkins, debido a que presenta menor error que el ARMAX y nos da una relación independiente entre las perturbaciones y la planta. Además que al analizar los modelos, en el Box-Jenkins se pueden escoger diferentes grados en cada uno de los polinomios.

3.1.3. Tipo de Controlador a Emplearse

El controlador a emplearse es un PID (Proporcional Integral Derivativo) Discreto, ya que este es el más común y el que mejores prestaciones nos brinda la instante del diseño de controladores. En el software LabVIEW el bloque que describe el controlador PID es el mostrado en la figura 3.7.

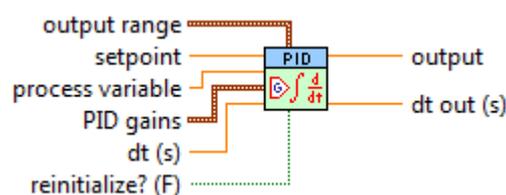


Figura 3.7: Bloque PID de LabVIEW
Fuente: Autor

A continuación describiremos los parámetros de ajuste del bloque PID:

- Output Range: es el rango de salida de la variable del controlador (en nuestro caso está entre 47 y 60Hz).
- Setpoint: el valor deseado del PID (en nuestro caso el tiempo de Catarata).
- Process Variable: la variable del proceso a controlar (el bloque PID encuentra el error y encuentra la variable de salida).
- PID Gains: las Ganancias del PID son: Kp (constante Proporcional), Ki (Constante Integrativa) y Kd (Constante derivativa).
- dt: es el tiempo de muestreo en segundos (2.5 segundos para nuestro caso).

Una vez explicados los parámetros del bloque PID estableceremos los parámetros deseados del controlador:

- Tiempo de subida menos o igual a 5 segundos.
- Error de Estado Estable 0.5 %.
- Tiempo de establecimiento menor o igual a 15 segundos.
- Sobrepaso máximo menor que el 5 %.

3.1.4. Ajuste del Controlador

Previo al ajuste de las variables del controlador, debemos tomar en cuenta la función de transferencia del sistema dada en la ecuación . Al poseer una función de transferencia que se aproxima al sistema, podremos simularlo y con ello encontrar las constantes para el controlador. Basándonos en el esquema de la figura 3.8 se harán las simulaciones del sistema.

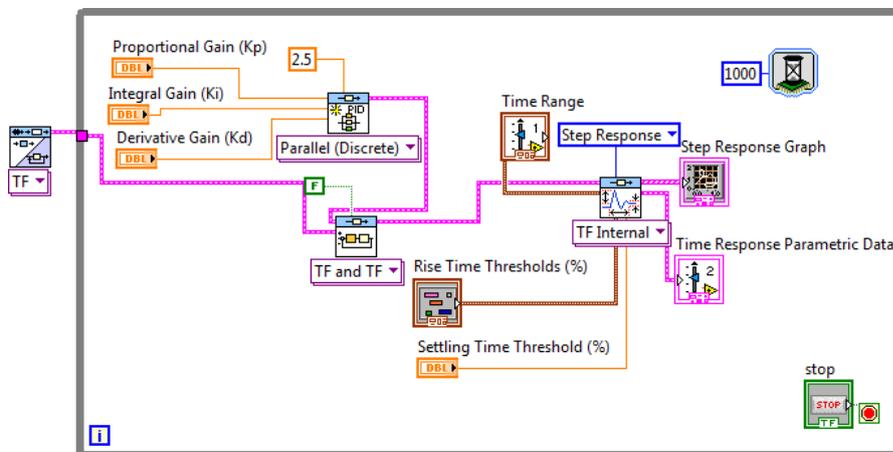


Figura 3.8: Diagrama de bloques de simulación del sistema
Fuente: Autor

La respuesta al escalon del sistema en lazo cerrado se presenta en la figura 3.9.

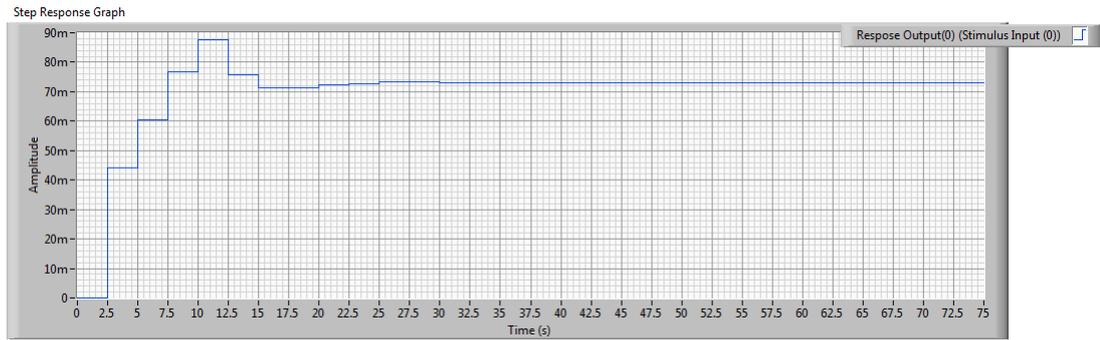


Figura 3.9: Respuesta al escalón del sistema sin el controlador.

Fuente: Autor

Los parámetros medidos en la respuesta al escalón son los mostrados en el cuadro 3.5.

Tiempo de Subida	Tiempo de Establecimiento	Sobrepaso Máximo
7.5	25	20.02 %

Cuadro 3.5: Parámetros del Sistema sin Controlador

Para justar el controlador PID se siguen los siguientes pasos:

- Fijar las ganancias: $K_p = 1$, $T_i = 0$, y $T_d = 0$.
- Modificar la Ganancia Proporcional (K_p) hasta conseguir el tiempo de levantamiento deseado.
- Incrementar la Ganancia Derivativa (K_d) hasta alcanzar el tiempo de establecimiento deseado.
- Incrementar la Ganancia Integral (K_i) hasta reducir el error de estado estable.

Una vez cumplidos los pasos anteriores tenemos las ganancias en el cuadro 3.6.

K_p	K_d	K_i
8.65	6	4.7

Cuadro 3.6: Ganancias del Controlador

La respuesta al escalón del sistema una vez puesto el controlador se presenta en la figura 3.10. Cabe recalcar que el modelo de control es el de la figura 2.8.

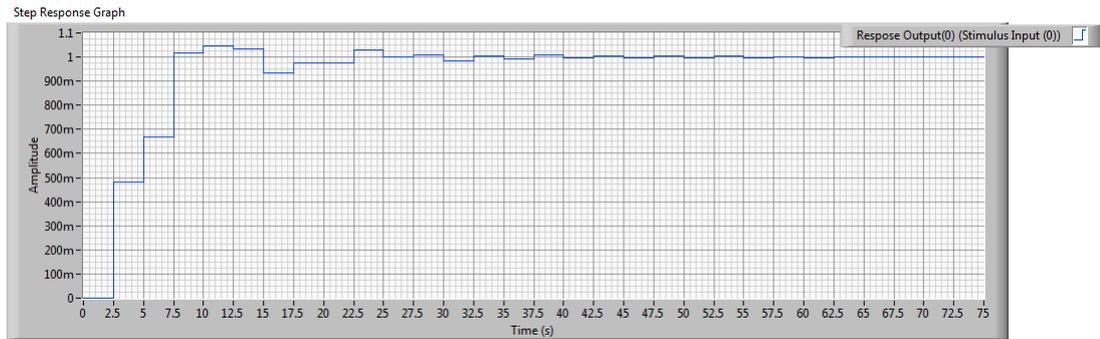


Figura 3.10: Respuesta al escalón del sistema sin el controlador.
Fuente: Autor

Los parámetros medidos en la respuesta al escalón del sistema con el controlador ajustado son los mostrados en el cuadro 3.7.

Tiempo de Subida	Tiempo de Establecimiento	Sobrepaso Máximo
5	15	4.46%

Cuadro 3.7: Parámetros del Sistema sin Controlador

Una vez calculados los valores del PID se tiene el sistema listo para la etapa de pruebas y reajustes. Éstos temas se tratarán en capítulos posteriores.

3.2. Sensores Acústicos

Las ondas sonoras se manifiestan por las variaciones de presión y velocidad que ellas generan. En la mayoría de los casos el campo acústico en un punto es el resultado de la superposición de ondas sonoras que han experimentado reflexiones múltiples. Los micrófonos son los sensores que facilitan la conversión de una señal acústica en eléctrica. Se pueden aplicar diversos principios a su realización siendo la más común la combinación de fenómenos mecánico-acústicos y su conversión electromecánica.

3.2.1. Sensores Acústicos Empleados

A continuación se presenta parte de la teoría de funcionamiento de los sensores empleados en el proyecto. Además de las características principales de los componentes en su funcionamiento junto a algunos parámetros que se deben ajustar al instante de la programación.

3.2.1.1. Sensores Acústicos Electrodinámicos

Se denominan también de bobina móvil. Este sensor utiliza la velocidad comunicada al diafragma por la presión sonora para inducir una fuerza electromotriz en la bobina móvil que se halla en el interior de un campo magnético. Su constitución es pues muy semejante a la de un altavoz electrodinámico, la baja impedancia permite su colocación con cables largos a gran distancia de punto de análisis y su ruido interno es muy bajo, por contra la respuesta en frecuencia no es muy buena y es sensible a campos magnéticos externos y vibraciones, en la figura 3.11 aparece representado un esquema constructivo de este micrófono.

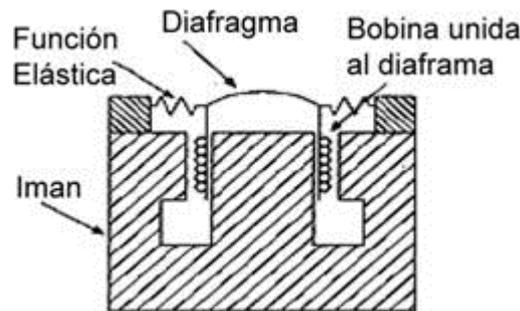


Figura 3.11: Esquema Constructivo de un micrófono Electrodinámico
Fuente: Autor

3.2.1.2. Sensores Elegidos

Para la realización del proyecto se ha recurrido a la utilización de sensores acústicos unidireccionales de tipo electrodinámico, mencionados anteriormente. Los que se emplean son de la marca Shure y son de uso profesional. De acuerdo a la disponibilidad se han adquirido dos micrófonos de similares características y respuestas en frecuencia. Los sensores se nombran a continuación:

- Shure SM58 (figura 3.12).
- Shure PG48.



Figura 3.12: Micrófono Shure SM58.

Fuente: http://www.dvestore.com/product_images/j/346/SHURE_SM58_LCE__78725_zoom.JPG

Las características de los micrófonos son similares y se presentan en el cuadro 3.8.

CARACTERÍSTICA	SHURE SM58	SHURE PG48
Tipo de micrófono	Dinámico (bobina móvil)	
Patrón polar	Cardioide (unidireccional)	
Respuesta de frecuencia	50 a 15.000 Hz	70 a 15.000 Hz
Sensibilidad a 1.000 Hz	-54,5 dBV/Pa (1,85 mV)	-52 dBV/Pa (2,5 mV)
Conector	Conector de audio profesional de tres pines	

Cuadro 3.8: Características de los micrófonos empleados

Como indica el cuadro 3.82 se pueden ver varias características que son las mismas en los micrófonos. La respuesta en frecuencia se diferencia en el mínimo valor que reciben, pero para nuestro análisis estas no son importantes, ya que en el ancho de banda en el que capturamos el sonido no hay influencia por esta característica. En cuanto a la sensibilidad que es diferente se deben hacer ciertas configuraciones en el software que permitan tener una igualdad en los datos. El ajuste del valor de amplificación se debe hacer para el micrófono SM58, la finalidad es obtener el mismo voltaje por unidad de presión, el cual se obtiene de la siguiente manera:

$$Relaciondeamplificacion = \frac{V_{PG48}}{V_{SM58}} \quad (3.3)$$

$$Relaciondeamplificacion = \frac{2,5}{1,85} = 1,35135 \quad (3.4)$$

Una vez obtenido este valor se debe aplicar una amplificación al sonido capturado por el micrófono Shure SM58 para igualar la relación de voltaje por unidad de presión.

3.3. Hardware para el Procesamiento

En esta sección se tratara acerca del hardware que va a ser empleado para procesar los datos durante el estudio y pruebas. No se considerará el hardware requerido para una futura implementación.

3.3.1. Características del Hardware para el Procesamiento

El hardware empleado en el procesamiento es un computador portátil de marca HP (figura 3.13), ya que es lo mas adecuado para procesar y almacenar grandes volúmenes de datos, además de soportar el software realizado en la plataforma LabVIEW que requiere combinar entrada y salida de datos además de realizar tareas complejas en cuanto al procesamiento.



Figura 3.13: Computador portátil HP

Fuente: http://di1-1.shoppingshadow.com/images/pi/7e/eb/49/80276962-260x260-0-0_Hewlett+Packard+HP+Pavilion+dv5+1233se+15+4+Widesc.jpg

El procesador del computador es un Intel Core 2 Duo que funciona a 2 Ghz, el cual es suficiente para el procesamiento requerido. Las características de la tarjeta de audio del computador con el cual se han estudiado y capturado los datos para el sistema se presentan a continuación:

- 2 Canales de adquisición.
- 24 bits de resolución por canal.
- 192000 muestras por canal por segundo.

Capítulo 4

Diseño y Construcción

4.1. Esquema Prototipo

Se han trabajado con varios prototipos de hardware, comenzando con un solo micrófono en la adquisición, pero se requiere cubrir un mayor sector del molino que lo que se puede lograr con un solo micrófono, por lo que se ha optado por emplear dos micrófonos. Antes de iniciar con la construcción y programación se dará una explicación del funcionamiento del sistema en general.

4.1.1. Molino y Variador de Frecuencia

Esta parte del hardware ya se encuentra implementada en la empresa. Además se dispone de un variador de frecuencia que cumple la función de arrancador con una rampa de arranque y otra de parada.

El molino (figura 4.1) es movido por un sistema de bandas que están conectadas a un sistema de transmisión, el cual está acoplado al motor y este a su vez se conecta al variador de frecuencia (figura 4.2).



Figura 4.1: Vista del Molino con su sistema de Transmisión
Fuente: Autor



Figura 4.2: Controlador del Variador de Frecuencia

Fuente:

http://support.automation.siemens.com/WW/llisapi.dll/csfetch/31622026/P_D011_XX_00091i.jpg

Las medidas del molino se presentan en el cuadro 4.1.

Radio exterior:	1.6 m
Radio interior:	1.5 m
Longitud exterior:	5.5 m
Longitud interior:	5 m
Levantadores:	30
Capacidad:	30 TON

Cuadro 4.1: Características del molino

Los datos de placa del motor se muestran en el cuadro 4.2.

Potencia:	110KW
Voltaje de funcionamiento:	480 V
Corriente:	75 A
Velocidad Nominal (a 60 Hz):	12.5 rpm

Cuadro 4.2: Características del Motor

Los datos técnicos del variador de frecuencia se presentan en el cuadro 4.3.

Marca y Modelo:	Siemens Sinamics G120
Potencia:	110KW
Voltaje de funcionamiento:	3AC - 380/480V
Frecuencia de funcionamiento:	47-53Hz

Cuadro 4.3: Características del Motor

Estos datos son una referencia para poder tener una idea de la magnitud del molino

y todos los elementos que se emplean para su funcionamiento previo al sistema de control.

4.1.2. Esquema de Funcionamiento

Con los datos de los dispositivos mencionados en la subsección anterior podremos dar una idea del funcionamiento del sistema. La función principal del sistema es la de controlar la caída de la catarata de carga del molino mediante la variación de la velocidad del molino, esto se da a través de un sistema con la capacidad de adquirir y procesar el sonido que produce el molino, para así reducir el tiempo de molienda. El rango de variación de la velocidad del molino está directamente relacionado con la frecuencia, en la figura 4.3 se muestra esta variación en base a pruebas hechas en el molino dentro de los rangos operacionales del variador de frecuencia.

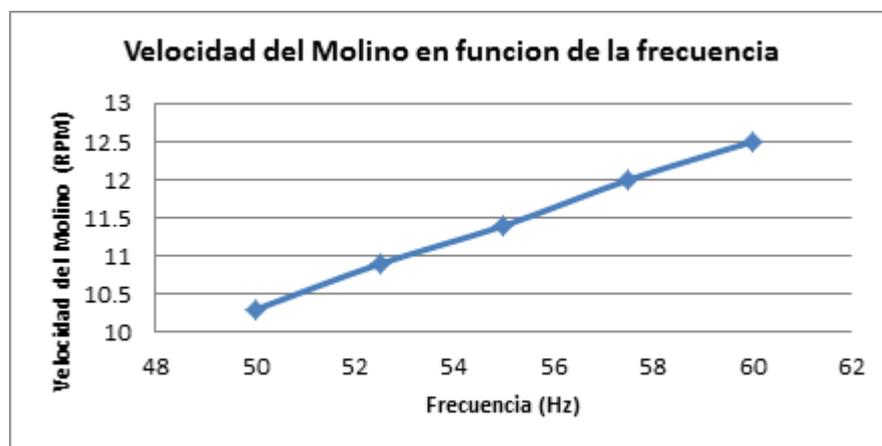


Figura 4.3: Velocidad del molino en función de la frecuencia del variador
Fuente: Autor

El funcionamiento básico del sistema es el siguiente:

- Se adquiere el sonido producido por el molino empleando dos micrófonos de tipo profesional. A los micrófonos se les agrega una campana elaborada de corcho para atenuar el ruido externo de la planta.
- Para sujetar los micrófonos se requiere de un soporte para sostenerlos.
- Previo al procesamiento se debe almacenar el sonido para posteriores análisis.
- Al instante de procesar se debe hacer un filtrado previo y luego analizar la posición y magnitud de los impactos de la catarata de carga en una sección del molino.
- Antes de implementar algún tipo de sistema de control se debe analizar los datos obtenidos para obtener curvas de funcionamiento del sistema.

- Una vez obtenidos modelos empíricos se procede a diseñar el controlador del sistema que ajuste la velocidad del molino en función al sonido producido por la catarata de carga.

4.1.3. Estructura de Soporte para los Sensores

En el caso de la estructura de soporte para los sensores se ha recurrido a diseñar una que posea la capacidad de ajustarse. De esta manera la estructura será capaz de ajustarse a los requerimientos del proyecto. El esquema de la estructura se presenta en la figura 4.4.

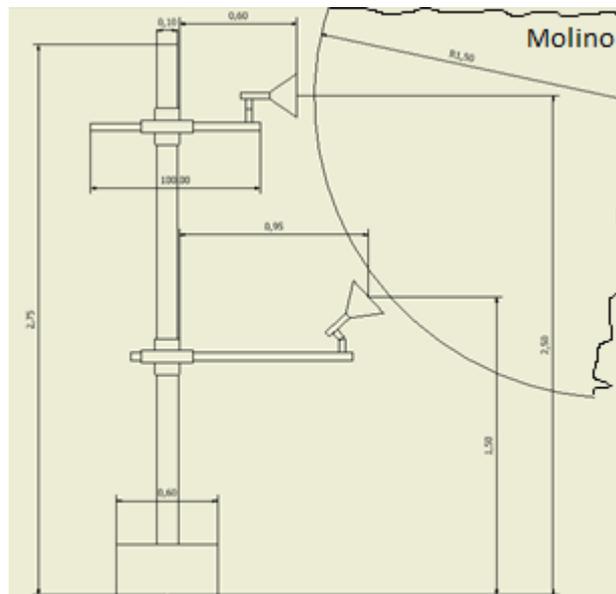


Figura 4.4: Esquema de la estructura de soporte de los sensores.
Fuente: Autor

La estructura posee un tubo largo con una base de alto peso, de esta manera se evita que la estructura sea inestable, a esta se agregan rieles verticales para ajustar la altura de los micrófonos. A los rieles verticales se les agrega unos horizontales para ajustar la posición horizontal del micrófono. Dentro de los rieles horizontales, se colocan tubos de menor diámetro para así poder desplazarlos por el riel. Al extremo de estos tubos, se coloca platinas para soportar la base del micrófono. La base que soporta al micrófono está formada por un tubo en el cual se inserta un extremo del micrófono y en un costado del tubo se coloca otra platina para que juntándose con la primera permita ajustar el ángulo de dirección del micrófono hacia el molino.

Esto es lo que respecta al diseño del soporte ajustable para los sensores del sistema. Al disponer del resto de equipo ya en funcionamiento, solo se considera necesario tomar en cuenta algunos de sus aspectos principales.

4.1.4. Placa de Acople para los Sensores

Los cables micrófonos disponen de conectores de tipo “plug” monofónicos de 6.35mm a su extremo para la conexión. Se requiere de una placa de acoplamiento, ya que el computador dispone de un Jack de 3.5mm, por lo que se requiere del diseño de un esquema (figura 4.5) que acople estos dos sistemas.

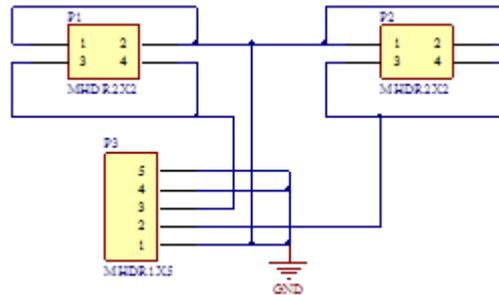


Figura 4.5: Esquema de la placa de acople de los sensores.
Fuente: Autor

El diseño muestra el acoplamiento de 2 “plugs” monofónicos a uno tipo estéreo mediante el uso de “Jacks”. Al no disponer en las librerías de los conectores se han colocado solamente sockets. Para el diseño de la placa se ha requerido del software Altium Designer y el resultado obtenido se muestra en la figura 4.6.

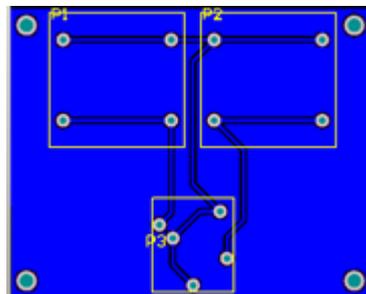


Figura 4.6: Diseño de la placa de acople de los sensores.
Fuente: Autor

El esquema muestra una placa que consta puramente de Jacks, por ello se debe conectar la salida de la placa al computador mediante un cable estéreo de 3.5mm.

4.2. Construcción Electrónica

4.2.1. Placa Electrónica

La placa de acoplamiento mencionada en la sección anterior se ha construido mediante el método de transferencia de calor y de ataque químico. El método escogido se debe

a la sencillez de la tarjeta. En la figura 4.7 se muestra la placa con sus componentes ya soldados.



Figura 4.7: Placa de acople de los sensores con los componentes ya soldados.
Fuente: Autor

Para una correcta manipulación de la tarjeta se la ha colocado en un contenedor para que así se la pueda manipular mas fácilmente y ha quedado como se indica en la figura 4.8.

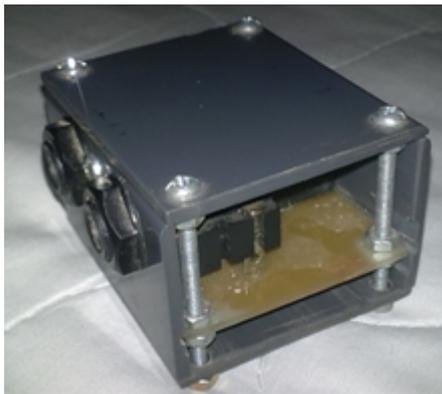


Figura 4.8: Placa de acople de los sensores en su contenedor.
Fuente: Autor

4.3. Programación del Dispositivo

Para la programación del computador se ha empleado el software de programación de alto nivel de National Instruments: LabVIEW. Esta elección se ha dado debido a las grandes facilidades de programación, el software permite manipular los periféricos y puertos del computador y que posee una excelente librería de análisis espectral.

4.3.1. Código de Adquisición

Para la adquisición de sonido de los micrófonos se ha recurrido a la manipulación de la tarjeta de audio del computador, cuyas características se mencionaron en el capítulo

3. El principio de funcionamiento del sistema de adquisición es sencillo y se describe en los siguientes pasos:

- Configurar la tarjeta de sonido a 11025 Hz, 2 canales y 24 bits de resolución (figura 4.9).

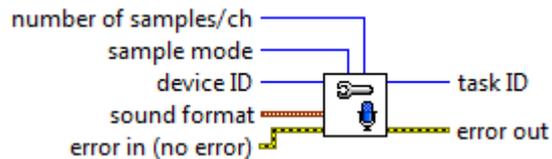


Figura 4.9: Bloque de configuración de adquisición de sonido.
Fuente: Autor

- Leer los datos del buffer (figura 4.10).

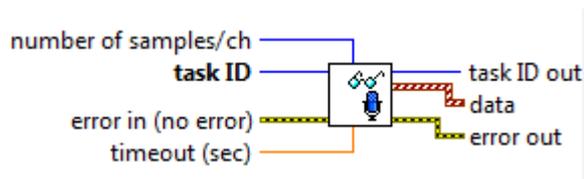


Figura 4.10: Bloque de lectura de sonido.
Fuente: Autor

- Asignar un nombre al sonido a almacenar y guardarlo (figura 4.11).

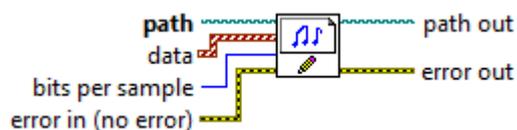


Figura 4.11: Bloque de escritura en disco de un sonido.
Fuente: Autor

Hay que tomar en cuenta que se deben llevar variables para usar dentro del mismo proceso como se observa en el diagrama de bloques las variables Sound y Sonidos que serán las que las utilizemos posteriormente, ya que este software se conecta directamente al de procesamiento y control, los cuales iremos explicando a continuación.

4.3.2. Código de Procesamiento

Esta parte del código es la más compleja en cuanto a los requerimientos del sistema, ya que se debe implementar un algoritmo que permita identificar el sonido produce un

impacto de catarata, además de su intensidad para ser considerados de esta manera. En la figura 4.12 se muestra el panel frontal del software de procesamiento del sistema.

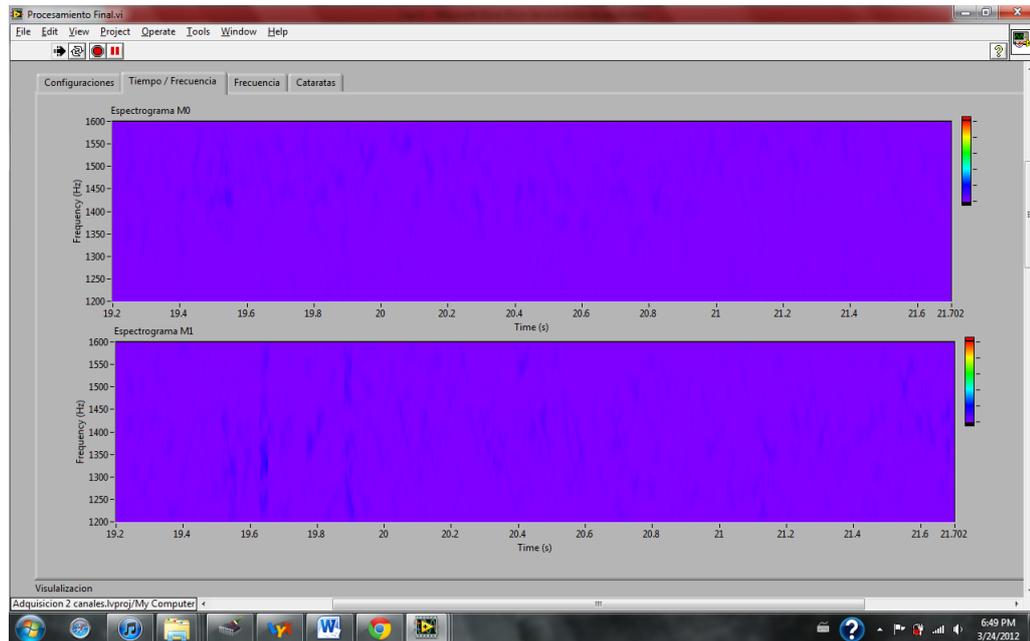


Figura 4.12: Panel Frontal del Software de Procesamiento.
Fuente: Autor

Para describir de una manera mas adecuada el funcionamiento del procesamiento de los datos se irán explicando las distintas etapas del mismo.

4.3.2.1. Filtrado

El filtrado del sonido es muy importante, ya que este ayudará a obtener el sonido que produce la catarata de carga del molino. Lo que se ha hecho en el procesamiento es colocar un filtro Butterworth pasabanda de 20 polos a la señal de entrada. El ancho de banda en el que se filtran los sonidos es en el de 1200 a 1600 Hz. Como indica La figura 4.13 se ven los parametros a consifurar del filtro.

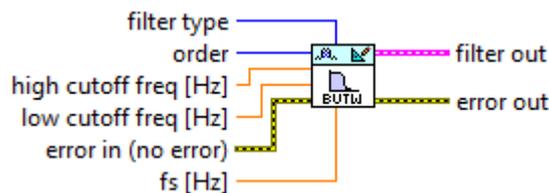


Figura 4.13: Bloque de Configuración de Filtro
Fuente: Autor

En las configuraciones se consideran:

- La frecuencia de corte bajo
- La frecuencia de corte alto
- Numero de polos
- Frecuencia de muestreo

Luego del filtrado se divide al audio en los dos canales para el proceso independiente de cada uno.

4.3.2.2. Análisis de Espectro

Se ha creado un algoritmo para procesar los canales de audio independientemente, para ello se deben considerar los parámetros que se han mencionado con anterioridad, como es el factor que se debe considerar para amplificar el sonido de uno de los micrófonos, el número de muestras y el umbral de los impactos que varía de entre los dos micrófonos. Parte del resultado del análisis de espectros es el corte del espectrograma, el cual se presenta en la figura 4.14.

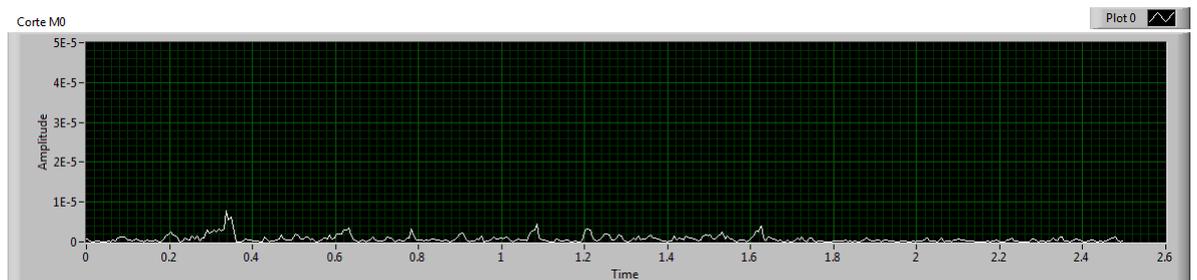


Figura 4.14: Corte de un espectrograma
Fuente: Autor

Se ha decidido capturar sonidos de 2.5 segundos para evitar que el siguiente sonido sea de la misma catarata o para no despreciar el de la anterior. El proceso de analizar el espectro y determinar si este sobrepasa el umbral tiene la siguiente descripción:

- Se amplifica el sonido de ingreso y se calcula el espectrograma del sonido en cuestión (figura 4.15).
- Se encuentra su pico máximo (Valor de tiempo y frecuencia).
- Se corta el espectrograma horizontalmente en ese valor de frecuencia.
- Se determina si el cociente entre el impacto máximo y la media del corte realizado es mayor al umbral.

- Si cumple esta condición, se la considera un impacto de catarata.

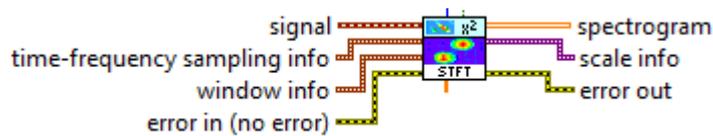


Figura 4.15: Bloque de STFT
Fuente: Autor

Se debe tener mucho cuidado al seleccionar los parámetros del Espectrograma en especial las configuraciones de tiempo y frecuencia, se deben tener resoluciones ni muy extensas, ni muy reducidas.

4.3.2.3. Almacenamiento de los Datos del Espectro

Una vez encontrados los tiempos correspondientes al impacto de catarata se considera un umbral de tiempo para discriminar que el impacto capturado corresponda a la misma catarata y si estas condiciones se cumplen se calculan y almacenan los datos en un fichero en excel (figura 4.16).

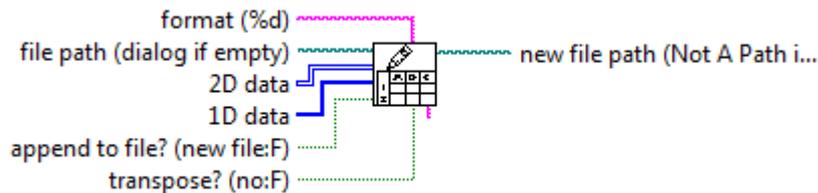


Figura 4.16: Bloque guardar hoja de cálculo.
Fuente: Autor

Los datos que se almacenan son los siguientes:

- Periodo de catarata: es una variable de entrada para el sistema de control.
- Angulo de impacto: es una variable de entrada para el sistema de control.
- Contador de impactos: es un dato de información acerca de la evolución de los impactos en función del tiempo y puede ayudar a determinar si el proceso se da por terminado.

4.3.2.4. Código de Control

Lo que respecta al código de control es bastante sencillo, se coloca un lazo separado que revise con el tiempo de muestreo el periodo de catarata y de su señal de control. En la figura 4.17 se muestra el panel frontal del control realizado.

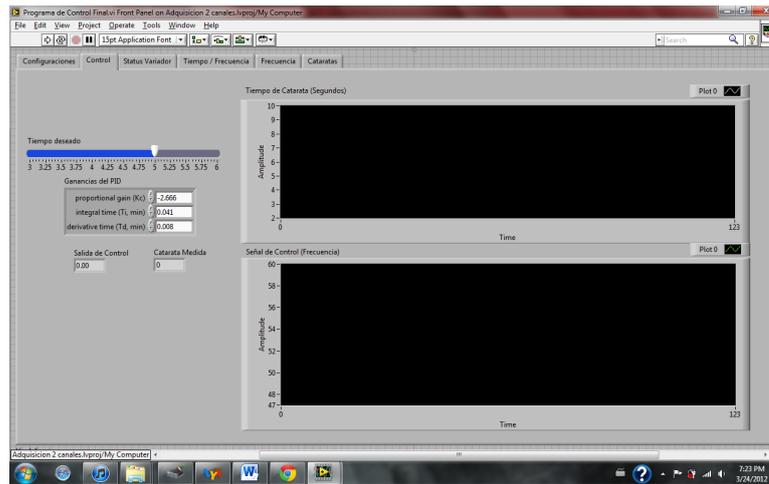


Figura 4.17: Panel frontal del control.
Fuente: Autor

El código se basa en el bloque de PID (figura 4.18). Se deben colocar las variables obtenidas en el capítulo anterior para luego realizar el ajuste.

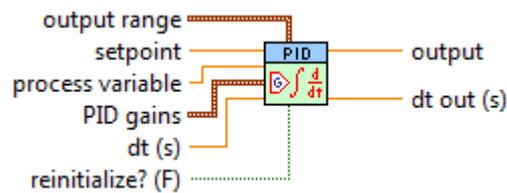


Figura 4.18: Bloque de implementación PID.
Fuente: Autor

4.3.2.5. Comunicación con el Driver

El programa de comunicación con el Driver se basa en una comunicación RS485 que mediante un adaptador Siemens se convierte la señal RS232 a la RS485 que requiere el Driver para de esta manera ajustar la frecuencia deseada. El bloque encargado de enviar los datos a través del puerto es el mostrado en la figura 4.19.

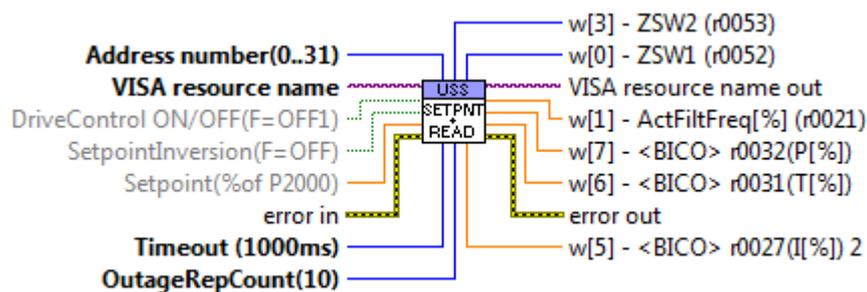


Figura 4.19: Bloque de lectura y escritura USS.
Fuente: Autor

Además de la configuración en software del computador se debe configurar el Driver Sinamics de Siemens para que el dato que reciba mediante RS485 sea ajuste de frecuencia. Los parámetros a configurar son los siguientes:

- P0014 (Tipo de comunicación)
- P1000 (Setpoint de Frecuencia)
- P2010 (Baud Rate)

4.4. Ensamblaje y Montaje

4.4.1. Estructura Mecánica

Al tener la estructura de soporte de los micrófonos, se ha procedido a colocarla de acuerdo a las especificaciones de la figura 4.4. El soporte montado ha quedado como se indica en la figura 4.20.



Figura 4.20: Estructura de soporte para los sensores.
Fuente: Autor

En la figura 4.20 se pueden observar ya los sensores montados. Su conexión al computador se trata en la siguiente subsección.

4.4.2. Sistema Completo

Una vez montada la estructura de soporte (figura 4.20), se ha procedido a realizar la conexión de los sensores al computador. Como ya se especificó anteriormente con los conectores plug y el cable stereo que requiere el ingreso del computador como se indica en la figura 4.21.

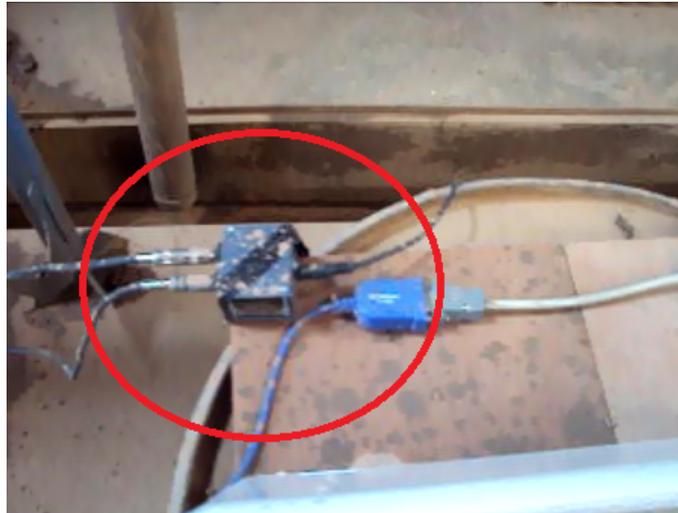


Figura 4.21: Conector de audio. .
Fuente: Autor

Ya conectado el sistema de audio, se procede a conectar la parte de comunicación, usando el conversor de RS232 a RS485 siemens, mediante un conversor de USB a RS232, del cual parte se observa en la figura 4.21. el conversor se presenta en la figura 4.22.



Figura 4.22: Módulo de conversión RS232 a RS485.
Fuente: Autor

Para enlazar el conversor a RS485 con el controlador del variador de frecuencia, se ha

realizado una comunicación a 2 hilos, empleando un cable concéntrico 2x16 con una longitud de 35 metros, ya que los armarios que contienen los variadores de frecuencia (figura 4.23) se encuentran un tanto alejados.



Figura 4.23: Armarios que contienen los variadores de Frecuencia.
Fuente: Autor

La conexión del cable en el controlador se observa en la figura 4.24. se presenta solo la conexión del cable en los pines 29 y 30 del controlador Sinamics.



Figura 4.24: Conexión al variador de Frecuencia.
Fuente: Autor

Una perspectiva de todo el sistema montado es la de la figura 4.25.



Figura 4.25: Perspectiva de l sistema implementado en un molino de la planta.
Fuente: Autor

Cabe aclarar que el montaje del sistema es totalmente desmontable. Si se decide implementar todas las estructuras deben ser soldadas y el cableado enviado por medio de canaletas.

Capítulo 5

Pruebas de Funcionamiento

5.1. Funcionamiento

En capítulos anteriores se ha explicado el funcionamiento general del sistema de control. Ahora bien previo a diseñar el controlador se debieron hacer pruebas para poder determinar un comportamiento del sistema a controlar.

5.1.1. Condiciones Habituales de Funcionamiento

Las condiciones bajo las cuales se realizaron las adquisiciones de sonido del sistema en condiciones habituales óptimas (las que se han venido manejando) son las siguientes:

- Carga del molino: siempre la misma (especificada en el capítulo 4).
- Vacío del molino: 1.3 m.
- Frecuencia de ingreso al motor de 60 Hz (12.5 RPM).

Los datos que se han medido son los que se presentan a continuación:

- Periodos de catarata (Segundos)
- Ángulos de impacto (Grados)
- Conteo de Impactos (Impactos/ min)

Estos parámetros se han explicado en los capítulos de comportamientos y diseño. El comportamiento del periodo de catarata se presenta en la figura 5.1.

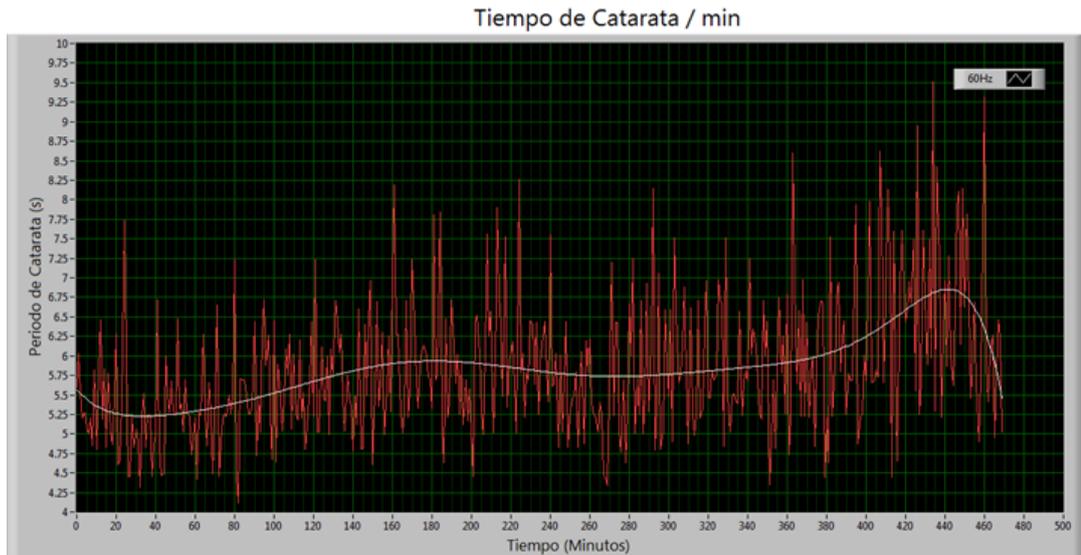


Figura 5.1: Periodo de catarata a velocidad de funcionamiento habitual
Fuente: Autor

Como se observa en la figura 5.1, se puede observar que la señal es demasiado ruidosa, por lo que se la ha sometido a un filtrado, que se observa por la señal en color blanco. La media del tiempo de catarata es de 5.73 segundos.

Lo que se pretende es bajar este tiempo a 5 segundos. Como dato de información se muestra una curva (figura 5.2) que indica la cantidad de impactos por minuto.

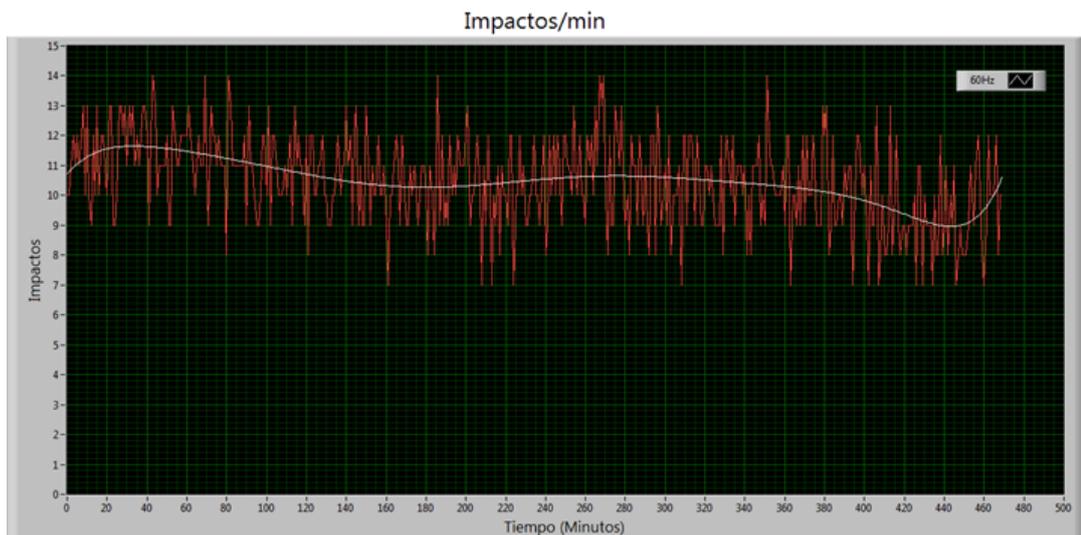


Figura 5.2: Numero de impactos de catarata a velocidad de funcionamiento habitual
Fuente: Autor

La media de los impactos por minuto se acerca a 10.5 por minuto, lo que está por debajo de lo considerado ideal (12.5). Como otro dato de información la media de los angulos de impacto en grados es de 23.6 grados.

Las pruebas también se realizaron en las condiciones no optimas, es decir, cuando el desgaste del cuerpo molidor ha llegado a niveles de vacío del molino altos (1.75m de vacío). El tiempo de catarata es el presentado en la figura 5.3.

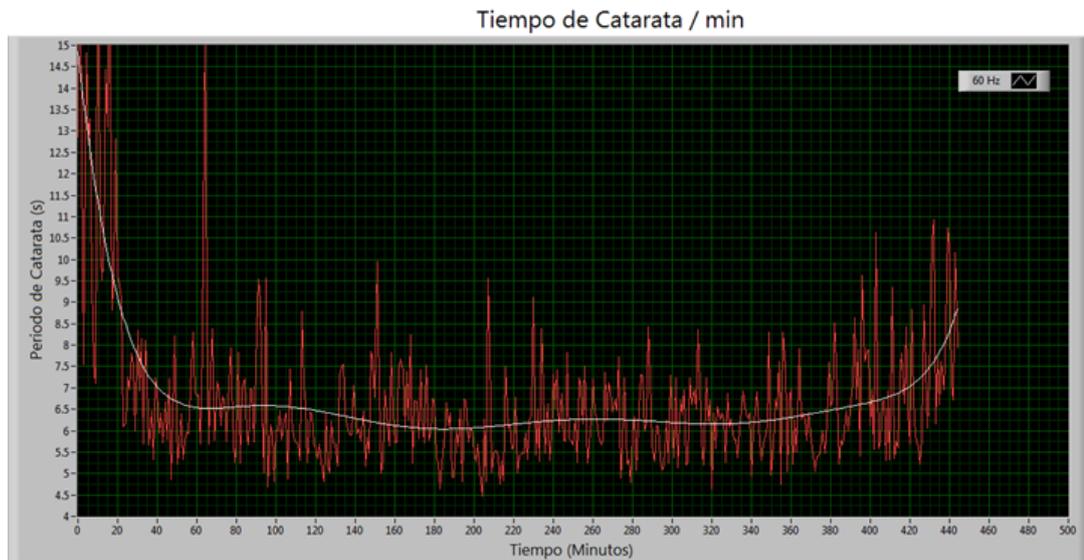


Figura 5.3: Periodo de catarata a velocidad de funcionamiento habitual con alto nivel de desgaste
Fuente: Autor

La media del tiempo de catarata es de 6.41 segundos. Se puede notar que al tener un desgaste en el cuerpo molidor el tiempo de catarata sube. De igual manera se indica la cantidad de impactos por minuto (Figura 5.4).

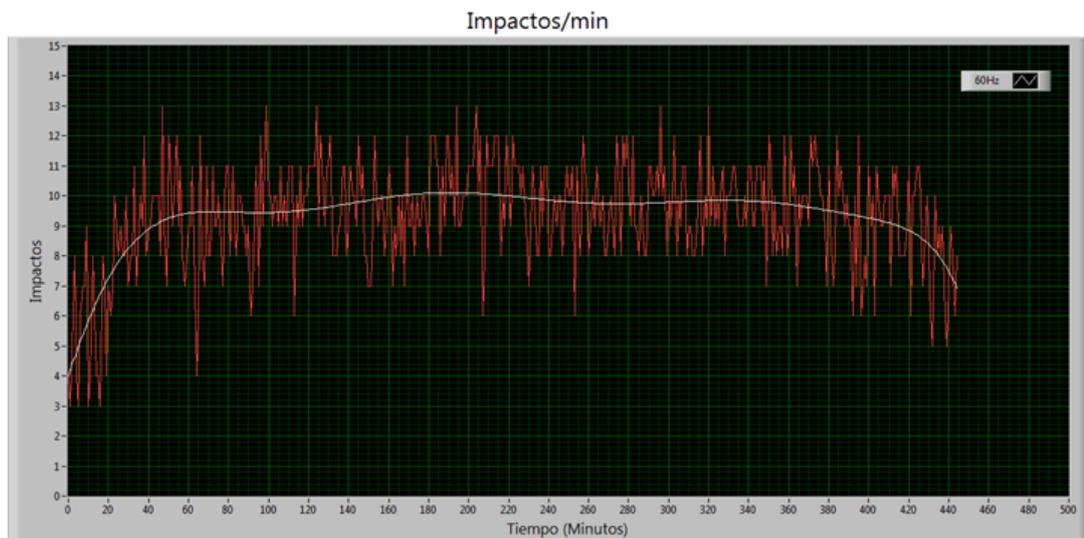


Figura 5.4: Numero de impactos de catarata a velocidad de funcionamiento habitual con alto nivel de desgaste
Fuente: Autor

La media de los impactos por minuto se acerca a 9.35 por minuto, lo que está por debajo de lo considerado ideal (12.5).

5.1.2. Condiciones Modificadas de Funcionamiento

Las condiciones bajo las cuales se realizaron las adquisiciones de sonido del sistema en condiciones modificadas son las siguientes:

- Carga del molino: siempre la misma (especificada en el capítulo 4).
- Vacío del molino: 1.3 m.
- Frecuencia de ingreso al motor de 55 Hz (11.4 RPM).

Los datos que se han medido son los mismos de la subsección anterior.

El comportamiento del periodo de catarata se presenta en la figura 5.5.

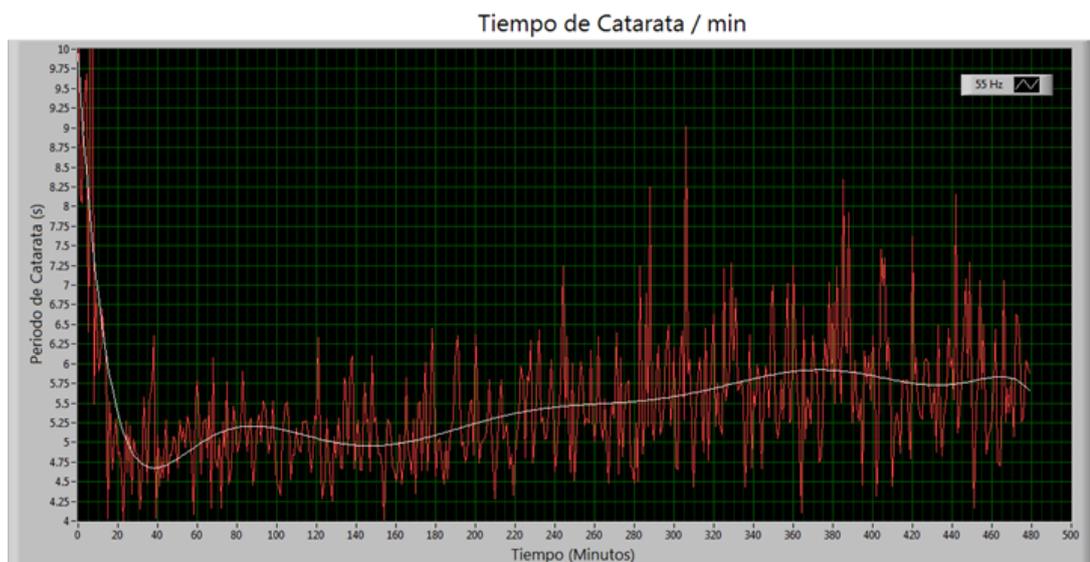


Figura 5.5: Periodo de catarata a velocidad de funcionamiento modificado
Fuente: Autor

Como se observa en la figura 5.5, la media del tiempo de catarata es de 5.37 segundos. En esta gráfica y los datos revelan una mejoría respecto a las condiciones de funcionamiento habitual del sistema.

Como un dato informativo se muestra una curva (figura 5.6) que indica el número de impactos por minuto.

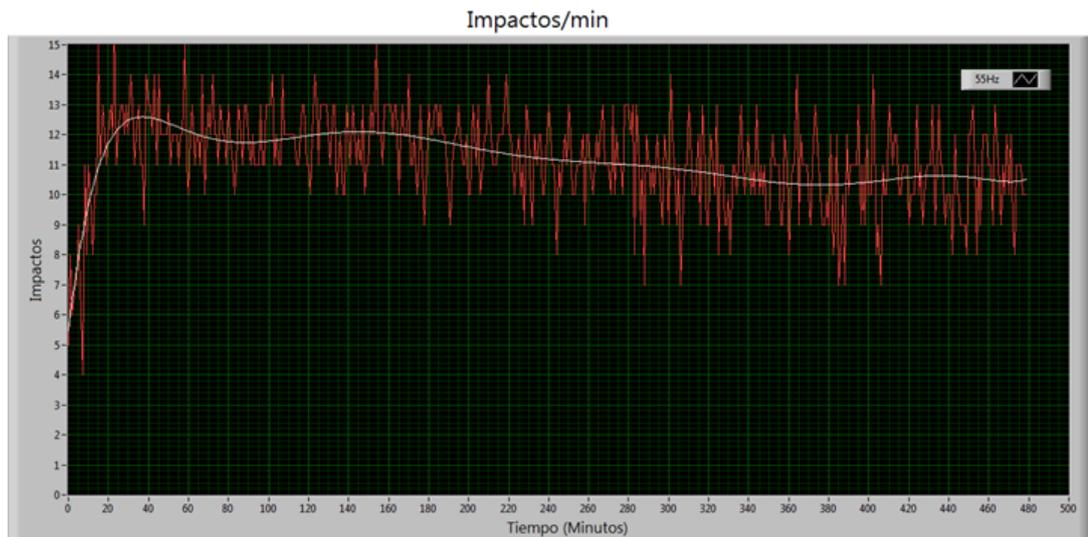


Figura 5.6: Numero de impactos de catarata a velocidad de funcionamiento modificada
Fuente: Autor

La media de los impactos por minuto se acerca a 11.16 por minuto. Como otro dato de información la media de los ángulos de impacto en grados es de 13.5 grados.

Las pruebas también se realizaron en las condiciones no optimas, es decir, cuando el desgaste del cuerpo molidor ha llegado a niveles de vacío del molino altos (1.75m de vacío). El tiempo de catarata es el presentado en la figura 5.7.

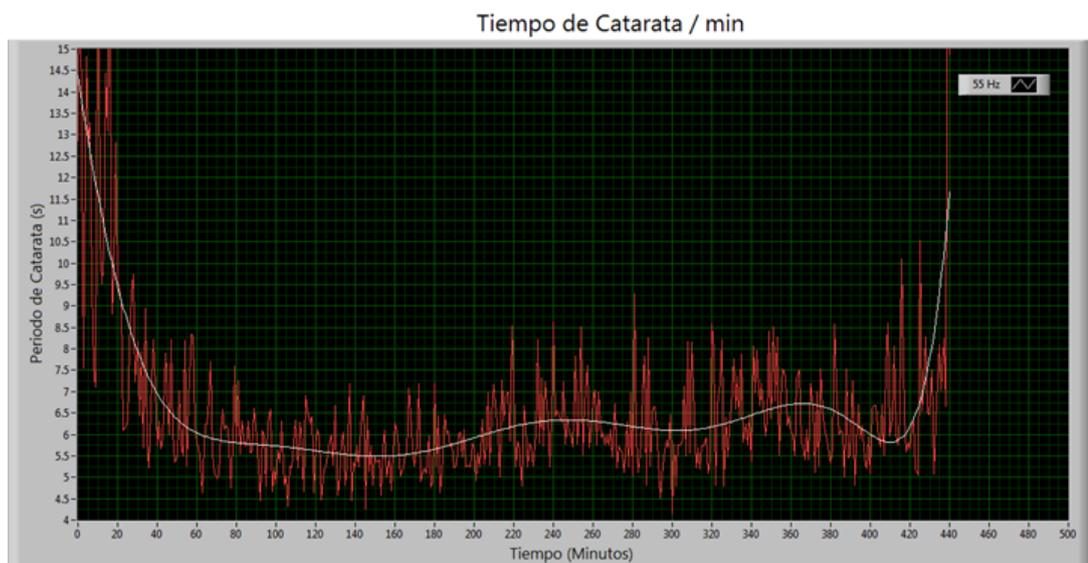


Figura 5.7: Periodo de catarata a velocidad de funcionamiento modificado con alto nivel de desgaste
Fuente: Autor

La media del tiempo de catarata es de 6.17 segundos. Se puede notar que al tener un desgaste en el cuerpo molidor el tiempo de catarata sube. De igual manera se indica la cantidad de impactos por minuto (Figura 5.8).

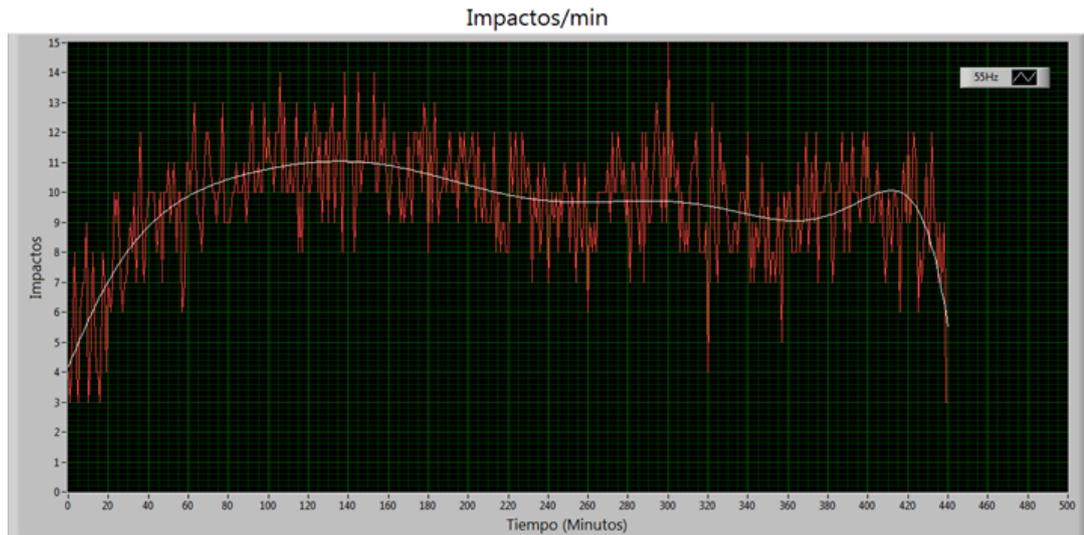


Figura 5.8: Numero de impactos de catarata a velocidad de funcionamiento modificado con alto nivel de desgaste

Fuente: Autor

La media de los impactos por minuto se acerca a 9.63 por minuto, lo que está por debajo de lo considerado ideal (12.5). A pesar de ello hay una mejora en el sistema.

5.1.3. Análisis de las Pruebas bajo Modificaciones Fijas en el Sistema

Con los datos tomados en las pruebas presentadas anteriormente, se pudo determinar la función de transferencia del sistema en el capítulo 3. Además de que se pudo notar una mejoría en el proceso con simplemente bajar la velocidad del motor del molino. Datos más específicos de las condiciones optimas del sistema se presentan en el cuadro 5.1.

PARÁMETRO MEDIDO	PRUEBA A 60HZ	PRUEBA A 55HZ
Tiempo de Molienda	9 horas	7.5 horas
Densidad	164.9 g/100cm ³	164.2 g/100cm ³
Viscosidad	38 seg	35 seg
Residuo	10.5	12
Periodo de Catarata	5.73 seg	5.36 seg

Cuadro 5.1: Resultados de las pruebas de velocidad.

Una vez indicados los datos de las pruebas preliminares, se procederá a realizar las pruebas de control. Cabe aclarar que no se han realizado pruebas aumentando la velocidad del molino, debido a que el sistema mecánico no soporta velocidades más altas y puede colapsar.

5.2. Velocidad en Comparación al Sistema sin el Controlador

Una vez realizadas las pruebas preliminares y el diseño del controlador se ha sometido al sistema a pruebas de velocidad. Se han realizado cuatro pruebas, adquiriendo y almacenando los datos del proceso de molienda como se ha hecho con las pruebas anteriores, con la diferencia que ahora se tiene un setpoint para ajustar el periodo de catarata y un control del proceso en sí.

5.2.1. Curvas de Comportamiento del Sistema con el Controlador Implementado

Como se explicó en capítulos anteriores el rango de salida de variación de velocidad oscila entre 47 y 60 Hz (10.0 y 12.5 RPM). En control automático se encarga de encontrar la mejor salida de frecuencia para mejorar el movimiento de material al interior del molino. Las pruebas del controlador se han hecho basadas en las siguientes condiciones:

- Vacío del molino alto de 1.65m (cercano al valor crítico).
- Carga especificada en el capítulo anterior.

Los resultados del ajuste de la variable a controlar (periodo de catarata) son los indicados en la figura 5.9.

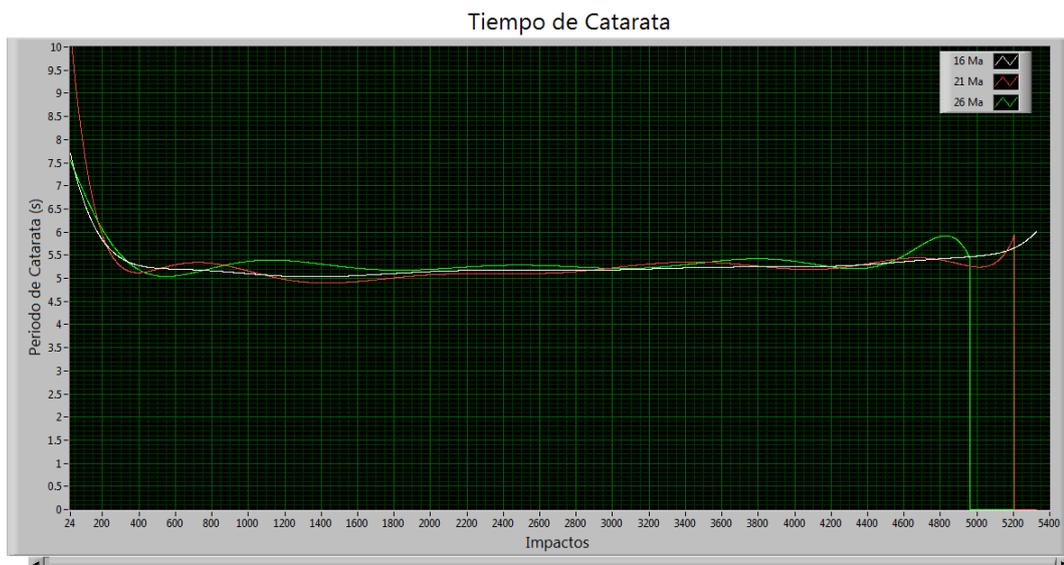


Figura 5.9: Periodo de Catarata con el sistema controlado

Fuente: Autor

Los impactos por minuto se presentan en la figura 5.10.

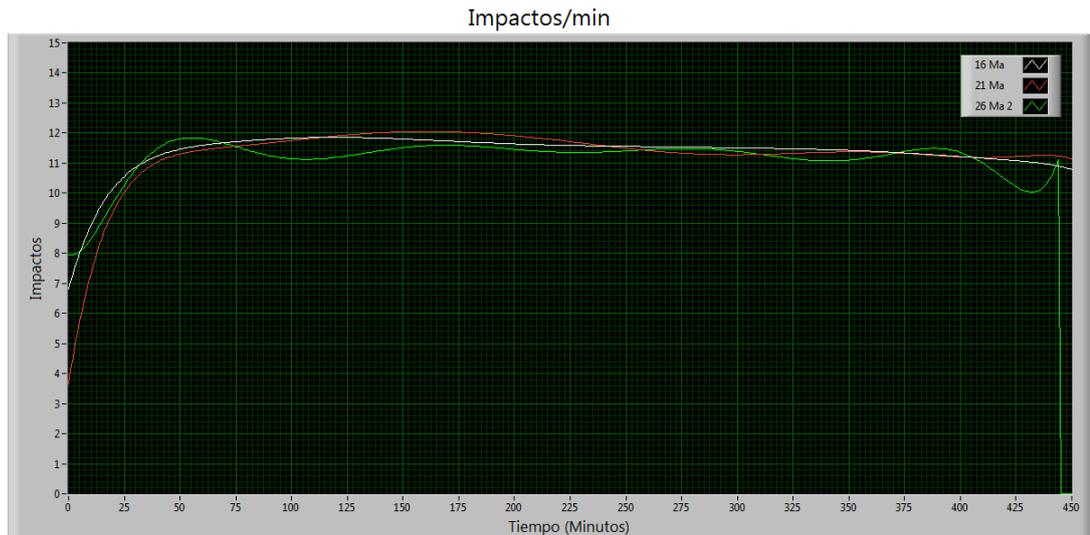


Figura 5.10: Impactos de Catarata con el sistema controlado.
Fuente: Autor

Con una simple inspección visual se puede observar una notable mejoría en el sistema, los tiempos de catarata cumplen con el parámetro de error de estado estable, ya que la señal filtrada nos indica una estabilidad y mejora en el sistema. Además de una repetitividad de los resultados, indicando que el control se está realizando.

Ahora procederemos a mostrar en el cuadro 5.2 los resúmenes de los datos presentados anteriormente en las graficas.

PARÁMETRO MEDIDO	PRUEBA 1	PRUEBA 2	PRUEBA 3
Tiempo de Molienda	8 horas	8 horas	8 horas
Densidad	160 g/100cm ³	165 g/100cm ³	164,3 g/100cm ³
Viscosidad	33 seg	52 seg	57 seg
Residuo	7.3 %	8.5 %	7.8 %
Periodo de Catarata	5.29 seg	5.3 seg	5.37 seg
Observación	200 litros mas de agua (VM=1.65m)	300 litros menos de agua (VM=1.65m)	VM=1.75m

Cuadro 5.2: Resultados de las pruebas de control.

Analizando los datos del cuadro podemos obtener varias observaciones:

- El parámetro que determina la finalización de los molienda es el residuo, actualmente debe estar entre un 9 y 10%. Este valor depende directamente del tiempo de molienda, pero también depende de la cantidad de agua, es decir, si se coloca mas agua de lo requerido, el residuo disminuye mas rápido, pero se afectan los valores de densidad y residuo (tardan mas en llegar a sus valores establecidos).
- Las condiciones del clima afectan directamente al proceso. Por ejemplo, al estar húmedo y lluvioso el clima, se debe colocar menos agua en la fórmula, por lo que los mismos operadores deben cambiar la cantidad de agua necesaria.

- Con el sistema se logra que el material impacte una mayor cantidad de veces, lo que desencadenaría en menores tiempos de molienda.
- En cuanto al control, este optimiza el movimiento de los materiales al interior del molino, esto se puede notar claramente en las figuras y . Los tiempos medidos e impactos contados nos muestran una notable mejoría del proceso, a pesar de no ser las condiciones óptimas de funcionamiento se ha logrado disminuir en al menos 1 segundo el periodo de catarata, que era lo esperado.
- Según los resultados de las pruebas se deben disminuir entre 30 minutos y una hora de molienda, lo cual cumple nuestro objetivo de disminuir el tiempo de molienda.
- Por factores de tiempo y disponibilidad en la fábrica no se han podido recopilar una mayor cantidad de datos de pruebas.

Capítulo 6

Análisis Financiero

6.1. Análisis de Factibilidad y Rentabilidad del Sistema

6.1.1. Presupuestos

Para la realización del sistema se han considerado los costos de los elementos adquiridos para la realización del proyecto, para esta etapa de implementación temporal y realización de pruebas se ha requerido de los componentes nombrados en el cuadro 6.1. Se incluye la mano de obra personal.

DESCRIPCION	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	TOTAL
Computador Hp Pavilion	1	1000.00	1000.00
Cable Stereo	1	1.00	1.00
Placa Electrónica	1	10.00	10.00
Jack Mono Grande	2	1.00	2.00
Extensión	1	5.00	5.00
Cable concéntrico 2x16	35	1.00	35.00
Microfono Shure SM58	2	85.00	170.00
Cable de audio conector Profesional	2	7.50	15.00
Modulo de conversion RS232 a RS485	1	235.00	235.00
Tubo de 2"	1	7.00	7.00
Tubo de 1.5"	1	6.50	6.50
Placa de acero	1	10.00	10.00
Construcción Estructura	1	30.00	30.00
Tornillos de 2"	5	0.1	0.50
Mano de obra Christian Romero	1	3000.00	3000.00
TOTAL PRESUPUESTO			4527.00

Cuadro 6.1: Presupuesto Personal del Proyecto

Ahora se presenta el presupuesto para una implementación del sistema de manera permanente. Se ha buscado hardware robusto y fiable para la implementación de un sistema de tiempo real. El cuadro 6.2 muestra el presupuesto incluyendo estos dispositivos.

DESCRIPCION	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	TOTAL
Computador Hp Pavilion	1	1000.00	1000.00
CRIO-9022, Real-Time PowerPC Embedded Controller for CompactRIO, 533 MHz, 2 GB storage, 256 MB DRAM	1	4257,80	4257.80
cRIO-9111, 4-slot Virtex-5 LX 30 Reconfigurable Chassis for CompactRIO	1	1330,56	1330.56
NI 9239 4-Ch-10 V, 50 kS/s/Ch, 24-bit, Ch-to-Ch Isolated AI Module	1	1330,56	1330.56
NI 9971 Backshell for 2-pos connector block (qty 4)	1	36,30	36.30
NI 9263 4-Channel, 16-Bit, +/-10 V, 100 kS/s per Channel, Analog Output Module	1	502,00	502.00
NI 9932 Strain relief & high voltage conn kit, 10-pos screw terminal plug w/ cable housing for 10-pos. screw terminal	1	36,30	36.30
NI PS-15 Power Supply, 24 VDC, 5 A, 100-120/200-240 VAC Input	1	278,20	278.20
Micrófono Piezotronics 377B02 con preamplificador 426E01	2	1287,50	2575.00
Cables Apantallados	2	20.00	40.00
Cable concéntrico 2x16	2	1.00	2.00
Tubo de 2"	1	7.00	7.00
Tubo de 1.5"	1	6.50	6.50
Placa de acero	1	10.00	10.00
Construcción Estructura	1	30.00	30.00
Tornillos de 2"	15	0.1	1.50
Varios	1	1000	1000
Mano de obra Christian Romero	1	3000.00	3000.00
TOTAL PRESUPUESTO			14112.16

Cuadro 6.2: Presupuesto para la Implementación Permanente del Proyecto

Los dispositivos están correctamente dimensionados de acuerdo a los requerimientos en procesamiento y análisis requeridos. En base al presupuesto del cuadro se hará el análisis VAN y TIR de una implementación del proyecto.

6.1.2. Análisis de la Tasa Interna de Retorno y del Valor Actual Neto (TIR y VAN)

Previo a calcular el VAN y la TIR, se presentan los costos de producción del gres porcelánico en la empresa que se pueden observar en el cuadro 6.3. Cabe recalcar que estos valores son aproximados, debido a que estos datos son muy delicados y no pueden ser revelados, por lo que se presentan valores muy cercanos que corresponden a una carga de un molino.

DESCRIPCION	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	TOTAL
Materias Primas Transportadas	18.2 ton (1000m ²)	\$7 c/ton	\$150
Molienda	1000m ²	\$0.35 c/m ²	\$350
Atomizado	1000m ²	\$0.45 c/m ²	\$450
Prensado	1000m ²	\$0.10 c/m ²	\$100
Secado	1000m ²	\$0.20 c/m ²	\$200
Esmaltado	1000m ²	\$0.60 c/m ²	\$600
Horneado	1000m ²	\$0.50 c/m ²	\$500
Clasificado y Empacado	1000m ²	\$0.75 c/m ²	\$750
TOTAL COSTOS			\$3100
COSTO POR METRO CUADRADO			\$3.10

Cuadro 6.3: Valores aproximados de costos de Producción

Para entender de mejor manera el cuadro se debe tener claras algunas cuestiones:

- Cada carga del molino produce aproximadamente 1000m² de gres. Por eso es que casi todos los costos se consideran por metro cuadrado.
- La molienda dura 8 horas,
- El atomizador atomiza 7.2 toneladas por hora, consumiendo aproximadamente 100 litros de diesel por hora.
- El horno está en capacidad de hornear 200 metros de gres por hora con un consumo de 90 m³ por hora.
- Se asume un precio de fabrica de \$6 el metro cuadrado (\$2.90 de ganancia por metro).

Ahora se presenta el ahorro energético en el molino una vez implementado el sistema en el molino en el cuadro 6.4.

DESCRIPCION	SIN CONTROLADOR	CON EL CONTROLADOR IMPLEMENTADO	MEJORA
Costo kW/h	0.09	0.09	0
Consumo Motor (kW/h)	110	110	0
Consumo Hora (\$)	9.9	9.9	0
Horas Totales de Trabajo Mensual	720	720	0
Tiempo Total Molienda (Horas)	10	9.5	-0.5
Cantidad Moliendas Mensuales	72	75.79	3.78
Tiempo de Funcionamiento Motor	8	7.5	-0.5
Porcentaje tiempo encendido	80	78.94	-1.05
Tiempo Mensual Encendido	576	568.42	-7.57
Consumo Mensual Energia Electrica	5702.4	5627.36	-75.03
COSTO POR METRO CUADRADO			

Cuadro 6.4: Ahorro energetico en el motor.

Como se observa en el cuadro, el aumento de molindas por mes es de 3.75, despreciaremos el 0.75 y calcularemos con solo 3 molindas extra por mes. Esto que desencadena en una ganancia de \$8700 en produccion.

En base al costo total del proyecto de \$14112.16 se hará el cálculo de la tasa interna de retorno y el valor actual neto. Para ello se empleará la formula de la ecuación 6.1.

$$Van = \sum_{t=0}^T \frac{Ft}{(1+r)^t} \quad (6.1)$$

donde:

Ft: es el flujo efectivo

T: el tiempo en meses

r: es la tasa de descuento

Para nuestro análisis debemos considerar al flujo de caja como el valor de ganancia que va a producir nuestra mejora en el sistema. El tiempo en el que se pretende descontar el calor del sistema es en 3 meses, por lo que la TIR se calculará igualando el VAN=0 en el tiempo antes mencionado. El tiempo de análisis del VAN será de 1 año (12 meses).

Para el flujo de caja se considerarán los siguientes aspectos:

- El ahorro de energía en el molino (75 dólares) .
- El aumento de la eficiencia del molino (ganancia de 8700 dólares).

Se considera un flujo de caja total de \$8775. La TIR se calcula como indica la ecuación 6.2.

$$0 = -14112,16 + \frac{8775}{(1+r)} + \frac{8775}{(1+r)^2} + \frac{8775}{(1+r)^3} \quad (6.2)$$

Resolviendo la ecuación 6.2 se obtiene una tasa interna de retorno del 39.05% que indica que el sistema es totalmente rentable. Y con esta TIR se muestra el cuadro 6.5 calculando el VAN.

TIEMPO EN MESES	VAN (\$)
0	-14112.16
1	-7801.686931
2	-3263.559256
3	0
4	2346.963281
5	4034.76369
6	5248.532239
7	6121.40446
8	6749.123736
9	7200.543176
10	7525.177958
11	7758.63654
12	7926.526465

Cuadro 6.5: Valor Actual Neto.

Como se puede observar el proyecto es muy rentable, al tener un corto tiempo de descuento y tener una alta TIR que indica y ratifica totalmente la rentabilidad. También se presenta una gráfica que muestra la evolución del VAN (figura 6.1).

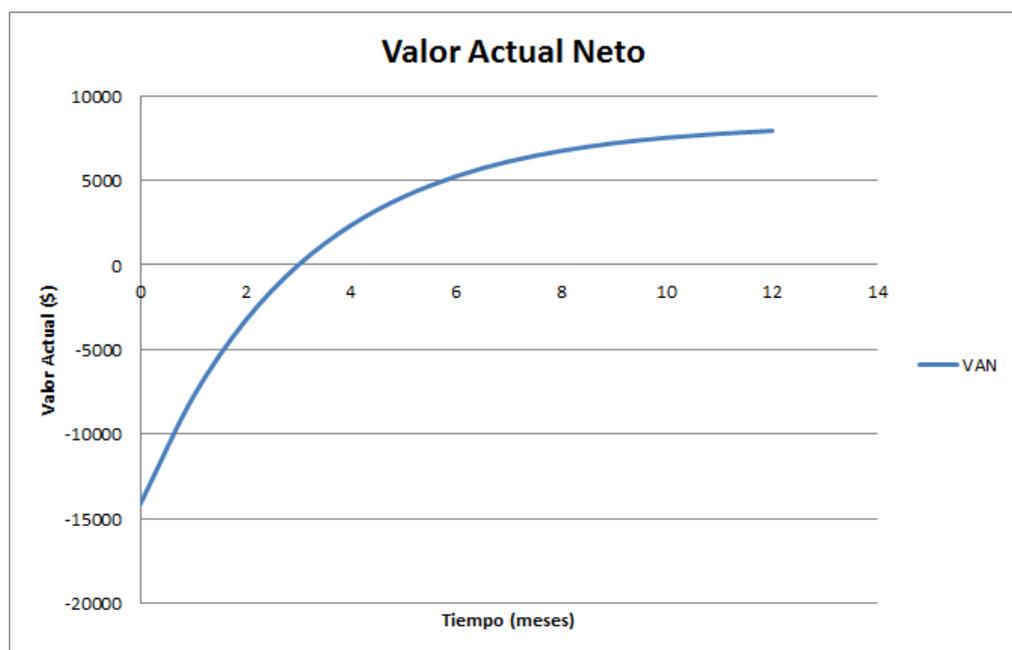


Figura 6.1: Valor actual neto.

Fuente: Autor

Conclusiones y Recomendaciones

Dentro de cualquier proceso es muy importante considerar todos los factores que lo afectan y lo influyen en él. Además de un control electrónico se deben considerar varios aspectos tales como: el personal que influye en el proceso y los factores climáticos, los cuales son de imperativa importancia si se trata de optimizar los procesos.

En el caso del proyecto realizado, no es la excepción, ya que se tiene una gran influencia de los factores que se involucran en el proceso. Para tener un correcto funcionamiento del sistema se debe considerar factores climáticos y factores operativos. Del comportamiento del sistema bajo esas condiciones se puede concluir:

- Es imperativo mantener el molino de bolas en condiciones óptimas de funcionamiento, por ejemplo, al mantener un nivel adecuado de cuerpo moledor se tiene con qué moler las materias primas. Al instante de realizar el estudio se pudieron obtener curvas y comportamientos muy diferentes, medidas en distintas condiciones de cuerpo moledor. Al instante de realizar las pruebas de funcionamiento del sistema se obtuvo una optimización en el movimiento de material, que era lo dispuesto para el proyecto, pero al no tener el molino en condiciones óptimas del nivel de cuerpo moledor, los tiempos que se manejan en la molienda tienden a subir y con ello la mejora que proporciona el proyecto tiende a mantener los tiempos en valores normales.
- La forma y uniformidad del cuerpo moledor tienen una gran influencia en el comportamiento de la catarata de carga del molino. Existe una gran diferencia entre cuerpo moledor empleado y el procesado (alúvid) donde se tiene un movimiento uniforme en la carga, además de tener una mayor superficie de contacto entre los cuerpos moledores. La uniformidad del movimiento se reduce notablemente al emplear las piedras de río, ya que no tienen una forma definida (unas pueden ser ovaladas, otras redondas y otras con puntas) y esto reduce la superficie de contacto además de afectar el volumen neto de cuerpo moledor (sin considerar el vacío que hay entre las piedras). Al implementar el sistema se ha optimizado el movimiento de los cuerpos moledores al interior del molino mediante la variación de la velocidad del molino.

- En etapas previas a la realización del proyecto se han realizado mediciones con un solo micrófono, al inicio colocándolo sin ningún tipo de aislamiento para el ruido, ya que en un ambiente industrial se tienen varias fuentes de ruido acústico. Por lo que se optó por colocar al micrófono en una “campana” de corcho, la cual favoreció al aislamiento de los ruidos externos. Una vez identificados los parámetros a medir, se vió la necesidad de cubrir un mayor sector del molino para poder identificar la posición de los impactos, por lo que se agregó un micrófono extra en una posición específica para poder cubrir mayor espacio del molino y detectar los impactos del cuerpo molidor.
- El tiempo de molienda depende directamente de la cantidad de agua que se cargue y de la humedad de las materias primas. De igual manera al instante de realizar las mediciones para el estudio se realizó en una temporada de clima seco, donde la cantidad de agua a colocarse era la indicada para la formulación. Pero en las pruebas del sistema de control se realizaron en una temporada de lluvias donde la cantidad de agua cargada al molino se veía directamente influenciada por la humedad de las materias primas. Al no haber un control rutinario de estos factores el proceso comienza a tornarse irregular, ya que los mismos operadores deben realizar cambios basándose en su experiencia.
- Con la implementación del sistema de control se ha cumplido con el objetivo de reducir el tiempo de molienda, consecuencia de la optimización del movimiento de los materiales. Esto trae resultados muy beneficiosos, ya que además de minimizar los tiempos de molienda hasta en una hora, se logra mantener el motor menos tiempo encendido en el mes (aproximadamente un 2% partiendo del consumo mensual). Lo que nos brindó un ahorro energético de aproximadamente \$80 que no se esperaba tener.

En cuanto al modelado del sistema y su complejidad se ha recurrido a la utilización de métodos de identificación de sistemas dinámicos. Estas herramientas han facilitado considerablemente el análisis y simulación del sistema, a la vez que nos proporcionan datos relevantes del sistema. Como conclusión respecto a este tema sería importante el desarrollo de modelos matemáticos específicos para un molino de bolas.

El desarrollo del software ha sufrido varias modificaciones desde la primera vez que se realizaron pruebas, al no conocer bibliografía referente al tema se han hecho varios descubrimientos considerables en cuanto a los comportamientos del sistema que se han empleado para el sistema de detección de impactos y como las variables más significativas del proceso influyen en la medición de los impactos.

Como recomendación, se puede citar que una optimización de un proyecto depende de diversos factores, mas no de solo un controlador para una determinada parte de él.

El control se debe realizar en todos los factores que influyen en el proceso, desde la manera en que los operadores cargan la materia prima en un molino (con las dosis exactas haciendo consideraciones en variaciones de humedad o colocación de materias adicionales), hasta el control realizado sistema electrónico implementado, es decir, se deben realizar controles incluso desde los niveles administrativos en la empresa.

Bibliografía

1. *Apuntes de Molienda*. (n.d.). Obtenido el 30 de enero de 2012. Universidad de Buenos Aires. De: http://materias.fi.uba.ar/7202/MaterialAlumnos/06_Apunte%20Molienda.pdf
2. Cuellar Lozano Javier. (2000). *Desarrollo y Caracterización de un gres Porcelánico*. Tesis Doctoral. Obtenido el 22 de noviembre de 2011. Universidad Autónoma de Nuevo León. De: <http://cdigital.dgb.uanl.mx/te/1020136708/1020136708.PDF>
3. Reyes Juan, Dr. (2002). *Cerámica Industrial*, obtenido el 25 de noviembre de 2011. Universidad de Alicante. De: http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/13558/1/CeramInd_JARLIQUA.pdf
4. Simone Casadio. (2008). Sacmi Imola, obtenido el 22 de noviembre de 2011. De: <http://www.ceramicaycristal.com/cc140pdf/investigacion140.pdf>
5. Rodas Barrientos Gianni. (n.d.). Obtenido el 25 de noviembre de 2011. De: <http://es.scribd.com/doc/59398500/Molinos-de-Bolas.pdf>
6. *SBM*. (2010). *Las aplicaciones de los molinos de bolas para la molienda de minerales*. Obtenido el 24 de noviembre de 2011. De: http://www.sbmtrituradora.cl/soluciones/molienda_de_minerales.html
7. Antonio Mínguez Olivares. (1998). *Ingeniería Avanzada para Sistemas de Control de Ruido Acústico mediante Técnicas Adaptativas*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. De http://oa.upm.es/1184/1/ANTONIO_MINGUEZ_OLIVARES.pdf
8. Julio Braslavsky. (2002). *Control Automático 1*. Obtenido el 9 de febrero de 2012. Universidad de Quilmes. De: http://csd.newcastle.edu.au/SpanishPages/clase_slides_download/C03.pdf
9. *Filtros Adaptativos*. (2002). Obtenido el 20 de marzo de 2012. Univerisdad Politécnica de Madrid. De: <http://www.dma.fi.upm.es/docencia/cursosanteriores/02-03/segundociclo/redesdeneuronas/Temas/7FiltrosAdaptativos.pdf>

10. Larco, Andrés - Aguirre, Paula. (n.d.). *Introducción a la Identificación de Sistemas*. Obtenido el 20 de marzo de 2012. Univesidad Politécnica del Litoral. De: [http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/11695/1/Diapositivas %20-Larco-Aguirre.pdf](http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/11695/1/Diapositivas%20-Larco-Aguirre.pdf)
11. Garrido, Santiago. (1999). *Identificación, Estimación y Control de Sistemas No-lineales mediante RGO*. Tesis Doctoral. Obtenido el 20 de marzo de 2012 . Universidad Carlos II de Madrid. De: <http://roboticslab.uc3m.es/publications/SGarridoPhD.pdf>
12. Sistemas Automáticos de Control. (n.d.). Obtenido el 23 de marzo de 2012. De: [http://www.juntadeandalucia.es/averroes/ies_sierra_magina/d_tecnologia/bajables/2 %20bachillerato/SISTEMAS %20AUTOMATICOS %20DE %20CONTROL.p df](http://www.juntadeandalucia.es/averroes/ies_sierra_magina/d_tecnologia/bajables/2%20bachillerato/SISTEMAS%20AUTOMATICOS%20DE%20CONTROL.pdf)
13. *System Identification Toolkit*. (n.d.). Obtenido el 30 de enero de 2012. National Instruments Sine. De: http://www.ni.com/pdf/products/us/cat_lvSIT.pdf
14. Minchala, Ismael. (2008). *Identificación, Simulación, Diseño e Implementación de Sistemas de Control Utilizando LabVIEW*. Obtenido el 23 de marzo de 2012. De: [http://www.inele.ufro.cl/apuntes/LabView/Manuales/Sistemas %20_Control %20_Nivel.pdf](http://www.inele.ufro.cl/apuntes/LabView/Manuales/Sistemas%20_Control%20_Nivel.pdf)