

# Diseño de sensor electrónico portable, para medir vibraciones en mesas de concentración gravimétrica

**Luis Mollinedo Zurita**

*Ingeniero Metalúrgico  
Universidad Técnica de Oruro  
lumozu1211@gmail.com*

**Antonio Salas Casado**

*Doctor en Concentración de Minerales  
Docente tiempo completo, Carrera de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales  
Universidad Técnica de Oruro  
salasdeviaje@yahoo.es*

## Resumen

El trabajo muestra el diseño y construcción del “Sensor Electrónico Portable” (SEP), inalámbrico, de bajo precio, para realizar mediciones de vibración en mesas de concentración gravimétrica vibrantes en tiempo real, y determinar mediante un plan de mantenimiento predictivo el estado técnico real en que se encuentran.

El SEP se ha probado realizando mediciones en mesas de concentración gravimétrica vibrantes del “Ingenio Santa Elena” Empresa Minera Huanuni y del Laboratorio de Concentración de la Carrera de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.

Los resultados obtenidos expresan que el SEP es ideal para la determinación del estado técnico del equipo mediante el análisis de diagramas e-t, v-t, a-t y frecuencia, de la vibración de la mesa de concentración gravimétrica, en los ejes “X” (transversal), “Y” (longitudinal) y “Z” (vertical).

La aplicación de un Plan de Mantenimiento Predictivo permite realizar el análisis del estado de una máquina, determinar las medidas necesarias para corregir la condición de vibración, reducir el nivel de las fuerzas vibratorias no deseadas y no necesarias. Además es identificar las amplitudes predominantes de la vibración, la determinación de las causas y la corrección del problema que ellas representan.

**Palabras clave:** Concentración gravimétrica, mesa concentradora, diagramas de vibración, mantenimiento predictivo.

## Design of a portable electronic sensor to measure vibrations in the vibrating table of gravimetric concentration

### Abstract

This paper shows the design and construction of the “Portable Electronic Sensor” (SEP), which is wireless and cheap. It can be used for measurement of vibration in vibrating tables of gravimetric concentration in real time and for determination of their real technical condition by a predictive maintenance plan.

The SEP was tested performing measurements on vibrating tables of gravimetric concentration in “Ingenio Santa Elena” (Empresa Minera Huanuni) and in the Concentration Laboratory of “Carrera de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales”.

The results express that the SEP is ideal for the determination of the technical condition of the equipment by the analysis of the diagrams e-t, v-t, a-t and the frequency of the vibration of the gravimetric concentration table, in the axes: X (cross), Y (longitudinal) and Z (vertical).

The application of a predictive maintenance plan allows the analysis of the state of a machine, the determination of the necessary steps to correct the condition of vibration and the reduction of the level of unwanted and unnecessary vibratory forces. It also allows the identification of the predominant amplitudes of vibration, the determination of the causes and the correction of the problem which they represent.

Keywords: Gravimetric concentration, concentration table, diagrams of vibrations, predictive maintenance.

## Projeto de um sensor eletrônico portátil para medir vibrações na mesa de concentração gravimétrica vibrante

### Resumo

O artigo mostra o projeto e a construção do “Sensor portátil eletrônico” (SEP), sem fio e de baixo custo, para a medição de vibração nas mesas vibrantes de concentração gravimétrica em tempo real, e para a determinação da condição técnica real delas por um plano de manutenção preditiva.

O SEP foi testado por meio de medições nas mesas vibrantes de concentração gravimétrica do “Ingenio Santa Elena” (Empresa Minera Huanuni) e do Laboratório de Concentração da “Carrera de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales”.

Os resultados expressam que o SEP é ideal para a determinação da condição técnica do equipamento analisando os diagramas e-t, v-t, a-t e a frequência da vibração da mesa de concentração gravimétrica, nos eixos: X (transversal), Y (longitudinal) e Z (vertical).

A aplicação de um plano de manutenção preditiva permite a análise do estado de uma máquina, determinar as medidas necessárias para corrigir a condição de vibração, reduzir o nível das forças vibratórias indesejadas e desnecessárias. Também permite identificar as amplitudes predominantes de vibração, determinar as causas e corrigir o problema que eles representam.

**Palavras chave:** Concentração gravimétrica, mesa de concentração, diagrama de vibração, manutenção preditiva.

### Introducción

Las mesas de concentración gravimétrica vibrantes son muy requeridas para obtener concentrados minerales, y son equipos que se caracterizan por tener un tablero vibrante cuyo desplazamiento es lineal desarrollando un diagrama de vibración periódico asimétrico, típico para cada modelo de mesa vibrante.

La forma del diagrama de vibración de la mesa de concentración gravimétrica vibrante incide significativamente en el rendimiento y recuperación del proceso de tratamiento de una mena [1].

### Antecedentes

Los métodos de separación gravimétrica se utilizan para separar una gran variedad de minerales de diferente densidad, en un medio fluido.

Las partículas están sometidas a dos tipos de fuerzas, aquellas debido al movimiento vibratorio de la mesa y las otras originadas por el movimiento de la capa de agua.

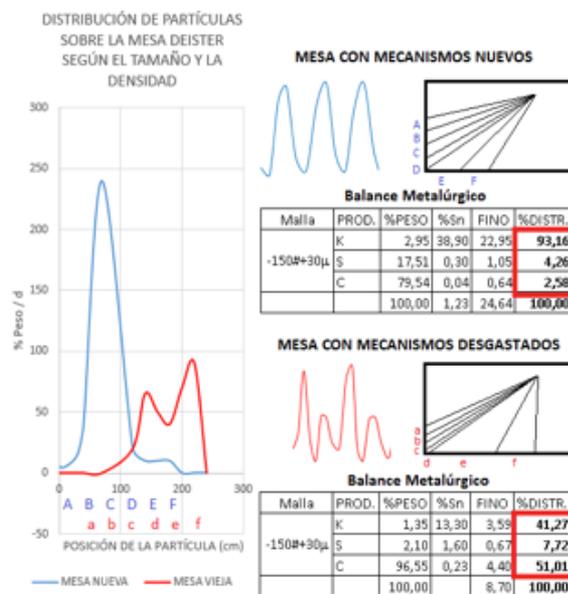
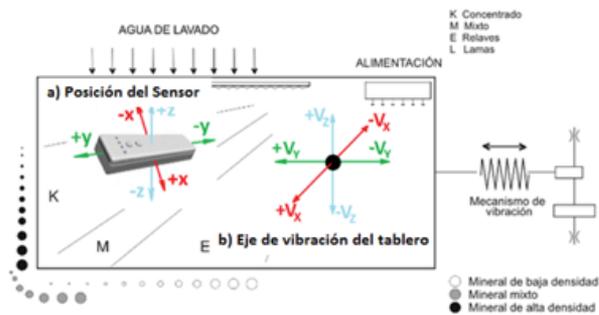


Figura 1. Distribución idealizada de partículas sobre una mesa referida a las características del diagrama de vibración del tablero.

El efecto neto es que las partículas de mineral se mueven diagonalmente a través del tablero desde la descarga de la alimentación y, como el efecto del flujo de la capa de agua depende del tamaño y densidad de las partículas, estas se abanicán sobre la mesa, las más pequeñas, y densas se trasladan al extremo de la canaleta de concentrados, mientras que las partículas grandes y livianas son lavadas hacia las canaletas de colas, pero la trayectoria definitiva de cada partícula resulta de la suma de fuerzas que actúan sobre cada una de ellas.



**Figura 2.** Eje de coordenadas cartesianas para el monitoreo de vibraciones X-Y plano horizontal del tablero y plano Z, eje vertical.

La figura 1 muestra una distribución idealizada de los productos en una mesa. Como los tableros pueden registrar vibraciones según los tres ejes cartesianos y además las fuerzas actuantes sobre cada partícula pueden tener componentes en los tres ejes, se han desarrollado teorías de los seis vectores de fuerza (+Fx; -Fx; +Fy; -Fy; +Fz; -Fz), que aparecen debido a las aceleraciones que se generan en los ejes como se ve en la figura 2.

Por los antecedentes anteriores, es necesario conocer y poder controlar las características de las ondas de vibración de los tableros de las mesas concentradoras.

## Justificación

El presente trabajo propone el monitoreo en tiempo real de las vibraciones de la mesa, obtener el registro de la información y su procesamiento mediante una aplicación informática, para tomar acciones en la solución de problemas relacionados al mantenimiento.

Aprovechando los acelerómetros que se encuentran en el mercado y a un precio razonable, frente a los de tipo industrial que son muy costosos, es posible diseñar un sensor que registre y permita realizar mediciones de la aceleración en tres ejes (X, Y, Z).

Con el desarrollo de este dispositivo se tendrá un instrumento que podrá ser usado en diferentes áreas de producción e investigación, permitiendo a estudiantes y docentes complementar las labores de registro y análisis de vibraciones en equipos de concentración vibrantes y a los operadores industriales optimizar el funcionamiento de las mesas

instaladas en las plantas de procesamiento.

## Objetivo general

Conocer la importancia del sensor para el análisis de diagramas de vibración de las mesas de concentración gravimétrica vibrantes y su influencia en el rendimiento metalúrgico de operación, planteando nuevos conceptos sobre el mantenimiento de estos equipos, para obtener en lo posible mejores índices de eficiencia en operaciones de beneficio de minerales.

## Objetivos específicos

1. Diseñar y construir un sensor que sea portable y de bajo costo para registrar vibraciones y permita analizar los diagramas de vibración de la mesa de concentración gravimétrica vibrantes en tres direcciones (X, Y, Z) y sea en tiempo real.
2. Establecer un plan de mantenimiento predictivo basado en las condiciones vibracionales de la mesa de concentración gravimétrica, sin provocar paros de funcionamiento.

## Diseño y construcción del sensor electrónico portable

Una de las características principales de la Mesa de Concentración Gravimétrica Vibrante, es que está sometida a una vibración entre 200 a 400 rpm en el eje longitudinal (eje Y) con una amplitud entre 10 a 30 mm, diseñada por los fabricantes para cada modelo de mesa. Se requiere que el sensor mida esta vibración.

En base a estas características, se procedió al diseño y construcción del sensor "SEP", para lo cual fue necesario contar con:

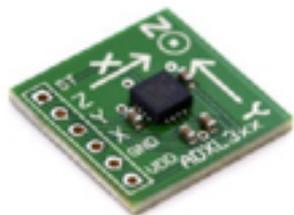
- Componentes electrónicos del sensor.
- Librerías de comunicación para la conectividad entre el sensor y la computadora.
- Recursos computacionales.
- Montaje; prototipo del sensor.
- Asociación del bluetooth con Windows para conectar el sensor con la computadora.
- Desarrollo de una aplicación en un lenguaje de programación para la lectura de datos y el análisis de la vibración.
- Prueba de funcionamiento.
- Captura de movimiento de vibración.
- Interpretación de las mediciones.

El sensor SEP está formado con los siguientes elementos:

- Botones (POWER, 1 y 2)
- 4 LEDs que indican el número de sensores utilizados y el nivel de carga de la batería.
- 2 pilas tipo AA.
- Acelerómetro ADXL330 de 3 ejes: para detección de movimientos (X, Y, Z).
- Bluetooth.

- Chip de memoria EEPROM de 16 Kb, destinado a guardar información.

El acelerómetro ADXL330 del sensor se muestra en la siguiente figura;



**ADXL330**  
(Analog Devices)

**Figura 3.** Acelerómetro ADX330.

El SEP tiene integrado este Acelerómetro y sus principales características han sido obtenidas mediante datos proporcionados por el fabricante:

- Opera con una fuente de voltaje que puede variar de 2.0 V a 3.6 V.
- Consume una corriente de 200  $\mu$ A, 3.0 V.
- Mide a escala completa un intervalo de -3 g. a 3 g.
- Mide aceleración estática de la gravedad y aceleración dinámica resultante de movimiento.
- Sus dimensiones son de 4 mm x 4 mm x 1.45 mm.
- Su ancho de banda oscila de 0.5 Hz a 1.6 KHz para el eje "X" y eje "Y"; 0.5 Hz a 550 Hz para el eje "Z".
- El voltaje en cada pin de salida es proporcional a la aceleración.
- Sensibilidad 300 mV/g.

Para otras aplicaciones se cambia el tipo de características del acelerómetro.

## Recursos computacionales

Las características de los recursos computacionales usados en este proyecto son:

Una computadora portátil, con las siguientes características:

- Sistema Operativo Windows XP.
- Procesador Intel Core 2 Duo 1.8 GHz.
- Memoria RAM 2 GB.
- Sistema de 32 bits.
- Bluetooth externo, para la computadora.

El software de apoyo utilizado es el siguiente:

- Dark Basic Professional versión 1.054, API para el desarrollo del programa.
- Microsoft .NET Framework, versión 3.5 SP1

## Asociación del bluetooth con Windows para conectar el sensor con la computadora

Para asociar el sensor con el Windows, se requiere una computadora portátil con Windows y un bluetooth (externo o de la misma computadora).

Si es externo, se coloca el bluetooth en uno de los puertos USB de la computadora portátil, iniciar la asociación con el SEP, hasta completar el proceso.

Una vez concluido la asociación, ya se puede interactuar con el dispositivo leyendo su estado y enviándole órdenes.

## Interpretación de las mediciones

Una vez que se tienen todos los elementos conectados y funcionando, es posible adquirir las señales del sensor. La primera condición y posiblemente la más importante es la posición, el punto de vista del observador. Esta característica se define como el plano de visión que tiene el observador con respecto a la horizontal, es decir, el plano paralelo a la superficie de la Tierra. Debido a que el sensor entrega mediciones con respecto a la horizontal (debido al ángulo formado con respecto al plano donde se ejerce la fuerza gravitacional), las mediciones analizadas son considerando este plano como referencia, no el plano del observador.

## Selección de los equipos que podrán ser incluidos al análisis de vibración

El sensor electrónico portable (SEP), desarrollado en esta investigación puede ser empleado para el diagnóstico de varias máquinas corrientemente usadas en concentración gravimétrica como jigs, mesas, vibradoras, maritates, etc.

Para el éxito del programa en la elección de los equipos, deben estar incluidos con mayor preferencia aquellos cuya posible falla podría resultar catastrófica para la producción, por este motivo, se han realizado análisis de vibraciones en 8 mesas del Ingenio "Santa Elena" de la Empresa Minera Huanuni y tres mesas del laboratorio de Concentración de la Carrera de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.

## Modelos de mesas de concentración gravimétrica vibrante

Hay varios modelos de mesas concentradoras, como las mesas Wilfley, Holman, Deister, rusas, Gemini o chinas. Cada una con un diagrama de vibración característica.

Para la mesa 6-S CHINA, el diagrama de vibración se ha obtenido con el Sensor Electrónico Portable diseñado (SEP). Son prototipos instalados en el nuevo Ingenio de 3,000 TPH, de Huanuni.

La mesa Deister tiene diagramas de vibración que dependen del tipo de cabezal. En esta investigación se han utilizado diagramas de vibración obtenido por el SEP para una mesa Deister del Laboratorio de Concentración de Minerales de la

Carrera de Metalurgia de la FNI y mesas Deister del Ingenio Santa Elena de le Empresa Minera Huanuni.

a) Mesa de concentración vibrante Wilfley

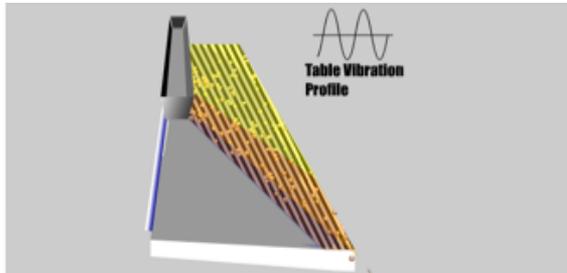


Figura 4. Mesa de concentración Wilfley [8].

b) Mesa de concentración vibrante Holman

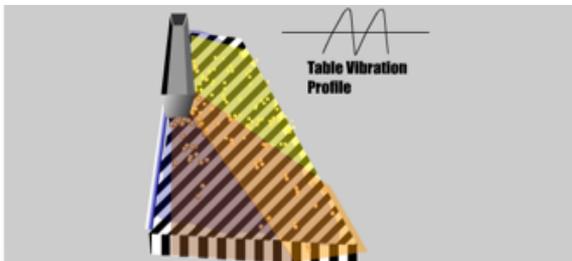


Figura 5. Mesa de concentración Holman [8].

c) MESA DE CONCENTRACIÓN VIBRANTE 6-S CHINA



Figura 6. Mesa de concentración S-6 China [9].

d) MESA DE CONCENTRACIÓN VIBRANTE DEISTER

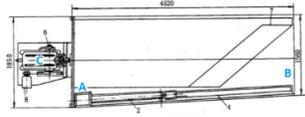
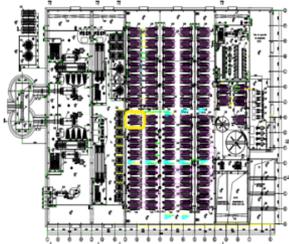


Figura 7. Mesa de concentración Deister Modelo 999[10]

### Creación de fichas con información técnica de los equipos

Se deben elaborar fichas con especificaciones técnicas de los equipos con el propósito de poseer información sobre aquellos que serán sometidos al análisis de vibraciones.

Tabla 1. Formato de la Ficha Técnica del equipo 6-S China.

INGENIO "NUEVO" EMPRESA MINERA HUANUNI DEPARTAMENTO DE MANTENIMIENTO	
 (Foto del equipo)	(Descripción del equipo, puntos de medición)  Punto de medición: <b>B:</b> Descarga del concentrado
<b>ESPECIFICACIONES TÉCNICAS</b>	
Sistema Ingenio "NUEVO"	
Área Gravimetría	
Número Inventario EMHN-001	
Mesa: Modelo y Marca Tipo 6-S LY(S) China	
Motor: Modelo, Serie y Potencia Y70L-4, 1.1KW	
Motor: Voltaje, Amperaje 220/340V, 35ª	
Motor: Frecuencia 60 Hz	
Motor: Velocidad de Rotación 1,400 rpm	
Mesa: Tamaño 4,500 x1,850 x1,560 mm	
Mesa: Longitud de Golpe (Amplitud) 10 a 30 mm	
Mesa: Frecuencia de Golpe 240 a 360 Veces/minuto	
Mesa: Inclinación Transversal 0 a 10 grados	
Mesa: Inclinación Longitudinal	
Alimentación: Granulometría Arena Fina	
Mesa: Capacidad de procesamiento 0.8 a 1.2 ton/Hora	
Alimentación: % sólidos 10 a 30%	
Agua de Limpieza: Consumo 0.4 a 1.8 ton/Hora	
Mesa: Área 7.67 m <sup>2</sup>	
Flujograma, lugar donde se encuentra el equipo: 	

### Determinación de los puntos de medición

En cada equipo en el que se desea hacer un control del estado de las vibraciones, se debe elegir el punto o puntos de aplicación del sensor que se conecta a la máquina mediante un poderoso imán.

Es recomendable realizar la inspección de los puntos críticos; en el caso de los tableros de las mesas concentradoras pueden ser en el lado próximo al cabezal o en el borde de descarga de concentrados, en nuestro caso optamos por aplicar el sensor en la descarga del concentrado de la mesa de concentración.

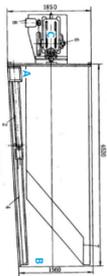
### Definición de las rutas en que se van a recolectar los niveles vibracionales en los equipos

Para cumplir con esta etapa se deben establecer rutas de medición basadas en las áreas en donde se encuentran los equipos, con el propósito de reducir el tiempo necesario para realizar las mediciones y evitar esfuerzos físicos innecesarios.

### Determinación de la frecuencia de monitoreo de los equipos de la planta

En la Empresa Minera Huanuni, por información del personal técnico que realiza el mantenimiento, hay problemas cada 3 a 4 meses por mesa. Por lo tanto se requiere realizar muestreo cada semana, para evaluar el avance de las vibraciones.

**Tabla 2.** Formato plan de Mantenimiento Predictivo por monitoreo de Vibraciones. Ingenio Nuevo EMH.

INGENIO "NUEVO" EMPRESA MINERA HUANUNI DEPARTAMENTO DE MANTENIMIENTO				
Sistema	Ingenio "NUEVO"			
Area	Gravimetría			
No. Inventario	EMHN-001			
Modelo	6-S LY(S) China			
Motor Modelo	Y70L-4, 1.1KW			
Frecuencia	Cada semana			
Emplazamiento	Nivel mesas			
Tiempo Total	1 minuto			
Número Personas	Dos personas			
Nivel de Alarma	X, Z 2.5 mm			
Desplazamiento	Y 10 a 20 mm			
Nivel de Alarma	X, Z 70 mm/s			
Velocidad	Y 260 mm/s			
Nivel de Alarma	X, Z 5 m/s <sup>2</sup>			
Aceleración	Y 9 m/s <sup>2</sup>			
DATOS DEL MEDIDOR				
Marca	Boliviana			
Modelo	SEP			
RUTINA DE MONITOREO DE VIBRACIÓN				
Fecha	Parámetro	PUNTOS DE MEDICIÓN		
		B		
		X	Y	Z
9-junio-2014	Aceleración	0.00	7.33	2.33
	máximo/mínimo	0.00	-4.67	0.00
	Desplazamiento	0.00	4.73	0.00
	máximo/mínimo	0.00	-7.43	-2.36
	Velocidad	0.00	233.43	62.27
	máximo/mínimo	0.00	-148.54	0.00

### Formatos para el plan de mantenimiento predictivo basado en análisis de vibraciones

Los formatos deben ser realizados para cada uno de los equipos nombrados y estos contienen información básica y general sobre el monitoreo. El formato es el mostrado en la tabla 2.

Este formulario también funcionará como histórico del comportamiento vibracional de los equipos a través del tiempo, para que se puedan establecer en él de acuerdo a su comportamiento, los valores propios de alarma factor clave cuando se utilizan valores globales de vibración.

### Establecimiento de los niveles de alarma de cada uno de los equipos

Fue necesario construir una norma con información obtenida de mesas nuevas (6-S China y LAB002 del Laboratorio de Concentración de la Carrera de Metalurgia), mostrada en la figura siguiente, donde se establecen criterios de severidad para el desplazamiento, la velocidad y la aceleración de la mesa en los ejes X, Y, Z.

Los criterios de severidad establecidas se definen como el mayor valor obtenido y medido en puntos preestablecidos cuando un equipo es nuevo o tiene un correcto funcionamiento, que se utiliza para comparar con otros equipos, los cuales para ser considerado "admisible" no deben sobrepasar estos valores.

**Tabla 3.** Criterios de Severidad de Vibración de la mesa de concentración gravimétrica vibrante.

RANGO	CRITERIOS DE SEVERIDAD VIBRATORIO EJES X, Y, Z					
	ACELERACIÓN (m/seg <sup>2</sup> )		DESPLAZAMIENTO (mm)		VELOCIDAD (mm/seg)	
	X, Z	Y	X, Z	Y	X, Z	Y
NO PERMISIBLE	>= 5	>= 9	>= 2,5	>= 20	>= 70	>= 260
ADMISIBLE	< 5	< 9	< 2,5	< 20	< 70	< 260

### Aplicaciones del sensor electrónico portable

La condición ideal de una mesa de concentración gravimétrica vibrante es 0, vibración en los ejes "X" (transversal) y "Z" (vertical); en el eje "Y" longitudinal la vibración es un movimiento periódico armónico, propio de cada modelo de mesa; según diseño del fabricante.



**Figura 8.** Diagrama de vibración ideal de una mesa de concentración gravimétrica vibrante.

### Mesa de concentración 6-s china emhn-01

La aplicación del sensor SEP en ésta mesa China en el nuevo ingenio de la Empresa Minera Huanuni permitió registrar los siguientes diagramas de vibración:

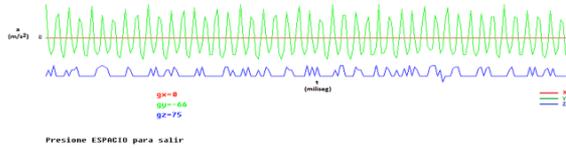


Figura 9. Mesa 6-S China EMHN-01 Diagrama de Vibración de la aceleración en los ejes X, Y, Z.

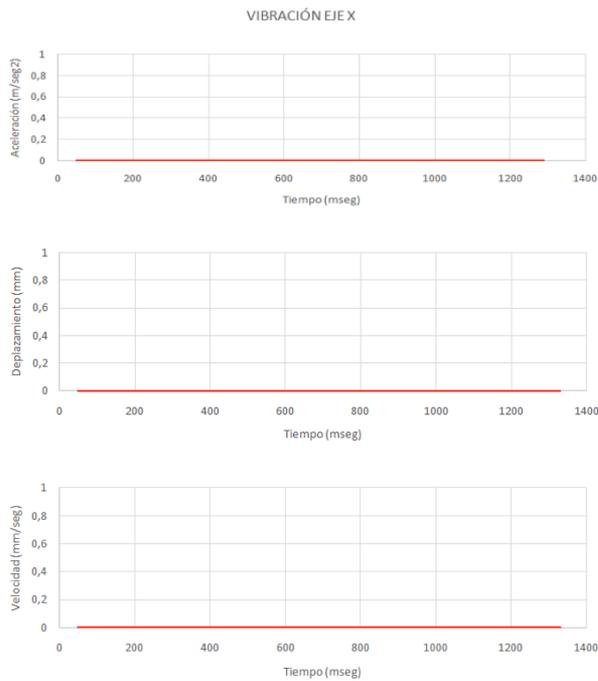


Figura 10. Señales de aceleración, desplazamiento y velocidad en el eje X.

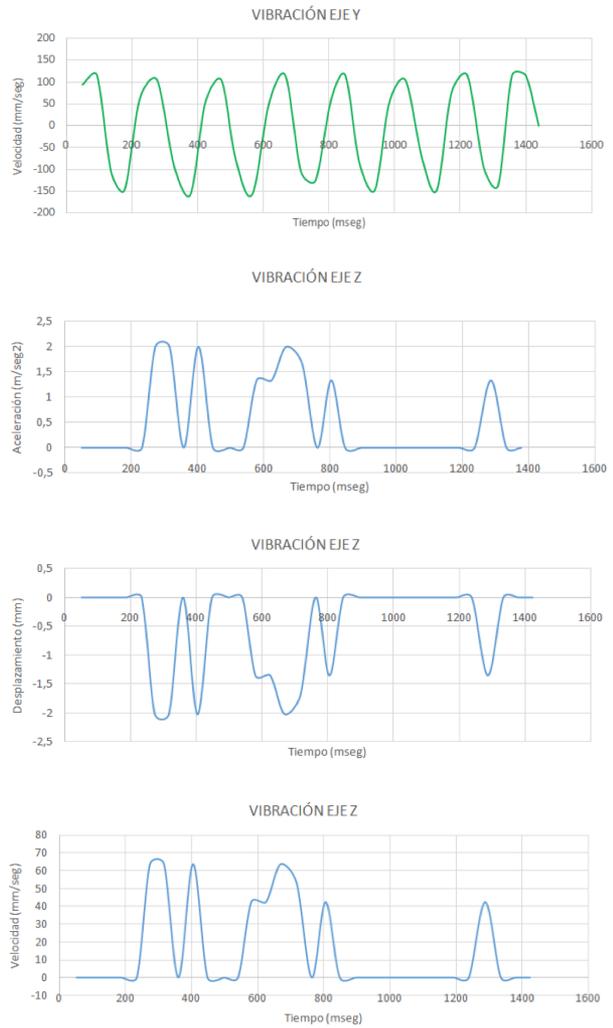
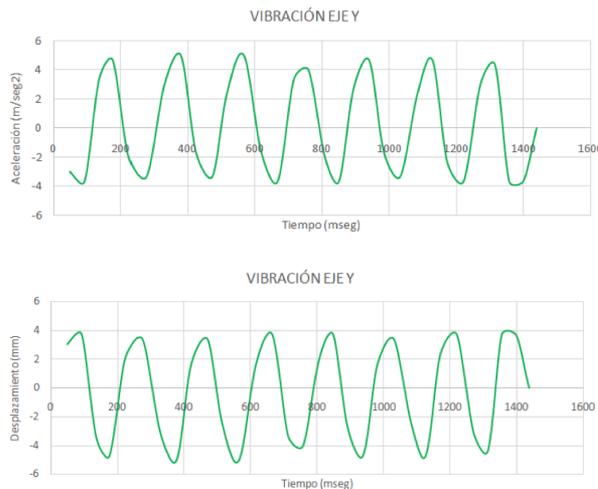


Figura 12. Mesa 6-S China EMHN-01. Señales de aceleración, desplazamiento y velocidad en el eje Z

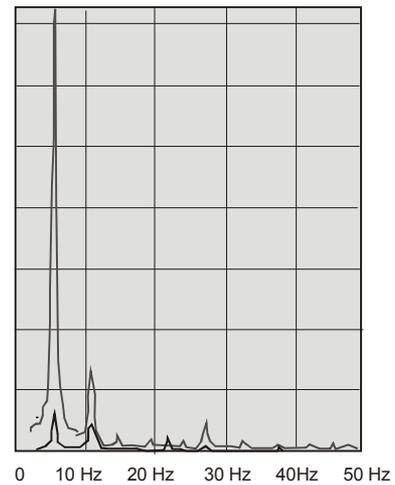


Figura 13. Mesa 6-S China EMHN-01. Diagrama de Frecuencia, ejes X, Y, Z.

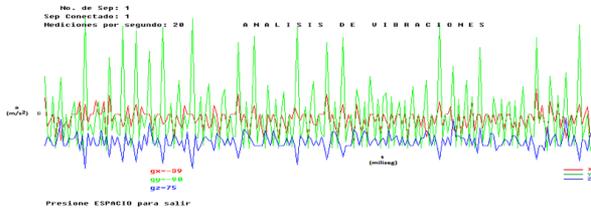
**Tabla 4.** Datos de la aceleración obtenidos de la vibración, mediante el SEP de la Mesa 6-S China.

EQUIPO	ACELERACIÓN (m/seg <sup>2</sup> )			DESPLAZAMIENTO (mm)			VELOCIDAD (mm/seg)			
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	
EMH-001	MAX	0.00	7.33	2.33	0.00	4.73	0.00	0.00	233.43	62.27
	MIN	0.00	-4.67	0.00	0.00	-7.43	-2.36	0.00	-148.54	0.00

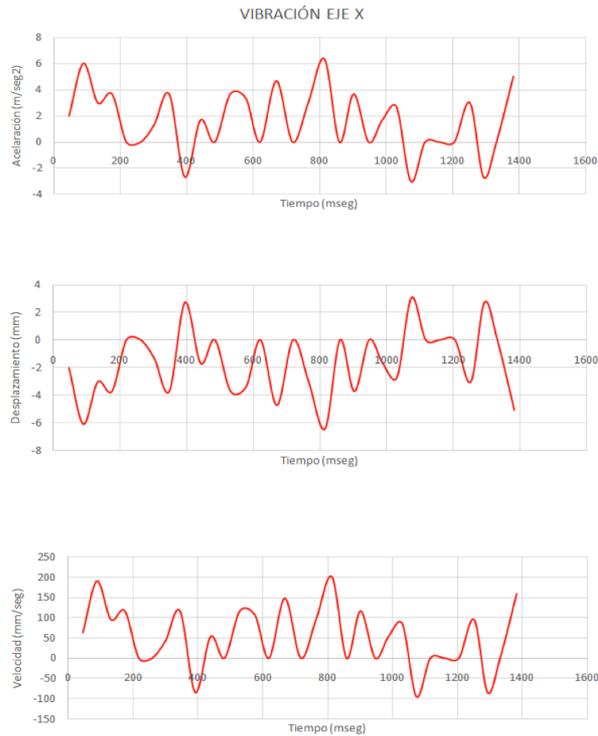
Los datos corresponden a un estado “admisible” de la mesa, porque se encuentran dentro de los rangos admisibles, definidos en la tabla 3.

### Mesa de concentración Deister EMH-017

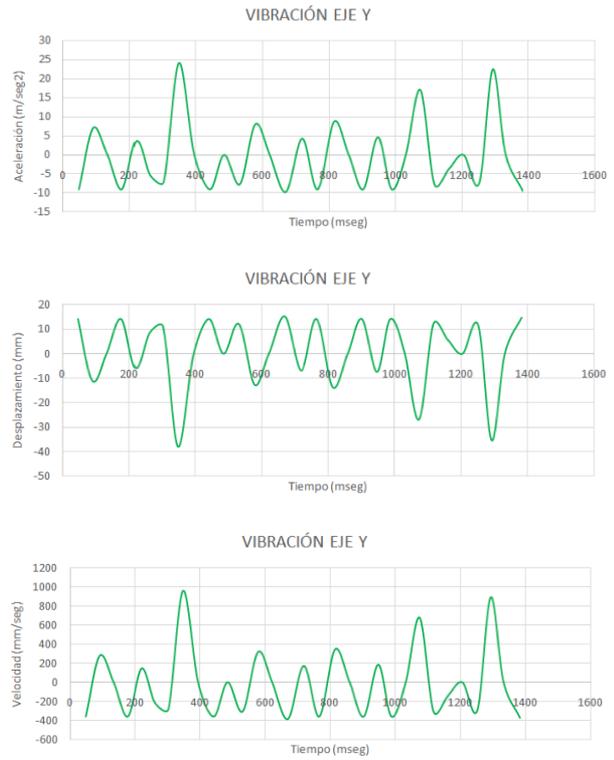
La aplicación del SEP en una mesa Deister del Ingenio “Santa Elena” de la Empresa Minera Huanuni, permitió registrar el siguiente set de diagramas de vibración:



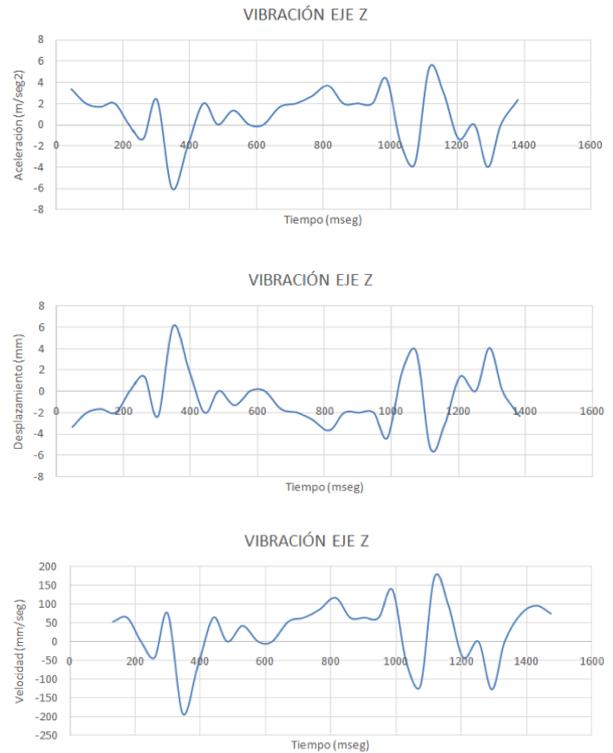
**Figura 14.** Mesa Deister EMHN-017. Diagrama vibración X, Y, Z.



**Figura 15.** Aceleración, desplazamiento y velocidad eje X.



**Figura 16.** Mesa Deister EMHN-017. Aceleración, desplazamiento y velocidad eje Y



**Figura 17.** Mesa Deister EMHN-017. Aceleración, desplazamiento y velocidad eje Z.

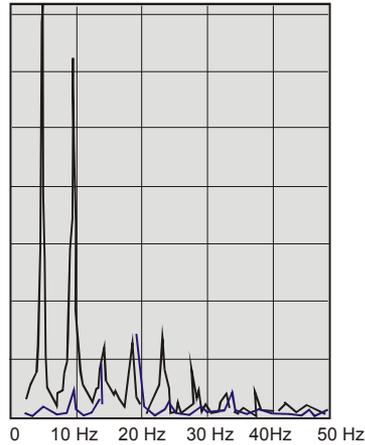


Figura 18. Mesa Deister EMH-017. Diagrama de Frecuencia, ejes X, Y, Z.

Tabla 5. Datos obtenidos con el SEP de la Mesa Deister EMH-017.

EQUIPO		ACELERACIÓN (m/seg <sup>2</sup> )			DESPLAZAMIENTO (mm)			VELOCIDAD (mm/seg)		
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
EMH-017	MÁX.	7.67	27.33	7.67	7.09	15.30	6.42	244.04	1,087.56	244.04
	MÍN.	-7.00	-9.67	-6.33	-7.77	-43.27	-7.77	-222.82	-384.62	-201.60

De acuerdo con los Criterios de Severidad (tabla 3), los datos corresponden a un estado “no admisible” de la mesa, por tener registros fuera del rango admisible establecido previamente.

La tabla siguiente muestra un resumen de todas las mesas analizadas, aplicando el sensor SEP, en los dos ingenios de la Empresa Minera Huanuni y en las mesas del Laboratorio de Concentración de Minerales de la Carrera de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales de la FNI.

Tabla 6. Mediciones de aceleración, desplazamiento y velocidad de 11 mesas.

Equipo		Aceleración, m/s <sup>2</sup>			Desplazamiento, mm			Velocidad, mm/s		
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
EMH-001	Máx.	0.00	7.33	2.33	0.00	4.73	0.00	0.00	233.43	62.27
	Mín.	0.00	-4.67	0.00	0.00	-7.43	-2.36	0.00	-148.54	0.00
EMH-016	Máx.	2.67	<b>12.00</b>	2.33	<b>6.33</b>	<b>11.08</b>	<b>6.86</b>	<b>106.10</b>	<b>477.46</b>	<b>92.84</b>
	Mín.	-4.00	-7.00	-4.33	<b>-4.22</b>	<b>-19.00</b>	<b>-3.69</b>	<b>-159.15</b>	<b>-278.52</b>	<b>-172.42</b>
EMH-017	Máx.	<b>7.67</b>	<b>27.33</b>	<b>7.67</b>	<b>7.09</b>	<b>15.30</b>	<b>6.42</b>	<b>244.04</b>	<b>1,087.56</b>	<b>244.04</b>
	Mín.	<b>-7.00</b>	<b>-9.67</b>	<b>-6.33</b>	<b>-7.77</b>	<b>-43.27</b>	<b>-7.77</b>	<b>-222.82</b>	<b>-384.62</b>	<b>-201.60</b>
EMH-018	Máx.	4.00	<b>11.67</b>	<b>5.67</b>	<b>4.38</b>	<b>7.30</b>	<b>4.38</b>	<b>152.79</b>	<b>445.63</b>	<b>264.54</b>
	Mín.	-3.00	-5.00	-3.00	<b>-5.84</b>	<b>-17.02</b>	<b>-8.27</b>	<b>-114.59</b>	-190.99	<b>-140.07</b>
EMH-020	Máx.	0.00	<b>13.00</b>	2.33	<b>6.81</b>	<b>10.70</b>	0.00	0.00	<b>496.56</b>	<b>108.94</b>
	Mín.	-4.67	-7.33	0.00	0.00	<b>-18.97</b>	<b>-3.40</b>	<b>-178.25</b>	<b>-280.11</b>	0.00
EMH-021	Máx.	4.67	<b>13.67</b>	4.33	<b>9.73</b>	<b>10.70</b>	<b>4.86</b>	<b>178.25</b>	<b>522.03</b>	<b>165.52</b>
	Mín.	<b>-6.67</b>	-7.33	-3.33	<b>-6.81</b>	<b>-19.94</b>	<b>-6.32</b>	<b>-254.65</b>	<b>-280.11</b>	<b>-127.32</b>
EMH-022	Máx.	0.00	<b>15.00</b>	2.00	<b>6.32</b>	<b>11.19</b>	0.00	0.00	<b>572.96</b>	<b>76.39</b>
	Mín.	-4.33	-7.67	0.00	0.00	<b>-21.89</b>	<b>-2.92</b>	<b>-165.52</b>	<b>-292.84</b>	0.00
EMH-023	Máx.	0.00	<b>11.67</b>	3.00	<b>3.89</b>	<b>9.73</b>	0.00	0.00	<b>445.63</b>	<b>114.59</b>
	Mín.	-2.67	-6.67	0.00	0.00	<b>-17.02</b>	<b>-4.38</b>	<b>-101.86</b>	-254.65	0.00
LAB-001	Máx.	4.00	7.33	<b>6.67</b>	<b>6.42</b>	3.72	<b>6.08</b>	233.43	<b>212.21</b>	<b>62.27</b>
	Mín.	<b>-6.33</b>	-3.67	<b>-6.00</b>	<b>-4.05</b>	-7.43	<b>-6.75</b>	<b>-201.60</b>	-116.71	<b>-190.99</b>
LAB-002	Máx.	2.67	8.33	2.67	2.13	3.35	0.00	63.64	251.99	68.64
	Mín.	-2.33	-3.67	0.00	-2.44	-7.62	-2.44	-58.56	-110.88	0.00
LAB-003	Máx.	<b>7.33</b>	<b>14.33</b>	4.67	<b>5.74</b>	<b>8.11</b>	<b>3.38</b>	<b>233.43</b>	<b>456.24</b>	<b>148.54</b>
	Mín.	<b>-5.67</b>	-8.00	-3.33	<b>-7.43</b>	<b>-14.52</b>	<b>-4.73</b>	<b>-180.38</b>	-254.65	<b>-106.10</b>

Los números resaltados en negrita significan que la mesa no está en buenas condiciones (rango de severidad no admisible), los de escritura normal y en cursiva, significan que la mesa está en estado “admisible” de funcionamiento, en relación a los criterios de severidad vibratorio mostrados en la tabla 3.

### Análisis de los diagramas de las mesas

La mesa S-6 China, presenta un leve problema de alineamiento y falta de lubricación entre la mesa y la base de vinculación que está conectada al mecanismo de transmisión en el eje Z (vertical):

Tabla 7. Mediciones de aceleración, desplazamiento y velocidad de la mesa 1 de la Empresa Minera Huanuni.

EQUIPO		ACELERACIÓN (m/seg <sup>2</sup> )			DESPLAZAMIENTO (mm)			VELOCIDAD (mm/seg)		
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
EMH-001	MÁX.	0.00	7.33	2.33	0.00	4.73	0.00	0.00	233.43	62.27
	MÍN.	0.00	-4.67	0.00	0.00	-7.43	-2.36	0.00	-148.54	0.00

Aceleración 2.33[m/seg<sup>2</sup>]  
 Desplazamiento -2.36 [mm]  
 Velocidad 62.27[mm/seg]

Aun así están dentro el rango admisible de severidad. Es una mesa nueva recién instalada en el ingenio nuevo de la EMH.

Los diagramas de vibración del resto de las mesas Deister de la Empresa Minera Huanuni estudiadas, muestran un deterioro muy grande debido a que sus piezas están muy gastadas. Están dentro el rango de “no admisible” (tabla 6); lo grave de la situación es que en esas condiciones la recuperación de concentrado en esas mesas es muy baja, ya que una vibración no adecuada genera fuerzas no deseables sobre las partículas [1].

Los diagramas de vibración de las mesas del Laboratorio de Concentración de la Carrera de Metalurgia y Ciencia de Materiales, la Mesa LAB-0003 muestra un deterioro muy grande y está dentro el rango de “no permisible” debido a que sus piezas están muy gastadas; en esas condiciones no se puede realizar pruebas experimentales porque la recuperación de concentrados va a ser muy baja. La mesa LAB-001 también está en el rango de “No permisible”; la mesa LAB-002 está en el rango “Admisible”; es nueva (tabla 6), sin embargo empieza a presentar problemas leves y se recomienda aplicar un plan de mantenimiento predictivo, tal como ha sido descrito en este proyecto.

## Conclusiones

Se ha cumplido con el objetivo general, desarrollar un sensor electrónico portable (SEP), y se ha demostrado la importancia que tiene este SEP para el análisis de diagrama de vibración de las mesas de concentración gravimétrica vibrantes, en el planteamiento de nuevos conceptos sobre el mantenimiento de estos equipos, que permite obtener mejores índices de eficiencia en las operaciones de beneficio de minerales.

Se ha diseñado y construido un SEP que es portable, de bajo costo, registra y monitorea los diagramas de vibración en tres direcciones (X, Y, Z), en tiempo real (sin necesidad de parar la máquina).

Se ha establecido un plan de Mantenimiento Predictivo que permite realizar el análisis del estado de una máquina, determinar las medidas necesarias para corregir la condición de vibración, reducir el nivel de las fuerzas vibratorias no deseadas y no necesarias. Identificar las amplitudes predominantes de la vibración, la determinación de las causas y la corrección del problema que representan las alteraciones de los diagramas de vibración, con el fin de corregir las fallas a tiempo y evitar el deterioro de la producción.

Se ha desarrollado un software para obtener datos de vibraciones, para su evaluación; para ello se utiliza una computadora portátil con la que se puede monitorear el funcionamiento de las mesas directamente en el sitio de operación y envía la información por vía inalámbrica a una central de control.

## Especificaciones técnicas del sensor electrónico portable

- Dimensiones largo 15.5 cm, ancho 4 cm, alto 3 cm.
- Captura de movimiento en tres ejes; x, y, z.
- Acelerómetro ADXL330
- Energía de alimentación 200  $\mu$ A, 3V
- Rango de aceleración  $\pm 3g$
- Rango de temperatura -25  $^{\circ}$ C +70  $^{\circ}$ C

- 2 pilas tipo AA o AAA
- Sensibilidad 300 mV/g
- 4 leds que miden el consumo de la batería y el número de sensores utilizados
- Botón Power de encendido y apagado
- Chip memoria EPROM BCM2043
- Bluetooth Broadcom BCM2042

El tiempo que se requiere para obtener información y registro de datos de una mesa de concentración gravimétrica vibrante es menos de un minuto, una vez fijado el sensor en el tablero de la mesa.

## Recomendaciones

La implementación del SEP en los ingenios de concentración gravimétrica que tienen mesas vibrantes, mediante un programa de mantenimiento predictivo basado en la condición del equipo, dentro de sus Programas de Mantenimiento, pues de esa manera se minimizaría los costos de mantenimiento y aumentaría la producción y las ganancias.

Establecer niveles de alarma y criterios de severidad de cada uno de los equipos, de acuerdo al historial de vibraciones (base de datos) mediante el cual se puede observar el comportamiento vibracional.

Capacitar al personal de mantenimiento y a los operarios de los equipos de un ingenio de concentración de minerales donde se utilizan mesas vibrantes, sobre análisis de vibraciones mecánicas con el SEP, para que contribuyan a anticipar paros en la producción y hacer seguimiento.

Realizar investigaciones sobre el diseño de la onda de vibración de las mesas de concentración gravimétrica vibrantes y otros equipos vibrantes, utilizando el SEP.

## Bibliografía

1. SALAZAR DELGADO, Juan Carlos. “Diagramas de Frecuencia de la Concentración Gravimétrica en Mesas Vibrantes”. Tesis de Grado. Universidad Técnica de Oruro: Carrera Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, Oruro 1984.
2. FARFÁN SUÁREZ, Efrén. “Acondicionamiento de Señal Proveniente de un Acelerómetro mems”. Tesis de Grado, México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México, 2010.
3. BETANCOURT, Edgar. “Implementación del Mantenimiento Predictivo Basado en el Análisis de Vibración en la Empresa C.V.G. Venalum”. Tesis de Grado, Ingeniería Mecánica, Puerto La Cruz 2006.
4. GARCÍA, Carmen. “Principios, causas y diagnóstico de la vibración en máquinas rotativas”, Puerto la Cruz, 1997.
5. MOSQUERA, G., ARMAS, G. y PIEDRA, M., “Las Vibraciones mecánicas y sus aplicaciones al mantenimiento predictivo”. Universidad Central de Venezuela. Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico. LaHabana: Instituto Superior de Ciencias y Tecnologías Nucleares, 1999.

6. ESTUPIÑAN, E., SAAVEDRA P., "Técnicas de Diagnóstico para el Análisis de Vibraciones en Rodamientos", Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Concepción – Chile.
7. ESPINOZA, Denis, "II Congreso Nacional de Aplicación de Software en Ingeniería Mecánica y Electromecánica", Universidad Técnica de Oruro, Carrera de Ingeniería Mecánica de la Facultad Nacional de Ingeniería, Oruro 2012.
8. <http://www.holmanwilfley.co.uk/>.
9. [http://www.shakingtable.com.cn/readProductContext\\_En?productid=16](http://www.shakingtable.com.cn/readProductContext_En?productid=16).
10. <http://www.deisterconcentrator.com/>.
11. <http://brianpeek.com/page/wiimotelib>.
12. <http://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Adxl330>
13. [http://digipak.org/zencart/index.php?main\\_page=product\\_info&products\\_id=161](http://digipak.org/zencart/index.php?main_page=product_info&products_id=161).
14. <https://www.sparkfun.com/products/12756>.
15. <http://i2dconsulting.cl/productos-servicios/productos/sensores-de-vibraciones>.
16. Flujograma Ingenio "Santa Elena" Empresa Minera Huanuni.
17. Flujograma Ingenio "Nuevo" Empresa Minera Huanuni.
18. [www.play.google.com/accelerometer\\_monitor](http://www.play.google.com/accelerometer_monitor).
19. SALAS, O. HINOJOSA, J. TEJERINA and E. MEDINA. "Re-design of old – fashioned machines used in mineral gravity concentration" En: XX International Mineral Processing Congress. Aachen, Germany, september 1997 pg. 541 – 550.