

**UNIVERSIDAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA UTEC**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**



**SISTEMA DE MONITOREO EN LÍNEA DEL  
DESGASTE DE LOS REVESTIMIENTOS EN LOS  
MOLINOS CONVENCIONALES DE LA UNIDAD  
MINERA UCHUCCHACUA**

**TESIS**

Para optar el título profesional de Ingeniero Mecánico

**AUTOR(ES)**

Juan Pablo Jesús Delgado Pomachagua (CÓDIGO: 201410158)

**ASESOR(ES)**

Tulio Antonio Antezano Inga (ORCID: 0000-0002-4849-7197)

Lima – Perú

2019

*Dedicatoria:*

La presente tesis lo dedico principalmente a Dios, por ser el inspirador y darme la fuerza para continuar en este proceso de obtener una de mis metas más preciadas. A mis padres, por todo su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años; gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy. Es un orgullo y privilegio ser su hijo, sin lugar a duda son los mejores. A mi enamorada, por estar siempre presente, acompañándome y brindándome un gran apoyo moral. A todas las personas que me han apoyado y han hecho que este trabajo se realice con éxito, abriéndome las puertas y compartiéndome sus conocimientos.

*Agradecimientos:*

Quiero agradecer a mis padres: Pablo y Rosario, por ser los principales promotores de mi sueño, por confiar y creer en mis expectativas, por los consejos, valores y principios que me han inculcado. Agradezco a mis profesores de la universidad de Ingeniería y Tecnología, por haber compartido sus conocimientos a lo largo de mi carrera profesional, de manera especial al Ingeniero Tulio Antezano, al Ingeniero Helard Álvarez, al Ingeniero Luis Mantari y la Ingeniera Ximena Guardia quienes con la enseñanza de sus valiosos conocimientos hicieron que pueda crecer día a día como profesional, gracias a cada una de ustedes por su paciencia, dedicación, apoyo incondicional y amistad. Agradezco a la Compañía de Minas Buenaventura por darme la oportunidad de desarrollar dicha investigación llevándolo a la realidad.

# TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
<b>RESUMEN.....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>i</b>
<b>CAPÍTULO I MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>1</b>
1.1 Investigaciones referentes al control y monitoreo de los revestimientos .....	1
1.2 Control de revestimientos en las principales mineras del Perú .....	3
1.3 Proceso de Molienda .....	5
1.3.1 Descripción del Área de Molienda.....	5
1.3.2 Principios de Operación .....	5
1.3.3 Reducción de Tamaño de Mineral.....	7
1.4 Tecnología de los Molinos .....	8
1.4.1 Componentes del Molino .....	8
1.4.2 Cuerpos de Molienda .....	10
1.4.3 Tipos de Molinos.....	12
1.4.3.1 Molino de Barras.....	12
1.4.3.2 Molino de Bolas .....	12
1.4.3.3 Molinos SAG y AG.....	13
1.4.3.4 Características de los molinos .....	14
1.5 Aspectos operativos de los Molinos.....	15
1.5.1 Condiciones de Operación.....	15
1.5.1.1 Zonas de Interacción .....	15
1.5.1.2 Carga de mineral .....	16
1.5.1.3 Fuerzas de Operación .....	17
1.5.1.4 Velocidad de giro de los molinos .....	19
1.5.2 Condiciones de Mantenimiento.....	19
1.6 Características de los minerales .....	20
1.6.1 Densidad y viscosidad del mineral.....	20

1.6.2	Dureza .....	21
1.7	Revestimientos de los Molinos .....	21
1.7.1	Importancia en el proceso de Molienda .....	21
1.7.2	Diseño y estructura.....	22
1.7.3	Materiales .....	25
1.8	Causa de desgaste de los revestimientos .....	26
1.8.1	Desgaste por las fuerzas de molienda.....	26
1.8.2	Desgaste por operación del Molino.....	26
1.8.3	Desgaste por la característica de los minerales .....	27
1.9	Tipos de Monitoreo y control de desgaste de los Revestimientos.....	29
1.10	Control y Monitoreo a Tiempo real.....	30
1.10.1	Modelamiento y Simulación .....	30
1.10.1.1	Solidworks Student. ....	30
1.10.1.2	ANSYS Workbench Structural .....	31
1.10.1.3	EDEM Simulation Academy.....	31
1.10.2	Recolección de datos .....	33
1.10.2.1	Sensor Piezoeléctrico de Fuerza.....	33
1.10.3	Procesamiento de la señal .....	34
1.10.4	Codificación y Procesamiento de DATA.....	35
1.10.4.1	Arduino .....	35
1.10.4.2	Codificación de la señal en el Arduino .....	36
<b>CAPÍTULO II METODOLOGÍA .....</b>		<b>38</b>
2.1	Información Básica .....	38
2.1.1	Descripción y operación del Molino en estudio.....	38
2.1.2	Descripción del Sensor utilizado.....	41
2.1.3	Reconocimiento de los puntos de medición .....	42
2.2	Análisis Mecánico .....	44
2.2.1	Diseño de componentes del Molino SAG 15.5'x11' mediante el Software Solidworks Student .....	45
2.2.2	Simulación Operacional del Molino SAG 15.5'x 11' mediante el Software EDEM Simulation Academic .....	47

2.2.3	Análisis de fuerzas de Impacto en el lugar de implementación del sistema mediante el Software Ansys Transient Structural.....	50
2.2.4	Diseño final de los componentes mecánicos a utilizar Mediante el Software Solidworks Student .....	55
2.3	Sistema Eléctrico.....	56
2.3.1	Materiales utilizados .....	56
2.3.2	Procesamiento de la Señal.....	60
<b>CAPÍTULO III RESULTADOS .....</b>		<b>67</b>
3.1	Resultados en base a las simulaciones realizadas .....	67
3.1.1	Fuerzas de impacto en la superficie del revestimiento en base a la Simulación Operacional del Molino SAG 15.5’x11’ .....	67
3.1.2	Fuerzas de impacto reales generadas en la superficie donde se instaló el sistema de control y monitoreo .....	71
3.1.3	Sistema mecánico utilizado para absorber las elevadas fuerzas de impacto asegurando el buen funcionamiento del sistema de control y monitoreo.....	73
3.1.4	Diseño de la Placa del Circuito Integrado .....	74
3.2	Resultados de los Prototipos diseñados.....	76
3.2.1	Sistema Eléctrico.....	76
3.2.2	Sistema Mecánico .....	82
<b>CONCLUSIONES.....</b>		<b>85</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>		<b>87</b>
<b>ANEXOS .....</b>		<b>94</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

Pág.

<b>Tabla 1.1</b> Indicadores de producción de los molinos convencionales de la unidad Minera Uchucchacua [11].....	iv
<b>Tabla 1.1</b> Investigaciones referentes al control y monitoreo de los revestimientos .....	2
<b>Tabla 1.2</b> Control de Revestimientos en las principales mineras del Perú.....	4
<b>Tabla 1.3</b> Clasificación según el tipo de proceso .....	7
<b>Tabla 1.4</b> Características de los molinos convencionales .....	14
<b>Tabla 1.5</b> Cantidad de revestimientos para un molino SAG .....	22
<b>Tabla 1.6</b> Materiales utilizados para la fabricación de revestimientos de un molino.....	26
<b>Tabla 1.7</b> Tipos de Monitoreo y control de desgaste de los Revestimientos.....	29
<b>Tabla 1.8</b> Criterios de elección para los sensores de fuerza Piezoeléctricos .....	34
<b>Tabla 2.1</b> Características del Molino SAG 15.5'x11' .....	39
<b>Tabla 2.2</b> Propiedades del Mineral y Medio Molturante.....	47
<b>Tabla 2.3</b> Coeficientes de Interacción utilizados para la simulación operacional del Molino .....	48
<b>Tabla 2.4</b> Datos de esfuerzos Normales generados en la superficie donde se instalará el sistema en estudio .....	53
<b>Tabla 3.1</b> Fuerzas de Impacto originadas en la cara superior del revestimiento obtenidos en base a la simulación operacional del molino SAG 15.5'x11' .....	70
<b>Tabla 3.2</b> Fuerzas de Impacto originadas en la cara lateral del revestimiento obtenidos en base a la simulación del molino SAG 15.5'x11'.....	71
<b>Tabla 3.3</b> Valores de fuerza de impacto real que se genera en la superficie donde se instalará el sistema de control y monitoreo .....	72
<b>Tabla 3.4</b> Elementos del sistema Eléctrico de mayor consumo de corriente .....	76
<b>Tabla 3.5</b> Consumo de Potencia Total del sistema Eléctrico inicial. ....	78
<b>Tabla 3.6</b> Consumo de Potencia Total del sistema Eléctrico modificado. ....	80

# ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1.1</b> Producción Nacional de Plata por Empresa [6].....	iii
<b>Figura 1.2</b> OPEX Presupuestado al 2018 para el mantenimiento y cambio de revestimientos [14].	vi
<b>Figura 1.1</b> Procedimiento de Operación de un Molino Convencional.....	6
<b>Figura 1.2</b> Molino convencional de 6.5m de diámetro y 9.7m de longitud .....	7
<b>Figura 1.3</b> Partes principales en un molino convencional.....	10
<b>Figura 1.4</b> Medio Molturantes en forma de Barras .....	11
<b>Figura 1.5</b> Medio Molturante en forma de bola.....	11
<b>Figura 1.6</b> Molino de barras .....	12
<b>Figura 1.7</b> Molinos de bolas.....	13
<b>Figura 1.8</b> Molino SAG .....	14
<b>Figura 1.9</b> Zonas de Operación de un molino de bolas convencional.....	16
<b>Figura 1.10</b> Flujo de Alimentación en relación a la potencia neta consumida.....	17
<b>Figura 1.11</b> Fuerzas de Impacto en partículas de mineral.....	18
<b>Figura 1.12</b> Fuerzas de abrasión en partículas de mineral .....	18
<b>Figura 1.13</b> Principios de Operación de un molino de bolas y SAG.....	19
<b>Figura 1.14</b> Dureza del mineral con efectos en la potencia neta del molino.....	21
<b>Figura 1.15</b> Revestimientos pertenecientes a la tapa de alimentación de un molino .....	23
<b>Figura 1.16</b> Revestimientos pertenecientes al cuerpo de un molino .....	24
<b>Figura 1.17</b> Revestimientos pertenecientes a la tapa de descarga de un molino.....	24
<b>Figura 1.18</b> Fuerzas que influyen en el desgaste de los revestimientos .....	26
<b>Figura 1.19</b> Operación de un Molino a distintas velocidades .....	27
<b>Figura 1.20</b> Solidworks 3D "Parte" .....	30
<b>Figura 1.21</b> Solidworks "Plano 2D" generado por un modelo 3D .....	30
<b>Figura 1.22</b> Coordenadas Nodales (i,j,k) y desplazamientos de los nodos .....	31
<b>Figura 1.23</b> Proceso de cálculo para Análisis en Elementos Discretos.....	33
<b>Figura 1.24</b> Sensores Piezoeléctricos .....	34
<b>Figura 1.25</b> Esquema de un Amplificador de carga con un sensor piezoeléctrico de fuerza .....	35
<b>Figura 1.26</b> Mecanismo de un Arduino.....	36



<b>Figura 1.27</b> Plataforma de Codificación del Arduino .....	37
<b>Figura 2.1</b> Diagrama de Flujo Molino SAG 15.5'x11' .....	39
<b>Figura 2.2</b> Molino SAG 15.5'x11' .....	40
<b>Figura 2.3</b> Sección de Revestimientos para el cuerpo del Molino SAG 15.5'x11' .....	40
<b>Figura 2.4</b> Secciones de revestimiento pertenecientes al cuerpo del Molino.....	41
<b>Figura 2.5</b> Sensor de Fuerza FSR 402.....	42
<b>Figura 2.6</b> Liner del cuerpo del Molino sin grado de desgaste. ....	42
<b>Figura 2.7</b> Lifter del Cuerpo del Molino sin grado de desgaste. ....	43
<b>Figura 2.8</b> Lifters del Cuerpo del Molino desgastados .....	43
<b>Figura 2.9</b> Ranura donde se instaló el sistema de control y monitoreo.....	44
<b>Figura 2.10</b> Diagrama de Flujo para el Análisis Mecánico.....	45
<b>Figura 2.11</b> Diseño del Lifter donde se colocará el sistema de control y Monitoreo.....	46
<b>Figura 2.12</b> Diseño de la vista lateral del interior del cuerpo del molino .....	47
<b>Figura 2.13</b> Plataforma de Definición de Parámetros de Simulación .....	49
<b>Figura 2.14</b> Plataforma de seteo de tiempo e Intervalos de guardado de datos .....	49
<b>Figura 2.15</b> Propiedad del acero inoxidable.....	50
<b>Figura 2.16</b> Propiedades del Caucho.....	50
<b>Figura 2.17</b> Definición del espacio donde será colocado el sistema de Control y Monitoreo .....	51
<b>Figura 2.18</b> Definición de las fuerzas de impacto en la cara superior del revestimiento .....	51
<b>Figura 2.19</b> Definición de las fuerzas de Impacto en la cara lateral del revestimiento. ....	52
<b>Figura 2.20</b> Análisis de Impacto Dinámico de los esfuerzos generados en el espacio donde será colocado el sistema en estudio. ....	52
<b>Figura 2.21</b> Dimensionamiento de la superficie donde se instalará el sistema en estudio.....	54
<b>Figura 2.22</b> Diseño del resorte de Compresión a Utilizar .....	55
<b>Figura 2.23</b> Amplificador Operacional Modelo MCP6004 .....	56
<b>Figura 2.24</b> Amplificador Operacional Modelo AD620 .....	57
<b>Figura 2.25</b> Potenciómetro de Precisión .....	57
<b>Figura 2.26</b> Capacitores Cerámicos .....	58
<b>Figura 2.27</b> Generador de Voltaje Negativo .....	58
<b>Figura 2.28</b> Arduino NANO .....	59
<b>Figura 2.29</b> Módulo WIFI ESP8266 .....	60
<b>Figura 2.30</b> Regulador de Voltaje Modelo LM7805.....	60
<b>Figura 2.31</b> Área de trabajo óptimo Resistencia vs Fuerza.....	62

<b>Figura 2.32</b> Valores de RM para el diseño del circuito en relación al sensor FSR 402 .....	63
<b>Figura 2.33</b> Codificación del Circuito Operacional .....	65
<b>Figura 2.34</b> Simulación del Circuito en estudio .....	66
<b>Figura 3.1</b> Simulación Operacional del Molino SAG 15.5'x11' .....	68
<b>Figura 3.2</b> Fuerzas de Impacto generadas en la parte superior del Revestimiento en estudio .....	69
<b>Figura 3.3</b> Fuerzas de Impacto generadas en la superficie lateral del revestimiento .....	70
<b>Figura 3.4</b> Cálculo del resorte de compresión.....	73
<b>Figura 3.5</b> Sistema mecánico de Absorción de fuerzas de Impacto.....	74
<b>Figura 3.6</b> Diseño de la Placa donde se instalarán los componentes electrónicos .....	75
<b>Figura 3.7</b> Simulación del circuito eléctrico utilizado para obtener el consumo de los componentes .....	77
<b>Figura 3.8</b> consumo eléctrico de los componentes del sistema.....	77
<b>Figura 3.10</b> Simulación del circuito eléctrico utilizado para obtener el consumo de los componentes en la cual se añadió tres transistores.....	79
<b>Figura 3.11</b> Consumo eléctrico de los componentes del sistema eléctrico en la cual se añadió tres transistores.....	79
<b>Figura 3.13</b> Diseño del Sistema Eléctrico Final en base a los resultados obtenidos .....	81
<b>Figura 3.14</b> Resortes mecanizados en base a las características del sistema.....	83
<b>Figura 3.15</b> Sensor de fuerza FRS 402 instalada en la placa circular de metal.....	83
<b>Figura 6.1</b> Plano del diseño del recubrimiento del revestimiento .....	94
<b>Figura 6.2</b> Plano del diseño de la Riel de inserción de pernos del revestimiento .....	95
<b>Figura 6.3</b> Plano del diseño del Alma del Revestimiento .....	96
<b>Figura 6.4</b> Plano del diseño de la vista lateral del Molino SAG 15.5'x11' .....	97
<b>Figura 6.5</b> Plano del Diseño Resorte de Compresión.....	98

# ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO 1: DISEÑO DE REVESTIMIENTO PERTENECIENTE AL TERCER ANILLO DEL MOLINO SAG 15.5'x11' .....	94
ANEXO 2: DISEÑO DE LA VISTAL LATERAL DEL CUERPO DEL MOLINO SAG 15.5'x11' .....	97

## RESUMEN

El presente trabajo de titulación establece un sistema de control y monitoreo en línea, mediante sensores de fuerza, para determinar el grado de desgaste de los revestimientos utilizados en los molinos semiautógenos (SAG). El sistema de control y monitoreo diseñado e implementado para la planta de Procesos de la Unidad Minera Uchucchacua de la Compañía de Minas Buenaventura tiene como objetivo principal el desarrollo de un sistema automatizado que permita obtener a tiempo real el grado de desgaste de los revestimientos en base a las fuerzas de impacto generadas en la superficie de los mismos, mediante una relación funcional entre fuerza y desgaste.

Se diseñó un sistema mecánico compuesto por resortes de compresión y caucho para absorber las elevadas fuerzas de impacto y dejar valores entre 0 y 90 N, lo cual permite un correcto procesamiento del sensor de fuerza. Así mismo, se diseñó un sistema eléctrico compuesto por sensores de fuerza resistivos modelo FRS 402 de rango de medición de 0 a 90 N, microcontroladores, módulos WIFI, resistencias de precisión, amplificadores operacionales, placa matriz y fuente de voltaje negativo y positivo. A través de estos sistemas se logró el prototipo idóneo para obtener el grado de desgaste a tiempo real mediante las fuerzas de impacto.

***Palabras clave:*** Desgaste, revestimiento, molienda, fuerzas de impacto, molinos

## ABSTRACT

# SYSTEM OF MONITORING ONLINE OF WEARING LINERS IN THE CONVENTIONAL MILLS OF UCHUCCHACUA MINING

This work establishes an online control and monitoring system, by means of force sensors, to determine the degree of wear of the linings used in semiautogenous mills (SAG). The control and monitoring system designed and implemented for the process plant of the Uchucchacua Mining Unit of the Buenaventura Mining Company has as main objective the development of an automated system that allows to obtain in real time the degree of wear of the linings based on the impact forces generated on their surface, through a functional relationship between forces and wear.

A mechanical system composed of compression springs and rubber was designed to absorb the high impact forces and leave values between 0 and 90 N, which allows a correct processing of the force sensor. Also, an electrical system was designed composed of resistive force sensors model FRS 402 measuring range from 0 to 90 N, microcontrollers, WIFI modules, precision resistors, operational amplifiers, matrix board and negative and positive voltage source. Through these systems, the ideal prototype was achieved to obtain the degree of wear in real time by means of the impact forces.

***Keywords:*** *Wear, lining, grinding, impact forces, mills*

# INTRODUCCIÓN

La industria minera es uno de los sectores más representativos del país. Actualmente, ocupa el 2° lugar en producción de cobre, plata y zinc a nivel mundial, así como el 1° lugar en producción de oro, plomo y zinc a nivel Latinoamericano [1]. Por este motivo, la minería representa uno de los más grandes pilares de la economía peruana siendo el motor de crecimiento y desarrollo, contribuyendo notoriamente a la reducción de la pobreza.

Dentro de su proceso productivo, se encuentra la etapa de molienda, la cual involucra el 80% del consumo energético de todo el sistema [2]. Esta etapa tiene como fin principal reducir el tamaño del mineral, requiriendo el uso de molinos dentro de los cuales se encuentran: los Molinos de bolas, barras y SAG.

Uno de los principales problemas con el uso de los molinos es el desgaste de sus revestimientos debido a factores operacionales como las fuerzas de conminución y las características de los minerales. Este desgaste implica que se tenga que parar la operación del molino para su mantenimiento, conllevando pérdidas de tiempo y dinero que oscilan entre USD \$45,000 y USD \$ 60,000 por hora de parada, utilizando entre 4 a 8 horas por semana únicamente en revisar el desgaste de los revestimientos de forma manual [3].

En este sentido, es importante encontrar formas de controlar y monitorear el desgaste de los revestimientos de los molinos que no implique paradas, consumo excesivo de energía ni cambios prematuros o tardíos de los mismos. Por este motivo, la presente tesis busca proponer un sistema de control y monitoreo a tiempo real del desgaste de los revestimientos de los molinos convencionales mediante sensores de fuerza.

El sistema diseñado e implementado para la planta de la unidad minera Uchucchacua de la Compañía de Minas Buenaventura, tiene como finalidad el desarrollo de un sistema automatizado que permita obtener a tiempo real información del ciclo de desgaste de los revestimientos en base a las fuerzas de impacto que actúan sobre los mismos, las cuales se generan por el efecto cascada y catarata de las bolas y el mineral propio. Esta variable principal se ajustará al desgaste mediante una relación funcional. Para ello se realizarán

pruebas de campo en la propia unidad minera con la finalidad de corroborar esta relación funcional y obtener una ecuación que se alinee al desgaste. Además, se realizarán simulaciones donde se analizará de forma rápida y precisa el comportamiento de los minerales dentro de los molinos, con el objetivo de determinar los puntos críticos de desgaste de los revestimientos.

## **Alcance**

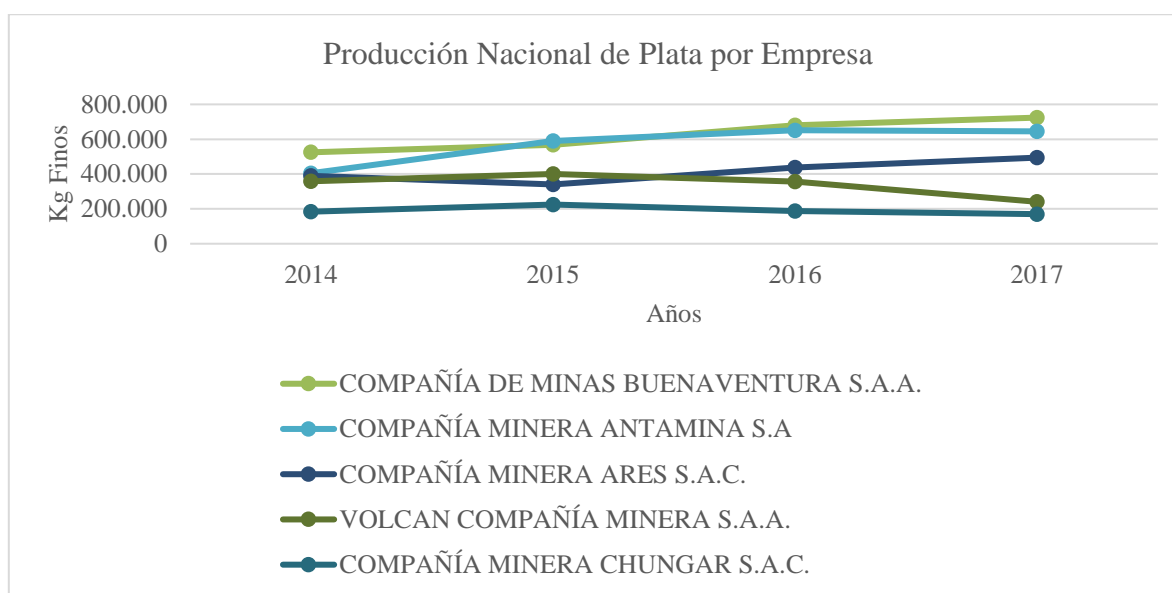
El presente trabajo comprende el estudio del desgaste de los revestimientos de un molino semiautógeno primario ya que, por motivos de operación, disponibilidad y grado de desgaste de sus revestimientos, lo convierte en un equipo en el cual se le debe poner mucho énfasis para poder solucionar el grave problema que es originado por no contar con un sistema de control y monitoreo automatizado del desgaste de sus revestimientos. Además, no se incluyen estudios de esfuerzos ni deformaciones mecánicas sobre los revestimientos ni algún otro componente del molino.

Por la complejidad del estudio de todos los revestimientos de un molino semiautógeno, el presente trabajo se enfocará en analizar únicamente los puntos críticos con los mayores desgastes. Estos puntos críticos serán fijados en base a data histórica del consumo de revestimientos y mediante simulaciones funcionales de baja complejidad, ya que este factor no es objetivo de la presente tesis.

El presente trabajo abarcará la etapa de prototipado, en la que se dispondrá de sensores de fuerza comerciales y un circuito elemental, con el cual se obtendrá la ecuación funcional que relacione las fuerzas de impacto con el grado de desgaste de los revestimientos. En base a los resultados obtenidos se realizará un sistema de control y monitero del desgaste de los revestimientos con un grado de complejidad mayor que ayude a mejorar el procesamiento de la señal y un mejor testeo de los datos obtenidos.

## Antecedentes

Con el paso de los años se ha demostrado que la minería peruana es un sector en desarrollo, pues para el 2017 representó el 1° lugar en reservas de Plata y 3° lugar en reservas de Cobre y Zinc a nivel mundial, siendo así una plaza atractiva para distintas empresas e inversionistas mineros [4]. Además, para el mismo año, la minería representó aproximadamente el 10% del PBI Nacional y cerca del 62% del valor total de las exportaciones, siendo el mayor generador de divisas para el país [5].



**Figura 0.1** Producción Nacional de Plata por Empresa [6]

Fuente: Ministerio de Energía y Minas. Anuario 2017

En la actualidad, la creciente demanda del sector minero ha permitido posicionar a compañías mineras como Buenaventura en la lucha del liderato de producción de Plata, ubicándolo en el 2° lugar a nivel mundial y en el 1° lugar a nivel latinoamericano [7]. El último informe de producción de plata del Ministerio de Energía y Minas que abarca los últimos 4 años, refleja claramente cómo la empresa en mención se ha posicionado en el primer lugar, dejando atrás a importantes compañías mineras [6].

Dentro de las principales unidades mineras que han permitido posicionar a Buenaventura en el liderato de producción tenemos a la Unidad Minera Uchucchacua, la cual ocupa el 3° lugar a nivel mundial y 1° lugar a nivel nacional en producción de plata, con una



capacidad de tratamiento de 3,910 toneladas métricas diarias de concentrado de Plomo, Zinc y Plata [7].

Uno de los equipos de mayor inversión en una planta minera son los molinos, los cuales varían por su costo y operación. Estos molinos operan con revestimientos de acero fundido y/o goma cerámica, actuando como elementos de protección en el proceso de molienda [8]. La vida útil de estos revestimientos depende básicamente del desgaste que se produce en dicho proceso, siendo este un factor que recae directamente en los costos de operación y los objetivos de la compañía [9].

La Unidad Minera Uchucchacua cuenta con dos circuitos de producción: Circuito 1 y circuito 2, los cuales tienen una capacidad de producción de 2,810 y 1,100 toneladas diarias respectivamente [10]. Ambos circuitos presentan un serio problema de disponibilidad de los equipos, ya que la labor de mantenimiento a los molinos influye de manera negativa en las horas laborales de los equipos y por ende a la producción de la planta.

Debido a que los equipos de una planta minera son altamente críticos, se realizan paradas de planta mensuales con el objetivo de asegurar su disponibilidad. En la siguiente tabla se presentan los indicadores de confiabilidad para los molinos pertenecientes al circuito 1 y 2 del mes de marzo del 2018 de la unidad Minera Uchucchacua.

FLOTA		Horas de trabajo programadas (horas)	Horas disponibles (horas)	Horas trabajadas (horas)	Tiempo medio de reparación (horas)	Tiempo medio entre fallas (horas)	Disponibilidad Mecánica (%)	Utilización Efectiva (%)
<b>Circuito 1</b>	<b>Molienda</b>	744	531	355.239	9.2	498	71.3	66.9
<b>Circuito 2</b>	<b>Molienda</b>	744	738	680.78	2.2	693	99.1	93.1

**Tabla 0.1** Indicadores de producción de los molinos convencionales de la unidad Minera Uchucchacua [11]

Fuente: Datos del mes de marzo para el año 2018. Compañía Minera Buenaventura

En la tabla mostrada, se refleja claramente que los molinos pertenecientes al circuito 1 solo fueron aprovechados en un 66% de las horas disponibles, resultando una pérdida del 34% de las horas laborables. Este tiempo en el cual los equipos estuvieron detenidos, fue

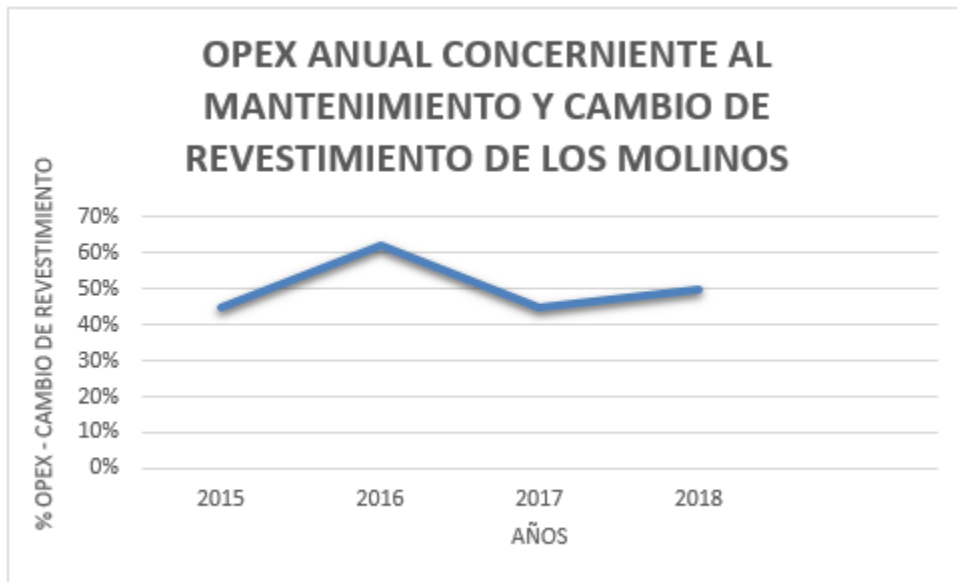
utilizado en su mayoría para la evaluación del desgaste de los revestimientos y el recambio de los mismos. Por su parte, para el circuito 2, el tiempo muerto de inoperancia fue menor, llegando a representar el 8% de las horas disponibles. Cabe resaltar que el porcentaje de tiempo muerto para el circuito 2 fue considerablemente menor debido a que los equipos ya habían entrado en mantenimiento el mes anterior y a pesar de ello aún tenían indisponibilidades por los mismos problemas mencionados en el circuito 1 [11].

Es por este gran problema que bibliográficamente se han publicado y propuesto modelos de naturaleza empírica que ayuden a determinar el desgaste y la vida útil de los revestimientos, sin la obtención de resultados positivos que ayuden a predecir el recambio adecuado y horas de mantenimiento óptimas en relación al grado de desgaste. Uno de estos modelos fue el propuesto por Marco Antonio Arratia Henríquez, que consistía en el desarrollo de un modelo matemático, utilizando metodologías estadísticas para evaluar los datos observados del desgaste y el tonelaje, prediciendo y estimando el tiempo de vida útil de los revestimientos [12]. Otro de los modelos fue propuesto por Marco Antonio Maquera Frisancho, que consistía en optimizar el mantenimiento en el cambio de revestimientos, recopilando información técnica para elaborar una codificación de criticidad y con ello elaborar un mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) [13].

A diferencia de los modelos e investigaciones previas mencionados, la presente investigación abarcará el diseño de un sistema de control y monitoreo a tiempo real, en el cual no se tenga la necesidad de realizar paradas al equipo y se logre saber con exactitud y precisión el grado de desgaste de los revestimientos.

## **Justificación y motivación**

De acuerdo al OPEX anual presupuestado por la Compañía Minera Buenaventura concerniente a los últimos 4 años, que corresponden a los gastos por mantenimiento de la planta concentradora de la unidad minera Uchucchacua, aproximadamente el 50% del total representan gastos por el cambio de los revestimientos, mantenimiento y monitoreo manual, como se puede observar en la siguiente figura:



**Figura 0.2** OPEX Presupuestado al 2018 para el mantenimiento y cambio de revestimientos [14]

Fuente: Datos desde al año 2015 hasta el 2018. Compañía Minera Buenaventura

Este alto porcentaje de presupuesto destinado al mantenimiento y cambio de revestimientos de los molinos, representa un problema que afecta directamente a los costos operacionales de la empresa. Además, aun habiéndose cambiado de distribuidora de revestimiento para el año 2016, los costos por cambio y mantenimiento de los mismos siguen siendo considerablemente altos [14].

La problemática en estudio motivó la formulación de un nuevo sistema empírico, basado en una relación funcional del desgaste y las fuerzas de impacto ejercidas sobre el revestimiento, que permita estimar la vida útil de los revestimientos y el monitoreo constante de su desgaste mediante un sistema automatizado de control en línea.

Este sistema permitirá controlar y monitorear el desgaste de una forma más rápida, precisa y segura para el operario y técnico mecánico, quien no tendrá que hacer el monitoreo de manera manual.

Así mismo, en comparación a las técnicas actuales de control y monitoreo de revestimientos, el sistema en estudio permitirá que las labores de mantenimiento presenten menores costos debido a que no se tendrá la necesidad de que un técnico mecánico realice la inspección manual a los revestimientos mediante mantenimientos programados, ya que se

tendrá un control constante del desgaste [15]. Además, sabiendo con exactitud el grado de desgaste, los mantenimientos para el cambio de revestimientos se realizarán en el tiempo adecuado evitando cambios prematuros y/o tardíos de los mismos.

Actualmente cerca del 50% del total de los costos de operación de la unidad minera Uchucchacua son destinados a la manutención y recambio de los revestimientos [14], por lo que con el presente sistema se desea reducir dichos costos a través de la eliminación de mantenimientos por labores de inspección manual, sabiendo con exactitud la frecuencia de cambio de los revestimientos para brindar una mejora directa en los costos operacionales y la producción de la compañía.

Mediante estudios realizados al área de mantenimiento de plantas mineras tradicionales, se comprobó que aproximadamente el 75% del número total de los paros se debieron a las actividades de mantenimiento realizadas a los revestimientos de los molinos, mientras que el porcentaje restante se debió a otras actividades [16]. Es por ello que con la implementación de este nuevo sistema se aumentará la producción, ya que se reducirán los mantenimientos realizados a los revestimientos en un 20%, aumentando las horas de operación de los equipos y estableciendo así una disponibilidad mecánica mayor al 80%. Con ello se tendrá más horas de operación del equipo y por ende mayores ingresos.

Además, con el sistema en estudio se evitarán los cambios prematuros y tardíos de los revestimientos pues se sabrá con exactitud cómo se desarrolla el desgaste, teniendo como resultado una estimación real de su vida útil. Finalmente, se reducirá el consumo excesivo de energía por parte del molino, la cual se origina por un mal funcionamiento de los revestimientos.

En comparación a los mantenimientos tradicionales, se tendrá una mejora significativa, puesto que el sistema propuesto será de uso simple y automatizado. Un sistema amigable para que todo personal que labora en la planta minera lo pueda utilizar.

Por otro lado, debido a que todos los componentes que se utilizaron para el desarrollo del sistema funcional son comerciales; el cambio de los mismos, ya sea por motivo de falla o desgaste, no traerá consigo un problema que impida su funcionamiento constante.

Generalmente el tiempo de durabilidad de unos revestimientos tiene un promedio de 3 a 6 meses dependiendo de las horas de operación y el tipo de mineral a tratar. A través de este sistema se espera que los cambios de los revestimientos sean en los tiempos puntuales donde la durabilidad del revestimiento haya llegado a su límite, eliminando cambios prematuros o tardíos de los mismos.

## **Objetivo general**

Proponer un sistema de control y Monitoreo a tiempo real del desgaste de los revestimientos de los molinos convencionales de la Unidad Minera – Uchucchacua mediante sensores de fuerza.

## **Objetivos específicos**

- Realizar simulaciones funcionales y análisis de impacto para la determinación de puntos críticos de mayor desgaste de los revestimientos, así como el prototipado de un sistema mecánico que asegure el buen funcionamiento del sistema de control y Monitoreo.
- Desarrollar un circuito automatizado con sensores de fuerza que determine la relación funcional entre las fuerzas de impacto generada en lo revestimientos y su ciclo de desgaste.

# CAPÍTULO I

## MARCO TEÓRICO

### 1.1 Investigaciones referentes al control y monitoreo de los revestimientos

La gran importancia de controlar y monitorear el desgaste de los revestimientos en molinos convencionales, ha traído consigo el desarrollo de diversas investigaciones en el ámbito global y nacional con el único fin de buscar un sistema o modelo que ayude a estimar el desgaste de los revestimientos, el cual viene a ser un elemento crítico para el correcto funcionamiento de un molino. En la **Tabla 1.1** se muestra las diferentes investigaciones, tesis de pregrado e innovaciones que han desarrollado una metodología para predecir la vida útil, cambio y mejora de los revestimientos.

Estas investigaciones han demostrado que en la actualidad sigue existiendo una clara necesidad por solucionar los inconvenientes o fallas operacionales que puede traer consigo un mal funcionamiento de los revestimientos. Las presentes investigaciones, se basan en el concepto teórico e ideal del funcionamiento de los molinos convencionales proponiendo modelos de control, utilizando herramientas estadísticas y de mantenimiento, las cuales no se ajustan al desgaste real y la vida útil de los revestimientos.

INVESTIGACIÓN	DESCRIPCIÓN	TIPO DE TECNOLOGÍA	DOCUMENTO	AÑO	ALCANCE	REFERENCIA
“Optimización del ciclo de vida de los forros del cilindro en un molino de bolas 8' x 10 de 2000 TMSD”	Optimizar el ciclo de vida de los revestimientos de un molino primario, utilizando aleaciones con mejores características de resistencia a la abrasividad	Manufactura de revestimientos	Tesis de Pregrado – Universidad Nacional de Ingeniería	2014	Demostó el cambio de aleación y composición química de los revestimientos, Logrando incrementar su vida útil.	[17]
“Optimización del mantenimiento en el cambio de los forros en el molino Fuller de la empresa Southern Perú – Toquepala – 2015”	Optimizar el mantenimiento el cambio de los revestimientos de un molino, mediante el uso de herramientas estadísticas y aumento de personal.	Mantenimiento basado en la confiabilidad	Tesis de Pregrado – Universidad Nacional del Altiplano	2015	Analizó el sistema de la empresa; posteriormente con el conocimiento y la recopilación de dato, elaboró la codificación de la criticidad de los revestimientos, de tal manera que se puede realizar mantenimientos centrados en la confiabilidad	[13]
“Diseño y simulación de manipulador para forros de acero aplicados en molinos convencionales”	Diseño y simulación de un manipulador automatizado para reducir los tiempos de cambio y mantenimiento de revestimientos.	Automatización	Tesis de Pregrado - Universidad Nacional del Altiplano.	2018	Logró optimizar la manutención de los molinos reduciendo los cambios de revestimientos y costos operacionales.	[18]
“Modelo matemático para la estimación de la vida útil de revestimientos en molinos semiautógenos”	Desarrollo de un modelo matemático, utilizando algoritmos programables y matemática estadística, la cual permita estimar el desgaste de los revestimientos.	Modelo matemático	Tesis de Pregrado – Universidad Austral de Chile	2015	Diseño y desarrollo un modelo matemático, mediante estadística descriptiva y algoritmos programables para estimar la vida útil de los revestimientos.	[12]

**Tabla 1.1** Investigaciones referentes al control y monitoreo de los revestimientos

Fuente: Elaboración propia en base a [17], [13], [18] y [12]

## **1.2 Control de revestimientos en las principales mineras del Perú**

Históricamente se ha demostrado que todas las Unidades Mineras aplican diversos métodos para el control y cambio de revestimientos de sus molinos. Estos criterios van desde un simple modelo estadístico basado en la confiabilidad, hasta la utilización de sensores de gran costo y tecnología. Teóricamente el cambio de los revestimientos o placas se realiza una vez que estos hayan alcanzado el desgaste máximo admisible.

La presente tabla brinda a detalle los procedimientos estándar para el control de desgaste de los revestimientos mediante inspecciones ultrasónicas, varillas de perfiles, herramientas de mantenimiento y modelos matemáticos. Mediante el análisis obtenido con los controles mencionados, se estima la integridad estructural de los revestimientos y se planifica en forma aproximada las fechas de detención por cambio de revestimientos.

Es de suma importancia resaltar que dichos controles se realizan a intervalos de tiempo irregulares, cuando algún mecanismo o sistema anexo al funcionamiento del molino falle. En teoría, estas mediciones del desgaste y vida útil de los revestimientos son realizados en zonas que sufren el mayor desgaste.



COMPAÑÍA MINERA	UNIDAD MINERA	TIPO DE MINA	TIPO DE MINERAL QUE PROCESA	UBICACIÓN	TONELAJE DE PRODUCCIÓN	MÉTODO DE CONTROL Y MONITOREO PARA SUS REVESTIMIENTOS	PÉRDIDA POR HORA DE PARADA DE LA PLANTA (USD \$)	REFERENCIA
<b>Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.</b>	Uchucchacua	Subterránea	Plata, Plomo y Zinc	Oyón – Lima, a 252 Kilómetros de Lima	3,910 TMD	Control manual mediante varillas de medición y punzones que miden el espesor de desgaste.	USD\$ 45,000	[10], [19]
<b>Southern Copper</b>	Toquepala	Tajo Abierto	Cobre y Molibdeno	Sur del Perú, a 870 Kilómetros de Lima	60,000 TMD	Control mediante un análisis de confiabilidad centrado en el RCM	USD\$ 55,000	[20], [21]
<b>Volcan Mining Company</b>	Chungar	Subterránea	Cobre, Plomo y Zinc	Pasco, a 2019 Kilómetros del Este de Lima	5,500 TMD	Control manual, mediante varillas y punzones que se encargan de medir el espesor de desgaste de los revestimientos.	USD\$ 50,000	[22], [23]
<b>Freeport – McMoran Copper and Gold</b>	Cerro Verde	Tajo Abierto	Cobre y Molibdeno	Sur, Este de la ciudad de Arequipa	174,500 TMD	Control automatizado mediante sensores de ultrasonido en el cual se analiza de manera puntual las zonas de mayor desgaste, deteniendo el equipo por breves periodo de tiempo. Además se realiza un control basado en la ingeniería de la confiabilidad (RCM).	USD\$ 60,000	[24], [25]
<b>Hudbay</b>	Constancia	Tajo Abierto	Cobre, Molibdeno y Plata	Sur, Este de los Andes del Perú, Distrito de Liviataca.	80,000 TMD	Control automatizado mediante sensores de ultrasonido, analizando los puntos más críticos de desgaste.	USD\$ 60,000	[26], [27]

**Tabla 1.2** Control de Revestimientos en las principales mineras del Perú

Fuente: Elaboración propia en base a [10], [20], [22], [24], [26], [19], [21], [23], [24], [26], [27]

## **1.3 Proceso de Molienda**

### **1.3.1 Descripción del Área de Molienda**

Los molinos convencionales son fundamentales en el proceso de concentración, tratamiento y conminución de minerales. Actualmente, las nuevas plantas son diseñadas basándose en sus ventajas de costos de inversión y operación en el proceso de molienda; la cual, por sus dimensiones de gran tamaño, tienen una capacidad de carga y tratamiento que va creciendo con el avance de la tecnología. Los molinos convencionales se caracterizan por su gran capacidad y eficiencia, acortando el proceso de chancado y permitiendo ahorros sustanciales en operaciones de gran escala [28].

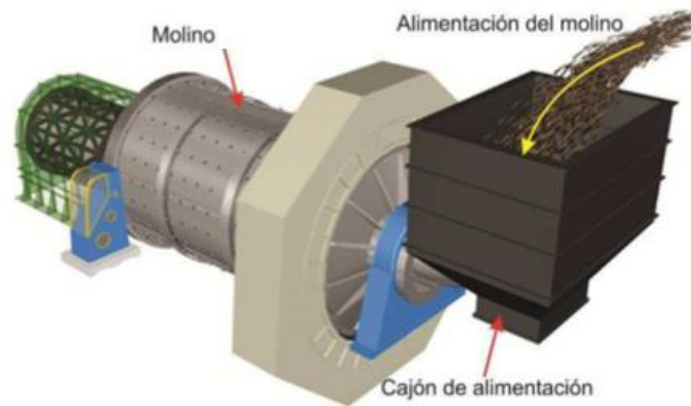
La molienda es la última etapa del procesamiento de conminución de mineral, la cual es antecedida por el área de chancado y precedida por el proceso de flotación o lixiviación de minerales; siendo la más intensiva en consumo de energía, llegando a consumir aproximadamente el 80% del total de electricidad de todos los procesos de operación de una planta minera [28].

La etapa de molienda recibe alimentación de minerales procedente de las chancadoras, para luego ser mezclada con agua y lechada de cal. Este proceso se realiza en molinos de forma cilíndrica que giran alrededor de su eje horizontal. La potencia de dichos equipos es suministrada por transmisiones de engranajes o por un anillo estator de inducción. Dicha potencia es transferida a la carga por acción de los revestimientos. La carga contiene generalmente cuerpos sueltos de molienda y rocas de mineral, las cuales se encuentran libres de moverse a medida que el molino gira, produciéndose la conminución de las partículas de mineral [29].

### **1.3.2 Principios de Operación**

Las partículas sólidas de mineral entran al molino en forma de pulpa, pasando por la zona de acción, donde son sometidas a tensiones mecánicas del equipo. Dichas tensiones se convierten en energía la cual toma dos caminos: En primera instancia, son absorbidas

internamente por las partículas en forma de energía de deformación, dependiendo de cada mineral, para dar lugar a la fracturación. La energía restante es disipada en forma de calor [30].



**Figura 1.1** Procedimiento de Operación de un Molino Convencional

Fuente: Segovia, Rodrigo. Reemplazo óptimo de componentes sujetos a desgaste bajo la realización de inspecciones periódicas [30]

La molienda tal como se muestra en la **Figura 1.1**, se realiza en molinos de forma cilíndrica que giran alrededor de un eje horizontal y que contienen una carga de cuerpos sueltos que actúan como cuerpos Molturantes conocidos como “Medios de Molienda”, los cuales pueden ser bolas o barras. Estos elementos están libres para moverse a medida que el molino gira, produciéndose la molienda del mineral. En el proceso de molienda, partículas de 5 a 250 mm son reducidas en tamaños de 10 a 300 micrones aproximadamente dependiendo del tipo de operación, concentración del mineral, tonelaje tratado, precio y ley de los minerales. Todos estos factores son estudiados con la única finalidad de realizar un análisis de Costo – Beneficio y así poder determinar si el proceso de molienda será rentable [31].

La finalidad principal del área de molienda es ejercer un control estrecho en el tamaño del producto y por esta razón frecuentemente se dice que una molienda bien hecha es la clave y el punto de partida de una buena recuperación de la especie útil, ya que con ello resulta más asequible separar el mineral de interés (Mena) del mineral estéril (Ganga). Trayendo consigo el buen desarrollo de la operación [28].

### 1.3.3 Reducción de Tamaño de Mineral

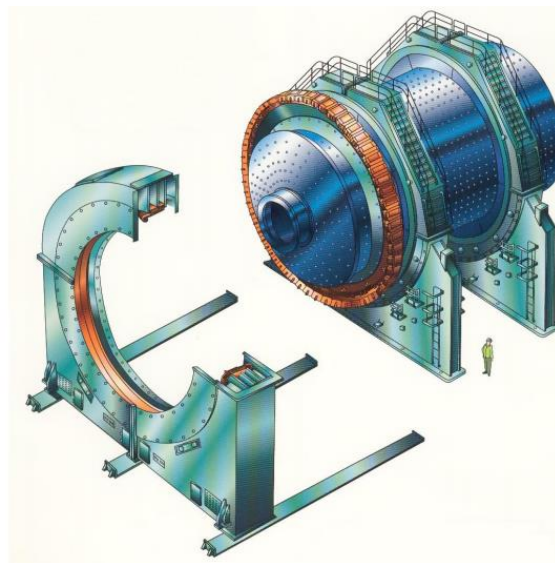
La molienda es una operación unitaria que se define como la reducción de tamaño de partículas sólidas a partir de la aplicación de fuerzas mecánicas (impacto y abrasión), las cuales provocan la fracturación o quebrantamiento del mineral con el objetivo de ayudar al siguiente proceso que viene a ser el tratamiento del mismo. La etapa de molienda es la última del proceso de conminución o fragmentación de las partículas de mineral, donde la reducción del tamaño dependerá del tipo de proceso que se realiza [32]:

Tipo de Proceso	Tamaño de Salida
Molienda gruesa	$\cong 1 - 2 \text{ mm}$
Molienda Fina	$\cong 200 - 500 \mu\text{m}$
Molienda Ultrafina	$\cong 50 - 100 \mu\text{m}$

**Tabla 1.3** Clasificación según el tipo de proceso

Fuente: Alcántara, J. Diseño práctico de un molino de bolas [32]

La fragmentación del mineral se realiza en el interior de equipos cilíndricos rotatorios de acero, a los que se conoce con el nombre de molinos giratorios o simplemente molinos.



**Figura 1.2** Molino convencional de 6.5m de diámetro y 9.7m de longitud

Fuente: Alcántara, J. Diseño práctico de un molino de bolas [32]

Es en dicho equipo donde se realizan las operaciones unitarias en la que los tamaños medios de los minerales son reducidos por la aplicación de fuerzas de conminución. El proceso de reducción de tamaño (etapa de molienda), se caracteriza por ser un proceso con rendimientos energéticos muy bajos, ya que gran parte de la energía que se utiliza es disipada en forma de calor, vibración y ruido [33].

## **1.4 Tecnología de los Molinos**

### **1.4.1 Componentes del Molino**

Un molino convencional presenta diferentes elementos o sistemas, los cuales cumplen la función principal de asegurar el correcto proceso de molienda del mineral. En el siguiente apartado se detallan los principales componentes que ayudan a operar de manera correcta un molino [13]:

- **Cuerpo del molino**

El casco o cuerpo del molino está diseñado para soportar impactos de carga pesada, la cual se origina por las fuerzas de conminución y el mineral propio. Es el elemento de mayor dimensionamiento de un molino y está construido en base a placas de acero forjado, las cuales pueden ser de varios tipos de aleación, dependiendo del trabajo que realicen. El cuerpo del molino está instalado sobre dos chumaceras o dos cojinetes macizos, los cuales cumplen la función de soporte del molino.

- **Chumacera**

Las chumaceras son elementos que se comportan como soporte del cuerpo del molino y a la vez la base sobre la que gira el mismo. La principal función de una chumacera radica en absorber todas las vibraciones que se producen por la operación del molino.

- **Tapas**

Las tapas de los molinos al igual que las chumaceras, brindan soporte al cuerpo y son los elementos por donde se produce la carga y descarga de mineral. Es en estos elementos es donde se produce un mayor desgaste del revestimiento y fractura constante de los pernos

de sostenimiento debido a esfuerzos cortantes. La tapa de descarga es la que se encuentra unida al trunion.

- Revestimientos

Los revestimientos sirven para la protección del cuerpo y la tapa del molino. Además, resisten al impacto de los cuerpos de molienda y el mineral propio. Un revestimiento en perfecto estado, asegura el adecuado funcionamiento del equipo, mientras que un revestimiento desgastado puede provocar un consumo excesivo de energía y paradas de equipo constante. Los pernos que sostienen a dichos elementos generalmente son de acero de alta resistencia a la tracción.

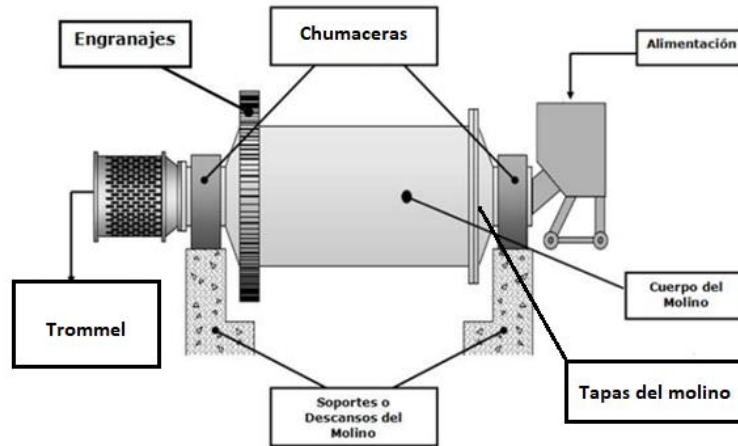
- Trunion de descarga

El trunion es el conducto de descarga de la pulpa de mineral, el cual en muchas ocasiones está unido a un hidrociclón con la finalidad de recircular la carga de mayor tamaño, la cual aún no ha alcanzado el tamaño deseado. Es por esta parte donde se alimentan los medios molturantes sin la necesidad de parar el equipo.

- Trommel

El trommel desempeña un trabajo de retención de las bolas, especialmente de aquellos que por excesivos trabajos han sufrido demasiado desgaste. Trabaja como una malla que impide el paso de bolas a la siguiente etapa de procesamiento. De igual modo sucede con el

mineral muy duro que no ha podido ser molido completamente por tener una granulometría considerable.



**Figura 1.3** Partes principales en un molino convencional  
Fuente: Elaboración propia en base a [13]

## 1.4.2 Cuerpos de Molienda

Los molinos convencionales requieren el empleo de elementos que favorezcan el trabajo de molienda y le resulte más fácil la trituration o conminución del mineral. Estos elementos o cuerpos moledores que cumplen la función principal de trituration suelen ser:

- **Barras**

Están fabricadas de acero con alto contenido en carbono o en ciertos casos de aleación. Estos elementos poseen un elevado límite elástico, el cual evita que se tuerzan impidiendo que se rompan o se traben con otras barras. Los molinos de barras se utilizan para moliendas más gruesas; actualmente existen pocas minas que utilizan un molino de barras ya que el mantenimiento y recambio de cuerpos pueden ser muy costosos [34].



**Figura 1.4** Medio Molturantes en forma de Barras  
Fuente Anónimo. Nodular cast Iron Bar [35]

- **Bolas**

Están fabricadas de acero de fundición, acero forjado y/o en su mayoría son de aleación al bajo Cromo para ser resistentes al desgaste por impacto o aleación con Níquel, para ser resistentes a la abrasión. En ocasiones no son esféricas, sino que toman formas cilíndricas, cónicas, etc. Los molinos de bolas son empleados para molienda fina y actualmente son los que se encuentran en la mayor cantidad de minas peruanas [36].



**Figura 1.5** Medio Molturante en forma de bola  
Fuente: Moly Cop. Productos para Minería [37]

- **Mineral Propio**

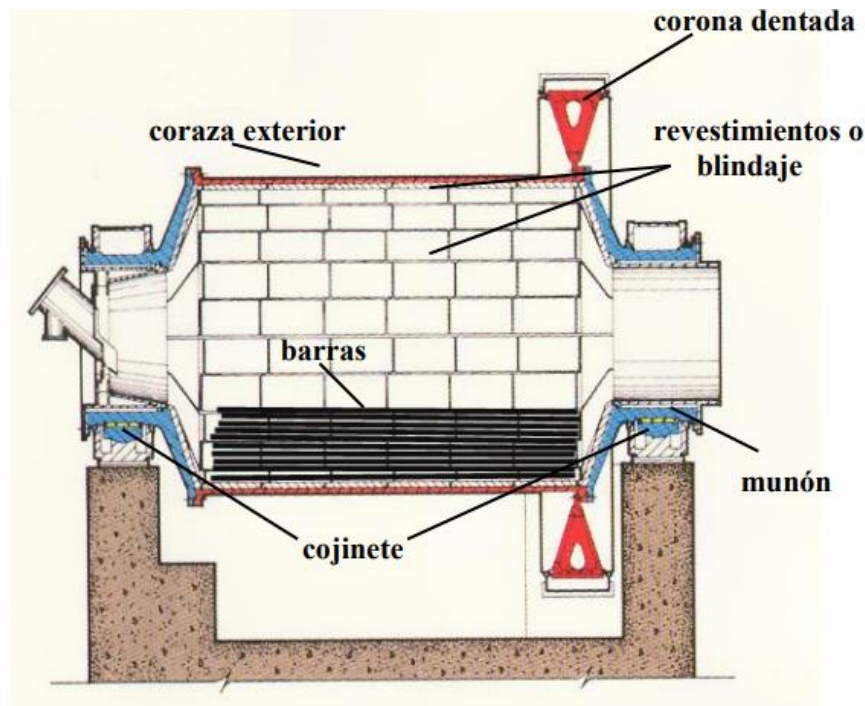
Existen molinos donde el propio mineral es el medio molturante. A este tipo de molinos se les conoce como molinos autógenos. Existen molinos donde se ha llegado a utilizar cuerpos de porcelana para molienda ultrafina, donde se pretende evitar la contaminación a causa del desgaste del acero de las bolas y/o barras [12].



### 1.4.3 Tipos de Molinos

#### 1.4.3.1 Molino de Barras

Este equipo presenta en su interior barras de acero que actúan como medio de molienda. Este molino gira con el mineral proveniente de la chancadora terciaria, que llega constantemente por medio de una faja transportadora. El mineral se va moliendo por la acción del movimiento de las barras, las cuales caen sobre el mineral. Generalmente el mineral molido por la acción del molino de barras, es alimentado hacia un molino de bolas con el objetivo de seguir reduciendo el tamaño del mineral [38].

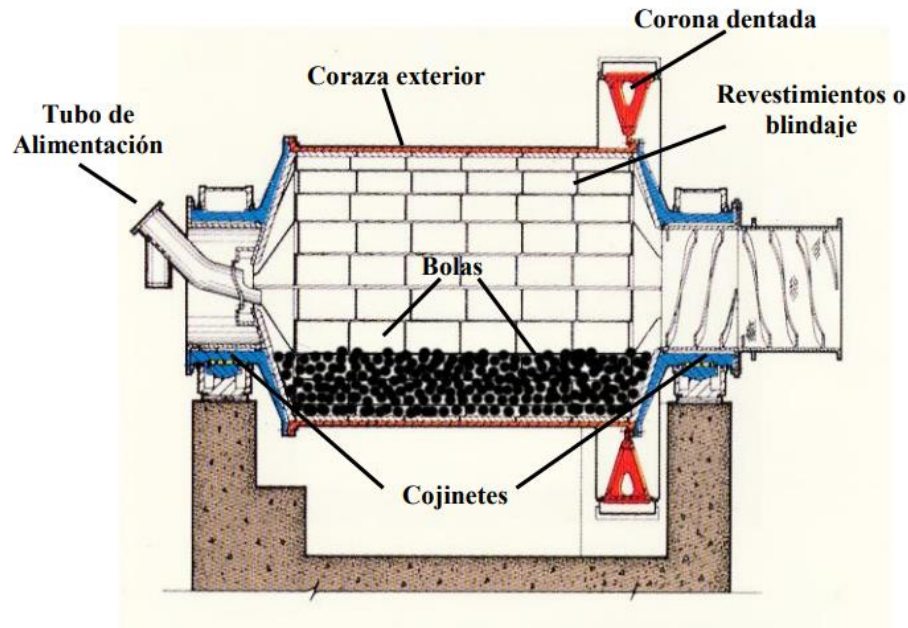


**Figura 1.6** Molino de barras  
Fuente: Anónimo. Electiva Metalúrgica [38]

#### 1.4.3.2 Molino de Bolas

Considerada como la representante de la molienda fina. Es en este tipo de molino donde el mineral pasa por la etapa final de conminución, siendo reducido por la acción de bolas de acero. Estas bolas deben ser lo suficientemente grandes para moler las partículas más grandes y duras del mineral. Para un molino de bolas, los medios de molienda ocupan

aproximadamente el 35% de la capacidad total del molino. Cabe resaltar que la molienda por bolas está perdiendo camino con relación a la creciente demanda de los molinos semiautógenos [39].

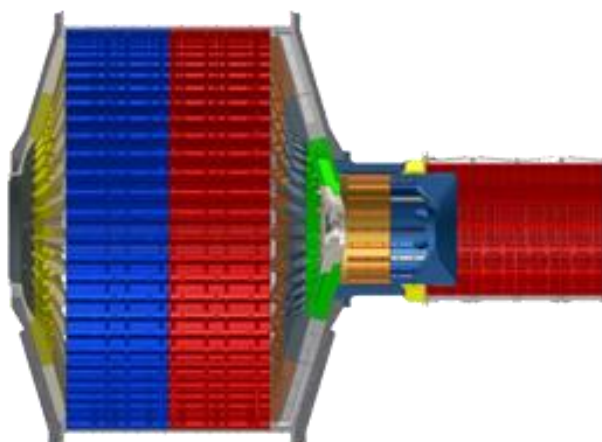


**Figura 1.7** Molinos de bolas

Fuente: Serrano Jiménez La molienda es la última etapa del proceso de conminución o fragmentación para la reducción del tamaño de las partículas [39]

### 1.4.3.3 Molinos SAG y AG

La instalación de los molinos SAG y AG constituye una innovación reciente en algunas plantas mineras. Los molinos SAG (Semi autógenos) son equipos de grandes dimensiones (40 x 22 pies y siguen en aumento) y con una mejor operación que los molinos de barras. Gracias a su gran capacidad y eficiencia mecánica, reducen las etapas de chancado y molienda. Ambos tipos de molinos son considerados autógenos, pues toda la acción de molienda es realizada por el propio mineral por la acción de frotación entre las partículas de mineral. En los molinos completamente autógenos no existen bolas de molienda de acero, mientras que en los molinos semiautógenos una porción de la molienda es autógena y la otra es realizada por acción de las bolas [39].



**Figura 1.8** Molino SAG

Fuente: Funvesa. Funvesa Fundición Ventanilla S.A – Molino SAG [40]

#### 1.4.3.4 Características de los molinos

En la siguiente tabla se muestra las características operacionales para los molinos convencionales utilizados en gran parte de las unidades mineras. En ella podemos observar las fuerzas que utilizan para la trituración del mineral, variables que las diferencian por su operación, así como las aplicaciones para las cuales son recomendadas:

TIPOS DE MOLINOS	FUERZAS	VARIABLES	CARACTERÍSTICA DE LOS EQUIPOS	ELEMENTOS MOLIENTES	APLICACIÓN
<b>Molino de Bolas y SAG</b>	Compresión y abrasión	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidad de rotación de los rodillos.</li> <li>• Velocidad de alimentación.</li> <li>• Distancia de separación.</li> </ul>	Dos o más rodillos giran uno hacia el otro.	Lisos, estriados y corrugados	Molienda gruesa e intermedia
<b>Molino de Barras</b>	Impacto y abrasión	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidad de operación.</li> <li>• Tiempo de molienda.</li> <li>• Velocidad de alimentación.</li> </ul>	Bolas grandes es fuerza de impacto. Bolas pequeñas es fuerzas de abrasión.	Bolas de acero y cerámica	Molienda Ultrafina y fina

**Tabla 1.4** Características de los molinos convencionales

Fuente: Fueyo Luis. Equipos de Trituración, Molienda y Clasificación [41]

## **1.5 Aspectos operativos de los Molinos**

### **1.5.1 Condiciones de Operación**

La acción y funcionamiento del molino está regulada por dos factores que aseguran su correcta operación. Entre ellos tenemos al proceso de molienda y transporte de material a través del cuerpo del molino. Las condiciones que regulan la operación son [42]:

#### **1.5.1.1 Zonas de Interacción**

Dependiendo de la interacción que se produce entre los medios Molturantes (barras y bolas) y la carga de mineral, las condiciones de operación de un molino pueden verse distorsionadas. A continuación, se presentan las 3 zonas que rigen dicha operación.

- **Zona de cascada**

Los medios moledores tienden a rodar suavemente produciéndose un flujo tipo cascada. Esta cascada ayuda a las afueras de conminución por abrasión, generando una gran cantidad de finos. Es importante mencionar este factor operacional, pues es aquí es donde se produce el mayor desgaste de los revestimientos por la abrasividad de los minerales.

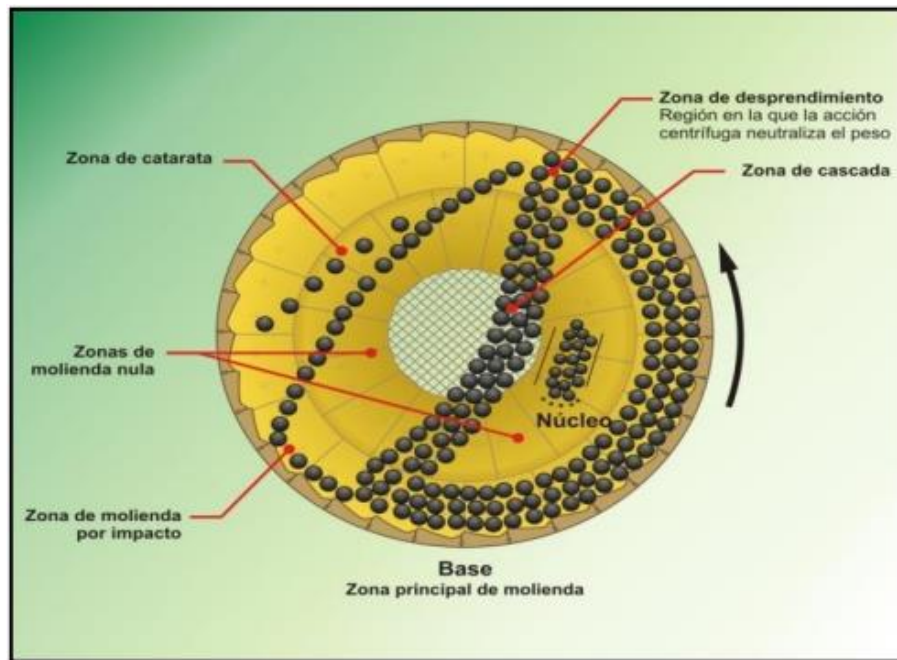
- **Zona de catarata**

Los medios moledores (barras y bolas) se separan de la carga en el punto más alto del molino y al momento de caer, desarrollando una trayectoria parabólica. Es por este factor operacional que se produce la molienda por impacto con el menor desgaste de los revestimientos. Cuando el nivel de carga presente en el molino es mínimo, el impacto de las bolas se puede producir directamente sobre el cilindro, generando ruptura de los medios moledores (bolas) y dañando gravemente a los revestimientos.

- **Zona de compresión**

La zona de compresión es generada principalmente por las fuerzas centrífugas y presión de la carga de mineral. Es en esta zona donde la presión entre las partículas de mineral, ayuda de manera sustancial para el correcto proceso de conminución. En general el movimiento de la carga y los medios molturantes en el molino, es una combinación de

movimientos de cascada y catarata y fuerzas de compresión. En el siguiente gráfico se indican las zonas anteriormente indicadas.



**Figura 1.9** Zonas de Operación de un molino de bolas convencional  
Fuente: Guzmán Rivera Levi. Metodología del Molino con fines Optimizantes [42]

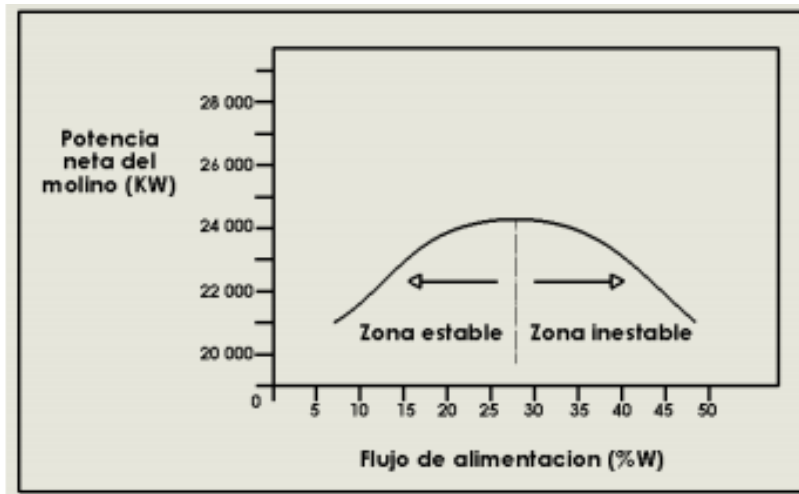
En el interior del molino es necesario el uso de revestimientos con barras levantadoras o corrugados para que se pueda dar la elevación y caída de los cuerpos molturantes (bolas), de otra forma la carga se deslizaría por la superficie del molino.

### 1.5.1.2 Carga de mineral

El grado de llenado de un molino depende de la cantidad de mineral que se le es alimentado; por lo que a mayor sea la cantidad, mayor será el volumen de la carga con que trabaja el molino. Esto se debe a que la molienda y la descarga de mineral son procesos cinéticos en los que, si las condiciones de trabajo permanecen constantes, las masas de mineral que sale del proceso de molienda debe ser proporcional a la masa presente en el

molino. Es por ello que para igualar un aumento de flujo de entrada de mineral es necesario aumentar la cantidad de elementos molidores (bolas y barras) [39].

Además, el volumen de la carga tiene un efecto directo en la potencia, ya que, a mayor volumen de carga, mayor será la potencia necesaria para moler todo el mineral presente en el interior del cuerpo del molino [29]:



**Figura 1.10** Flujo de Alimentación en relación a la potencia neta consumida

Fuente: Napier, Morell, Morrison. Mineral Comminution circuits, Operation and Optimization [29]

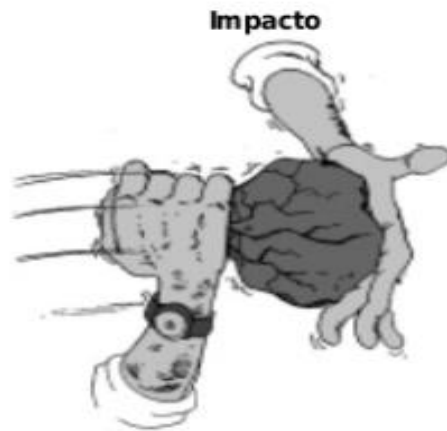
En la **Figura 1.10**, se observa que a medida que el flujo de alimentación crece, la potencia consumida se incrementa hasta llegar a un valor máximo. Un volumen de carga mayor, provocará una sobrecarga y la potencia comenzará a caer. Es en esta sobrecarga donde la intensidad de la acción de molienda se reduce y la capacidad de tratamiento del molino disminuye.

### 1.5.1.3 Fuerzas de Operación

Para que un proceso de molienda sea eficiente, la concentración de energía aplicada a la sustancia debe exceder la energía mínima requerida por el molino. Así también, se debe evitar los excesos de energía o hacerla lo más pequeña posible, ya que si no es aprovechada se pierde en forma de calor. En el proceso de molienda las partículas de mineral son reducidas de tamaño por una combinación de fuerzas [43]:

- Impacto

Ocurre cuando la energía aplicada es sobreexcedida de la necesaria para fracturar la partícula. El resultado de dicha fuerza es un gran número de partículas con un amplio rango de tamaños.

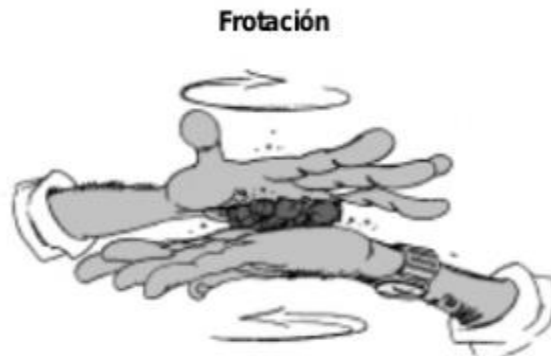


**Figura 1.11** Fuerzas de Impacto en partículas de mineral

Fuente: Gabriel Barrientos, Luis Espejo. Evaluación de las cargas de impacto en el interior de un molino [43]

- Abrasión

Ocurre cuando la energía aplicada es insuficiente para causar fractura significativa en la partícula. Es aquí cuando ocurren tensiones localizadas resultando fracturas en áreas de superficies pequeñas, dando como resultado una distribución de las partículas.

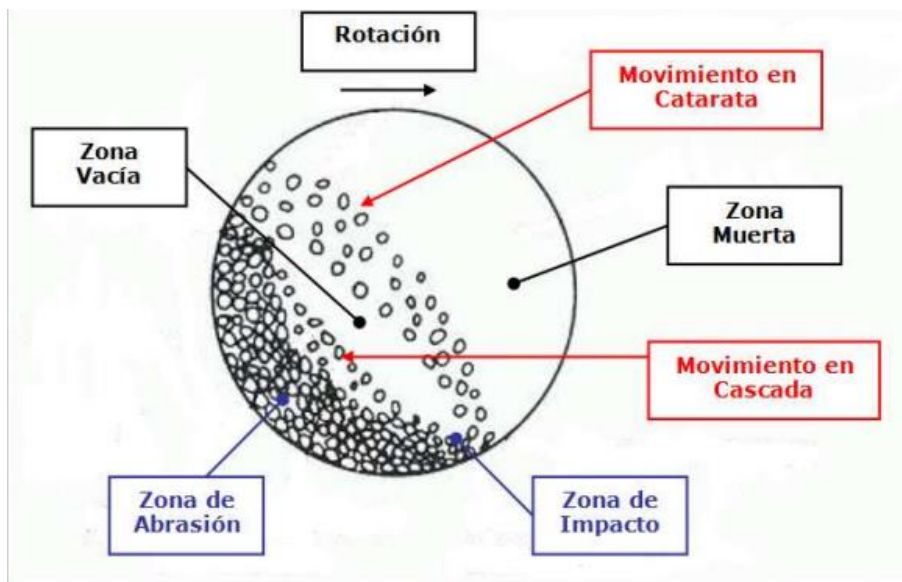


**Figura 1.12** Fuerzas de abrasión en partículas de mineral

Fuente: Gabriel Barrientos, Luis Espejo. Evaluación de las cargas de impacto en el interior de un molino [43]

#### 1.5.1.4 Velocidad de giro de los molinos

Una característica que define a los molinos giratorios es el uso de cuerpos de molienda que son grandes y pesados con relación a las partículas de mineral, pero pequeños con relación al volumen del molino, ocupando menos de la mitad del volumen (aproximadamente entre 40% a 50% del volumen total). Cuando el molino gira, los medios molidores son elevados, cayendo en cascada y en catarata sobre la superficie libre de los otros cuerpos. A velocidades relativamente bajas, los medios de molienda tienden a rodar hacia el pie del molino, lo que definimos anteriormente como cascada y la conminución que ocurre es netamente abrasiva. A velocidades mayores, los cuerpos de molienda son proyectados sobre la carga, describiendo una trayectoria parabólica antes de aterrizar al pie de esta última. Este tipo de caída en forma de catarata produce conminución por impacto con menos desgaste del revestimiento [31].



**Figura 1.13** Principios de Operación de un molino de bolas y SAG

Fuente: Cleary, W. Charge Behaviour and power consumption in ball mills [31]

#### 1.5.2 Condiciones de Mantenimiento

La posibilidad de una mejora en la actividad de cambio de revestimientos es muy amplia y diversificada. Es por ello que la innovación de nuevos mecanismos o métodos de control de desgaste resulta de suma importancia para las unidades mineras. La manutención



de un proceso de molienda puede ser un trabajo arduo, además de extenso (por sobre las 60 horas semanales) y peligroso debido a la manipulación de pernos y de revestimientos que pueden pesar por encima de los 100 kilos. Si a ello se le suma que no se tiene o posee un proceso de control automatizado, el problema se acrecienta.

Dentro de los aspectos que se debe tomar en cuenta al momento del cambio de revestimientos, están el orden, reubicación de los revestimientos gastados y su retiro de la planta. Actualmente muchas mineras esperan que algún elemento falle con la finalidad de que solo en ese instante se pueda realizar un mantenimiento adecuado según sea lo indicado. Es por ello que resulta importante resaltar la importancia de un mantenimiento preventivo y predictivo que asegure el funcionamiento continuo de los equipos bajo una premisa en especial: Mayor hora de operación es significado de mayor ingreso para la compañía [44].

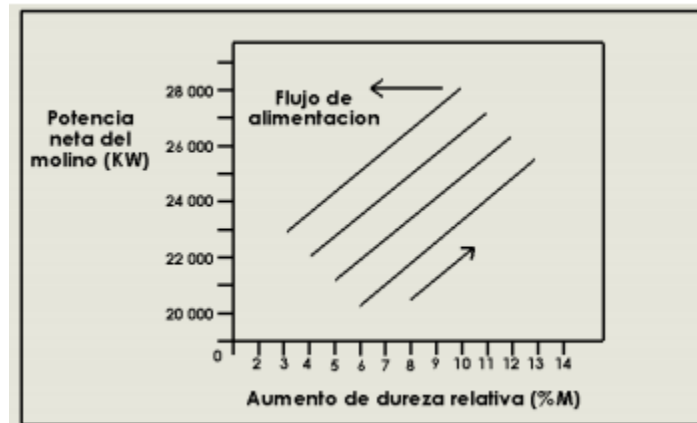
## **1.6 Características de los minerales**

### **1.6.1 Densidad y viscosidad del mineral**

Ambas definiciones de densidad y viscosidad están completamente ligadas, ya que presentan una relación directamente proporcional. Estos factores no pueden ser medidos en cada etapa del proceso de molienda, pues el único lugar donde se controla la densidad de la pulpa de mineral es en la descarga del molino. Es importante resaltar la densidad del mineral ya que este valor cambia a la entrada y salida del molino. La retención de agua en el molino es prácticamente menor que los sólidos finos, de allí que la densidad de la pulpa sea mayor en la descarga. Este factor se relaciona directamente con el desgaste de los revestimientos, pues a mayor sea la densidad de la carga de mineral, mayor será su desgaste. Además, se produce un aumento de potencia debido al crecimiento de la masa del molino. En conclusión, una pulpa o carga de mineral más densa y viscosa producirá un mayor desgaste de los revestimientos y una mayor demanda de potencia [45].

## 1.6.2 Dureza

La dureza del mineral con que se alimenta el molino es algo incontrolable, ya que esto varía de acuerdo al grado de dureza del mineral procesado. Mientras más duro sea el mineral, mayor es el tiempo que se requiere para moler y reducir el tamaño del mineral procesado. Bajo una alimentación constante del mineral, el volumen de la carga del mismo aumentará junto con su dureza, por lo que el aumento del volumen de carga traerá consigo un mayor consumo de potencia. Sin embargo, si el molino está operando a plena carga y se produce un aumento de dureza, esto traerá consigo un sobrellenado, el cual se compensará con una disminución del tonelaje tratado [29].



**Figura 1.14** Dureza del mineral con efectos en la potencia neta del molino

Fuente: Napier, Morell, Morrison. Mineral Comminution circuits, Operation and Optimization [29]

La **Figura 1.14**, representa la relación directa existente entre la potencia y la dureza del mineral en la que, si existe un aumento de la cantidad de mineral tratado, la capacidad de procesamiento del molino disminuirá paulatinamente y por ende un mayor desgaste de los revestimientos debido a un sobreesfuerzo realizado por el equipo.

## 1.7 Revestimientos de los Molinos

### 1.7.1 Importancia en el proceso de Molienda

Como se ha mencionado anteriormente la conminución del mineral, etapa previa a la concentración, es sin lugar a dudas el proceso o etapa de mayor relevancia práctica en todo

el circuito, por cuanto demanda la principal inversión de capital incidiendo fuertemente en los costos unitarios y determina en gran medida la rentabilidad de la operación.

Los revestimientos forman parte de esta etapa, ya que son los encargados de brindar una protección y ayuda en el proceso de molienda; siendo el factor clave para una correcta operación del molino. Un revestimiento en óptimas condiciones ayuda a reducir el consumo de energía, mayores horas de operación del equipo y una mejor trituración del mineral.

### 1.7.2 Diseño y estructura

Cada sección del molino (Cuerpo y tapas) está recubierta por unos revestimientos que tienen como función principal proteger al molino del contacto con la carga evitando de esta manera el desgaste. El material del revestimiento dependerá del tipo de desgaste y trabajo al que es sometida la sección correspondiente.

La **Tabla 1.5**, refleja un aproximado del total de revestimientos para molinos semiautógenos, el cual utilizaremos para el desarrollo de la presente investigación:

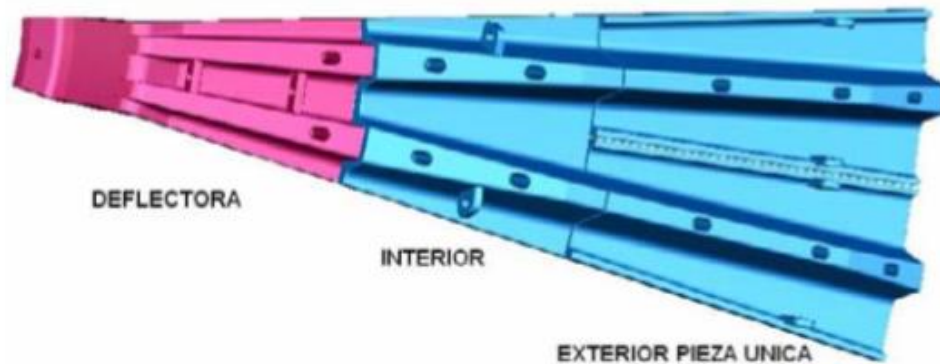
SECCIÓN	DESIGNACIÓN	UNIDADES
<b>ALIMENTACIÓN</b>	Coraza deflectora	18
	Coraza Interior	18
	Coraza Intermedia	18
	Coraza exterior	36
	Coraza exterior pieza Única	36
<b>CILINDRO</b>	Esquinero lado de alimentación	36
	Lifter alto	144
	Placa	72
	Lifter bajo	144
	Esquinero lado descarga	36
<b>TAPA DE DESCARGA</b>	Coraza parrilla descarga	36
	Coraza intermedia	18
	Coraza interior	18
<b>Total de revestimiento de los molinos</b>		<b>630</b>

**Tabla 1.5** Cantidad de revestimientos para un molino SAG

Fuente: Arratia Henríquez Marco. Modelo matemático para la estimación de la vida útil de revestimientos en molinos semiautógenos [12]

- Tapa de alimentación

La tapa de alimentación de un molino está compuesta por los siguientes revestimientos: Unas corazas deflectoras que actúan como alzadores del mineral y medios Molturantes, corazas exteriores los cuales facilitan el cambio de la carga de mineral y por último una coraza interior que sirve como comunicador entre la coraza defleitora y la coraza exterior.



**Figura 1.15** Revestimientos pertenecientes a la tapa de alimentación de un molino

Fuente: Arratia Henríquez Marco. Modelo matemático para la estimación de la vida útil de revestimientos en molinos semiautógenos [12]

- Cuerpo del molino

El cuerpo de un molino está compuesto por los siguientes revestimientos: Alzadores (Lifters del cilindro), los cuales son instalados en la parte central de cada placa en forma alternada, siendo una fila más alta que la otra; Placas de cilindro sobre las que se asientan la base de los alzadores, teniendo cada uno un rebaje central; y, por último, los esquineros, los cuales se instalan recubriendo circunferencialmente el espacio que sobra entre los revestimientos del cuerpo y las tapas. No son fijados por pernos, ya que estos quedan atrapados bajo presión por los revestimientos de las tapas y el cuerpo.

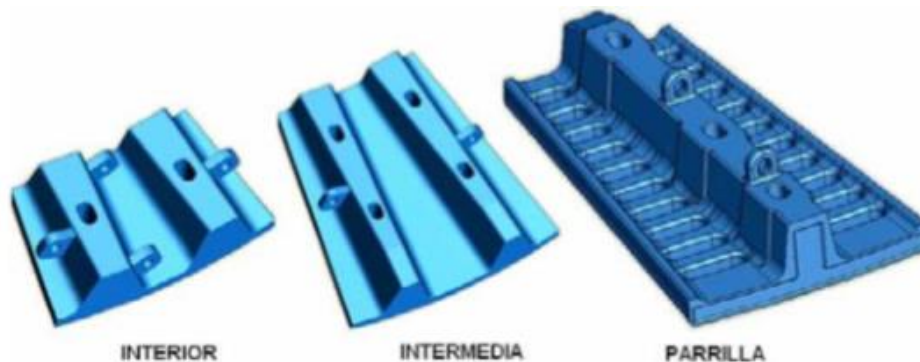


**Figura 1.16** Revestimientos pertenecientes al cuerpo de un molino

Fuente: Arratia Henríquez Marco. Modelo matemático para la estimación de la vida útil de revestimientos en molinos semiautógenos [12]

- Tapa de descarga

La tapa de descarga presenta una doble pared: Una que protege la tapa (carcaza exterior) y otra que va en contacto con la carga. Esta última sirve como parrilla de clasificación, guiando la pulpa o carga de mineral hacia la descarga por una cámara intermedia que se forma entre ambas paredes. La pared que está en contacto con la carga, presenta tres tipos de revestimientos: Interiores, intermedios y de parrilla. Los revestimientos interiores e intermedios están conformados por una placa y dos alzaadores fundidos integralmente formando una única pieza, siendo fijado a la tapa de descarga interior por medio de 4 pernos. Los revestimientos que conforman la parrilla de descarga tienen forma de sector circular y vienen fundidas hacia un alzaador central. Estos revestimientos en forma de sector circular, presentan perforaciones alargadas lo que le permite el paso de la carga del mineral hacia la cámara de descarga.



**Figura 1.17** Revestimientos pertenecientes a la tapa de descarga de un molino

Fuente: Arratia Henríquez Marco. Modelo matemático para la estimación de la vida útil de revestimientos en molinos semiautógenos [12]

### 1.7.3 Materiales

La selección del material de construcción para un revestimiento va en función a la abrasividad del mineral, tamaño del molino, corrosión, tamaño de los medios Molturantes y velocidad del molino. El diseño del revestimiento y el material de construcción son integrales y no pueden ser elegidos de forma aislada. En la **Tabla 1.6**, se proporciona una lista de los materiales primarios de construcción, con los usos y fortalezas particulares de cada uno [44]:

MATERIALES	DESCRIPCIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<b>Acero austenítico a base de manganeso (AMS)</b>	Se utiliza para revestimientos de rejilla y, en general, para molinos más pequeños	Se endurece bajo estrés, pero el sustrato sigue siendo resistente y puede soportar impactos extremos sin fracturas	Se propaga con el impacto, por lo que los revestimientos sólidos comienzan a apretarse y se vuelven extremadamente difíciles de quitar, y pueden dañar la cubierta de un molino si se permite que la tensión se acumule hasta un nivel extremo.
<b>Acero al Cromo con bajo contenido de carbono (300 - 370BHN)</b>	Se usa generalmente para revestimientos de laminación (AG, SAG y bola) hacia aceros con mayor contenido de carbono.	Excelentes características de desgaste con cierta resistencia al impacto, generalmente ahora se usa para las rejillas de descarga donde se requiere una resistencia al impacto ligeramente mejor	Elevados costos de manufactura
<b>Acero al Cromo con alto contenido de carbono (300 - 370BHN)</b>	Este acero ahora se considera el principal material utilizado para los revestimientos para molinos SAG.	Las variaciones tienden a tener relación con el tamaño del forro y el grosor de su sección.	Hay un desarrollo continuo dentro de esta área ya que el tamaño de los revestimientos está superando las propiedades proporcionadas por los aceros estándar de cromo con alto contenido de cromo[24].
<b>Acero con alto Níquel</b>	El uso de este tipo de material generalmente comenzó con molinos de bolas y barras donde los impactos se consideraron lo suficientemente bajos como para que este material se desgaste frágil pero altamente abrasivo funcione bien	Funciona perfectamente bajo fuerzas de abrasión	Se considera obsoleto a la luz del uso de los aceros con alto contenido de cromo y el hierro blanco al cromo y molibdeno.

MATERIALES	DESCRIPCIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Hierro con alto contenido de cromo	Se usa generalmente en los molinos de barras y bolas	Es más rentable pero más quebradizo que los hierros de cromo blanco molido.	Características superiores de abrasión al desgaste

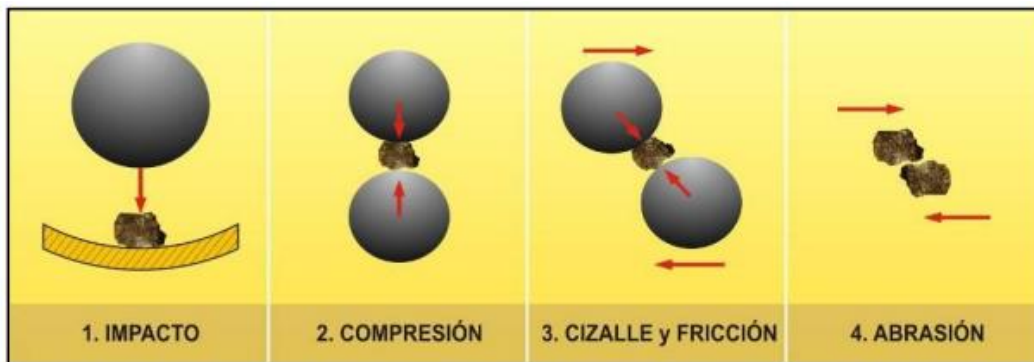
**Tabla 1.6** Materiales utilizados para la fabricación de revestimientos de un molino

Fuente: Dandotiya Rajiv. Decision Support Models for the Maintenance and Design of Mill Liners [44]

## 1.8 Causa de desgaste de los revestimientos

### 1.8.1 Desgaste por las fuerzas de molienda

Como se mencionó, las fuerzas de impacto son generadas por el efecto catarata que se produce dentro del molino. Esta fuerza se producirá siempre y cuando la energía que se aplique sea rápida, buscando que el impacto se dé entre los cuerpos de molienda y el mineral propio, ya que si las bolas no impactan con el mineral estas caerán en el revestimiento e irán desgastándolo constantemente. Concerniente a las fuerzas de abrasión, los minerales que han alcanzado una trituración pequeña traerán consigo un desgaste constante del revestimiento por las fuerzas de abrasión, siendo esta fuerza la que produce el mayor desgaste en los revestimientos [46].



**Figura 1.18** Fuerzas que influyen en el desgaste de los revestimientos

Fuente: Gutiérrez O. Estudio para la calibración de Molinos [46]

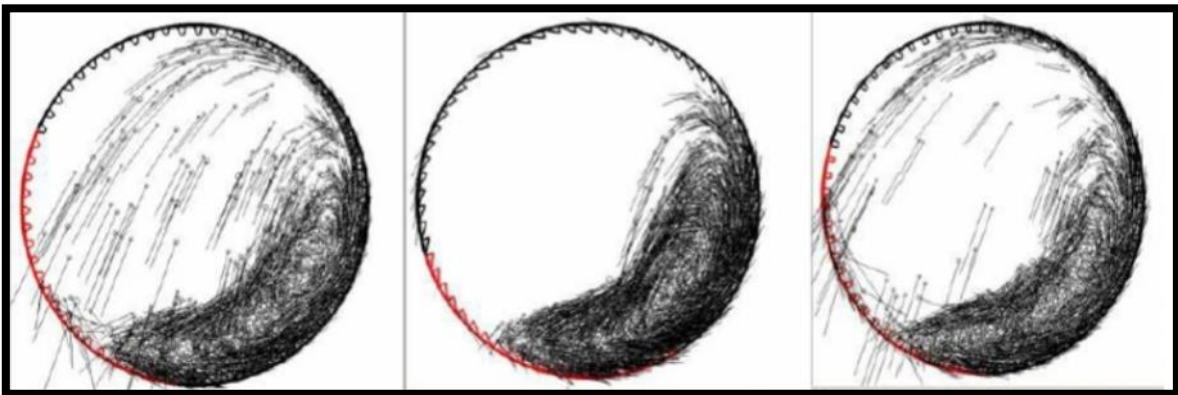
### 1.8.2 Desgaste por operación del Molino

Actualmente, el funcionamiento correcto de un molino, depende de las variables de operación. Un molino funcionará correctamente si es que sus valores de Potencia Neta, carga

de Mineral y velocidad de trabajo se encuentran en los rangos permisibles de operación. Un aumento del volumen de carga de mineral traerá consigo una mayor potencia y con ello un mayor trabajo de los revestimientos, produciéndose desgastes prematuros [41].

Entre las características de operación que más se resalta está la variable de velocidad de trabajo. Una velocidad por debajo del 60% de la velocidad crítica, traerá consigo que las fuerzas de impacto no se presenten con tanta regularidad, ya que no se producirá el efecto catarata el cual es el principal factor de la trituración por impacto, pero si se presentará un mayor desgaste por abrasión debido a que las bolas de molienda y el propio mineral estarán en continua interacción, desgastando de manera paulatina los revestimientos de un molino.

Si es que la velocidad de trabajo se encuentra por encima del 60% de la velocidad crítica, se producirá un efecto catarata más pronunciado la cual traerá consigo que las bolas de molienda impacten de forma directa con el revestimiento triturándolo por las constantes fuerzas de impacto que se producen [47].



**Figura 1.19** Operación de un Molino a distintas velocidades

Fuente: Franke J, Lichti D. Mill Liner Condition Monitoring and Mill Performance Optimization [47]

### **1.8.3 Desgaste por la característica de los minerales**

La abrasividad y dureza de los minerales juega un papel muy importante en la operación y desgaste de sus componentes. Es necesario que una planta concentradora antes de iniciar su proceso de concentración realice un estudio de las características del mineral no solo con la finalidad de elegir qué tipo de protección llevarán sus equipos, sino también qué



método de flotación y/o lixiviación se utilizará para separar el mineral de interés del estéril. Si se produce un efecto catarata bajo operación de minerales con alto grado de dureza, el propio mineral se encargará de triturar dicho elemento y quebrarlo al momento de caer en los revestimientos. Si un mineral cambia rápidamente su densidad por la añadidura de agua y reactivos, esto traerá consigo que el revestimiento se desgaste por corrosión. Además, si un mineral es muy abrasivo el desgaste de los revestimientos será de una forma más rápida, ya que la constante interacción entre revestimiento y mineral producirá que el mineral abrasivo carcoma el forro del molino [44].

## 1.9 Tipos de Monitoreo y control de desgaste de los Revestimientos

En la siguiente tabla se muestra los métodos de control más utilizados para el monitoreo del desgaste de revestimientos, realizando una breve comparación entre su disponibilidad, precisión, costo y tiempo de medición:

CONTROL	DESCRIPCIÓN	DISPONIBILIDAD	PRECISIÓN	COSTO	TIEMPO DE MEDICIÓN	REF
<b>Laser 3D</b>	Es un sistema de imágenes activo que mide el rango de un objeto en una serie de incrementos uniformes de arco, lo que resulta en un mapa tridimensional del objeto.	Gran Minería y Procesamiento abrupto de minerales	Confiable	Elevado	5 minutos	[48], [49]
<b>Bastidor y Varillas de Perfil</b>	Dispositivo de lectura de desgaste mecánico que consiste en un bastidor y 5 varillas y mide el perfil en el punto de medición mediante inspecciones manuales.	Gran y mediana minería	+/- 5mm	Bajo	30 min	[48], [50]
<b>Sensores de Ultrasonido</b>	Produce una señal de onda continua modulada en frecuencia. Esto proporciona una frecuencia de barrido correspondiente de las ondas de sonido que se introducen en la parte que se está midiendo.	Gran y mediana minería	+/- 2mm	Elevado a corto plazo	10 min	[48], [51]
<b>Herramientas de Mantenimiento</b>	Este tipo de medición se basa en el estudio de las condiciones de operación del molino (RCM)	Gran y mediana minería	+/- 5mm	Bajo costo		[48]
<b>Sensores de calor</b>	Realiza un barrido general del equipo, donde se presencia los mayores consumos consumo de energía la cual se traduce en la mayor área de desgaste de los revestimientos.	Gran Minería	+/- 7mm	Costo Elevado	Constante	[48], [52]
<b>Sistema Sensor de desgaste para revestimientos.</b>	Utilización de sensores de ultrasonido en forma de vástagos los cuales registran las frecuencias mediante un barrido. Son conectados en los pernos de ajuste.	Gran Minería	+/- 5mm	Costo Elevado	Constante	[53]

**Tabla 1.7** Tipos de Monitoreo y control de desgaste de los Revestimientos

Fuente: Elaboración Propia en base a [48], [49], [50], [51], [52] y [53]

## 1.10 Control y Monitoreo a Tiempo real

### 1.10.1 Modelamiento y Simulación

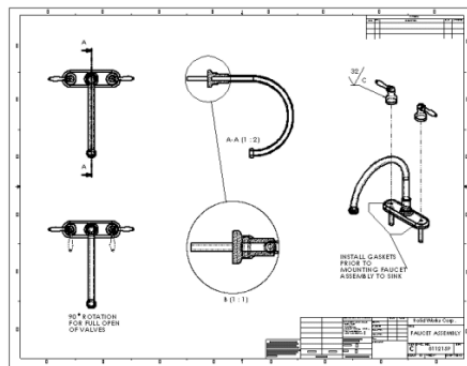
#### 1.10.1.1 Solidworks Student.

El software CAD Solidworks, es una aplicación de automatización de diseño mecánico que permite a los diseñadores rápidamente bosquejar sus ideas, experimentando con características y dimensiones produciendo así, modelos y planos detallados. Dicho Software CAD, utiliza un enfoque de diseño 3D. Además, con dicho software, se puede crear dibujos en 2D ensamblándolo en 3D. Al diseñar un modelo o componente utilizando Solidworks, puedes visualizarlo en tres dimensiones, pudiendo visualizarlo antes de fabricarlo [54].



**Figura 1.20** Solidworks 3D "Parte"

Fuente: Dassault Systemes. Introducing Solidworks [54]

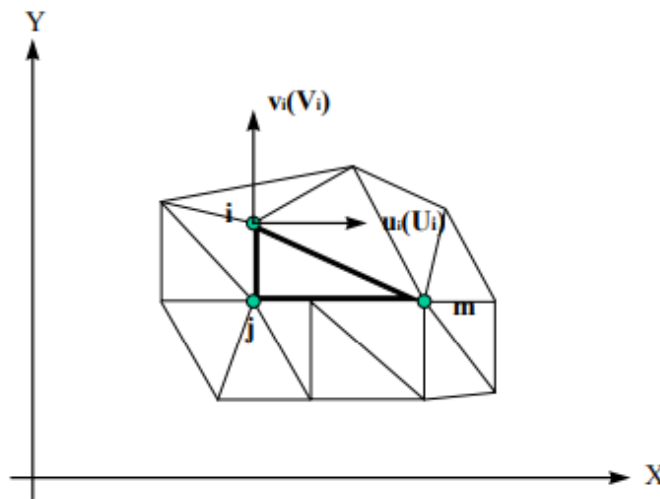


**Figura 1.21** Solidworks "Plano 2D" generado por un modelo 3D

Fuente: Dassault Systemes. Introducing Solidworks [54]

### 1.10.1.2 ANSYS Workbench Structural

El método de elementos finitos es un método tradicional que se utiliza para resolver problemas continuos el cual divide al sistema en un número infinito de partes o elementos, cuyo comportamiento se caracteriza mediante un número infinito de parámetros asociados a puntos que generalmente llamados nodos. La solución del sistema completo sigue las reglas de un elemento discreto. El sistema que desarrolla se forma por el ensamblaje de los elementos. Generalmente, las incógnitas del problema dejar de ser funciones matemáticas y pasan a ser el valor de estas funciones en los nodos. El análisis de elementos finitos por lo tanto se basa en transformar un sistema de naturaleza continua en modelo discreto. Esta transformación es denominada desratización de los elementos. El comportamiento de lo que sucede en el interior de este modelo se obtiene mediante la interpolación de los valores conocidos como nodos. Es por ello que una aproximación de los valores de una función a partir del conocimiento de un número determinado de elementos finitos [55].



**Figura 1.22** Coordenadas Nodales (i,j,k) y desplazamientos de los nodos  
Fuente: Kenneth H. Thornton Earl. The finite Element Method for Engineers [55]

### 1.10.1.3 EDEM Simulation Academy

El método de los elementos discretos simula y modela el comportamiento mecánico de un sistema formado por un conjunto de partículas, las cuales interactúan entre sí a través

de colisiones. La disposición de las partículas dentro del conjunto global del sistema o medio es aleatoria, por lo que se puede formar medios con diferentes tamaños de partículas distribuidos a lo largo del conjunto, idealizando de este modo la naturaleza granular de los medios que usualmente se analiza y se simula mediante esta técnica numérica. Generalmente se pueden extraer las siguientes propiedades básicas que definen de forma general y a grandes rasgos este método de análisis numérico [56]:

- Las partículas como elementos discretos que en su conjunto conforman el sistema complejo de partículas que interactúan entre sí sin seguir un camino definido.
- Estos elementos distintos, como también se le conoce, se desplazan independientemente de las otras partículas, produciéndose una interacción entre ellas.
- En este método a nivel de cada partícula, se hace uso de la mecánica del cuerpo rígido y los elementos discretos se consideran elementos rígidos en sí.

Para la presente investigación se utilizará el software EDEM Simulation, con el fin de poder determinar los valores de la fuerza de impacto que se generará en los revestimientos y con ello los puntos críticos de mayor desgaste en el molino en estudio.



**Figura 1.23** Proceso de cálculo para Análisis en Elementos Discretos

Fuente: Universidad de Ciencias Aplicadas. Formulación del Método de los Elementos Discretos [56]

## 1.10.2 Recolección de datos

### 1.10.2.1 Sensor Piezoeléctrico de Fuerza

Los sensores piezoeléctricos son sensores que pueden medir las fuerzas de impacto. Como todo tipo de componente, dicho sensor presenta sus ventajas y desventajas en el momento de la medición. Es por ello que en la presente tabla se refleja las características de un sensor piezoeléctrico en comparación a otros sensores de fuerza tradicionales [57]:

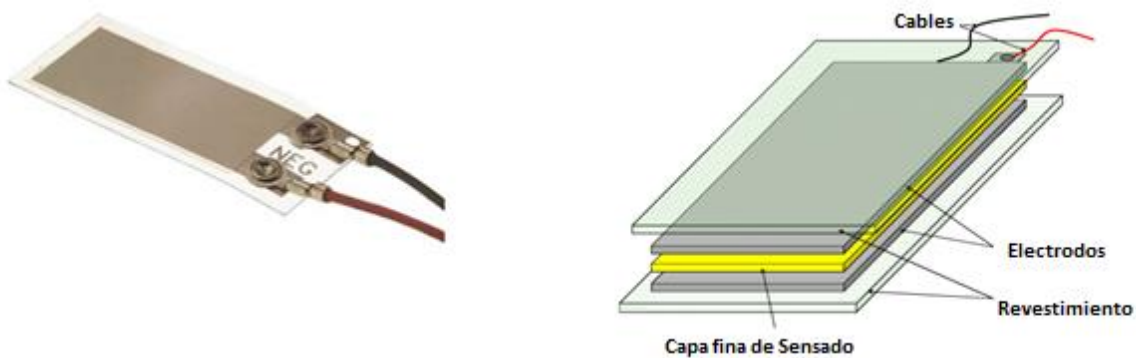
CRITERIO	GALGAS O CELDAS DE FUERZA COMERCIALES	SENSOR DE FUERZA PIEZOELÉCTRICO
Medición de fuerza dinámica		Más adecuado
Rango de medida de fuerza		Más adecuado
Capacidad de sobrecarga		Más adecuado
Linealidad	Más adecuado	
Frecuencia de calibración		Más adecuado
Respetabilidad		Más adecuado
Adaptación a cambio de temperatura	Más adecuado	
Montaje (Facilidad, acondicionamiento, bajo ruido)	Más adecuado	
Tiempo de Vida		Más adecuado

CRITERIO	GALGAS O CELDAS DE FUERZA COMERCIALES	SENSOR DE FUERZA PIEZOELÉCTRICO
Pequeña dimensión para medir fuerzas con múltiples componentes		Más adecuado
Medición de fuerzas estáticas	Más adecuado	

**Tabla 1.8** Criterios de elección para los sensores de fuerza Piezoeléctricos

Fuente: Fernández Acel. Estudio de sensores piezoeléctricos en aplicaciones de medición de fuerza [57]

Para el presente proyecto se utilizarán sensores de fuerzas piezoeléctricos Film de PVDF, los cuales pueden ayudar a medir fuerzas en lugares muy pequeños ya que son láminas muy finas que se adaptan a cualquier medio. Además, presentan una buena sensibilidad, son relativamente económicos y de muy poco grosor.



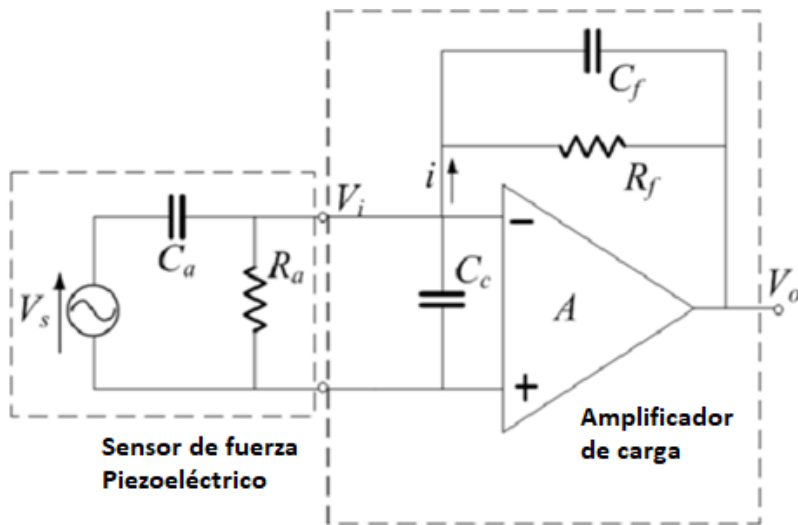
**Figura 1.24** Sensores Piezoeléctricos

Fuente: Fernández Acel. Estudio de sensores piezoeléctricos en aplicaciones de medición de fuerza [57]

### 1.10.3 Procesamiento de la señal

Los sensores piezoeléctricos entregan en su salida una señal de carga eléctrica. Dicha carga es una magnitud que, en ciertas ocasiones, no se presenta de manera clara como lo puede ser una tensión de voltaje o corriente eléctrica. Es por ello que, para poder trabajar con la señal de salida del sensor, es necesario amplificar la señal y convertirla en variaciones porcentuales de tensión más fáciles de medir y manipular.

Para el presente proyecto se realizará un circuito que pueda entregar a la salida una señal que sea fácil de tratar e interpretar. Tomando como factores importantes para el diseño la característica del sensor, las interferencias, rango de frecuencias en el que se quiere trabajar y la amplificación deseada [57].



**Figura 1.25** Esquema de un Amplificador de carga con un sensor piezoeléctrico de fuerza  
Fuente: Fernández Acel. Estudio de sensores piezoeléctricos en aplicaciones de medición de fuerza [57]

## 1.10.4 Codificación y Procesamiento de DATA

### 1.10.4.1 Arduino

El arduino es un sistema microcontrolador mono placa, de hardware libre de fácil uso y bajo costo. Actualmente existen más de 20 modelos de plataformas, las cuales son compatibles entre sí. Para el desarrollo del sistema de control y monitoreo de revestimientos se utilizará el controlador arduino, pues funciona de forma autónoma, sin necesidad de estar conectado a un ordenador. Además, dicho hardware puede tomar información del entorno a través de sensores conectados a sus entradas analógicas y digitales, controlando para nuestro caso el desgaste de los revestimientos mediante señales de impacto. Es importante resaltar que dicho sistema permite a su vez la comunicación con otros sistemas mediante Wifi, Ethernet y Bluetooth; factor de suma importancia para establecer nuestro control a tiempo real [58].

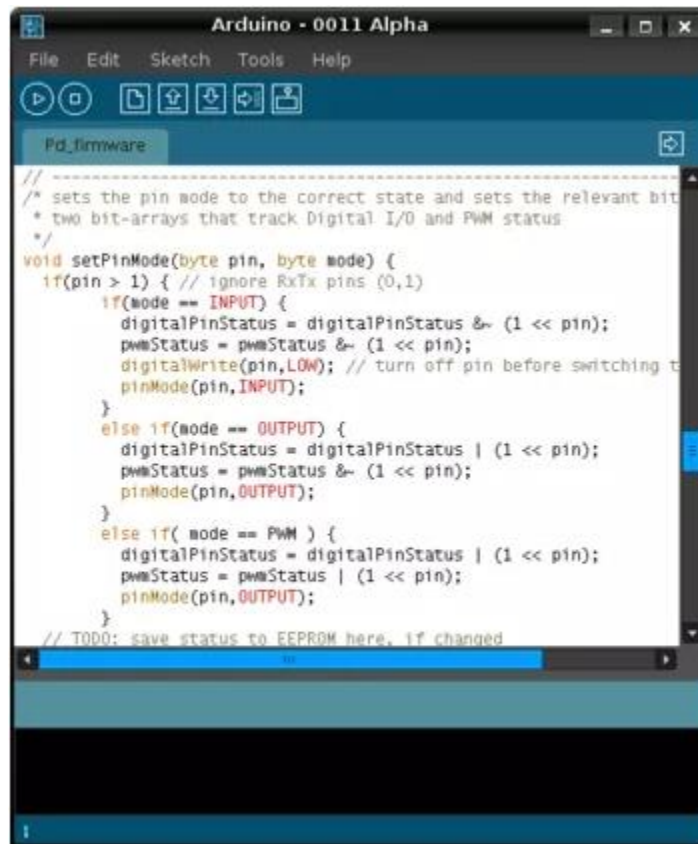




**Figura 1.26** Mecanismo de un Arduino  
Fuente: Sparkfun. What is an Arduino? [59]

#### 1.10.4.2 Codificación de la señal en el Arduino

Para facilitar su uso y programación, arduino estableció una plataforma en la que se utiliza un lenguaje de programación parecido a C++. La plataforma permite editar, compilar y enviar la codificación al hardware del arduino que se esté utilizando. Mediante dicha plataforma, se enviará la señal saliente del sensor de fuerza piezoeléctrico para ser procesado y tener como variable final el grado de desgaste de los revestimientos para el molino en estudio.

The image shows a screenshot of the Arduino IDE interface. The title bar reads "Arduino - 0011 Alpha". The menu bar includes "File", "Edit", "Sketch", "Tools", and "Help". Below the menu bar is a toolbar with icons for running, saving, and other functions. The main text area shows the code for the `setPinMode` function. The code is as follows:

```
//  
/* sets the pin mode to the correct state and sets the relevant bit  
 * two bit-arrays that track Digital I/O and PWM status  
 */  
void setPinMode(byte pin, byte mode) {  
  if(pin > 1) { // ignore RxTx pins (0,1)  
    if(mode == INPUT) {  
      digitalPinStatus = digitalPinStatus &~ (1 << pin);  
      pwmStatus = pwmStatus &~ (1 << pin);  
      digitalWrite(pin,LOW); // turn off pin before switching to  
      pinMode(pin,INPUT);  
    }  
    else if(mode == OUTPUT) {  
      digitalPinStatus = digitalPinStatus | (1 << pin);  
      pwmStatus = pwmStatus &~ (1 << pin);  
      pinMode(pin,OUTPUT);  
    }  
    else if( mode == PWM ) {  
      digitalPinStatus = digitalPinStatus | (1 << pin);  
      pwmStatus = pwmStatus | (1 << pin);  
      pinMode(pin,OUTPUT);  
    }  
  }  
  // TODO: save status to EEPROM here, if changed
```

**Figura 1.27** Plataforma de Codificación del Arduino  
Fuente: Arduino. Lenguaje de Programación Arduino [60]

# **CAPÍTULO II**

## **METODOLOGÍA**

Uno de los problemas más importantes que aqueja al sector minero en la actualidad es la gran pérdida de tiempo y dinero que se genera debido a los mantenimientos tradicionales. Estos tipos de mantenimiento, que generalmente son llamados mantenimientos preventivos y correctivos, conlleva a que los técnicos mecánicos y electricistas revisen los equipos de forma constante y manual.

Esto ha inspirado la idea de establecer mantenimientos predictivos en los equipos más críticos de una planta minera como son los molinos, los cuales tienen como función principal la molienda del mineral. En el presente capítulo se detallará el procedimiento para el diseño de un sistema de control en línea, el cual se encargará de monitorear el desgaste de los revestimientos de un molino SAG HARDINGE 15.5' x 11' de forma constante, sabiendo únicamente las fuerzas de impacto que se generan en dichos revestimientos.

### **2.1 Información Básica**

#### **2.1.1 Descripción y operación del Molino en estudio**

El molino SAG 15.5' x 11', utiliza como medio de molienda bolas de acero de 5 pulgadas de diámetro. Dicho medio molturante ocupa aproximadamente el 18% del volumen total del molino. Para que el proceso de molienda dentro de este sea más eficiente se le añade agua alrededor de 39 a 47  $\frac{m^3}{h}$ , con la finalidad de obtener una densidad de descarga que oscile entre los 1850 y 1950  $\frac{g}{L}$ . Esto se realiza para que el equipo necesite menos potencia de trabajo y facilite al siguiente proceso de Flotación [61].

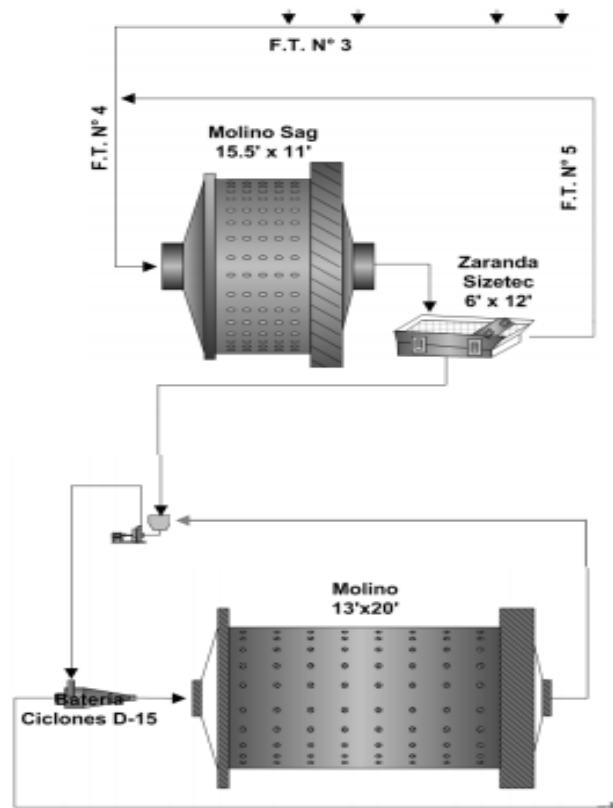
La descarga de mineral proveniente del Molino SAG, es llevada hacia una zaranda vibratoria Sisetec de 6' x 12'. Dicho equipo se encarga de clasificar la carga fina de la gruesa, donde la fina es enviada hacia otro Molino con el fin de seguir reduciendo el tamaño de las

partículas, mientras que la carga gruesa es recirculada nuevamente al Molino SAG para ser triturada nuevamente.

MOLINO SAG	
Marca	KOOPERS HARDINGE
Modelo	SAG 15.5' x 11'
Potencia del motor	1500 HP
Amperaje Nominal	142 A
Parrilla de descarga	1' x 1'
Revoluciones	15 RPM

**Tabla 2.1** Características del Molino SAG 15.5'x11'

Fuente: Soto Yanqui, Nelson. Informe Técnico de Operaciones Metalúrgicas de la Planta de Procesos de Uchucchacua Cia. de Minas Buenaventura S.A.A. [61]



**Figura 2.1** Diagrama de Flujo Molino SAG 15.5'x11'

Fuente: Soto Yanqui, Nelson. Informe Técnico de Operaciones Metalúrgicas de la Planta de Procesos de Uchucchacua Cia. de Minas Buenaventura S.A.A. [61]

La **Figura 2.1**, detalla más a fondo el principio de operación del Molino SAG 15' x 11', donde la carga de mineral proveniente de la faja N°3 es mezclada con la carga gruesa

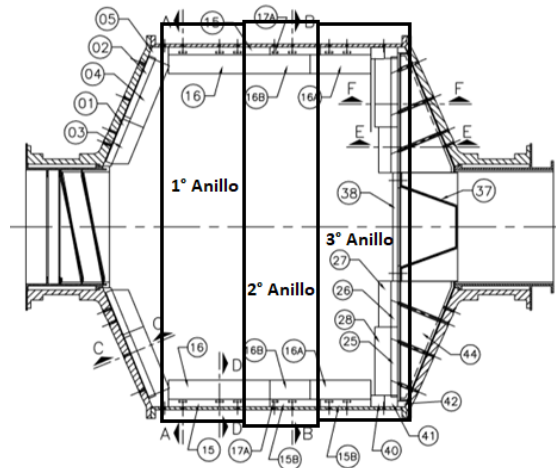
que recircula mediante la faja N° 5, desembocando ambas cargas de mineral en una faja principal N°4 que se encarga de alimentar al Molino en estudio. El mineral fino que se descarga de la zaranda vibratoria Sisetec de 6' x 12', es impulsado por medio de una bomba hacia el ciclón D-15, el cual se encarga de clasificar nuevamente al mineral con el objetivo de que el mineral ultra fino sea enviado al siguiente proceso y el mineral fino sea nuevamente triturado por un molino de bolas 13'x20' [61].



**Figura 2.2** Molino SAG 15.5'x11'

Fuente: Buenaventura. Unidad Minera Uchucchacua [62]

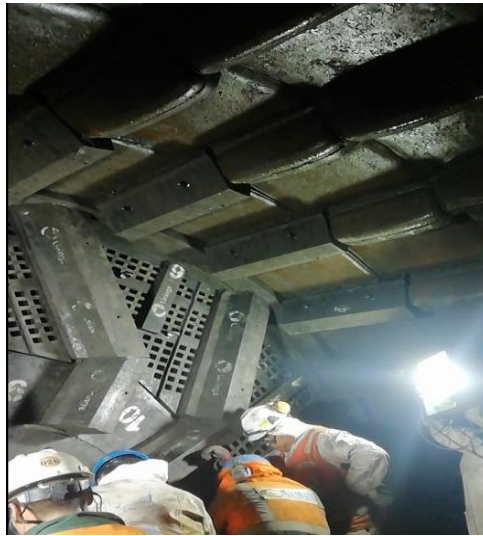
Para la presente investigación, nos enfocaremos en los revestimientos pertenecientes al cuerpo del molino. Dicha parte está dividida por tres secciones denominadas anillos, tal como se puede observar en la **Figura 2.3**.



**Figura 2.3** Sección de Revestimientos para el cuerpo del Molino SAG 15.5'x11'

Fuente: Metso. Revestimientos para Molino SAG 15.5'x11' [63]

En la **Figura 2.4**, se puede observar los cambios de revestimientos realizados al tercer anillo del cuerpo del molino ya que dichos revestimientos son los que sufren mayores desgastes debido a que se presentan mayores fuerzas de abrasión; por lo que para el desarrollo de la presente investigación, nos centraremos en el estudio de los revestimientos pertenecientes a dicha sección [14].



**Figura 2.4** Secciones de revestimiento pertenecientes al cuerpo del Molino  
Fuente: Buenaventura. Unidad Minera Uchucchacua [62]

### 2.1.2 Descripción del Sensor utilizado

El sensor de fuerza FRS 402, es un sensor piezoeléctrico de detección de fuerza el cual está conformado por una película gruesa de polímero robusto. Son dispositivos que exhiben una disminución en resistencia con el aumento de la fuerza aplicada en la superficie del sensor. La sensibilidad del sensor está orientada al uso de dispositivos electrónicos como la automatización. El sensor fue utilizado para poder medir las fuerzas de impacto que se generan en el revestimiento, con el fin de obtener una ecuación funcional que relacione las fuerzas de impacto con el grado de desgaste de los revestimientos. Dicho sensor es redondo de 18.28 mm de diámetro, ultra delgado con un espesor de 0.45 mm, simple y fácil de utilizar [64].



**Figura 2.5** Sensor de Fuerza FSR 402  
Fuente: Interlink Electronics. FSR 402 Data Sheet [64]

### 2.1.3 Reconocimiento de los puntos de medición

Tal como se detalló anteriormente, los sensores fueron colocados en el tercer anillo perteneciente al cuerpo del molino, ya que los revestimientos de dicha sección son los que sufren mayor desgaste. Con el fin de poder determinar el lugar adecuado para la instalación del sistema, se realizó un estudio a los revestimientos de la sección en estudio. La **Figura 2.6** representa los revestimientos que cumplen la función de soporte de los alzadores. Estos revestimientos son llamados “Liners” y debido a no poseer un espacio donde se pueda colocar el sistema de control y monitoreo, son descartados.



**Figura 2.6** Liner del cuerpo del Molino sin grado de desgaste.  
Fuente: Buenaventura. Unidad Minera Uchucchacua [62]

Por otro lado, la **Figura 2.7** representa los alzadores. Estos son revestimientos que se encargan de levantar las bolas y la carga de mineral con el fin de producir el fenómeno de catarata. Son generalmente llamados Lifters y presentan una ranura que se utiliza para sujetar el revestimiento al chasis del molino mediante pernos que son colocados a los extremos.



**Figura 2.7** Lifter del Cuerpo del Molino sin grado de desgaste.  
Fuente: Buenaventura. Unidad Minera Uchucchacua [62]

Por su parte, la **Figura 2.8**, representa un Lifter ya gastado donde se puede observar que la ranura donde son colocados los pernos, queda libre en su gran mayoría. Gracias al espacio libre que presenta dicha ranura, se optó por elegir el lugar donde fue instalado nuestro sistema de control y monitoreo de desgaste.



**Figura 2.8** Lifters del Cuerpo del Molino desgastados  
Fuente: Buenaventura. Unidad Minera Uchucchacua [62]



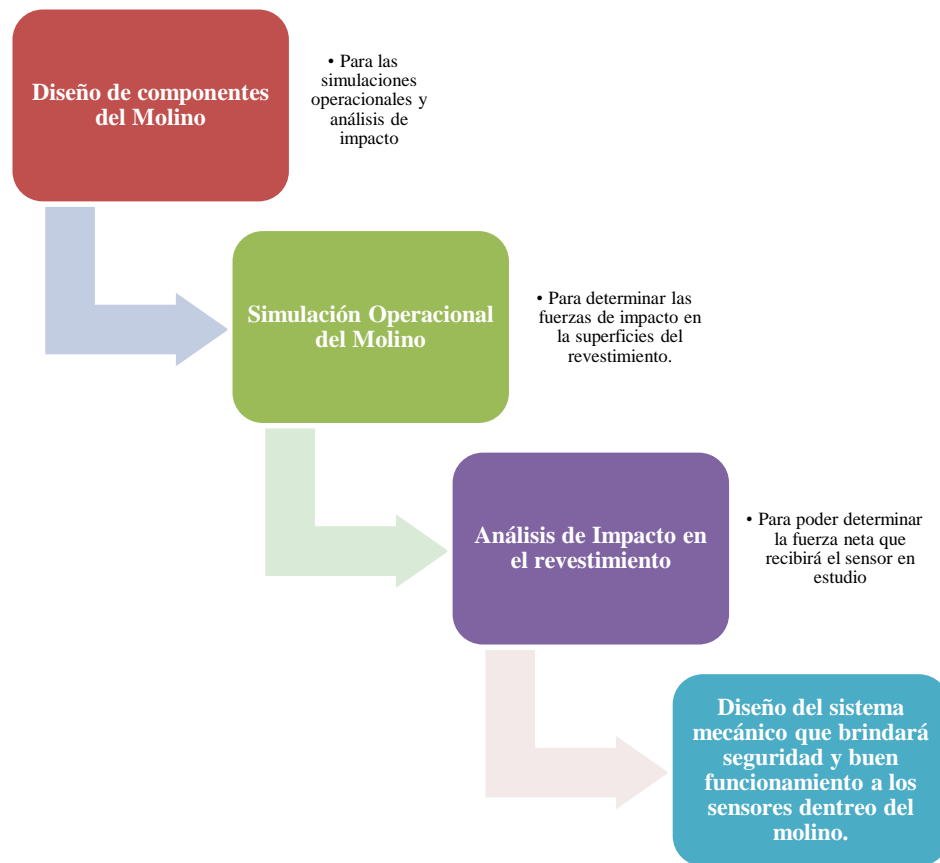
Finalmente, en la **Figura 2.9**, se puede visualizar la ranura donde se colocó nuestro sistema de control y monitoreo, presentando medidas de 7 cm de ancho, 80 cm de largo y 3.5 cm de alto.



**Figura 2.9** Ranura donde se instaló el sistema de control y monitoreo  
Fuente: Buenaventura. Unidad Minera Uchucchacua [62]

## 2.2 Análisis Mecánico

Con el objetivo de poder aproximar las fuerzas de impacto que se generan en el revestimiento y con ello realizar el diseño de una estructura que brinde seguridad y buen funcionamiento a los sensores dentro del molino, se realizó un análisis mecánico a los revestimientos del tercer anillo, así como una simulación operacional del molino. En la **Figura 2.10**, se presenta los pasos que se siguieron para poder realizar dicho análisis mecánico:



**Figura 2.10** Diagrama de Flujo para el Análisis Mecánico  
Fuente: Elaboración propia

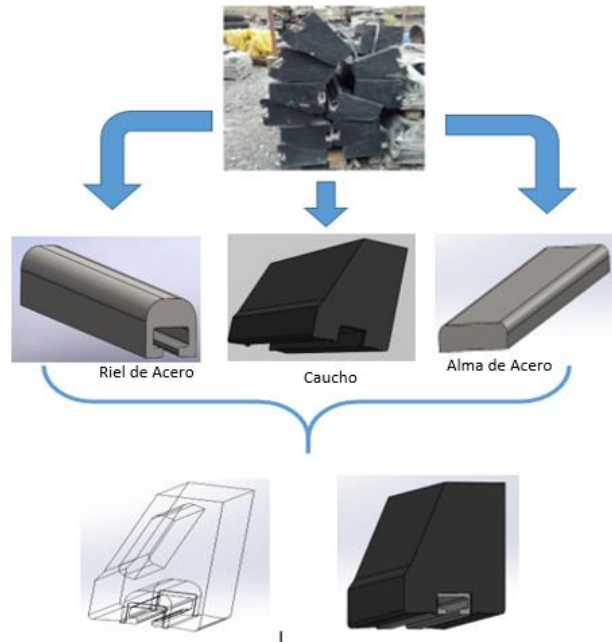
## 2.2.1 Diseño de componentes del Molino SAG 15.5'x11' mediante el Software Solidworks Student

Para poder realizar las simulaciones operacionales y análisis de impacto del revestimiento donde se instaló el sistema, se procedió a diseñar los componentes mediante un estudio de campo para la toma de medidas reales. A continuación, se detalla el proceso de diseño de los revestimientos y sección lateral del cuerpo del Molino.

### 2.2.1.1 Revestimientos del cuerpo del Molino

Tal como se detalló en apartados anteriores, el sistema de control y monitoreo se instaló en los Lifters o alzadores pertenecientes al tercer anillo del cuerpo del molino. Estos revestimientos están conformados por tres componentes: Un núcleo de acero Aleado que

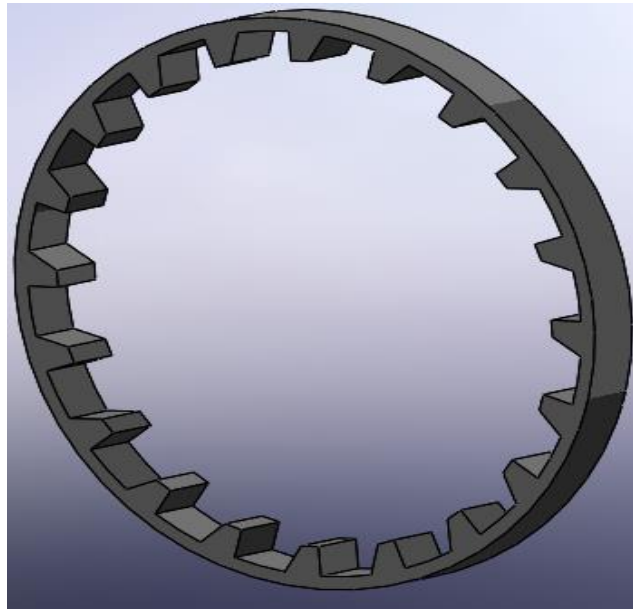
sirve como alma del revestimiento para brindarle mayor rigidez y soporte, una Riel de acero Aleado por donde se incorporan los pernos que brindan ajuste entre el chasis del molino y el propio revestimiento y, por último, un recubrimiento de caucho que permite que los revestimientos no sean tan pesados. La **Figura 2.11**, detalla los componentes que conforman dicho revestimiento, mientras que los planos se muestran en el **ANEXO 1**.



**Figura 2.11** Diseño del Lifter donde se colocará el sistema de control y Monitoreo  
Fuente: Elaboración Propia. Software Solidworks Student [62]

### 2.2.1.2 Sección lateral del cuerpo del Molino

Para poder simular la operación del Molino SAG 15.5'x11' fue necesario realizar el diseño de la vista lateral del interior del molino, teniendo como base las medidas y materiales de los lifters y liners, así como el propio chasis del molino. El plano de la sección lateral del molino en estudio se presenta en el **ANEXO 2**.



**Figura 2.12** Diseño de la vista lateral del interior del cuerpo del molino  
 Fuente: Elaboración Propia. Software Solidworks Student [54]

### 2.2.2 Simulación Operacional del Molino SAG 15.5' x 11' mediante el Software EDEM Simulation Academic

Para predecir las fuerzas de impacto que se generan en el revestimiento, fue necesario calcular con precisión el movimiento de las partículas de mineral y la carga molturante (bolas de acero) mediante el método de elementos discretos (DEM), cuyo sistema operativo brinda información dinámica de las partículas y el contacto que se genera entre ellas y el propio revestimiento.

Para el desarrollo de la simulación operacional del molino, fue necesario recolectar datos de entrada como la densidad del mineral, tamaño de las partículas, entre otros tal como se presenta en la **Tabla 2.2**:

Componente	Material	Densidad ( $kg/m^3$ )	Tamaño (Pulgadas)	Porcentaje que ocupa del volumen total del molino
<b>Partículas de Mineral</b>	Sulfuros de Plata	1850-1950	3	12%
<b>Medio Molturante</b>	AISI 1045	7850	5	18%

**Tabla 2.2** Propiedades del Mineral y Medio Molturante  
 Fuente: Soto Yanqui, Nelson. Informe Técnico de Operaciones Metalúrgicas de la Planta de Procesos Uchucchacua CIA. De Minas Buenaventura S.A.A. [61]

Para el desarrollo de la presente simulación, se utilizaron tres tipos de coeficientes de interacción:

- **Coefficiente de Restitución:**

Cuando dos o más cuerpos chocan entre sí, estos pueden comportarse de distintas maneras según la fuerza de restitución que esté actuando sobre los mismos. Es por ello que el coeficiente de restitución evalúa las pérdidas de energía cinética, según la fuerza o la elasticidad de los materiales [65].

- **Coefficiente de Fricción Estática:**

Es aquel coeficiente de fricción, que se debe superar para poner en movimiento un cuerpo con respecto a otro que se encuentra en contacto con este [66].

- **Coefficiente de Fricción de Rodadura:**

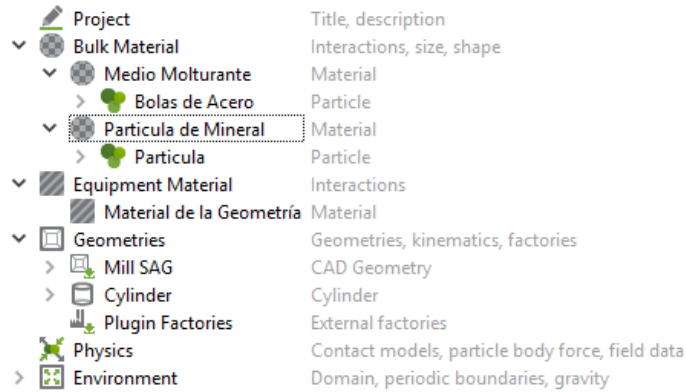
El concepto del coeficiente de fricción de rodadura, es similar al de fricción estática con la diferencia que la de rodadura se presenta cuando un cuerpo rueda sobre una superficie, deformándose uno de ellos o inclusive ambos. Este coeficiente solo estará presente en cuerpos que no sean rígidos o indeformables [67].

La **Tabla 2.3** presenta los tres valores de coeficiente de interacción entre las partículas de mineral, bolas de acero y el propio revestimiento utilizados para la presente tesis.

<b>Interacción</b>	<b>Coefficiente de Restitución</b>	<b>Coefficiente de Fricción Estática</b>	<b>Coefficiente de Fricción de Rodadura</b>
<b>Medio Molturante – Material de la Geometría</b>	0.5	0.5	0.15
<b>Medio Molturante – Medio Molturante</b>	0.35	0.44	0.15
<b>Medio Molturante – Partícula de Material</b>	0.5	0.7	0.15
<b>Partícula de Material – Partícula de Material</b>	0.75	0.56	0.05
<b>Partícula de Material – Material de la Geometría</b>	0.5	0.5	0.15
<b>Partícula de Material – Medio Molturante</b>	0.75	0.44	0.15

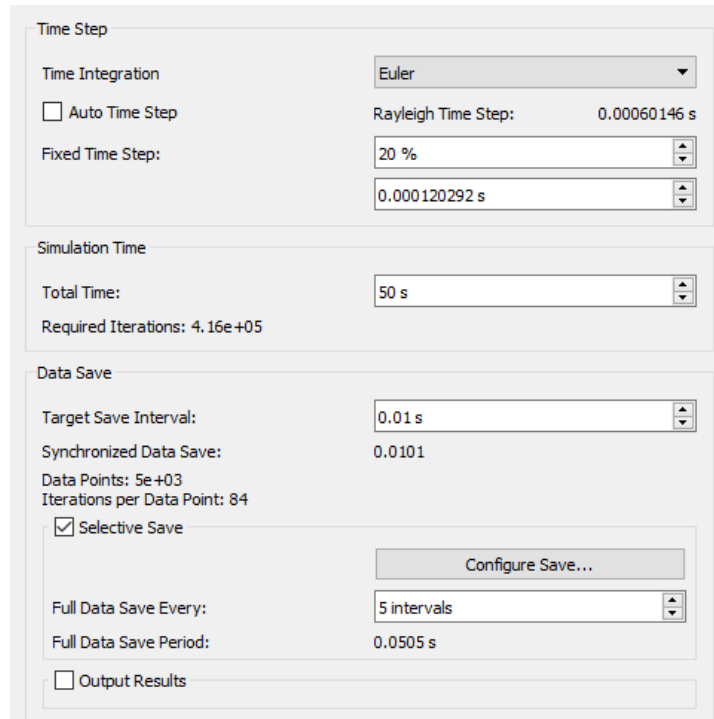
**Tabla 2.3** Coeficientes de Interacción utilizados para la simulación operacional del Molino  
Fuente: Elaboración Propia en base a [65], [66] y [67]

Con los datos brindados en la descripción del equipo y los valores de la **Tabla 2.2** y **Tabla 2.3**, se procedió a introducir los parámetros brindados en la plataforma del software EDEM Simulation Academy con el objetivo de poder tener una simulación operacional que se aproxime al trabajo real del molino, como se aprecia en la siguiente figura.



**Figura 2.13** Plataforma de Definición de Parámetros de Simulación  
Fuente: Project. EDEM Simulation Academy [68]

Se ajustó el simulador por un tiempo total de 50 segundos bajo un intervalo de guardado de destino de 0.01 s, tal como se presenta en la **Figura 2.14**:













**Figura 2.14** Plataforma de seteo de tiempo e Intervalos de guardado de datos  
Fuente: Project. EDEM Simulation Academy [68]






Finalmente, los resultados de las fuerzas de impacto obtenidos mediante la simulación operacional del molino en las superficies de contacto, fueron llevados al Software Ansys Transient Structural con el objetivo de poder determinar la magnitud real de la fuerza de impacto que será medida por el sensor en estudio. Cabe resaltar que las simulaciones realizadas parten del punto de que el revestimiento no ha sufrido desgaste alguno, ya que simular un revestimiento desgastado presenta demasiada complejidad.

### 2.2.3 Análisis de fuerzas de Impacto en el lugar de implementación del sistema mediante el Software Ansys Transient Structural

Con el objetivo de poder determinar las fuerzas de impacto real que se genera en el punto de implementación del sistema, se realizó un análisis de impacto dinámico con los resultados obtenidos en la simulación operacional del molino. Para ello fue necesario definir los materiales de cada componente del revestimiento con sus respectivas propiedades, como se muestra en las siguientes figuras.

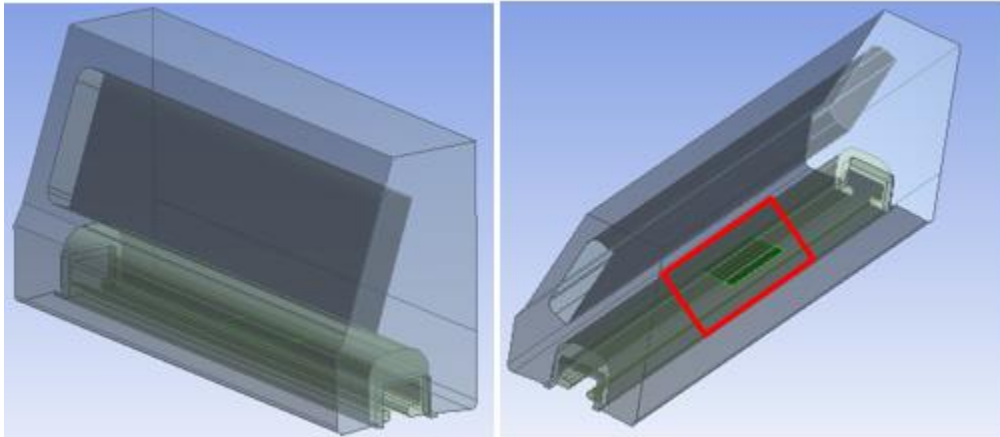
Properties of Outline Row 4: Stainless Steel				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	 
2	 Material Field Variables	Table		
3	 Density	7750	kg m <sup>-3</sup>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
4	 Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			<input type="checkbox"/>
6	 Isotropic Elasticity			<input type="checkbox"/>
12	 Tensile Yield Strength	2.07E+08	Pa	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
13	 Compressive Yield Strength	2.07E+08	Pa	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
14	 Tensile Ultimate Strength	5.86E+08	Pa	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
15	 Compressive Ultimate Strength	0	Pa	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

**Figura 2.15** Propiedad del acero inoxidable  
Fuente: Elaboración Propia en base a [69]

Properties of Outline Row 3: Rubber2				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	 
2	 Material Field Variables	Table		
3	 Density	1000	kg m <sup>-3</sup>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
4	 Mooney-Rivlin 2 Parameter			<input type="checkbox"/>

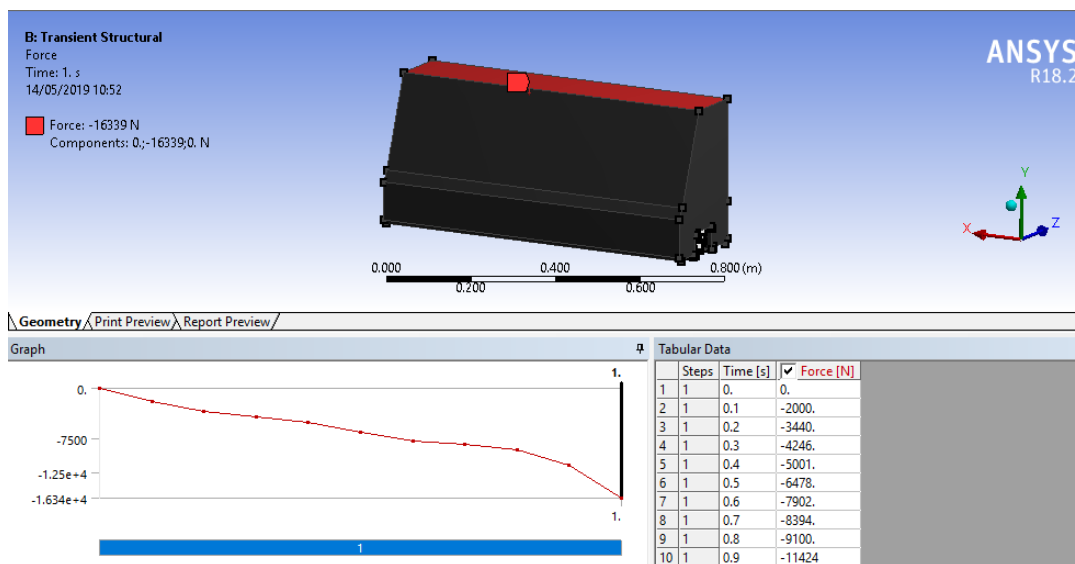
**Figura 2.16** Propiedades del Caucho  
Fuente: Elaboración Propia en base a [69]

Con el material especificado para cada componente del revestimiento, se definió el espacio y las dimensiones del lugar de instalación del sistema de control y monitoreo. En la **Figura 2.17**, se puede observar el espacio de instalación del sensor para la toma de datos. Dicha sección presenta 14 cm de largo, 8 cm de alto y 3.5 cm de alto.



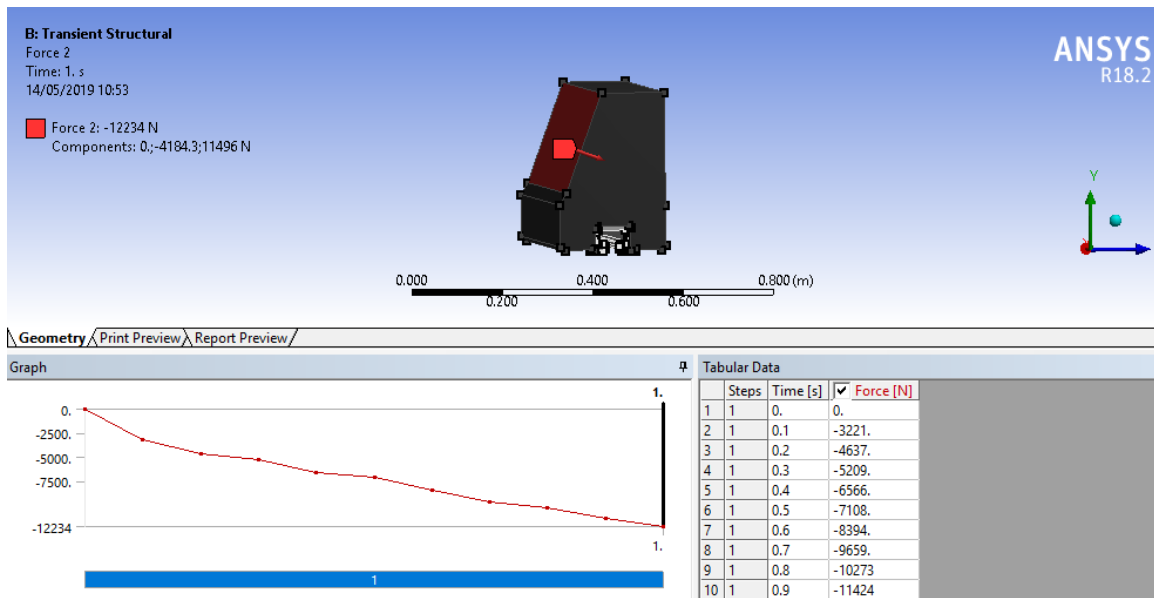
**Figura 2.17** Definición del espacio donde será colocado el sistema de Control y Monitoreo  
Fuente: Elaboración Propia en base a [70]

Con el área delimitada y el material establecido para cada componente, se procedió a introducir las fuerzas de impacto generadas en las superficies de contacto obtenidas mediante la simulación operacional del molino, tal como se detalla en la **Figura 2.18** y **Figura 2.19**.



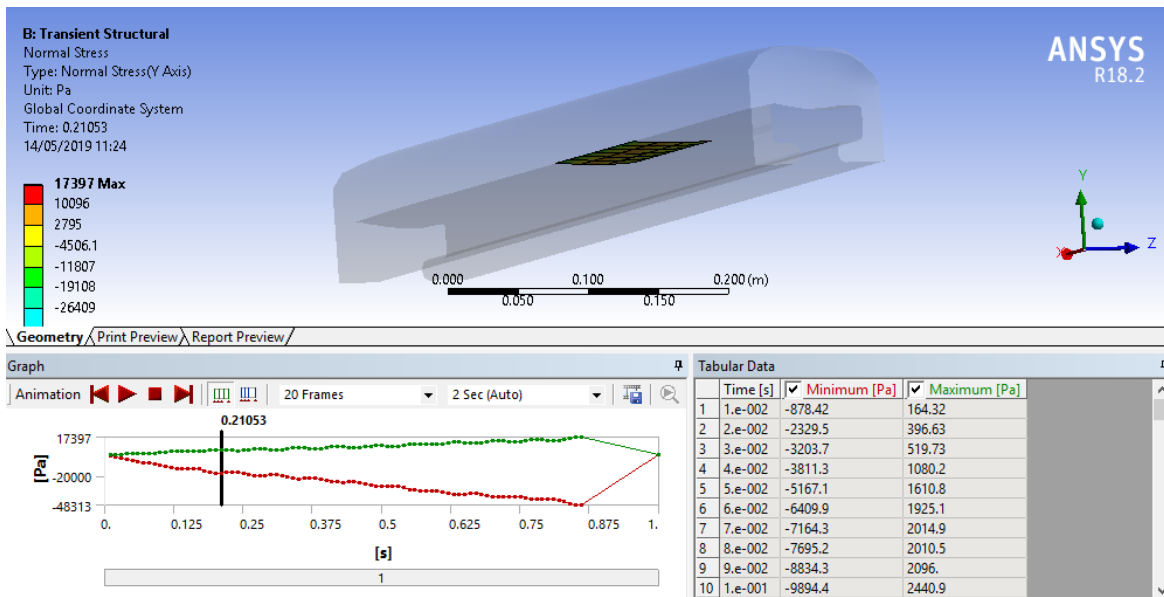
**Figura 2.18** Definición de las fuerzas de impacto en la cara superior del revestimiento  
Fuente: Elaboración Propia en base a [70] y [68]





**Figura 2.19** Definición de las fuerzas de Impacto en la cara lateral del revestimiento.  
 Fuente: Elaboración Propia en base a [70] y [68]

Con las fuerzas de impacto definidas en las caras de contacto del revestimiento, se procedió a realizar el análisis de impacto dinámico con el objetivo de poder determinar los esfuerzos normales generados en la superficie de instalación del sistema en estudio, como se muestra a continuación.



**Figura 2.20** Análisis de Impacto Dinámico de los esfuerzos generados en el espacio donde será colocado el sistema en estudio.  
 Fuente: Elaboración Propia en base a [70] y [68]

En la **Tabla 2.4** se muestran los esfuerzos normales que se presentaron en la superficie de instalación del sistema de medición.

N°	Tiempo [s]	Esfuerzo [Pa]	N°	Tiempo [s]	Esfuerzo [Pa]	N°	Tiempo [s]	Esfuerzo [Pa]
1	0.01	164.32	29	0.29	5530.3	58	0.58	10519
2	0.02	396.63	30	0.3	5107	59	0.59	10101
3	0.03	519.73	31	0.31	4958.4	60	0.6	10145
4	0.04	1080.2	32	0.32	5297.3	61	0.61	10785
5	0.05	1610.8	33	0.33	6008.6	62	0.62	11725
6	0.06	1925.1	34	0.34	6708.9	63	0.63	12434
7	0.07	2014.9	35	0.35	7032.5	64	0.64	12530
8	0.08	2010.5	36	0.36	6871.1	65	0.65	12091
9	0.09	2096	37	0.37	6461.2	66	0.66	11601
10	0.10	2440.9	38	0.38	6221.5	67	0.67	11562
11	0.11	3064.1	39	0.39	6459.7	68	0.68	12128
12	0.12	3672.3	40	0.4	7138.3	69	0.69	13056
13	0.13	3907.5	41	0.41	7890.3	70	0.7	13853
14	0.14	3737.9	42	0.42	8268.6	71	0.71	14068
15	0.15	3428.3	43	0.43	8106.9	72	0.72	13637
16	0.16	3298.6	44	0.44	7621.7	73	0.73	12996
17	0.17	3547.3	45	0.45	7243.8	74	0.74	12723
18	0.18	4153.8	46	0.46	7317.9	75	0.75	13085
19	0.19	4826.5	47	0.47	7899	76	0.76	13911
20	0.20	5216.5	48	0.48	8683.8	77	0.77	14728
21	0.21	5162.4	49	0.49	9195.6	78	0.78	15055
22	0.22	4782.8	50	0.5	9143.9	79	0.79	14738
23	0.23	4393	51	0.51	8698.5	80	0.8	14110
24	0.24	4330.4	52	0.52	8343.9	81	0.81	13769
25	0.25	4703.1	53	0.53	8475.8	82	0.82	14154
26	0.26	5305.4	54	0.54	9155.3	83	0.83	15255
27	0.27	5774.3	55	0.55	10098	84	0.84	16568
28	0.28	5846.7	56	0.56	10808	85	0.85	17397
29	0.29	5530.3	57	0.57	10916	86	0.86	17364

**Tabla 2.4** Datos de esfuerzos Normales generados en la superficie donde se instalará el sistema en estudio  
Fuente: Elaboración Propia en base a [70]

Con dichos esfuerzos se procedió a calcular las fuerzas normales o de impacto generadas en la sección donde se instalará el sistema de control, con el objetivo de determinar

las fuerzas de impacto reales que serán medidas por el sensor dentro del molino. Para ello se hizo uso de la presente ecuación de esfuerzos de compresión:

$$\sigma_{normal} = \frac{F_{normal}}{\text{Área}}$$

El área de la sección donde se midieron los esfuerzos fue calculada mediante la siguiente ecuación:

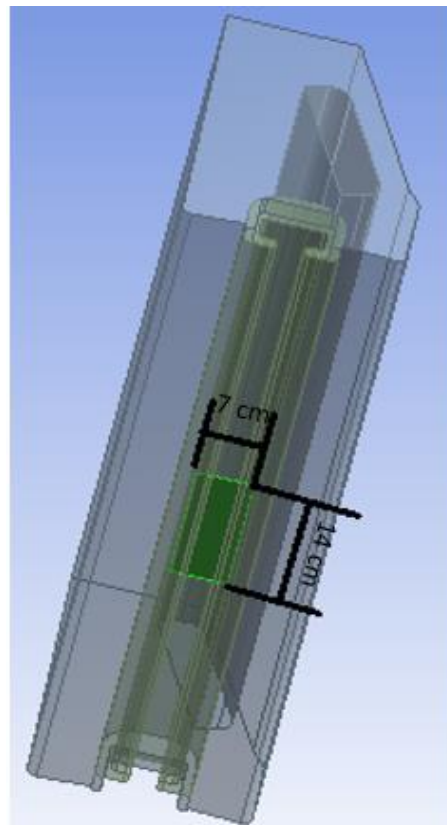
$$\text{Área}_{superficie} = B \times h$$

$$\text{Área}_{superficie} = 0.14 \text{ m} \times 0.07 \text{ m}$$

$$\text{Área}_{superficie} = 0.0098 \text{ m}^2$$

Donde:

$B$ , representa la base de la superficie y  $h$  la altura. Ambas dimensiones representan al área donde fue instalado el sensor de fuerza, tal como se representa en la **Figura 2.21**:



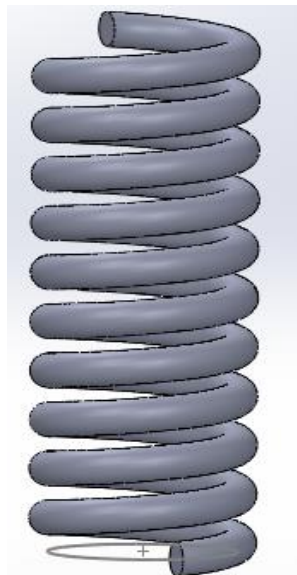
**Figura 2.21** Dimensionamiento de la superficie donde se instalará el sistema en estudio  
Fuente: Elaboración Propia en base a [70] y [10]

Teniendo los valores de esfuerzos normales y el área de la superficie donde se instaló del sistema, se obtuvo las fuerzas de impacto reales a ser medidas por el sensor de fuerza.

#### **2.2.4 Diseño final de los componentes mecánicos a utilizar Mediante el Software Solidworks Student**

Con los resultados obtenidos en la simulación operacional del molino y el análisis de impacto dinámico en el revestimiento donde se instaló los sensores, se diseñó un sistema mecánico el cual se encargó de reducir las fuerzas de impacto a ser medidas por el sensor de fuerza piezoeléctrico. Para ello, se diseñó un sistema mecánico en base a resortes de compresión, el cual se encargue de absorber un gran porcentaje de la fuerza, dejando únicamente valores de impacto que oscilen entre los 0 N a 90 N [64]. Dicho rango fue fijado en base a la ficha técnica del sensor en estudio.

Debido a que el sensor recibe fuerzas mayores a los 170 N, valor obtenido en el análisis de impacto dinámico, cuando el revestimiento sufre desgaste, es recomendable establecer un factor de seguridad que quintuple la carga inicial, asegurando el correcto funcionamiento del sistema. Para ello se diseñaron resortes de compresión, tal como se muestra en la siguiente figura:



**Figura 2.22** Diseño del resorte de Compresión a Utilizar  
Fuente: Elaboración Propia en base a [54] y [71]

En función a la magnitud de la fuerza de impacto cuando el revestimiento se encuentre desgastado, se eligió el modelo y número de resortes convenientes que fueron utilizados en prototipado del sistema mecánico.

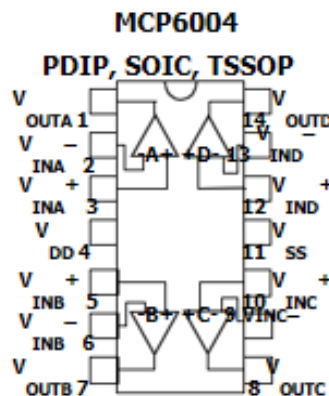
## 2.3 Sistema Eléctrico

Para el presente proyecto de investigación se utilizó el sensor FRS 402, el cual tiene un comportamiento similar a una resistencia variable. Con ayuda de un sistema mecánico compuesto por resortes, cuyo detalle se presenta en apartados anteriores; la fuerza de impacto generada en el revestimiento se redujo hasta ciertos valores que facilitaban el comportamiento lineal del sensor.

### 2.3.1 Materiales utilizados

- Amplificador Operacional (MCP6004)

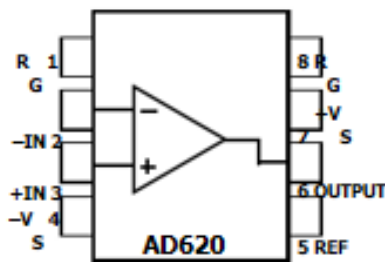
Los amplificadores MCP6004 son específicamente diseñados para aplicaciones donde se requiera tener una señal de procesamiento ideal sin ruido ni perturbaciones. Este amplificador presenta un ancho de banda de ganancia de 1 MHz y una fase de 90° [72]. Para la presente investigación se utilizó un Amplificador del modelo MCP6004 para poder procesar el voltaje de entrada que recibirá el circuito eléctrico en estudio.



**Figura 2.23** Amplificador Operacional Modelo MCP6004  
Fuente: Mouser. Amplificadores Operacionales [72]

- Amplificador Operacional (AD620)

El Amplificador AD620 es específicamente diseñado para aplicaciones donde se requiere una ganancia en la señal de entrada y con ello asegurar que los datos procesados no presenten perturbaciones. Este amplificador presenta las mismas características que el amplificador MCP6004, teniendo un ancho de banda de ganancia de 1 MHz y una fase de 90° [72]. Para la presente investigación se utilizó un amplificador del Modelo AD620 para poder hacer coincidir el voltaje de salida del sensor con el voltaje de alimentación del Arduino.



**Figura 2.24** Amplificador Operacional Modelo AD620  
Fuente: Mouser. Amplificadores Operacionales [72]

- Potenciómetro de Precisión

Un resistor variable es un resistor lineal sobre el cual se desliza un contacto eléctrico capaz de inyectar corriente en un punto intermedio de su elemento resistivo [73]. En la presente tesis se utilizaron dos potenciómetros de precisión: Uno instalado en serie con el sensor y otro en serie con el amplificador AD620.



**Figura 2.25** Potenciómetro de Precisión  
Fuente: Mouser. Resistor [73]

- Capacitores (0.33uF, 0.1uF, 10uF)

Un capacitor es un componente electrónico pasivo de dos terminales que almacena energía eléctrica en un campo eléctrico. El efecto de un condensador se conoce como capacitancia [74]. En la presente tesis se utilizó tres capacitores de 0.33uF, 0.1uF y 10uF respectivamente para poder filtrar la señal de la fuente de alimentación.



**Figura 2.26** Capacitores Cerámicos  
Fuente: Mouser. ProductDetail [74]

- Generador de Voltaje Negativo (ICL7660A)

Los convertidores de súper voltaje ICL7660S y ICL7660A son IC de conversión de voltaje CMOS monolítico que garantizan ventajas significativas de rendimiento sobre otros dispositivos [74]. En la presente tesis se utilizó un generador de voltaje negativo ICL7660A para poder alimentar a los dos amplificadores detallados anteriormente, con tensión negativa.

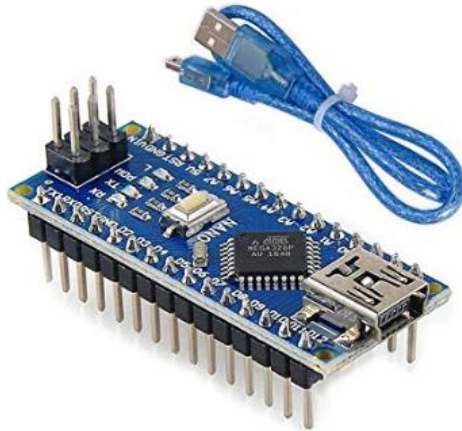


**Figura 2.27** Generador de Voltaje Negativo  
Fuente: Mouser. ProductDetail [74]

- Arduino NANO

El Arduino NANO ADK es un tablero de microcontrolador basado en el ATmega2560. Tiene una interfaz de host USB para conectar con teléfonos Android, basados

en el MAX3421e IC. Cuenta con 54 pines de entrada / salida digital (de los cuales 15 se pueden usar como salidas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UART (puertos serie de hardware), un oscilador de cristal de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, un cabezal ICSP y un botón de reinicio [60]. En la presente tesis se utilizaron dos Arduinos NANO, los cuales se encargaron de procesar la señal dentro y fuera del Molino.



**Figura 2.28** Arduino NANO  
Fuente: Mouser. ProductDetail [74]

- **Módulo Wifi**

Este módulo incluye todo lo necesario para conectarse a un punto de acceso Wifi mediante comandos de texto AT, vía una puerta serie, que puede ser configurada a diferentes velocidades [75]. En la presente tesis se utilizó un módulo WIFI ESP8266 para poder enviar la señal desde el interior del molino a un controlador de PLC ubicado en la parte externa del equipo.

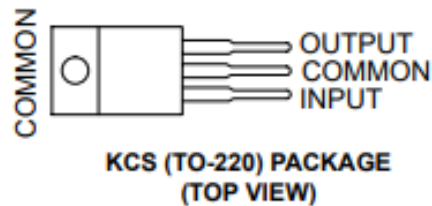




**Figura 2.29** Módulo WIFI ESP8266  
Fuente: MercadoLibre. MóduloWIFI [75]

- Regulador de Voltaje (Modelo LM7805 y LM7812):

Esta serie de reguladores de voltaje de circuito integrado de voltaje fijo está diseñada para una amplia gama de aplicaciones. Estas aplicaciones incluyen la regulación en tarjeta para la eliminación de problemas de ruido y distribución asociados con regla de un solo punto [76]. En la presente tesis se utilizó un regulador de voltaje del Modelo LM7805 para poder controlar el voltaje y la corriente del circuito eléctrico.



**Figura 2.30** Regulador de Voltaje Modelo LM7805  
Fuente: Sparkfun. Components [76]

## 2.3.2 Procesamiento de la Señal

### 2.3.2.1 Circuito de Medición

- **Circuito del sensor Piezoeléctrico FRS 402**

Según el datasheet del sensor; a medida que se le aplique una fuerza, la resistencia interna de dicho componente varía. Esto origina que el sensor en estudio no pueda funcionar

como una típica señal, por lo que se le debe adaptar un circuito eléctrico formado por una resistencia de precisión y una fuente de alimentación.

Con dichos elementos podemos, idealmente, generar una señal de voltaje proporcional a la resistencia variable del sensor.

- **Tratamiento de la señal de salida**

Teniendo ya una señal de voltaje como salida del sistema de medición, se procedió a tratar dicho valor. En primera instancia, se modificó el circuito del sensor aumentándole un OPAMP (Amplificador Operacional) en configuración de buffer. Esto con el objetivo de establecer un seguidor de voltaje que nos permita tener una señal más precisa y no se vea alterada por la relación proporcional de impedancias entre la resistencia de precisión y la resistencia interna del sensor al momento de la lectura de las fuerzas de impacto.

En la segunda parte del proceso, la señal resultante pasa por un segundo OPAMP de instrumentación con el cual el voltaje de salida del primer proceso pasó a tener un rango de 0 a 5 voltios. Esto con el fin de que la señal de salida coincida con el rango de lectura del ADC (Analog to Digital Converter) asociado al controlador.

Por último, el controlador recibió los datos del sensor y con ayuda del módulo NRF24I01 los transfirió hacia el Circuito de Tratamiento de DATA a 2.4 GHz.

### **2.3.2.2 Circuito de tratamiento de data**

Este circuito consta de dos componentes claves:

- **Circuito de Recepción de data**

Este circuito consta de 2 únicos componentes, un módulo NRF24I01 que actúa como esclavo y un controlador para poder decodificar los datos y generar la señal.

- **Circuito de Procesado**

Debido a la existencia de un PLC que se encarga de medir la temperatura y engrase del motor correspondiente al molino en estudio, se optó por utilizar este mismo para procesar la señal decodificada por el circuito de recepción de data.

### 2.3.2.3 Alimentación

#### ▪ Circuito de Medición

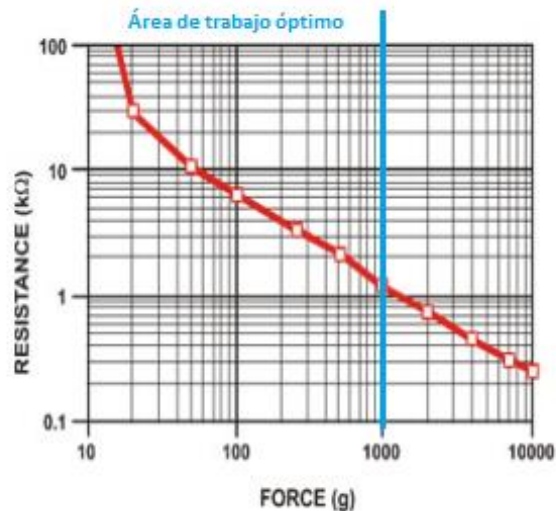
Debido que el circuito se encuentra dentro de un elemento giratorio, se optó por descartar la alimentación cableada y se diseñó un espacio para colocar baterías (las cuales se tuvieron que cambiar cada cierto tiempo) en una cierta combinación dependiendo del voltaje requerido por el circuito, para poder generar el voltaje y la autonomía (mAh) necesaria.

#### ▪ Circuito de tratamiento de data

Tal como se mencionó anteriormente, este circuito aprovecha un PLC existente en el equipo, por lo que se utilizó la fuente del PLC para alimentar al resto de este circuito.

### 2.3.2.4 Codificación de Sensor FRS 402

La **Figura 2.31**, ilustra la variación de la resistencia interna del sensor conforme se le aplica una fuerza representando un comportamiento logarítmico. Gracias a dicha gráfica, se definió los parámetros permisibles de fuerza que soportará el sensor, los cuales oscilan entre los 0 N y 90 N (0 gramos a 9000 gramos).

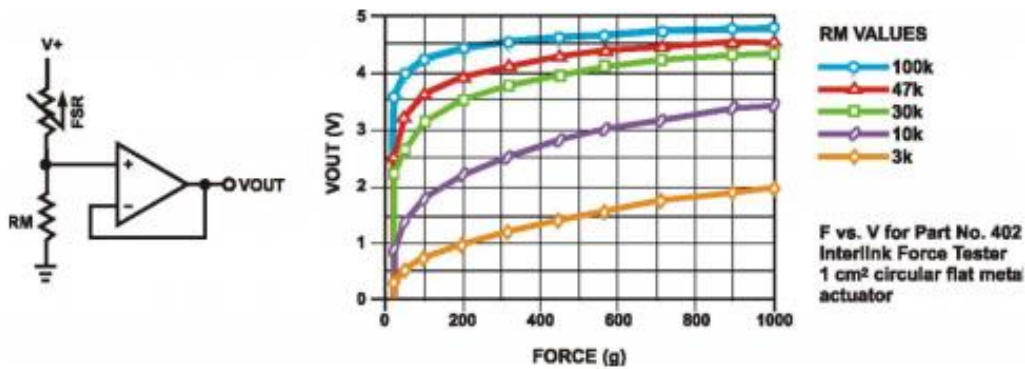


**Figura 2.31** Área de trabajo óptimo Resistencia vs Fuerza  
Fuente: Interlink Electronics. FSR 402 Data Sheet [64]

La salida de voltaje para el sensor se definió mediante la siguiente ecuación:

$$V_{out} = \frac{R_M V}{R_M + R_{FSR}}$$

Dicha ecuación demuestra que la tensión de salida aumenta con la fuerza creciente. La resistencia de medición (RM), se eligió con el fin de poder maximizar la sensibilidad de la fuerza deseada y limitar la corriente. En el circuito de medición, el divisor de voltaje va seguido de un amplificador operacional, el cual se encarga de amplificar la señal volviéndola más pareja. En ese sentido, utilizando las curvas de la **Figura 2.32** se escogió una resistencia de 100 kΩ para establecer una salida de voltaje de 5 Voltios.



**Figura 2.32** Valores de RM para el diseño del circuito en relación al sensor FSR 402  
Fuente: Interlink Electronics. FSR 402 Data Sheet [64]

La **Figura 2.32**, representa los valores de RM, la cual ayuda a eliminar los ruidos y basura que se pueda originar en la toma de datos del sensor. El datasheet del sensor recomienda un circuito simple, compuesto de una fuente de alimentación, una resistencia, un OPAMP (Amplificador Operacional) y el sensor en estudio.

Además, la **Figura 2.32** representa un esquema donde el Amplificador Operacional se encuentra conectado en una configuración de Buffer. Con dicha configuración se logra obtener un voltaje con menor porcentaje de error. En caso se omita este componente, la señal del voltaje puede verse distorsionada por la relación de impedancias entre ambas resistencias, produciendo voltajes de lectura erróneos. Esto principalmente por el comportamiento logarítmico del sensor.

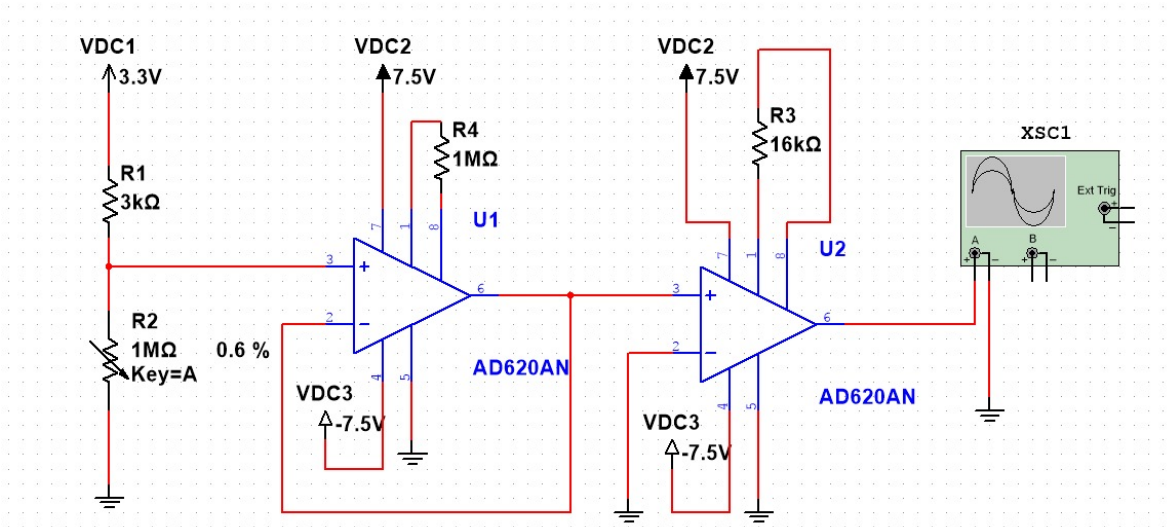
Teniendo como base los circuitos recomendados por el datasheet del sensor, se procedió a generar las siguientes alteraciones, para producir una variante óptima en el sistema eléctrico a diseñar:

- Debido a que el prototipo tendrá una alimentación con baterías, se necesita reducir los consumos energéticos. Por ello, se optó por cambiar la fuente de alimentación de 5 V a 3.3 V, con la finalidad de reducir la corriente que consume dicho sistema eléctrico reduciendo la cantidad de dispositivos necesarios dentro del circuito impreso, ya que un voltaje de 3,3 V puede obtenerse del mismo arduino NANO.
- El rango de la señal debe poseer una variación cercana a la existente entre 0 a 5 V para poder tener una mejor conversión por parte del ADC (Analog to Digital Converter) del Arduino. Por ello, al circuito recomendado se le colocó un OPAMP adicional para que genere una ganancia a la señal y tenga un comportamiento ideal.
- Un OPAMP ideal puede generar una ganancia infinita; sin embargo, en la realidad este elemento no puede generar dicha ganancia, ya que se ve limitado por el voltaje con el que se es alimentado. Un OPAMP, por lo general, necesita 2 fuentes de alimentación: Una positiva y una negativa. Para el presente proyecto se optó por alimentar dicho elemento con un voltaje mayor a 7.5 V y uno menor a -7 V, esto debido a que un voltaje menor en la toma positiva o un voltaje mayor en la toma negativa genera mucho “ruido” (el cual se expresa en la cantidad de voltaje AC que presenta el circuito) en la señal de salida.
- Por último, se conoce que el sistema puede leer fuerzas de impacto atípicos muy elevados en ciertos momentos de operación del molino. Para evitar que estos datos sean amplificados por el OPAMP y que posteriormente puedan averiar el ADC del arduino NANO, se decidió invertir el orden del circuito propuesto con el objetivo de que cuando se registren fuerzas de impacto elevadas en el revestimiento, el voltaje de salida sea pequeño.

A continuación, se presenta el circuito utilizando el OPAMP de instrumentación AD620AN, el cual genera una ganancia determinada por una resistencia  $R_g$  (conectado entre los pines 1 y 8). Dicha relación está determinada por la siguiente ecuación de ganancia:

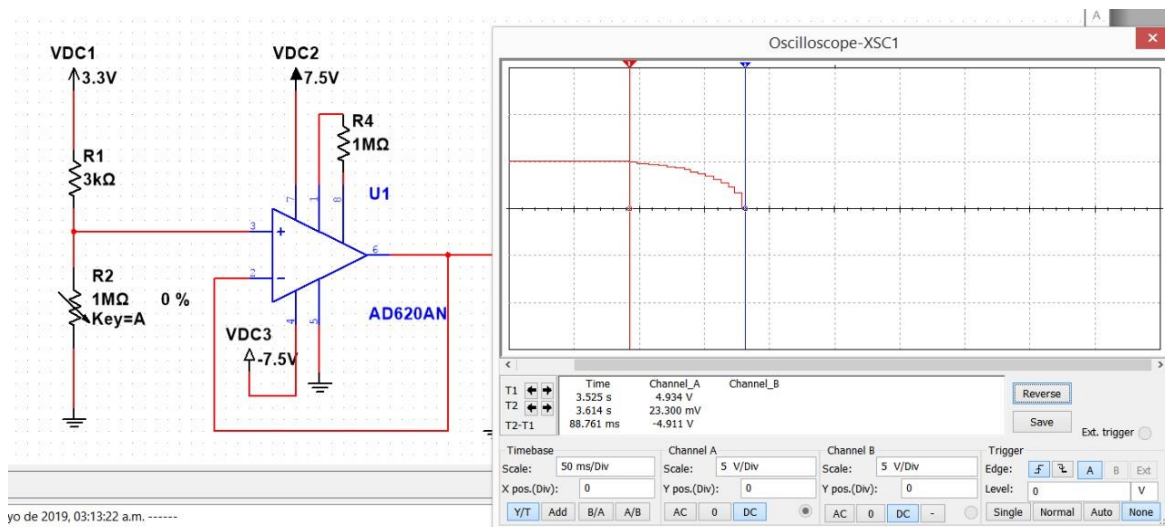
$$\text{Ganancia} = 49.4\text{K} / R_g + 1$$

En la configuración del buffer, la ganancia de un OPAMP es 1. Por ello no se suele colocar una resistencia y se opta por dejar los pines al aire, tal como se representa en la **Figura 2.33**:



**Figura 2.33** Codificación del Circuito Operacional  
Fuente: Elaboración Propia en base a [77]

El primer AD620AN tiene la función de ser un seguidor de voltaje o buffer. Podemos ver que el R2 es de 1M. Esto solo se colocó con el objetivo de que el programa utilizado para la simulación del circuito pueda realizar la simulación brindada en la **Figura 2.34**:



**Figura 2.34** Simulación del Circuito en estudio  
Fuente: Elaboración Propia en base a [78]

Con el circuito presentado se logró obtener una correcta lectura desde el 0.75% de 1M (7500 ohms) hasta 0% (0 ohms), coincidiendo con el rango de trabajo requerido para el sistema a diseñar.

Finalmente, con los datos obtenidos en la presente sección, se diseñó una placa matriz en la cual se instalará los componentes utilizados y el sensor FRS 402.

## **CAPÍTULO III**

### **RESULTADOS**

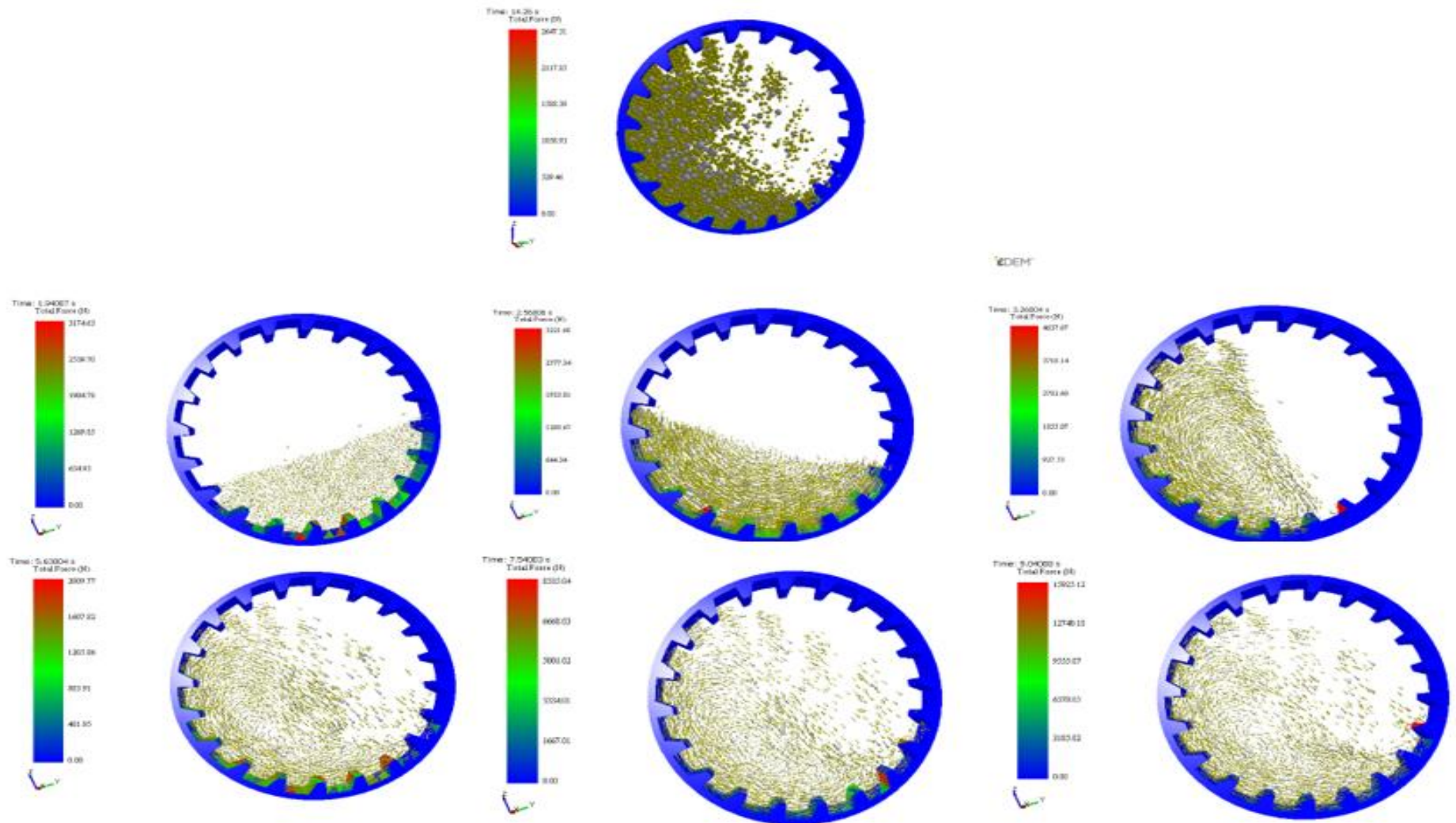
En el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos para el diseño del sistema de control y monitoreo en línea del desgaste de los revestimientos de un Molino SAG 15.5'x11' de la Unidad Minera Uchucchacua. Dichos resultados presentan dos secciones; una sección referente a los resultados obtenidos mediante las simulaciones funcionales realizadas al molino y el revestimiento que lo conforma, con el objetivo de diseñar el sistema eléctrico y mecánico y la otra sección referente a los resultados de pruebas de campo realizadas a los prototipos diseñados en la primera sección con el objetivo de corroborar su buen funcionamiento.

#### **3.1 Resultados en base a las simulaciones realizadas**

##### **3.1.1 Fuerzas de impacto en la superficie del revestimiento en base a la Simulación Operacional del Molino SAG 15.5'x11'**

En base a la simulación operacional del molino SAG 15.5'x 11', se pudo obtener como resultado las fuerzas de impacto que se originan en la superficie del revestimiento, tal como se presenta en la **Figura 3.1** Simulación Operacional del Molino SAG 15.5'x11':

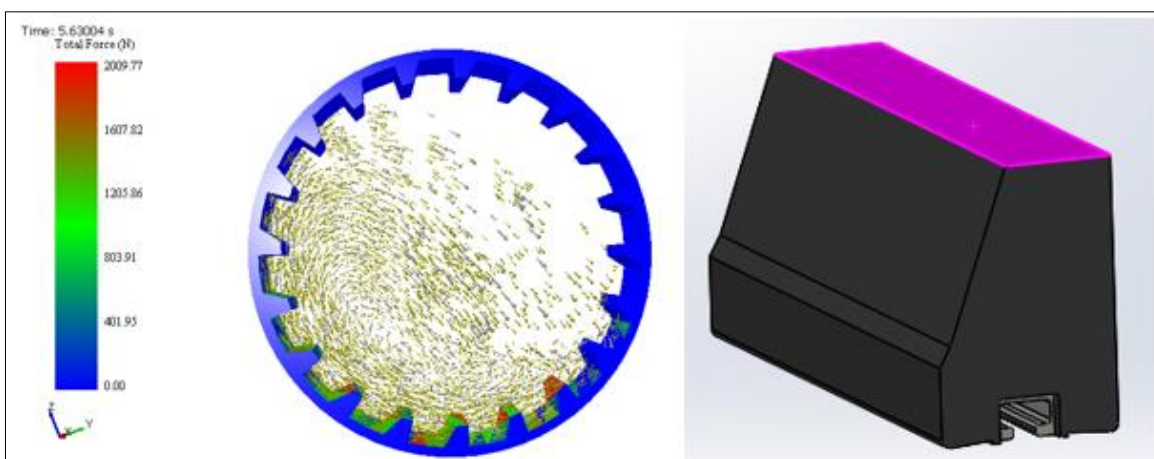




**Figura 3.1** Simulación Operacional del Molino SAG 15.5'x11'  
Fuente: Elaboración Propia en base a [66], [67], [68], [61], [43], [62], [54]

Como se aprecia en la **Figura 3.1**, las bolas de acero y el mineral propio realizan el fenómeno de catarata con el objetivo de triturar el mineral mediante fuerzas de impacto, las cuales ayudaron a estimar el desgaste de los revestimientos mediante una relación funcional entre ambas variables.

Por otro lado, la **Figura 3.2** Fuerzas de Impacto generadas en la parte superior del Revestimiento en estudio representa un esquema de las fuerzas de impacto que se genera en la superficie resaltada del revestimiento:



**Figura 3.2** Fuerzas de Impacto generadas en la parte superior del Revestimiento en estudio  
Fuente: Elaboración Propia en base a [68], [54]

Como se puede observar en la **Figura 3.2**, la sección resaltada del revestimiento, comprende una zona donde se producen fuerzas de impacto netas en un solo eje. Magnitudes de fuerza que no son tan elevadas en comparación a las de la sección con pendiente.

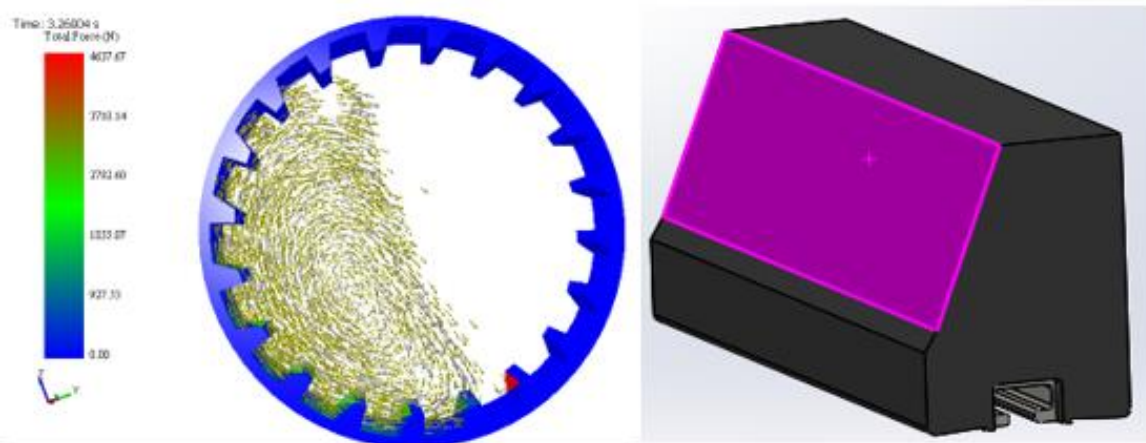
La **Tabla 3.1**, nos brinda información relevante acerca de la magnitud de las fuerzas que se originan en la superficie mencionada en la **Figura 3.2**, bajo distintos tiempos de operación del molino. En ella podemos observar fuerzas atípicas y fuerzas que siguen una media; donde los valores atípicos serán descartados mediante la configuración del circuito eléctrico evitando fallos en la toma de datos, dejando únicamente valores de fuerza media que seguirán un incremento paulatino en relación a su magnitud, a medida que el revestimiento se vaya desgastando.

N°	Tiempo (s)	Fuerza de Impacto (N)	N°	Tiempo (s)	Fuerza de Impacto (N)
1	2	2000	13	26	5917

2	4	2179	14	28	6665
3	6	3440	15	30	5937
4	8	3939	16	32	6678
5	10	4246	17	34	12234
6	12	9100	18	36	6655
7	14	4086	19	38	3851
8	16	5001	20	40	5036
9	18	10060	21	42	3550
10	20	6478	22	44	11109
11	22	16339	23	46	4893
12	24	7856	24	48	5036
13	26	5917	25	50	3550

**Tabla 3.1** Fuerzas de Impacto originadas en la cara superior del revestimiento obtenidos en base a la simulación operacional del molino SAG 15.5'x11'  
Fuente: Elaboración Propia en base a [68]

La **Figura 3.3** representa la otra superficie donde impactan las bolas de acero y el mineral propio. En dicha imagen podemos observar que la superficie resaltada es la que presenta mayores fuerzas de impacto por tener un área mayor en comparación a la anterior. Por lo que dicha región es la que presenta mayores desgastes.



**Figura 3.3** Fuerzas de Impacto generadas en la superficie lateral del revestimiento  
Fuente: Elaboración Propia en base a [68], [54]

Por otro lado, la **Tabla 3.2** nos brinda información acerca de la magnitud de la fuerza que se desarrolla en la superficie resaltada en la **Figura 3.3**, bajo distintos tiempos de operación del molino. En dicha tabla se observa fuerzas atípicas y fuerzas que siguen una media, donde los valores atípicos serán descartados mediante la configuración del circuito evitando fallos en la toma de datos, dejando únicamente valores de fuerza media que seguirán

un incremento paulatino en relación a su magnitud, a medida que el revestimiento se vaya desgastando.

N°	Tiempo (s)	Fuerza de Impacto (N)	N°	Tiempo (s)	Fuerza de Impacto (N)
1	2	3221	14	28	10273
2	4	4637	15	30	6535
3	6	4586	16	32	8335
4	8	5209	17	34	5917
5	10	5648	18	36	6665
6	12	5460	19	38	11424
7	14	6566	20	40	5460
8	16	7108	21	42	6122
9	18	6162	22	44	6615
10	20	4741	23	46	11424
11	22	9659	24	48	5878
12	24	6062	25	50	6655

**Tabla 3.2** Fuerzas de Impacto originadas en la cara lateral del revestimiento obtenidos en base a la simulación del molino SAG 15.5'x11'

Fuente: Elaboración Propia en base a [68]

Como se aprecia en la **Tabla 3.2**, la fuerza de impacto media es de 4200 N aproximadamente, mientras que los valores mínimos y máximos son 3000 N y 11420 N respectivamente.

### 3.1.2 Fuerzas de impacto reales generadas en la superficie donde se instaló el sistema de control y monitoreo

En base a las fuerzas de impacto generadas en la superficie del revestimiento, se realizó la simulación dinámica de impacto en el revestimiento con el objetivo de poder determinar la magnitud real de la fuerza que será medida por el sensor FRS 402.

Los resultados brindados en la **Tabla 3.3**, representan las fuerzas normales en la superficie de contacto del sensor obtenidas mediante la multiplicación de los esfuerzos normales y su respectiva área, procedimiento detallado en la sección de metodología del presente estudio. Cabe resaltar que dichas fuerzas de impacto fueron obtenidas asumiendo que el revestimiento no sufrió desgaste alguno.

N°	Esfuerzo [Pa]	Fuerza de Impacto [N]	N°	Esfuerzo [Pa]	Fuerza de Impacto [N]	N°	Esfuerzo [Pa]	Fuerza de Impacto [N]
1	164.32	1.610336	29	5530.3	54.19694	58	10519	103.0862
2	396.63	3.886974	30	5107	50.0486	59	10101	98.9898

N°	Esfuerzo [Pa]	Fuerza de Impacto [N]	N°	Esfuerzo [Pa]	Fuerza de Impacto [N]	N°	Esfuerzo [Pa]	Fuerza de Impacto [N]
3	519.73	5.093354	31	4958.4	48.59232	60	10145	99.421
4	1080.2	10.58596	32	5297.3	51.91354	61	10785	105.693
5	1610.8	15.78584	33	6008.6	58.88428	62	11725	114.905
6	1925.1	18.86598	34	6708.9	65.74722	63	12434	121.8532
7	2014.9	19.74602	35	7032.5	68.9185	64	12530	122.794
8	2010.5	19.7029	36	6871.1	67.33678	65	12091	118.4918
9	2096	20.5408	37	6461.2	63.31976	66	11601	113.6898
10	2440.9	23.92082	38	6221.5	60.9707	67	11562	113.3076
11	3064.1	30.02818	39	6459.7	63.30506	68	12128	118.8544
12	3672.3	35.98854	40	7138.3	69.95534	69	13056	127.9488
13	3907.5	38.2935	41	7890.3	77.32494	70	13853	135.7594
14	3737.9	36.63142	42	8268.6	81.03228	71	14068	137.8664
15	3428.3	33.59734	43	8106.9	79.44762	72	13637	133.6426
16	3298.6	32.32628	44	7621.7	74.69266	73	12996	127.3608
17	3547.3	34.76354	45	7243.8	70.98924	74	12723	124.6854
18	4153.8	40.70724	46	7317.9	71.71542	75	13085	128.233
19	4826.5	47.2997	47	7899	77.4102	76	13911	136.3278
20	5216.5	51.1217	48	8683.8	85.10124	77	14728	144.3344
21	5162.4	50.59152	49	9195.6	90.11688	78	15055	147.539
22	4782.8	46.87144	50	9143.9	89.61022	79	14738	144.4324
23	4393	43.0514	51	8698.5	85.2453	80	14110	138.278
24	4330.4	42.43792	52	8343.9	81.77022	81	13769	134.9362
25	4703.1	46.09038	53	8475.8	83.06284	82	14154	138.7092
26	5305.4	51.99292	54	9155.3	89.72194	83	15255	149.499
27	5774.3	56.58814	55	10098	98.9604	84	16568	162.3664
28	5846.7	57.29766	56	10808	105.9184	85	17397	170.4906
29	5530.3	54.19694	57	10916	106.9768	86	17364	170.1672

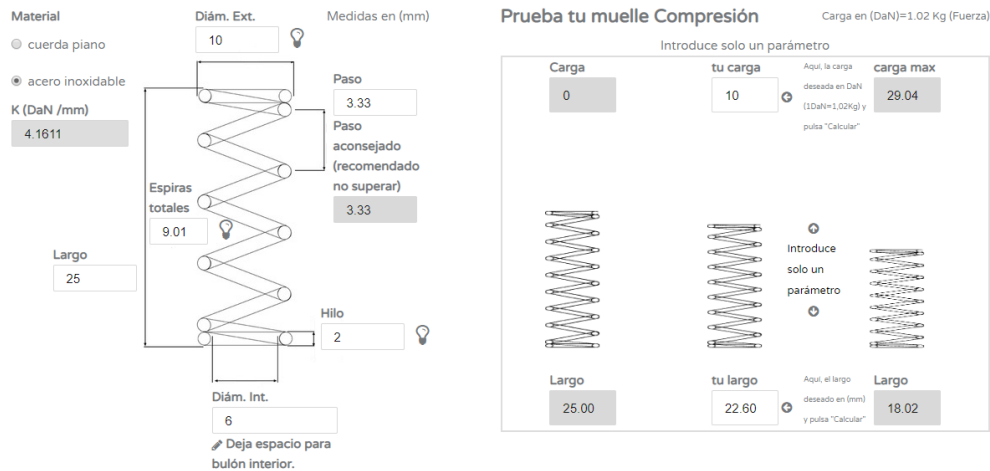
**Tabla 3.3** Valores de fuerza de impacto real que se genera en la superficie donde se instalará el sistema de control y monitoreo

Fuente: Elaboración Propia en base a [70] y [10]

Con las fuerzas mencionadas en la **Tabla 3.3** se pudo tener una aproximación de las fuerzas de impacto a producirse cuando el revestimiento se vaya desgastando paulatinamente. Tal como se mencionó en apartados anteriores, resulta muy difícil poder simular un revestimiento desgastado, ya que dicho desgaste se presenta en diferentes partes del componente.

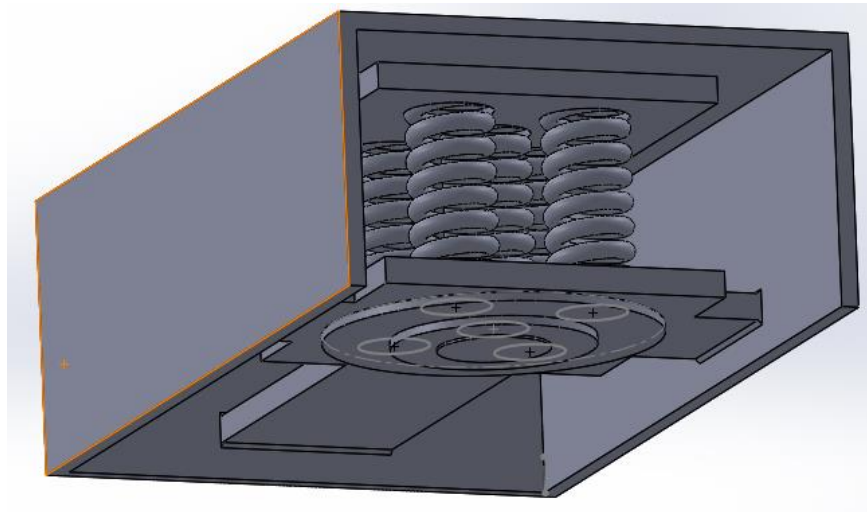
### 3.1.3 Sistema mecánico utilizado para absorber las elevadas fuerzas de impacto asegurando el buen funcionamiento del sistema de control y monitoreo

En función a la magnitud de la fuerza de impacto que fue medida por el sensor cuando el revestimiento se encontraba desgastado, se eligió el número de resortes convenientes en base a los resultados de las simulaciones elásticas. La **Figura 3.4** representa el análisis elástico realizado a diversos resortes de compresión con el objetivo de poder determinar el resorte ideal para su uso en el diseño del sistema mecánico.



**Figura 3.4** Cálculo del resorte de compresión  
Fuente: Elaboración Propia en base a [71]

En base a los resultados obtenidos se eligió un resorte de compresión que presenta un largo libre de 25 mm, diámetro externo de 10 mm, diámetro interno de 6 mm y un hilo de 2 mm con pasos de 3.33 mm. Dicho resorte presenta una capacidad de carga máxima de aproximadamente 31 kilogramos o 310 N.



**Figura 3.5** Sistema mecánico de Absorción de fuerzas de Impacto.  
Fuente: Elaboración Propia en base a [54] y [71]

La **Figura 3.5** representa un mecanismo con cinco resortes de compresión, presentando una absorción de carga de aproximadamente 1450 N. Si la fuerza de impacto inicial en la superficie del revestimiento donde fue instalado el sensor es multiplicada por ocho veces su valor inicial, representando un valor de fuerza de unos 1360 N, se puede decir que dicho sistema mecánico es capaz de soportar ocho veces más la fuerza de impacto inicial de medición del sensor.

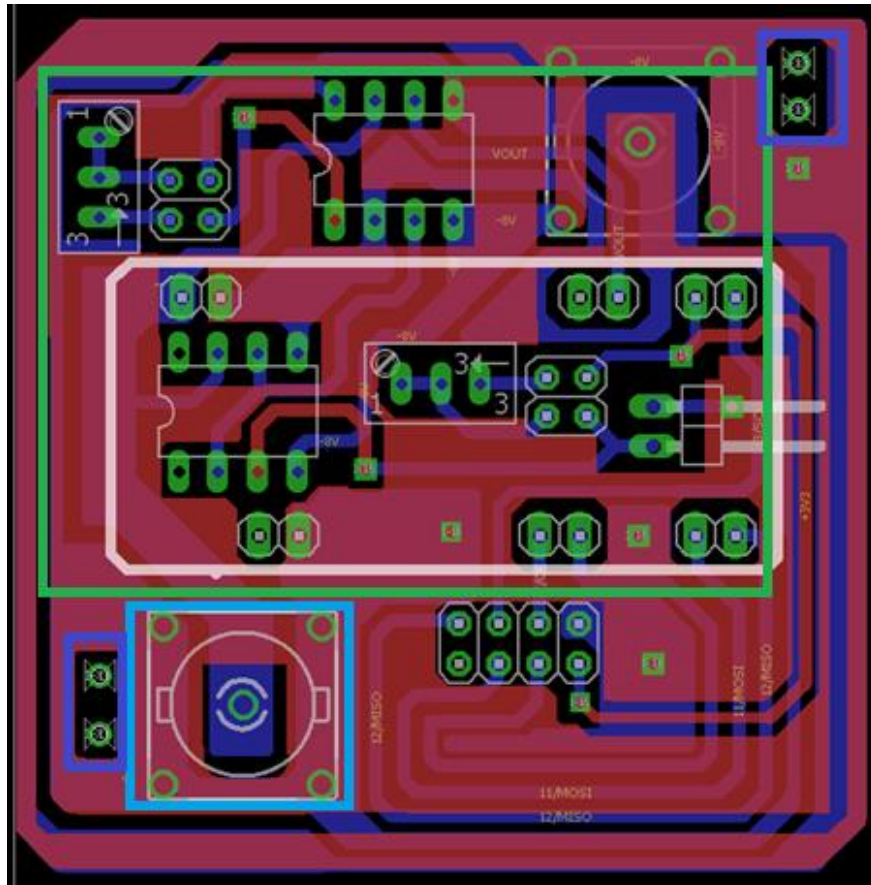
El sistema completo fue protegido por resina y una estructura en forma de caja que se acopla al dimensionamiento del sistema mecánico.

#### **3.1.4 Diseño de la Placa del Circuito Integrado**

Teniendo en cuenta las dimensiones disponibles para la implementación del sistema de control y monitoreo en el revestimiento, se procedió a realizar el diseño de la placa matriz del sistema en estudio, en el cual fueron instalados los sensores de fuerza y los componentes eléctricos que se utilizaron para el correcto funcionamiento del sensor.

En la **Figura 3.6** se presenta el diseño de la placa matriz, el cual posee un largo y ancho de 55 mm. Dicha placa donde irán soldados todos los componentes detallados en la sección de sistema eléctrico, consta generalmente de líneas internas por donde circulará el

flujo de corriente eléctrica alimentado a cada componente del circuito. Además, presenta pequeños orificios donde fueron instalados cada componente asociándolos entre sí.



**Figura 3.6** Diseño de la Placa donde se instalarán los componentes electrónicos  
Fuente: Elaboración Propia en base a [78]

El área delimitada por color verde, representa los componentes del circuito que están conformados por el sensor FSR 402, Amplificadores Operacionales, Resistencias Variables y Capacitores; el área delimitada por color azul, representa los orificios diseñados para poder anclar la placa a una estructura, la cual se encuentra aislada de todo contacto, inclusive del voltaje de referencia; y por último, el área delimitada por el color celeste, representa los espacios donde fueron colocados las fuentes de voltaje que alimentan a todo el circuito.

Tal como se puede observar en la **Figura 3.6**, no se integró ningún regulador de voltaje, ya que la alimentación positiva y negativa se obtuvo gracias a un juego de baterías colocados de forma paralela en la riel del revestimiento en estudio.



Tras la instalación del mecanismo mecánico completo dentro del molino, se obtuvieron valores reales de fuerza de impacto, con lo cual únicamente se calibró el sistema para que el sensor pueda recibir valores de fuerzas de impacto óptimas que se encuentren dentro del rango permisible del sensor y con ello se refleje el grado de desgaste de los revestimientos.

### 3.2 Resultados de los Prototipos diseñados

En base a los resultados obtenidos de la simulación operacional del molino y el análisis de impacto en el revestimiento, se realizó el diseño de prototipos funcionales del sistema eléctrico y mecánico que cumplan con los requerimientos de trabajo, trayendo consigo el correcto funcionamiento del sistema de control y monitoreo en línea del desgaste de los revestimientos del Molino SAG 15.5'x11'.

#### 3.2.1 Sistema Eléctrico

Dadas las condiciones presentadas en el sistema, la implementación de un circuito eléctrico capaz de procesar la salida del sistema mecánico representa un reto, especialmente hablando en términos de consumo energético.

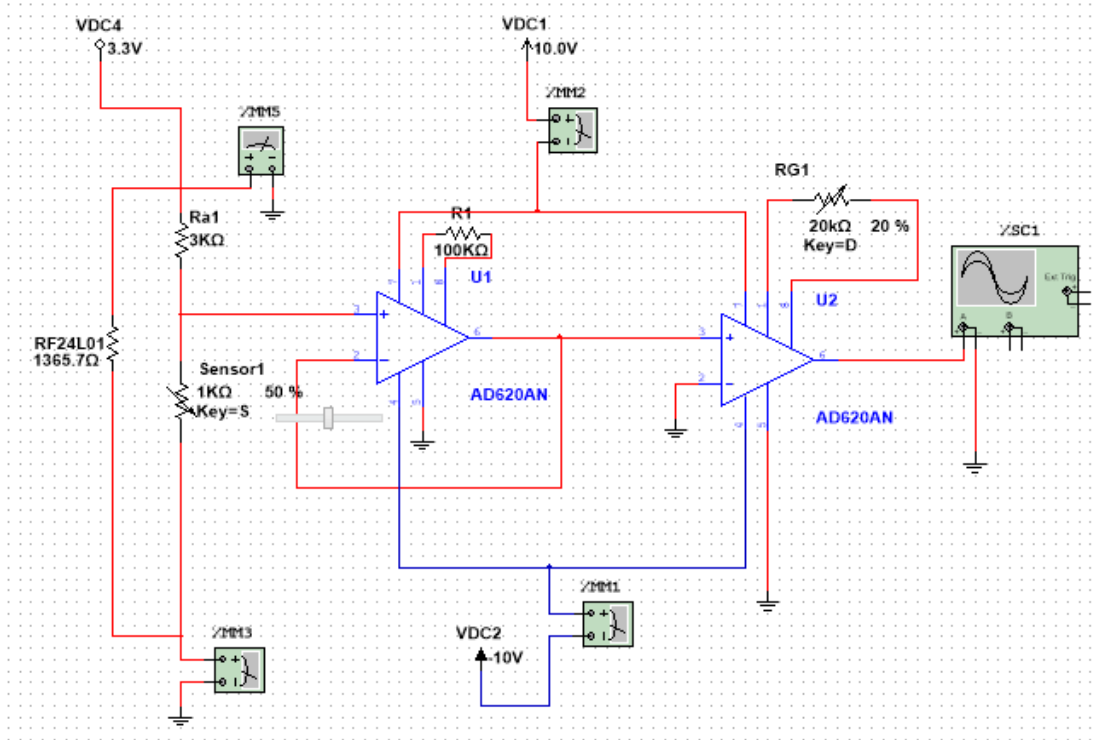
Se decidió alimentar el sistema con un juego de baterías; sin embargo, al realizar los cálculos de consumo de los componentes se pudo observar que el consumo promedio de los todos los elementos eléctricos usados para el sistema, generan un gasto muy significativo de energía, con el cual, para poder obtener una autonomía mayor a los 2 meses, se necesita colocar baterías con dimensiones mayores a las usadas en el mundo automotriz.

En la **Tabla 3.4**, se muestra los elementos de mayor consumo del sistema eléctrico, obtenidos mediante las simulaciones funcionales realizadas al circuito eléctrico.

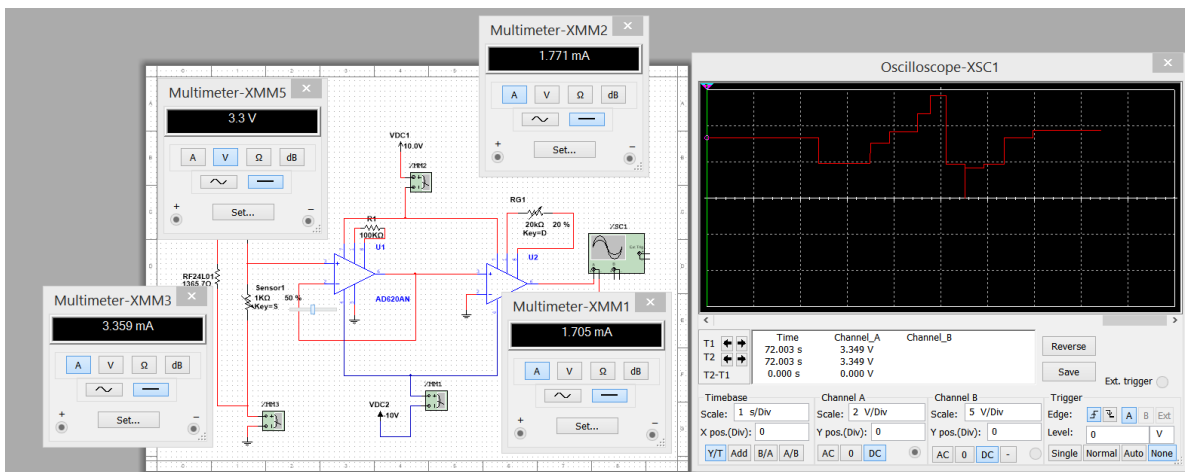
Elemento	Cantidad	Consumo de corriente (mA)
Arduino Nano	1	15 mA
NRF24L01	1	15 mA
AD620	2	2.6 mA
<b>TOTAL</b>		<b>32.6 mA</b>

**Tabla 3.4** Elementos del sistema Eléctrico de mayor consumo de corriente  
Fuente: Elaboración Propia

Para reducir el consumo energético del sistema eléctrico se optó por el uso de software como el Clok Pre – Scale y el Sleep Mode. Inicialmente con la implementación de dichos Software en el sistema de control de alimentación, se obtuvo el circuito eléctrico que se presenta en la **Figura 3.7** y **Figura 3.8**.



**Figura 3.7** Simulación del circuito eléctrico utilizado para obtener el consumo de los componentes  
Fuente: Elaboración Propia



**Figura 3.8** consumo eléctrico de los componentes del sistema  
Fuente: Elaboración Propia

En la **Tabla 3.5** se puede observar el consumo de los principales componentes del sistema eléctrico en mili amperios (mA) a diferentes voltajes de alimentación.

<b>Componentes</b>	<b>Fuentes de Alimentación (Voltios)</b>		
	<b>3.3 Voltios</b>	<b>10 Voltios</b>	<b>-10 Voltios</b>
AD620's	0 mA	1.701 mA	1.086
NRF24L01	2.416 mA	0 mA	0 mA
Circuito del Sensor a un 4% de trabajo	1.086 mA	0 mA	0 mA
<b>Total de consumo de Corriente eléctrica(mA)</b>	3.052 mA	1.701 mA	1.086 mA
<b>Potencia Total ( Voltaje x Corriente)</b>	11.56 mW	17.01 mW	10.86 mW

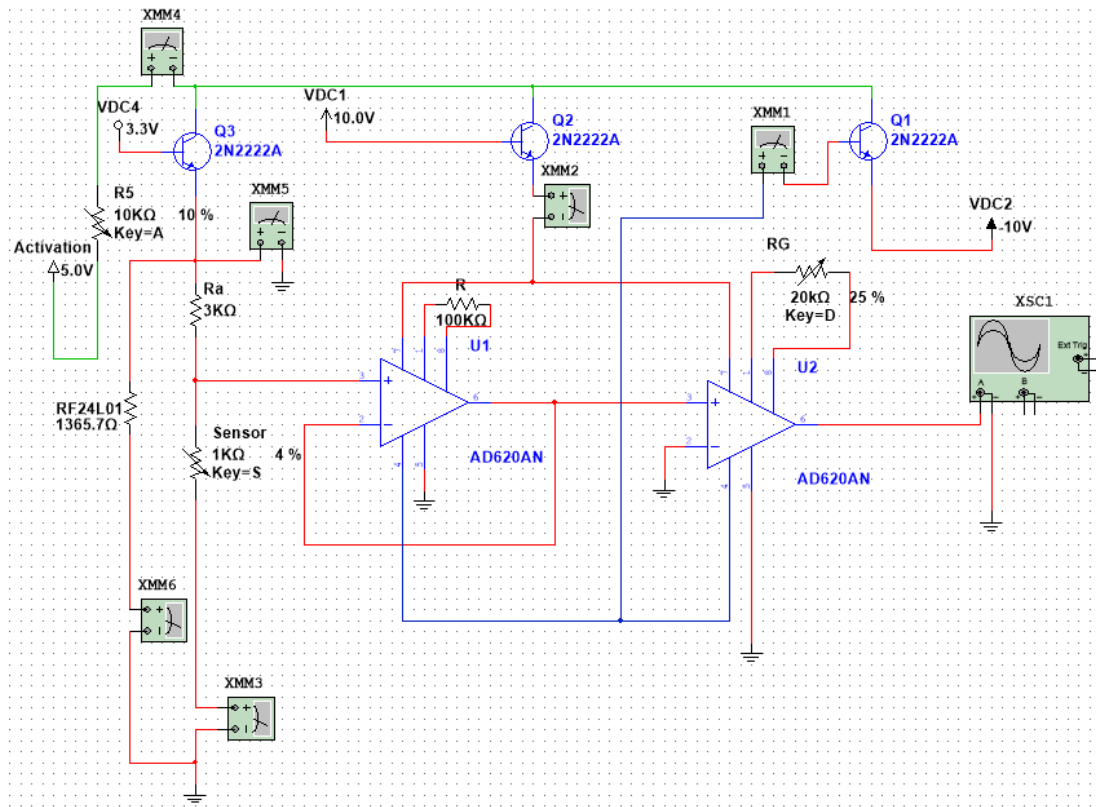
**Tabla 3.5** Consumo de Potencia Total del sistema Eléctrico inicial.

Fuente: Elaboración Propia

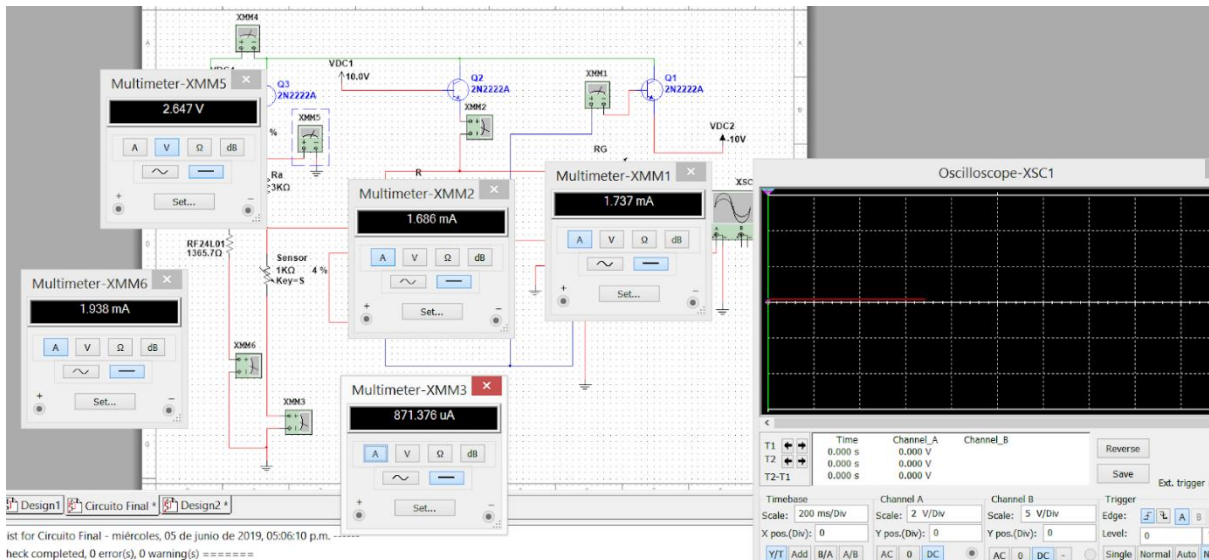
En ella se observó que dicho sistema eléctrico presentaba un consumo total de potencia eléctrica de 39.43 mW, para los componentes de mayor consumo del sistema.

Para obtener el cálculo de la dimensión de la batería requerida para proveer la energía consumida se tomó el valor de la potencia obtenida (39.49 mW) y se la multiplicó por el tiempo (en horas) de autonomía deseado, siendo aproximadamente unas 4,320 horas por tres meses de trabajo continuo.

La solución final planteada para la reducción del consumo energético mediante implementación de hardware y software fue la adición de 3 elementos activos, conocidos como transistores, para generar un sistema de control en la alimentación tal cómo se muestra en la **Figura 3.9** y **Figura 3.10**.



**Figura 3.9** Simulación del circuito eléctrico utilizado para obtener el consumo de los componentes en la cual se añadió tres transistores  
Fuente: Elaboración Propia



**Figura 3.10** Consumo eléctrico de los componentes del sistema eléctrico en la cual se añadió tres transistores  
Fuente: Elaboración Propia

De la misma forma al sistema anterior, se halló la potencia total de todos los componentes, tal como se muestra en la **Tabla 3.6**.

Componentes	Fuentes de Alimentación (Voltios)		
	2.647 Voltios	7.841 Voltios	9.166 Voltios
AD620's	0 mA	1.686 mA	1.737 mA
NRF24L01	1.938 mA	0 mA	0 mA
Circuito del Sensor a un 4% de trabajo	0.871 mA	0 mA	0 mA
<b>Total de consumo de Corriente eléctrica (mA)</b>	2.802 mA	1.686 mA	1.737 mA
<b>Potencia Total (Voltaje x Corriente)</b>	7.436 mW	13.22 mW	15.92 mW

**Tabla 3.6** Consumo de Potencia Total del sistema Eléctrico modificado.

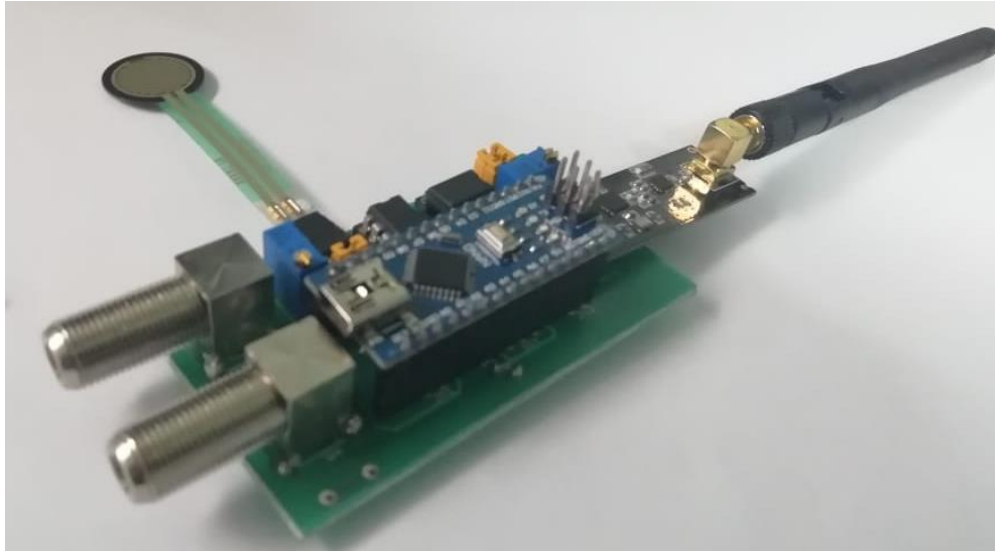
Fuente: Elaboración Propia

Obteniéndose finalmente un consumo total de potencia eléctrica de 36.58 mW.

Se puede notar que entre ambos sistemas existe un ahorro mínimo de 2.85 mW en la potencia; sin embargo, el mayor diferencial se encuentra en el consumo energético debido a que el primero no cuenta con un sistema de control de alimentación, ello significa que ese sistema debe estar alimentado permanentemente (duty cycle = 1) generando un costo energético muy significativo.

En contraparte, en el segundo circuito, con ayuda del controlador (arduino), podemos activar las fuentes de alimentación cuando se necesiten, con el fin de alterar su duty cycle (duty cycle < 1) y así generar un ahorro de energía considerable.

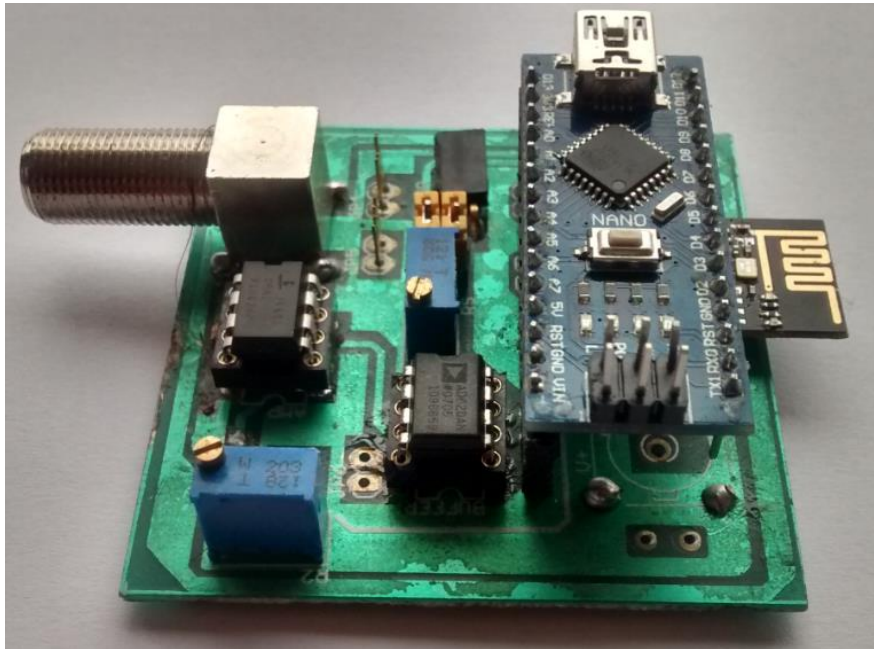
Con los datos finales y los cambios realizados al circuito inicial mediante los resultados obtenidos, se diseñó el prototipo del sistema eléctrico que se encargará de procesar la señal enviada por el sensor de fuerza FRS 402, tal como se muestra en la **Figura 3.11**.



**Figura 3.11** Diseño del Sistema Eléctrico – Placa de Procesamiento Final en base a los resultados obtenidos  
Fuente: Elaboración Propia.

La **Figura 3.11**, representa el sistema eléctrico que se encargó de procesar la señal recibida por el sensor de fuerza FRS 402. Dicho mecanismo eléctrico fue instalado en el exterior del molino ya que, dentro de este, la señal del WIFI se distorsionaba. Para ello fue necesario soldar una pequeña caja en el cuerpo del molino donde pueda caber dicho sistema y las baterías que lo alimentaran. El código de procesamiento de dicho sistema eléctrico se presenta en el Anexo 4.

La **Figura 3.12**, representa la placa matriz de recepción el cual presenta los mismos componentes de la placa anterior variando únicamente en su fuente alimentación. Dicha placa irá conectada al PLC del molino enviándole la señal recibida para su posterior tratamiento. El código utilizado por el microcontrolador de dicha placa se presenta el en Anexo 5.



**Figura 3.12** Diseño del Sistema Eléctrico – Placa de Recepción Final en base a los resultados obtenidos  
Fuente: Elaboración Propia

### 3.2.2 Sistema Mecánico

Tal como se mencionó en apartados anteriores, fue necesario el diseño de un sistema mecánico que pueda reducir las elevadas fuerzas que se presentan en el mecanismo dejando únicamente valores que oscilen entre los 0 N y 90 N, valores definidos por el datasheet del sensor de fuerza.

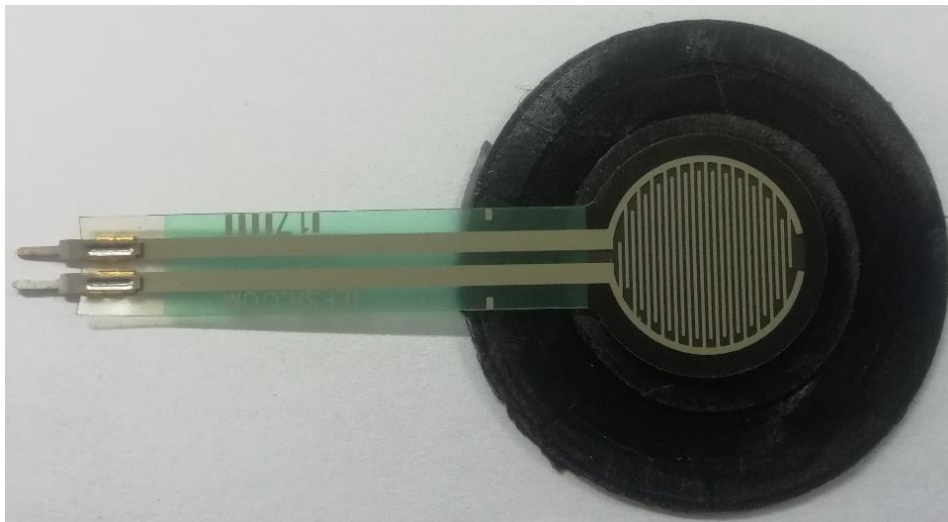
Para ello se realizó el prototipo funcional de un sistema de absorción de fuerza mediante resortes, los cuales irán en contacto directo con la riel del revestimiento.

En la **Figura 3.13**, se muestra el prototipo final de los resortes que fueron utilizados en el sistema mecánico, los cuales fueron mecanizados en base a análisis de elasticidad y resistencia:



**Figura 3.13** Resortes mecanizados en base a las características del sistema  
Fuente: Elaboración Propia

Dichos resortes fueron instalados en una caja de metal la cual le servirá como soporte y protección. El sensor de fuerza irá debajo de dicho sistema de absorción, teniendo una placa circular entre ambos componentes con el objetivo de que la fuerza sea localizada en el área de medición del sensor, tal como se muestra en la **Figura 3.14**.



**Figura 3.14** Sensor de fuerza FRS 402 instalada en la placa circular de metal  
Fuente: Elaboración Propia



Finalmente se implementará el sistema mecánico dentro del revestimiento para que con ello se pueda medir las fuerzas impacto generadas, enviándolo al sistema eléctrico mediante una señal analógica y con ello obtener el desgaste de los revestimientos.

## CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos, se puede estipular que el sistema de control y monitoreo en línea desarrollado en este trabajo de titulación cumple con los objetivos propuestos y con los planteados y exigidos por la Compañía de Minas Buenaventura. En términos generales, la implementación del sistema de control y monitoreo en línea del desgaste de revestimientos del molino principal de la Unidad Minera Uchucchacua resultó muy beneficiosa, ya que con la implementación del sistema se logró tener un control preciso del desgaste de los revestimientos, para que con ello se puedan programar mantenimientos en función de su desgaste, evitando cambios prematuros y tardíos de los mismos. A su vez, se logró tener un mayor control en el consumo de revestimos, factor que influye directamente en los costos operacionales de la Unidad Minera.

A continuación, se brindan algunas conclusiones específicas del trabajo de investigación y sus logros:

1. El sistema de control y monitoreo es capaz de estimar el grado de desgaste de los revestimientos y con ello su vida útil, determinando así las probables fechas de recambio. Además, se describe gráficamente la forma y el comportamiento de los revestimientos frente al fenómeno del desgaste que se origina por el proceso de molienda. Esto se logró gracias a un sistema mecánico compuesto por resortes de compresión y caucho, el cual absorbe las elevadas fuerzas de impacto, dejando únicamente valores que oscilan entre los 0 a 90 N para un correcto procesamiento del sensor de fuerza.
2. En relación al sistema eléctrico, este está compuesto por sensores de fuerza resistivos modelo FRS 402 de rango de medición de 0 a 90 N, microcontroladores, módulos WIFI, resistencias de precisión, amplificadores operacionales, placa matriz y fuente de voltaje negativo y positivo. Se logró diseñar un sistema con una gran autonomía energética y un buen sistema de procesamiento, asegurando así el correcto funcionamiento del sistema en general.

3. Desde el punto de vista de la ingeniería, la solución permite un rápido y eficaz análisis, diagnóstico y conocimiento del estado evolutivo del desgaste de los revestimientos. Además, el solo hecho de conocer mediante el sistema de control y monitoreo en línea las fechas de recambio de los revestimientos, permite programar y planificar las fechas de mantenimiento general de la planta, puesto que el equipo en estudio es un elemento crítico en el proceso de la planta minera. Estos resultados son la base de toma de decisiones y acciones futuras a realizar, por parte de los ingenieros supervisores y los planeadores de manutención. También es posible contrastar la duración rendimiento de los revestimientos que ofrecen diferentes proveedores y fabricantes, con los datos estimados por sistema en estudio. Cabe resaltar que el presente sistema fue diseñado en miras de que sea posible su instalación en cualquier molino de bolas y SAG realizando únicamente ajustes en el código de programación y el sistema de absorción de carga puesto que cada molino presenta fuerzas de impacto diferentes.
  
4. Debido a que no se detalló a fondo el consumo energético del sistema completo, se recomienda realizar un estudio futuro para estimar el tiempo real de trabajo continuo del sistema de control y monitoreo y así definir el tipo y capacidad de baterías que alimentará a nuestro mecanismo. Además, se recomienda realizar un estudio en base a los resultados obtenidos bajo una implementación futura del sistema en el propio molino, con la finalidad de determinar si es necesario el uso de uno o más sensores de fuerza. Para determinar si el sistema determina valores reales en relación al desgaste de los revestimientos, se recomienda realizar una comparación con un sistema de control existente como el ultrasonido, varillas de medición, laser, entre otros.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. L. A. B. A. V. M.C. Moreno, «La Minería en el Perú,» Anuario Minero, 2017.
- [2] Metso, «<http://www.metsominerals.com>,» Metso, 2018. [En línea]. [Último acceso: 2018].
- [3] P. Malcolm, S. Ian, R. Peter, C. Paul, R. Bruce, E. Klas y S. Leon, «The Selection and Design of Mill Liners,» 2017.
- [4] J. V. Sánchez, «El Comercio Perú,» El Comercio, 2015. [En línea]. Available: <http://elcomercio.pe/economia/peru/importante-mineria-peru-192754>. [Último acceso: 11 10 2018].
- [5] Rumbo Minero, «Perú: Sector Minero 2017,» Rumbo Minero, 2017.
- [6] Ministerio de Energía y Minas, «Anuario Minero,» Lima, Perú, 2017.
- [7] Rumbo Minero, «5 mineras del Perú dentro de las 10 líderes productoras de plata en el Mundo,» Rumbo Minero, 2018.
- [8] Anónimo, «Revestimientos para Molinos,» de Revestimientos , 2015.
- [9] R. D y M. J, Sistema de Mejora en la Gestión de los procesos mineros de planta (Chancado y Molienda), 2018.
- [10] Buenaventura, «UCHUCCHACUA,» 2019. [En línea]. Available: <http://www.buenaventura.com/es/operaciones/detalle/7>. [Último acceso: 05 04 2019].
- [11] Unidad Minera Uchucchacua - Compañía de Minas Buenaventura , «Reporte Mensual Mantenimiento Planta,» Oyon, Lima, 2018.
- [12] M. A. A. Henríquez, «MODELO MATEMÁTICO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE REVESTIMIENTOS EN MOLINOS SEMIAUTÓGENOS,» Universidad Nacional de Ingeniería, Chile, 2006.
- [13] M. A. M. Frisancho, «OPTIMIZACIÓN DEL MANTENIMIENTO EN EL CAMBIO DE LOS FORROS EN EL MOLINO FULLER DE LA EMPRESA

- SOUTHERN PERÚ - TOQUEPALA,» Universidad Nacional de Altiplano, Lima, 2015.
- [14] Unidad Minera Uchucchacua , Compañía de Minas Buenaventura, «Costos Operacionales de la Unidad Minera Uchucchacua 2015 - 2018,» Oyon, Lima.
- [15] B. Acuña y H. , «Informe Final Diseño Molino SAG,» Chile, 2009.
- [16] R. Segovia, «Reemplazo Óptimo de componentes sujetos a desgaste bajo la realización de inspecciones periódicas,» Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile, 1997.
- [17] C. O. G. Urquiza, «"OPTIMIZACIÓN DEL CICLO DE VIDA DE LOS FORROS DEL CILINDRO EN UN MOLINO DE BOLAS 8'X10 DE 2000TMSD",» Lima, Perú, 2014.
- [18] M. T. Cari, «DISEÑO Y SIMULACIÓN DE MANIPULADOR PARA FORROS DE ACERO APLICADOS EN MOLINOS CONVENCIONALES,» Puno, Perú, 2018.
- [19] J. C. J. Ochoa, Interviewee, Pérdida de la Planta por hora de parada y Control de los revestimientos. [Entrevista]. 10 2018.
- [20] Southern Copper, «Unidad Minera Toquepala,» 09 2019. [En línea]. Available: <http://www.southerncoppercorp.com/ESP/Pages/default.aspx>.
- [21] A. Valdivia, Interviewee, Costo por hora de parada de planta y control de los revestimientos. [Entrevista]. 10 2018.
- [22] VOLCAN, «Unidad Minera Chungar,» 01 2019. [En línea]. Available: <https://www.volcan.com.pe/en/operations/mining/#unidadesmineras>. [Último acceso: 03 2019].
- [23] J. Zubilete, Interviewee, Costo por hora de parada de Planta y control de los revestimientos. [Entrevista]. 10 2018.
- [24] Cerro Verde, «Unidad Minera Cerro Verde,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.cerroverde.pe/>. [Último acceso: 10 2018].

- [25] M. Felipe, Interviewee, Control y Monitoreo de los revestimientos en la Unidad Minera Cerro Verde. [Entrevista]. 11 10 2018.
- [26] HUDBAY, «Operaciones Comerciales Perú,» 06 2018. [En línea]. Available: <https://www.hudbayminerals.com/Spanish/Nuestras-operaciones-comerciales/Perues/default.aspx>. [Último acceso: 10 2018].
- [27] M. Medina, Interviewee, "Experiencia exitosa del uso de Megaliner". [Entrevista]. 15 11 2018.
- [28] R. D y M. J, «"Sistema de mejora en la gestión de los procesos mineros de planta°,» 2018.
- [29] M. Napier, M. T, M. S y K. T, «Mineral Comminution Circuits. Their Operation and Optimization,» Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, Indorooipilly, 1999.
- [30] S. Rodrigo, «Reemplazo óptimo de componentes sujetos a desgaste bajo la realización de inspecciones periódicas,» Pontifica Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería, Chile, 1997.
- [31] C. P, «Charge behavior and power consumption in ball mills: Sensitivity to mill operating conditions, liner geometry and charge composition.,» International Journal of Mineral Processing, 2001.
- [32] J. Alcántara, «Diseño práctico de un molino de bolas,» México, 2008.
- [33] L. Espinoza de León y A. López, «Teoría y prácticas de trituración y Molienda,» Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2012.
- [34] P. A. Huarcaya Taípe, «Peritaje para la actualización de la capacidad instalada de Planta Metalurgica de Minera Laytaruma S.A,» Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, 2018.
- [35] Anónimo, «Made-in-china.com,» Chinese Suppliers, 2018. [En línea]. Available: <https://crdmetal.en.made-in-china.com/product/zjwQCanVC1hW/China-F12101-F12803-F13102-Nodular-Cast-Iron-Bar-Price.html>. [Último acceso: 2018].
- [36] M. A. M. Aldave, «Recuperación del Molino de bolas 9'x8' de la Minera Aurifera Retamas,» Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, 2008.

- [37] Moly Cop, «Productos,» 10 10 2018. [En línea]. Available: <https://molycop.com/products/>.
- [38] Anónimo, «Electiva Metalúrgica,» 10 10 2018. [En línea]. Available: <http://electivapmetalurgicos.blogspot.com/2015/>.
- [39] P. J. M. J. Serrano, «La molienda es la última etapa del proceso de conminución o fragmentación para la reducción del tamaño de las partículas.,» 10 11 2018. [En línea]. Available: <https://docplayer.es/63107859-La-molienda-es-la-ultima-etapa-del-proceso-de-conminucion-o-fragmentacion-para-la-reduccion-del-tamano-de-las-particulas.html>.
- [40] Funvesa, «Funvesa Fundación Ventanilla S.A - Molino SAG,» [En línea]. Available: <https://www.funvesa.com.pe/es/ver-productos/1-molienda/3-molino-sag>. [Último acceso: 10 10 2018].
- [41] L. Feuyo, «Equipos de Trituración, Molienda y Clasificación,» Rocas y Minerales.
- [42] G. R. Levi, «Metodología del Molino con fines Optimizantes,» Universidad Nacional de San Agustín, Cuzco, 2001.
- [43] G. Barrientos y L. Espejo, «Evaluación de las cargas de Impacto en el Interior de un molino SAG,» Universidad de Concepción, Chile.
- [44] R. Dandotiya, «Decision Support Models for the Maintenance and Design of Mill Liners,» Lulea University of Technology, Lulea, 2011.
- [45] Elastomers, «Mineral Processing Plant Design, Practice and Control Proceedings,» SME, 2002.
- [46] G. G. O, «Estudio para Calibración de Molinos,» Universidad de Chile, Santiago de Chile, 2011.
- [47] J. Franke y D. Lichti, «Mill Liner Condition Monitoring and Mill Performance Optimization,» Meeting of the Canadian Mineral Processors, Ottawa, 2005.
- [48] R. Dandotiya, A. Lundberg y A. Parida, «Evaluation of abrasive wear Measurement Devices of Mill Liners,» Lulea University of Technology, Lulea.
- [49] S. Kawatra, «Advances in Comminution,» ISBN, 2006.

- [50] H. Bloch y K. Geitner, «Practical Machinery Management for Process Plants,» ISBN, 1190.
- [51] J. Franke, «Mill Mapper Experiences a Mill Condition Monitoring and Operational Improvement Case Study,» MetPlant, Australia, 2008.
- [52] B. Mishra, R. Rajamani, V. Duriseti y S. Latchireddi, «Developments in Sensor Technology for Tumbling Mills,» ISBN, 2006.
- [53] HighService Corp, «Sistema Sensor de Desgaste para Revestimientos de Molinos y Placas de Desgaste,» [En línea]. Available: <http://www.highservice.com/highservice/es/highservice-technology/ssd-sistema-sensor-de-desgaste/>. [Último acceso: 12 04 2019].
- [54] Dassault Systemes, «Introducing Solidworks,» 2014.
- [55] H. Kenneth , E. Huebner y A. Thornton, «The Finite Element Method for Engineers,» Jhon Wiley y Sons, Canadá, 1990.
- [56] Universidad Peruana de Ciencia Aplicadas, «Formulación del Método de los Elementos Discretos,» de Aplicación del Método de los elementos discretos a problemas de desgaste, Lima , pp. 15-50.
- [57] A. E. Fernández Galeano, «Estudio de Sensores Piezoeléctricos en aplicaciones de medición de Fuerza,» Universidad Politécnica de València, Valencia, 2018.
- [58] J. C. Herrero Herranz y A. J. Sánchez, «Una mirada al Mundo Arduino,» Universidad Alfonso X El Sabio, Madrid, 2015.
- [59] Sparkfun, «What is an Arduino?,» [En línea]. Available: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/what-is-an-arduino/all>. [Último acceso: 20 03 2019].
- [60] Arduino, «Lenguaje de Programación,» [En línea]. Available: <https://carenteria00.wordpress.com/lenguaje-de-programacion/>. [Último acceso: 12 04 2019].
- [61] N. Soto Yanqui, «Informe Técnico de Operaciones Metalúrgicas de la Planta de Procesos de Uchucchacua CIA. de Minas Buenaventura S.A.A,» Universidad Nacional San Agustín de Arequipa, Arequipa, 2014.



- [62] Buenaventura, Unidad Minera Uchucchacua, Oyon, 2019.
- [63] metso, «Molino SAG 15.5'x11' Resvestido de Caucho,» Lima, 2012.
- [64] Interlink Electronics, «FSR 402 Data Sheet,» Sensor Technologies.
- [65] V. Garrindo Castro, «Determinación del Coeficiente de Restitución de una Pelota de ping - Pong,» México, 2015.
- [66] Anónimo, «Rozamiento,» Universidad de Valencia, Valencia.
- [67] E. Valladolid y J. López, «Dinámica Longitudinal de Tracción,» UVA, 2013.
- [68] EDEM Simulation, «Plataforma de Interacción EDEM Simulation Academy».
- [69] Ansys Transient Structural, «Data de propiedades de Material».
- [70] Ansys Transient Structural, «Ansys Workbench».
- [71] MuelleStock, «Cálculo de resortes de Compresión».
- [72] Mouser, «Amplificadores Operacionales,» [En línea]. Available: [https://www.mouser.pe/Semiconductors/Amplifier-ICs/\\_/N-4frvm?Keyword=MCP6004&FS=True](https://www.mouser.pe/Semiconductors/Amplifier-ICs/_/N-4frvm?Keyword=MCP6004&FS=True).
- [73] Mouser, «Resistor,» [En línea]. Available: <https://www.mouser.pe/Search/Refine?Keyword=VARIABLE+RESISTOR&FS=True&OrgTerm=RESISTENCIA+VARIABLE&NewSearch=1>.
- [74] Mouser, «ProductDetail,» [En línea]. Available: <https://www.mouser.pe/ProductDetail/EPCOS-TDK/B72205S0421K101?qs=sGAEpiMZZMsxC37ffO%2fHC%2ftrNgxEVR7%2f>.
- [75] MercadoLibre, «Módulo Wifi,» [En línea]. Available: [https://articulo.mercadolibre.com.pe/MPE-434717747-modulo-wifi-nodemcu-lua-esp8266-v3-ch340-s28-s300-\\_JM](https://articulo.mercadolibre.com.pe/MPE-434717747-modulo-wifi-nodemcu-lua-esp8266-v3-ch340-s28-s300-_JM).

- [76] SPARKFUN, «Datasheets Components,» [En línea]. Available: [https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/LM7805.pdf?fbclid=IwAR38hSL4PUP4bDyplUvfqoTurQT136IpdDbjdqm6PXE6Rw5CUR4YU\\_XQmCw](https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/LM7805.pdf?fbclid=IwAR38hSL4PUP4bDyplUvfqoTurQT136IpdDbjdqm6PXE6Rw5CUR4YU_XQmCw).
- [77] Iwel, «Software de Simulación».
- [78] Multisim, «Software de Simulación».
- [79] PEDRO GAMIO, Manual processing xxx, Perth: Yale, 2016.
- [80] V. Chillce y R. Rojas, «Implementación del Sistema Experto en Molino Para Optimizar la Molienda del Circuito de Cobre en la Planta Concentradora de Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A.» Universidad Nacional del Centro, Huancayo, 2012.

# ANEXOS

## ANEXO 1: DISEÑO DE REVESTIMIENTO PERTENECIENTE AL TERCER ANILLO DEL MOLINO SAG 15.5'x11'

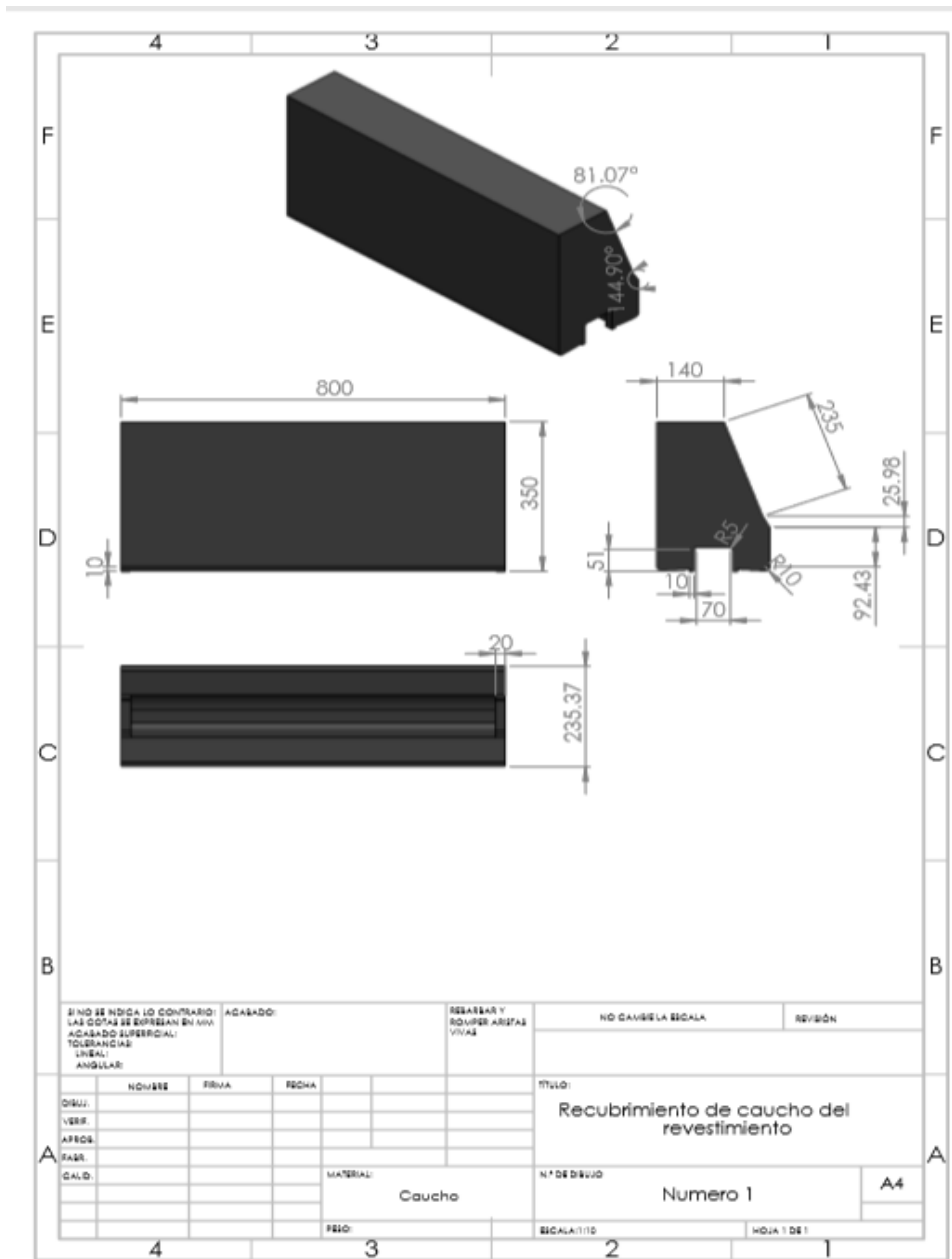
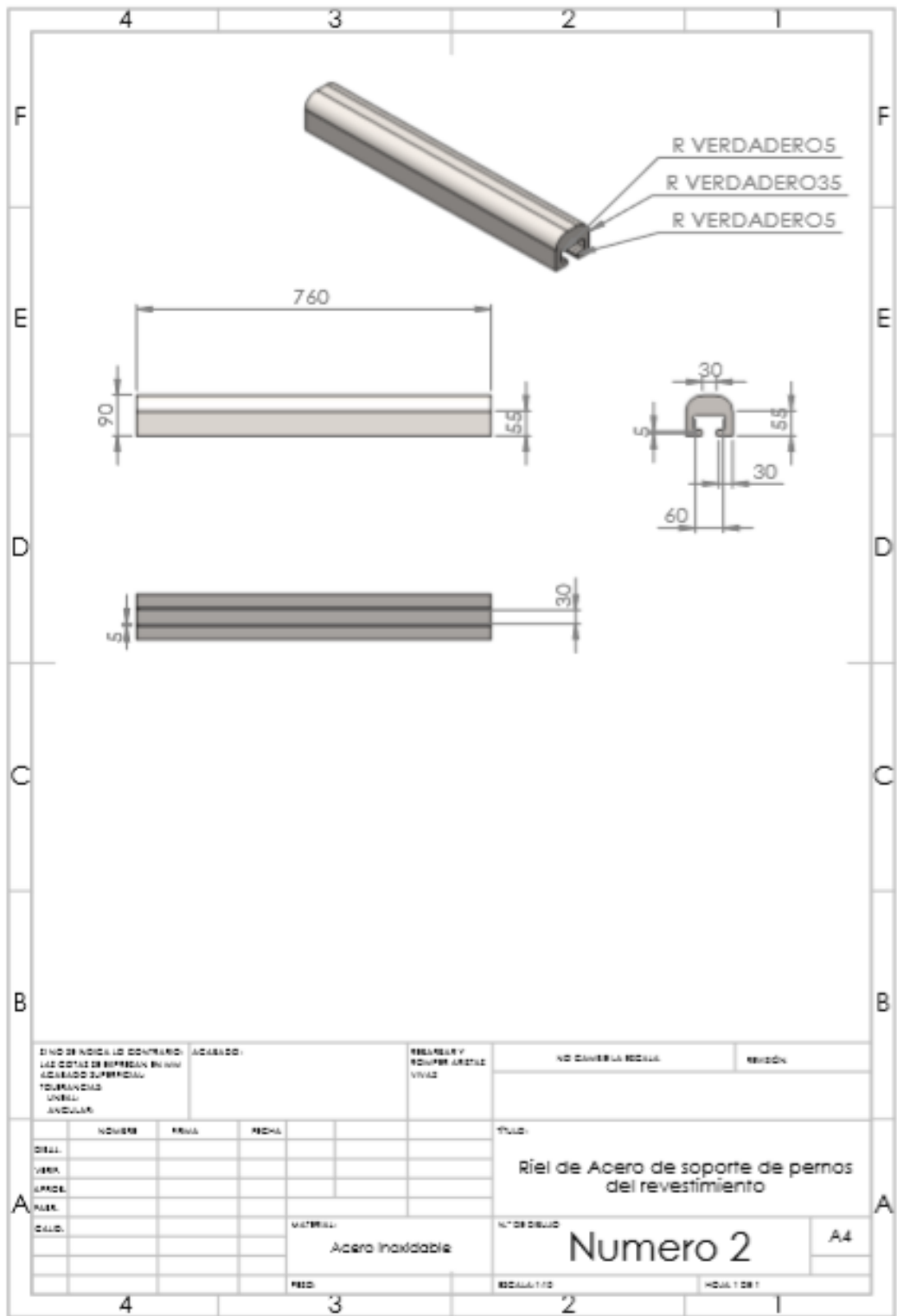
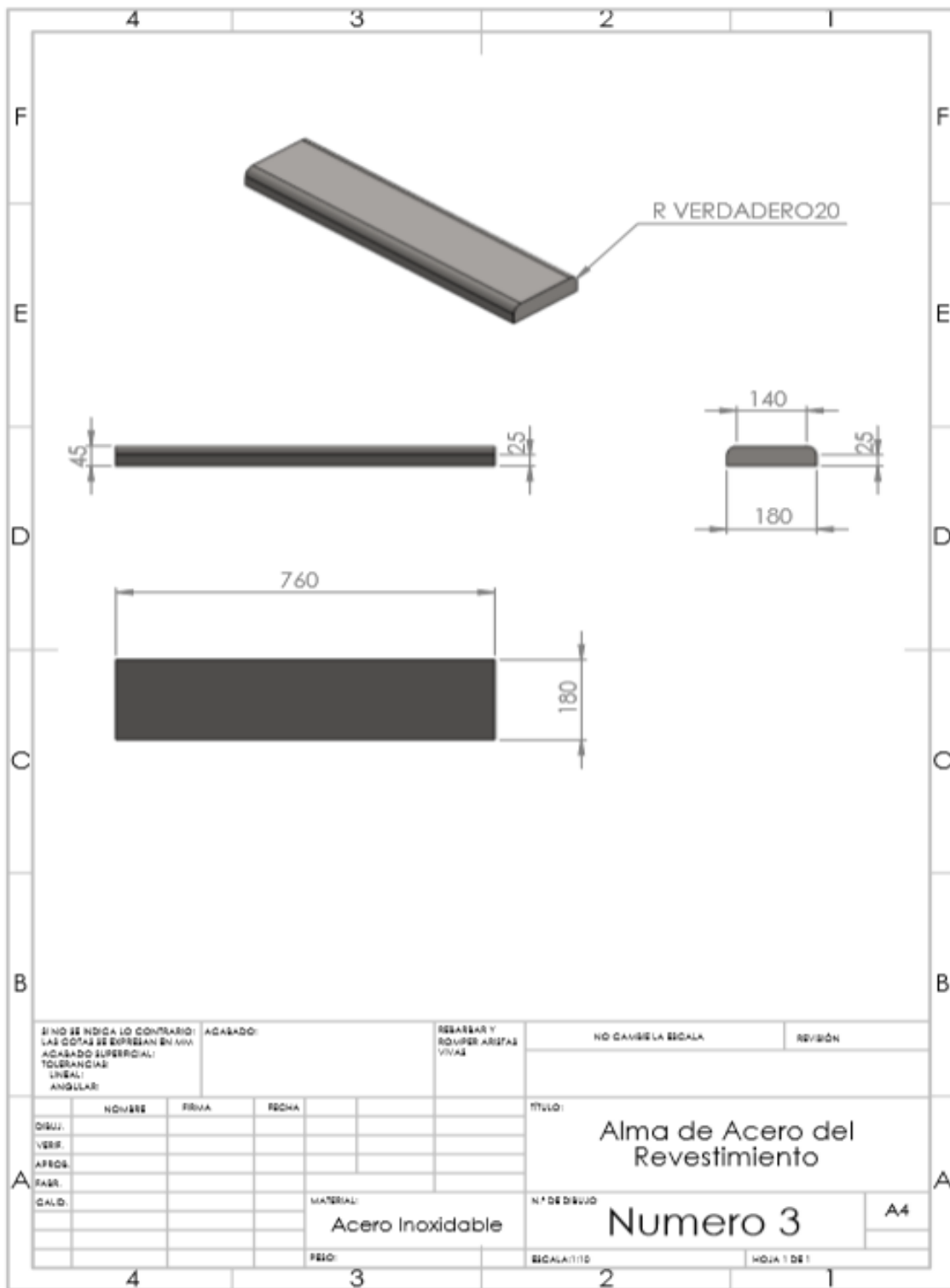


Figura 6.1 Plano del diseño del recubrimiento del revestimiento  
Fuente: Elaboración Propia

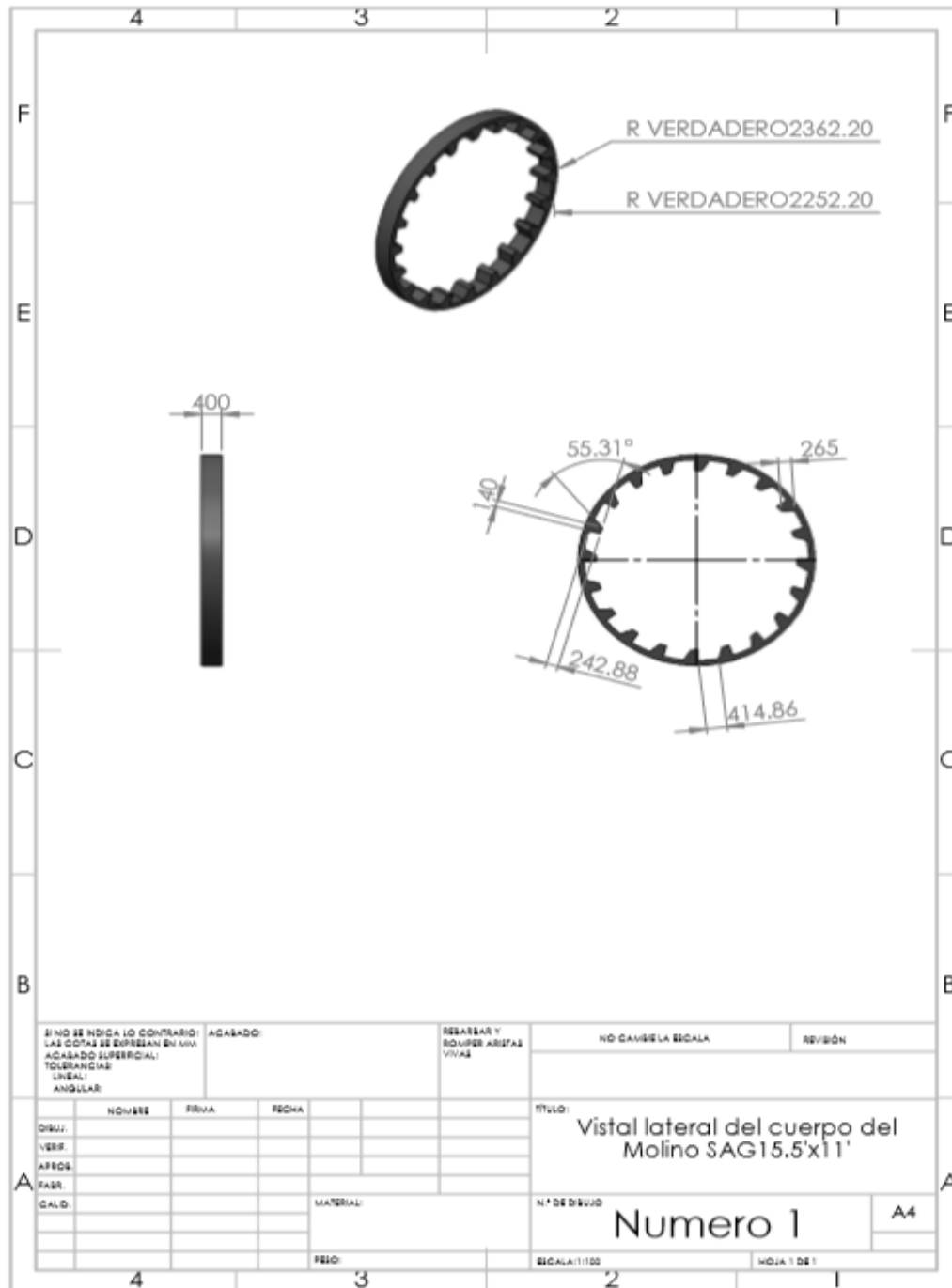


**Figura 6.2** Plano del diseño de la Riel de inserción de pernos del revestimiento  
Fuente: Elaboración Propia



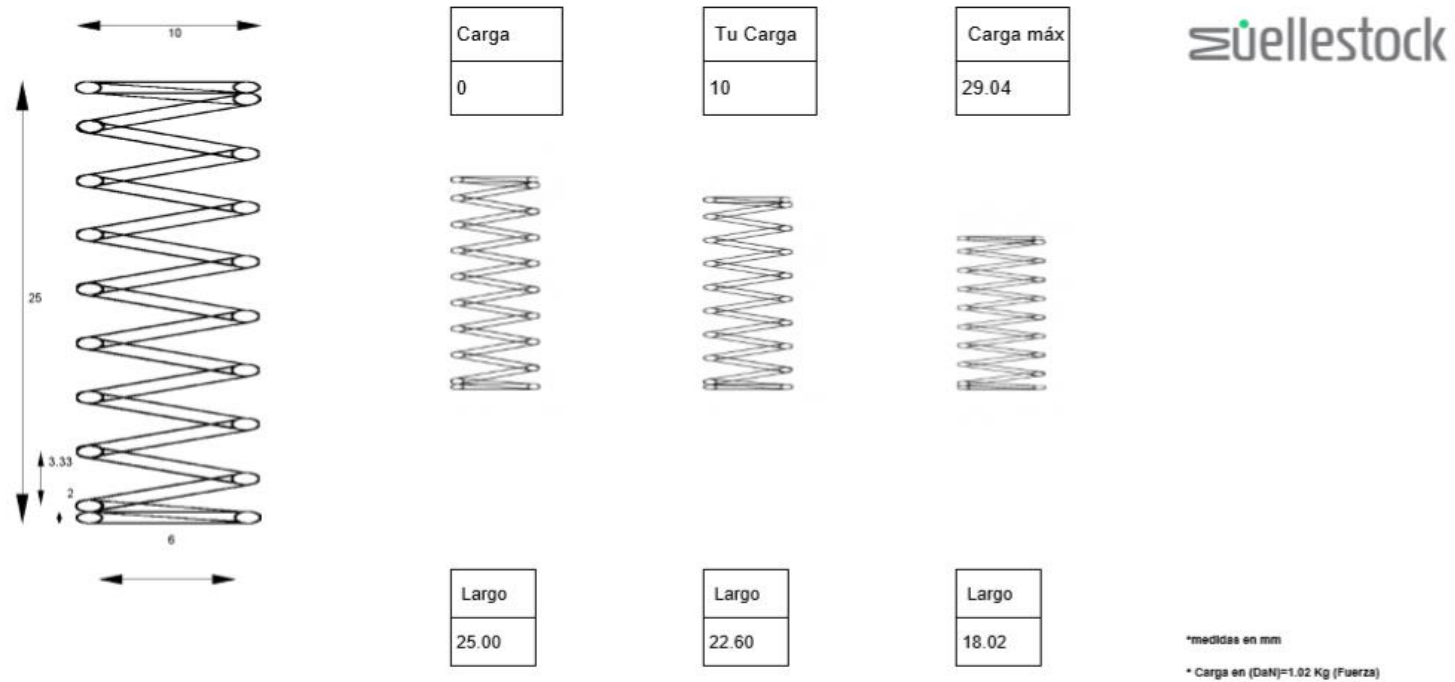
**Figura 6.3** Plano del diseño del Alma del Revestimiento  
Fuente: Elaboración Propia

## ANEXO 2: DISEÑO DE LA VISTA LATERAL DEL CUERPO DEL MOLINO SAG 15.5'x11'



**Figura 6.4** Plano del diseño de la vista lateral del Molino SAG 15.5'x11'  
Fuente: Elaboración Propia

## ANEXO 3: DISEÑO DEL RESORTE A UTILIZAR EN EL SISTEMA MECÁNICO



<b>Material:</b> Inox: ALAMBRE DE ACERO EN 10270-3 *1.4310*NS (INOX-AISI 302)	
Largo total:	25
Hilo:	2
Diámetro exterior:	10
Diámetro interior:	6
Paso:	3.33
K (DaN/mm):	4.1611

**Figura 6.5** Plano del Diseño Resorte de Compresión  
Fuente: Elaboración Propia

## ANEXO 4: CÓDIGO DE LA PLACA MATRIZ DE PROCESAMIENTO

```
#include <Sleep_n0m1.h>
#include <SPI.h>
#include <nRF24L01.h>
#include <RF24.h>
RF24 radio(7, 8); // CE, CSN
const byte address[6] = "00001";

int count = 0;
int matriz[39];

Sleep sleep;
unsigned long sleepTime; //how long you want the arduino to sleep

void setup()
{

    radio.begin();
    radio.openWritingPipe(address);
    radio.setPALevel(RF24_PA_MIN);
    radio.stopListening();
    Serial.begin(9600);
    sleepTime = 3600000; //set sleep time in ms, max sleep time is 49.7
days

}

void loop()
{
    delay(50); //delay to allow serial output to be ready after wake up
    int valorMedido = analogRead(A0);
    for(int d=0; d<=40; d++){
        int valorMedido = analogRead(A0);
        matriz[d]=valorMedido;
        count++;
        delay(50);
    }
    int *pMatriz=(int*) matriz;
    for (int i=0; i< 39; i++) {
        Serial.println(pMatriz[i]);
    }

    for(int tr=0; tr<1000; tr++){

        radio.write(&matriz, sizeof(matriz));
        delay(5);
    }

    if(count >= 40)// 40
```



```
{
  count = 0;
  int hour=0;
  int minute;
  Serial.print("sleeping for ");
  minute = sleepTime/60000;
  Serial.println(minute);
  Serial.print(" minutes...");
  delay(100); //delay to allow serial to fully print before sleep

  sleep.pwrDownMode(); //set sleep mode
  sleep.sleepDelay(sleepTime); //sleep for: sleepTime
}

}
```

## ANEXO 5: CÓDIGO DE LA PLACA MATRIZ DE RECEPCIÓN

```
#include <SPI.h>
#include <nRF24L01.h>
#include <RF24.h>

RF24 radio(7, 8); // CE, CSN

const byte address[6] = "00001"; // Fíjate en el código del transmisor y pon la dirección que dice

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  radio.begin();
  radio.openReadingPipe(0, address);
  radio.setPALevel(RF24_PA_MIN);
  radio.startListening();
}

void loop() {
  if (radio.available()) {
    char text[32] = "";
    radio.read(&text, sizeof(text));
    Serial.println(text);
  }
}
```