

# SISTEMA MECATRÓNICO DE ELECTRÓLISIS DE PLOMO PARA LA EMPRESA OPERACIONES METALÚRGICAS S.A. (OMSA)

## MECHATRONIC LEAD ELECTROLYSIS SYSTEM FOR OPERACIONES METALÚRGICAS S.A. (OMSA)

Ing. Bertil Arturo Zubieta Beltrán <sup>1 \* §</sup>

Recibido: Junio 15, 2023; Aceptado: Septiembre 27, 2023

### RESUMEN

El presente trabajo, proporciona una visión general del proyecto, “Sistema Mecatrónico de Electrólisis de Plomo”, desarrollado para la empresa Operaciones Metalúrgicas S.A. (OMSA). El objetivo principal del proyecto fue, desarrollar un sistema mecatrónico, a partir de un proceso electrolítico, para obtener plomo metálico, de una aleación Pb-Bi, de un subproceso en la producción de estaño de la empresa.

La introducción destaca el rol de OMSA, como empresa líder en la fundición y refinación de concentrados de estaño, con una producción anual significativa de lingotes metálicos de alta calidad. Se menciona la importancia de mejorar, la eficiencia y rentabilidad de la empresa, al incorporar procesos tecnológicos, en la separación de plomo-bismuto (Pb-Bi).

El objetivo principal del proyecto fue, desarrollar un proceso electrolítico de Pb-Bi metálico, utilizar un sistema mecatrónico para obtener el Pb metálico, de una aleación Pb-Bi, generado un proceso de electrólisis, a diferencia de un proceso convencional discontinuo, a un proceso completamente continuo de operación. Este objetivo se planteó con el fin de mejorar la calidad del producto final de Pb y aumentar la competitividad de OMSA en el mercado.

Se logró desarrollar un sistema mecatrónico, en un proceso electrolítico utilizando aleación metálica de plomo-bismuto, para obtener plomo metálico puro. Este avance tecnológico contribuirá a mejorar la eficiencia y rentabilidad de OMSA, así como a la calidad del producto final de plomo. Además, se destaca el impacto positivo que este nuevo proceso, pueda tener en el medio ambiente, al fomentar la reutilización de materiales secundarios.

El proyecto representa un hito importante para OMSA, al introducir tecnología innovadora y mejorar su posición en el mercado. Se espera que este avance genere beneficios significativos para la empresa, tanto en términos económicos como ambientales.

**Palabras claves:** Electrodo, Electrólito.

### ABSTRACT

The following work provides an overview of the project, “Mechatronic Lead Electrowinning System,” developed for Operaciones Metalúrgicas S.A. (OMSA). The main objective of the project was to develop a mechatronic system based on an electrolytic process to obtain metallic lead from a Pb-Bi alloy, which is a subprocess in the company’s tin production.

The introduction emphasizes OMSA's role as a leading company in smelting and refining tin concentrates, with a significant annual production of high-quality metal ingots. The importance of improving the efficiency and profitability of the company by incorporating technological processes in the separation of lead-bismuth (Pb-Bi) is mentioned.

The main objective of the project was to develop an electrolytic process for metallic Pb-Bi and use a mechatronic system to obtain metallic Pb from the Pb-Bi alloy, transitioning from a conventional batch process to a fully continuous operation. This objective was set to enhance the final Pb product's quality and increase OMSA's competitiveness in the market.

A mechatronic system was successfully developed for an electrolytic process using a lead-bismuth alloy to obtain pure metallic lead. This technological advancement will contribute to improving OMSA's efficiency, profitability, and the quality of the final lead product. Additionally, the positive impact of this new process on the environment is highlighted as it promotes the reuse of secondary materials.

The project represents a significant milestone for OMSA by introducing innovative technology and improving its position in the market. It is expected that this advancement will generate significant benefits for the company, both economically and environmentally.

**Keywords:** Electrode, Electrolyte.

**Citación:** Zubieta Beltrán Bertil Arturo. SISTEMA MECATRÓNICO DE ELECTRÓLISIS DE PLOMO PARA LA EMPRESA OPERACIONES METALÚRGICAS S.A. (OMSA), Revista Científica EMINENTE 2023, 7-2: 99-112.

<sup>1</sup> Ingeniero Mecatrónico – Carrera de Ingeniería Mecatrónica - Unidad Académica La Paz - Escuela Militar de Ingeniería. Investigador de la Dirección Nacional de Investigación, Ciencia y Tecnología

\* Corresponde al Autor (correo electrónico: bertilzubieta.bazb@gmail.com).

<sup>s</sup> Dirección de contacto Investigador primer autor: Zona Irpavi calle 9 N101 - Telf.: (+591) 79428477  
La Paz - Bolivia.

## INTRODUCCIÓN

La importancia de la fundición del estaño se basa principalmente en la utilización del estaño, dentro de la producción de las industrias Alimenticias, Metalúrgicas, de fabricación de electrónica, de fabricación de vidrio y cerámicas, considerando al estaño como un material necesario, pero terciario en su producción, siendo que cada industria tiene un distinto perfil de demanda de estaño muy diferente.

Según un estudio realizado, con respecto a la caracterización y análisis del mercado internacional de minerales, en el corto, mediano y largo plazo, con una vigencia hasta el año 2035 China, EE. UU. y Japón, tienen el mayor consumo per cápita de estaño a nivel mundial.

Para el caso de Bolivia, según el analista en minería Dr. Ing. Héctor Córdova en la gestión 2022, el precio de los metales que exporta Bolivia empezó con un alto precio, siendo el caso del estaño, el cual presenta una tendencia al incremento, debido a que la oferta es menor a la demanda, lo que puede llegar a significar que el precio del estaño, tendrá un incremento en el precio de venta.

La empresa Operaciones Metalúrgicas S.A. (OMSA), se dedica principalmente a la fundición y refinación de concentrados de estaño, obteniendo lingotes metálicos de alta calidad con una pureza del 99,985% y con bajos niveles de plomo (30 ppm), bismuto (300 ppm) y antimonio (150 ppm). La mayor parte de estos concentrados mineralizados de estaño, son provenientes de minas bolivianas, OMSA utiliza diversos procesos tecnológicos metalúrgicos para obtener el producto final. La producción anual en lingotes de estaño es aproximadamente 3600 toneladas de estaño de calidad A1, OMSA se ha consolidado como uno de los principales proveedores en el mercado internacional.

La importancia de este trabajo de investigación, para la empresa Operaciones Metalúrgicas S.A. (OMSA) es significativa. El equipo desarrollado, no solo permitirá la utilización de materiales secundarios en la producción, sino que también aumentará la eficiencia y la rentabilidad de la empresa, al tratar sus productos intermedios. Al incorporar procesos tecnológicos avanzados y automatización, el equipo mejorará la comercialización del producto final, y reducirá los costos de producción, lo

que a su vez aumentará la competitividad de la empresa en el mercado. Además, esta nueva línea de producción también puede tener un impacto positivo en el medio ambiente, al fomentar la reutilización de materiales secundarios en lugar de comercializarlos a bajos costos.

## OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un proceso electrolítico para la obtención de plomo metálico de una aleación plomo-bismuto a partir del proceso de electrolisis mediante un sistema mecatrónico.

## METODOLOGÍA

Se presenta explicaciones sobre los diseños, cálculos, simulaciones y especificaciones necesarias para la construcción del proyecto. Además, se presentan los resultados de los análisis y pruebas realizadas para demostrar la viabilidad del proyecto y su capacidad para alcanzar los objetivos establecidos.

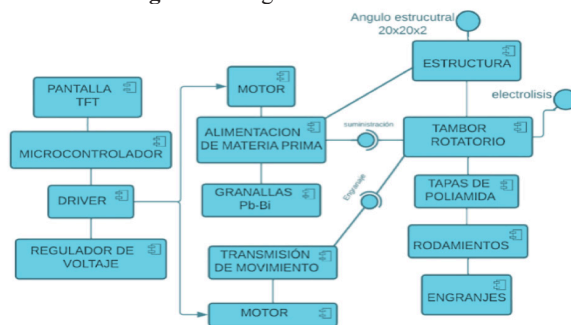
## Diagramas UML

Los diagramas UML son una herramienta esencial en el desarrollo de sistemas de software, ya que permiten modelar y visualizar la estructura y el comportamiento del sistema de manera clara y precisa.

## Diagrama UML de Componentes

El diagrama UML de componentes son una herramienta fundamental en el diseño y desarrollo de prototipos de sistemas informáticos. Este tipo de diagrama posibilitó la representación visual de los diferentes componentes del sistema y su interacción para cumplir con los requisitos específicos del mismo de manera clara y precisa.

Figura 1. Diagrama UML estático



Fuente: Elaboración propia

### Diagrama UML Dinámico

El diseño y desarrollo de un prototipo es una tarea crucial en la ingeniería, donde la comprensión clara del comportamiento y la interacción de los diferentes componentes del sistema es fundamental para su éxito. Para lograrlo, se utilizó diversas herramientas y técnicas, entre las cuales los diagramas UML dinámicos, son una opción valiosa. En este contexto, los diagramas UML dinámicos, permitieron modelar y analizar el comportamiento del sistema en tiempo de ejecución, lo que facilita la identificación de problemas y, la garantía de que el prototipo cumpla con los requisitos y expectativas del usuario.

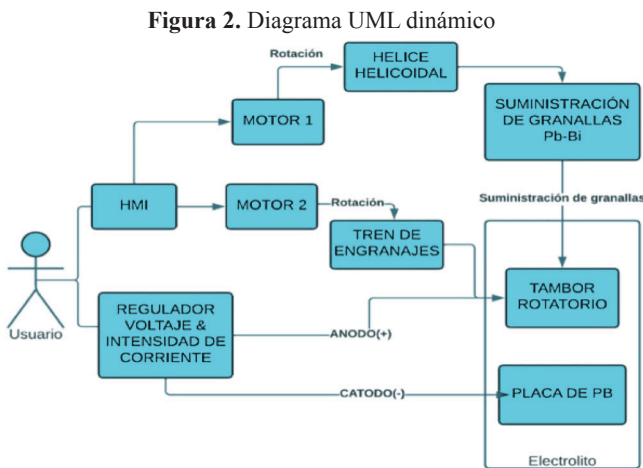


Figura 2. Diagrama UML dinámico

Fuente: Elaboración Propia

### Diagrama UML De Secuencia

Se presenta el diagrama UML de secuencia correspondiente al prototipo que se desarrolló para la obtención de plomo a partir de una aleación plomo-bismuto, de la empresa Operaciones Metalúrgicas S.A. El prototipo se basa en un reactor químico, que permite la electrólisis de aleación Pb-Bi para obtener plomo. El diagrama UML de secuencia muestra el flujo de información entre los distintos componentes del sistema, desde la alimentación de la aleación, hasta la obtención del plomo puro. Se puede observar la interacción entre el operador, el inicio del sistema, el proceso de electrólisis y el producto final. Cada componente del sistema cumple un rol específico y se comunica con los demás, lo que permite la ejecución de las distintas acciones que se requieren para la obtención del producto final.

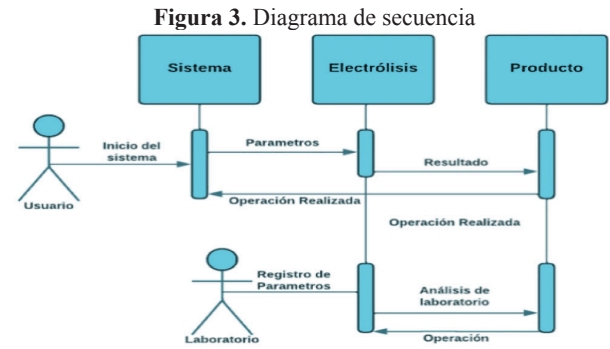


Figura 3. Diagrama de secuencia

Fuente: Elaboración Propia

### Análisis de aleación Plomo-Bismuto

Dentro del proceso de producción del horno al vacío, se obtiene dos productos por un lado destilado de estaño, el cual es material para realimentar el proceso de cristalización y por otro lado una aleación plomo bismuto, la cual tiene una concentración de estaño de 0.5-1% de estaño.

En la tabla 1 se observan los distintos productos del proceso de producción del horno al vacío.

Tabla 1. Análisis de muestra

% del elemento proporcionado		
Elemento	Destilado de estaño	Condensado Pb-Bi
% Sn	97,4	1,06
% H2O	0	0
% S	0	0
% As	0,031	0,0061
% Bi	0,625	44,68
% Pb	1,51	39,64
% Sb	0,0094	0
% Fe	0,0026	0,06
% Cu	0,0009	0,0009
% Ag	0,04	0,065

Fuente: Elaboración propia

### Análisis de electrólisis de aleación Plomo-Bismuto

Para realizar la electrólisis de plomo a partir de una aleación Pb-Bi, es esencial analizar la proporción exacta de plomo y bismuto en la aleación. En el caso de estudio, se llevó a cabo el análisis de una muestra proporcionada por la empresa OMSA y se determinó que la concentración de plomo y bismuto tenía una

relación cercana a uno, con una concentración de plomo del 39.64% y bismuto del 44.68% según la tabla 1.

Con esta información, es posible llevar a cabo la electrólisis para el electro refinación del plomo. Para lograr este objetivo, se deben seguir algunos pasos previos, como preparar la muestra adecuadamente, disolver una sal de plomo en un solvente adecuado para crear la solución electrolítica, seleccionar el electrólito adecuado para evitar la contaminación y realizar la electrólisis con la fuente de corriente eléctrica apropiada.

Es importante destacar que la electrólisis y la electro refinación, son procesos especializados, que requieren de personal capacitado y experimentado en la materia. Por lo tanto, se recomienda que estos procesos sean realizados por expertos en el campo de la metalurgia, para asegurar su correcta ejecución.

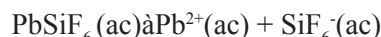
**Proceso de electro refinación del plomo.** En este apartado se menciona que el electro refinación del plomo se lleva a cabo en una solución de fluosilicato de plomo, que es utilizada como electrólito.

Es importante destacar que, el proceso de electro refinación es un método efectivo para la purificación de metales, ya que se basa en la aplicación de una corriente eléctrica en una solución electrolítica para separar los elementos metálicos. En el caso específico del plomo, la utilización de una solución de fluosilicato de plomo como electrólito es adecuada debido a su alta capacidad para disolver los compuestos de plomo, lo que permite un electro refinación más efectiva.

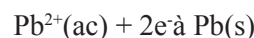
Es fundamental mencionar que la elección del electrólito adecuado es un aspecto clave en el proceso de electro refinación, ya que la calidad del metal obtenido puede verse afectada por su elección. Por lo tanto, es esencial contar con un conocimiento profundo de las propiedades de los electrólitos y cómo afectan el proceso de refinación de metales.

**Análisis de electrólisis de plomo.** Una vez identificado el electrólito, se analiza su comportamiento dentro del proceso de electrólisis mediante su disociación. Es importante realizar este análisis para comprender cómo se lleva a cabo la reacción en la solución y poder ajustar los parámetros del proceso para obtener resultados óptimos.

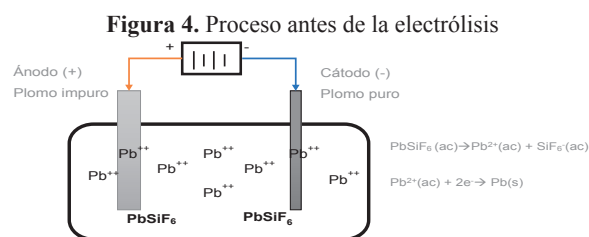
El electrólito es de fluosilicato de plomo ( $PbSiF_6$ ), haciendo una disociación se tiene.



Entonces se tiene que analizar qué pasa con iones de plomo lo que significa que:

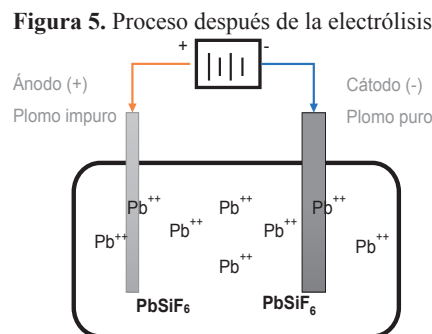


Debido a que adicionó 2 electrones se tiene que el plomo se depositara en el cátodo. Este proceso se muestra en la figura 4.



Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, dentro del proceso se da la reducción del ánodo generando barras anódicas y el aumento de tamaño del cátodo siendo este con altos concentrados de plomo puro, este proceso se observa en la figura 5.



Fuente: Elaboración propia

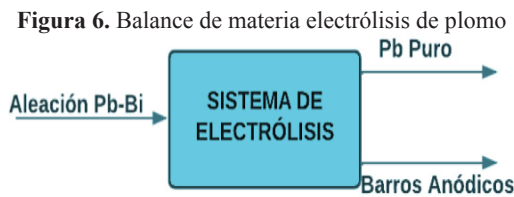
**Balance de materia.** La figura 5 corresponde al balance de materia del proceso de electro refinación del plomo. Este balance es una herramienta útil para evaluar y controlar la cantidad de materiales que entran y salen del proceso de refinación.

En la figura 6, se muestran las entradas y salidas del proceso, incluyendo los materiales que se utilizan en el electrólito, los electrodos, los productos de la reacción

electroquímica y los residuos generados durante el proceso.

El balance de materia es esencial para asegurar que el proceso de refinación del plomo sea efectivo y, sostenible en términos de consumo de materiales y energía. Además, este balance permite identificar posibles fugas o pérdidas de materiales, lo que puede ayudar a optimizar el proceso y reducir los costos de producción.

Es importante destacar que la interpretación adecuada del balance de materia requiere de un conocimiento profundo de los principios de la electroquímica y la metalurgia.



Fuente: Elaboración propia

Para el cálculo de balance de materia se tiene que:

$$n^{\circ} \text{moles } e^{-} = I * t * \frac{1 \text{ mol de } e^{-}}{96548C}$$

Una vez sabiendo el número de moles del sistema de electrólisis, se podrá obtener la cantidad en masa, de la obtención de plomo puro que sale del sistema, para realizar este cálculo. Entonces se define la cantidad de corriente que pasa por el sistema y el tiempo de electrólisis.

Entonces, se realiza el cálculo para una corriente de 5 amperios que será suministrado al sistema de electrólisis por un tiempo de 2 horas y considerando la suministración de 1000g de Pb-Bi se tiene que:

$$n^{\circ} \text{moles } e^{-} = 5 \left( \frac{C}{s} \right) * 2 * 3600s * \frac{1 \text{ mol } e^{-}}{96548C}$$

$$n^{\circ} \text{moles } e^{-} = 0.37 \text{ mol } e^{-}$$

Para el cálculo de moles de plomo que intervienen en 1000 g de aleación Pb-Bi se tiene que, el porcentaje

presente de plomo dentro la aleación se tiene una concentración de 39.64% de plomo, haciendo el cálculo de porcentaje en gramo de plomo contenidos en 1000g de aleación entonces,

$$\text{masa Pb} = 1000g * 0.3964$$

$$\text{masa Pb} = 396.4 \text{ g} \rightarrow 0.3964 \text{ Kg}$$

La masa en gramos de plomo obtenida dentro de 1000g de aleación Pb-Bi es de un aproximado de 396.4g de plomo, una vez obtenida la cantidad de gramos de plomo presentes en 1000 de aleación Pb-Bi se realiza el cálculo de moles de plomo presentes. Para el cálculo de moles el peso atómico del plomo es de 207.19g/mol entonces, para el cálculo de los moles presente solo hay que dividir la cantidad de gramos presentes, sobre el peso atómico del plomo entonces se tiene que:

$$\text{masa Pb mol} = \frac{396.4 \text{ g}}{207.19 \text{ g/mol}}$$

$$\text{masa Pb mol} = 1.91 \text{ mol} \approx 2$$

Entonces la masa que se depositará para  $Pb^{2+}(ac) + 2e^{-} \rightarrow Pb(s)$ .

$$\text{masa Pb} = 0.37 \text{ mol } e^{-} * \frac{2 \text{ mol Pb}}{2 \text{ mol } e^{-}} * \frac{207.2 \text{ Pb}}{2 \text{ mol Pb}}$$

$$\text{masa Pb} = 38.65g \rightarrow 0.038Kg$$

El balance químico del proceso de electrólisis se representa en la siguiente tabla 2.

Tabla 2. Balance químico

Balance químico electrólisis de plomo-bismuto						
Elemento	Pb	Bi	Sn	Fe	Cu	Ag
% de elemento	39,64	44,68	1,06	0,06	0,0009	0,065
% dentro de 1000g de Pb-Bi	396,4g	446,8g	10,6g	0,6g	0,009g	0,65g
electrólisis 2h-5A(g)	38,65g	barro anódico 458g				

Fuente: Elaboración propia

### Diseño mecánico

En el diseño mecánico de un proceso de electrólisis es fundamental, considerar las características físicas del

material que se va a manipular. En este caso, se trata de una aleación de plomo-bismuto que se desea electrolizar mediante un tambor rotatorio. Para suministrar la aleación al proceso, se utilizarán granallas de la aleación Pb-Bi proporcionadas por la empresa OMSA. S.A. Una muestra de estas granallas se muestra en la Figura 7.

Es importante realizar un análisis detallado de las características físicas del material para determinar la viabilidad del proceso de electrólisis y optimizar su rendimiento. Para ello, se deben medir parámetros como la densidad, la resistencia mecánica, la conductividad eléctrica y la reactividad química del material.

Además, es necesario considerar el tamaño y la forma de las granallas de la aleación Pb-Bi, para garantizar un flujo constante y uniforme durante el proceso de electrólisis. Un flujo inadecuado puede afectar la eficiencia del proceso y generar problemas de calidad en los productos obtenidos.

Figura 7. Granallas de aleación plomo-bismuto-estaño



Fuente: Elaboración propia

### Análisis de magnitudes físicas

Para llevar a cabo un diseño mecánico adecuado, es esencial analizar las características físicas del material que se manipulará. En este caso, se desea electrolizar una aleación de plomo-bismuto, mediante un tambor rotatorio, utilizando granallas de la aleación Pb-Bi, suministradas por la empresa OMSA S.A. Para obtener información sobre el tamaño y la masa de las granallas, se realizó una medición utilizando un vernier y una balanza digital, respectivamente. Dado el gran tamaño de la muestra, se midieron y pesaron 20 granallas para obtener un promedio. Los valores obtenidos se presentan en la tabla 3 y serán esenciales para el desarrollo del

diseño mecánico. Se requiere que el sistema mecánico sea capaz de soportar una carga de 1000g de granallas de Pb-Bi para llevar a cabo el proceso de electro refinación, de la aleación plomo-bismuto. Con estos datos, se puede continuar con el proceso de diseño mecánico.

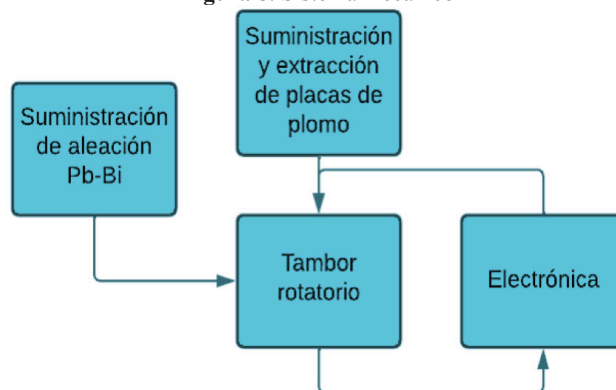
Tabla 3. Propiedades físicas 1ra muestra

Nuestra	Peso (g)	Tamaño (mm)	Muestra	Peso (g)	Tamaño (mm)
1	0,18	3,5	11	0,17	3,6
2	0,14	2,8	12	0,15	3,3
3	0,17	3,9	13	0,15	3,8
4	0,15	3,4	14	0,16	2,9
5	0,16	3,5	15	0,14	2,8
6	0,14	2,6	16	0,15	3,7
7	0,19	3,8	17	0,18	3,6
8	0,17	2,8	18	0,16	2,9
9	0,14	3,1	19	0,11	2,7
10	0,17	3,1	20	0,16	3
Sumatoria	3,14 g		64,8 mm		
Promedio	0,157 g		3,24 mm		

Fuente: Elaboración propia

Dentro del sistema mecánico se identificó los siguientes componentes ver figura 8.

Figura 8. Sistema mecánico





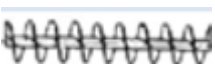
Fuente: Elaboración propia

### Suministración de aleación Plomo-Bismuto

El diseño del sistema de suministro toma en cuenta las características de las granallas de aleación plomo-bismuto. Para diseñar un tornillo helicoidal, se debe seleccionar el tipo de hélice adecuado, el tipo de hélice adecuado para este caso es el continuo. En consecuencia, el paso de la hélice será igual al diámetro. Luego, se

debe considerar la velocidad de giro del tornillo, que, para materiales ligeros, como las granallas de aleación plomo-bismuto, se recomienda que sea menor a 150 rpm. Además, se debe calcular el área de relleno del canalón, para asegurar una adecuada capacidad de suministro de las granallas al tambor rotatorio.

Tabla 4. Selección de hélice

Tipo de hélice	Figura	Tipo de material para transportar/Aplicación
Hélice continua, de paso igual al diámetro		Tipo de Hice normalmente para transporte de solidos
Hélice de gran paso de 1.5 a 2 veces el diámetro		Se utiliza para productos que fluyen muy bien
Hélice de pequeño paso normalmente la mitad de diámetro		Se utiliza en tornillos sin fin inclinados hasta unos 20-25°

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la selección de la hélice continua para el transporte de las granallas de la aleación Pb-Bi, se determinó que el paso de la hélice será igual al diámetro. Después de seleccionar el tipo de hélice, es importante considerar la velocidad de giro del tornillo, para materiales ligeros se recomienda una velocidad menor a 150 r.p.m.

Además, es necesario calcular el relleno del canalón para asegurar que el material será transportado adecuadamente. Para ello, para calcular el área de relleno (S).

$$S = \lambda \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

Entonces es necesario el coeficiente de relleno ( $\lambda$ ) se tiene que:

Tabla 5. Selección de coeficiente de relleno




Tipo de carga	Coefficiente de relleno
Pesada y abrasiva	0,125
Pesada y poco abrasiva	0,25
Ligera y no abrasiva	0,32

Fuente: Elaboración propia

Una vez seleccionado el coeficiente de relleno, el cálculo de área de relleno para la elección del diámetro

se selecciona el tipo de tubo de acuerdo con los tubos disponibles en el mercado.

Tabla 6. Selección de tubo

Tipo	Aspecto	Límite de fluencia	Resistencia a la atracción	Elongación mínima
Tubo LAC ASTM A500		228(Mpa)	310[Mpa]	25%
Tubo LAF ASTM A513		140-275(Mpa)	290[Mpa]	15%
Tubo GALV ASTM A500		228(Mpa)	310[Mpa]	25%

Fuente: Elaboración propia

Donde se obtiene un diámetro exterior de 21.35 mm, continuando con el cálculo de área de relleno se tiene que: Es necesario calcular el relleno del canalón, se tiene el cálculo del área de relleno (S).

$$S = \lambda \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

$$S = 0.25 \frac{\pi \cdot 21.35mm^2}{4}$$

$$S = 8.95mm^2 \rightarrow 8.95 \times 10^{-5}m^2$$

Continuando con los cálculos, se calcula la velocidad de desplazamiento que se tiene que la velocidad de desplazamiento es:

$$V = \frac{p \cdot n}{60}$$

$$V = \frac{0.02135 m \cdot 100 rpm}{60}$$

$$V = 0.036m/s$$

Para el cálculo del Caudal del tornillo helicoidal, es necesario calcular la densidad del material, que, según la ecuación de la densidad, se tiene que la densidad es proporcional a la masa sobre volumen, donde se obtiene que la densidad del material es 6.42t/m<sup>3</sup>, se tiene el cálculo del flujo de material transportado.



$$Q = 3600 * S * V * p * i$$

$$Q = 3600 * 8.95 \times 10^{-5} m^2 * 0.036 m/s * 6.42 t/m^3 * 1$$

$$Q = 0.074 t/h$$

Ahora es necesario, el cálculo de potencia de accionamiento, se tiene el cálculo de la potencia de accionamiento donde:

$$P = P_H + P_N + P_I$$

Entonces se realiza el cálculo de la potencia de desplazamiento

$$P_H(kw) = c_0 \frac{Q * L}{367}$$

Para realizar el cálculo de la potencia de desplazamiento, es esencial conocer el coeficiente de resistencia del material. Se recomienda revisar cuidadosamente esta tabla 7 para obtener los valores correctos y asegurarse de utilizar la unidad de medida adecuada en el cálculo de coeficiente de resistencia.

Tabla 7. Coeficiente de resistencia

Tipo de material	Coefficiente de relleno $\lambda$
Harina, aserrín, productos, granulados	1,2
Turba, sosa, polvo de carbón	1,6
Antracita, carbón, sal de roca	2,5

Fuente: Elaboración propia

Entonces para el cálculo del potencial de desplazamiento se tiene que definir una longitud del transportador, que según en dimensionamiento del diámetro, se tendrá una longitud de 200 mm, equivalentes a 0.2 m, entonces se tiene que:

$$P_H(kw) = 2.5 \frac{0.074 \frac{t}{h} * 0.2m}{367}$$

$$P_H(kw) = 1 \times 10^{-4}$$

Siguiendo con el cálculo de la potencia total, el cálculo de la potencia de accionamiento del tornillo en vacío.

$$P_N(kw) = \frac{D * L}{20}$$

$$P_N(kw) = \frac{0.0427m * 0.2m}{20}$$

$$P_N(kw) = 4.2 \times 10^{-4}$$

Siguiendo con el cálculo de la potencia total, el cálculo del tornillo sin fin inclinado.

$$P_H(kw) = \frac{Q * H}{367}$$

$$P_H(kw) = \frac{0.074 \frac{t}{h} * 0.1m}{367}$$

$$P_H(kw) = 2 \times 10^{-5}$$

Entonces la potencia total es:

$$P = P_H + P_N + P_I$$

$$P = 1 \times 10^{-4} + 4.2 \times 10^{-4} + 2 \times 10^{-5}$$

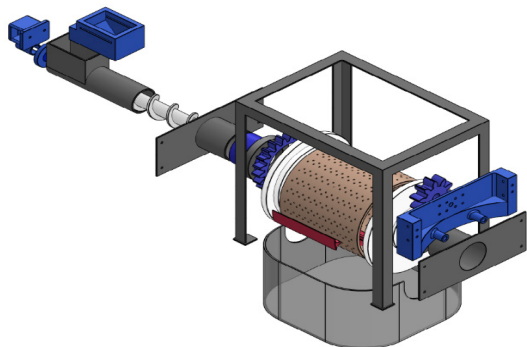
$$P = 5.4 \times 10^{-4} (kw)$$

Para seleccionar el motor adecuado, además del torque necesario, también es importante considerar otros factores, como la velocidad requerida, la frecuencia de uso y la eficiencia energética. Una vez seleccionado el motor, se procede con el diseño mecánico, en una herramienta de diseño CAD/CAM, la cual permite crear un modelo en 3D del sistema y, simular su funcionamiento antes de la fabricación. Esto permite detectar posibles errores o mejoras en el diseño, reduciendo costos y tiempo de producción. Además, la herramienta CAD/CAM también permite generar los planos técnicos y la lista de materiales necesarios para la fabricación del sistema mecánico.

Después de completar el diseño individual de cada componente, se procedió al ensamblaje final del sistema. Se realizaron las conexiones entre el soporte del motor, el acople para el motor del tornillo helicoidal, los soportes de rodamiento, las aspas verticales, la tolva y la tapa del tambor rotatorio, asegurándose de que todas las partes encajaran adecuadamente y cumplieran con las especificaciones requeridas para el funcionamiento correcto del sistema.

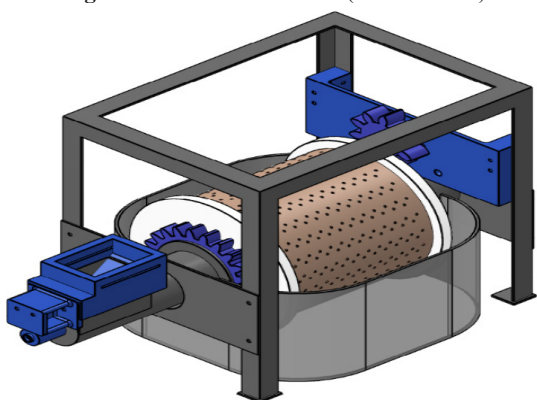
Se llevaron a cabo pruebas para verificar la sincronización y el correcto funcionamiento de todas las partes. Se realizaron ajustes y modificaciones necesarios para asegurar un rendimiento óptimo. Una vez confirmado que todo estaba funcionando correctamente, se consideró que el diseño y el ensamblaje del sistema estaban completos.

Figura 9. Diseño mecánico



Fuente: Elaboración propia

Figura 10. Diseño mecánico (continuación)

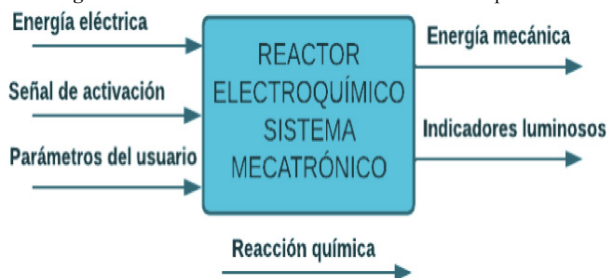


Fuente: Elaboración propia

### Diseño electrónico

El objetivo del presente Trabajo de Grado es desarrollar un diseño mecatrónico de un reactor electroquímico para la realización de la electrólisis del plomo de una aleación plomo-bismuto-estaño, proporcionada por la empresa OMSA.SA. El diseño se ha basado en las características descritas anteriormente y se presenta en la figura adjunta. El sistema mecatrónico ha sido diseñado con el fin de garantizar un proceso de electrólisis eficiente y seguro.

Figura 11. Sistema mecatrónico de reactor electroquímico

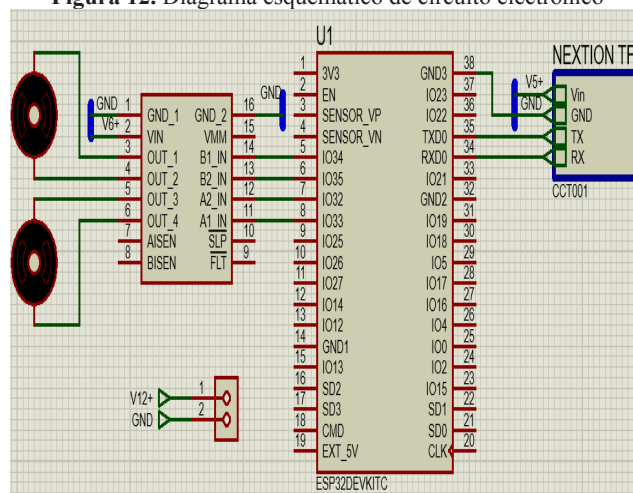


Fuente: Elaboración propia

### Diseño del circuito electrónico

Para facilitar la comprensión del diseño del sistema eléctrico, se muestra en la figura 12 el esquema diagramático creado utilizando el software Proteus. Este programa posibilita el desarrollo de una placa de circuito impreso (PCB) sin la necesidad de utilizar softwares externos o enfrentar complicaciones adicionales. Esta representación visual proporciona una visión clara de la disposición y conexión de los componentes electrónicos en el diseño, lo que ayuda a simplificar el proceso de desarrollo y optimizar la eficiencia del sistema eléctrico.

Figura 12. Diagrama esquemático de circuito electrónico

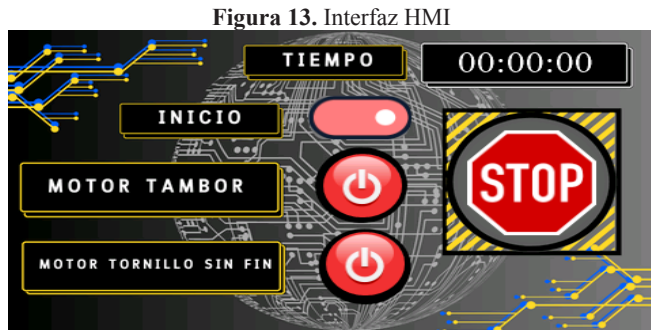


Fuente: Elaboración propia

### Interfaz de Usuario

Luego de analizar los requisitos del sistema, se determinó la necesidad de incorporar una pantalla TFT para desarrollar una interfaz HMI (Human-Machine Interface) que permitiera controlar el sistema de manera intuitiva y eficiente. Con este fin, se decidió utilizar una pantalla táctil de la marca Nextion, la cual posibilitará la programación y el manejo de datos a través del puerto serial.

La inclusión de esta pantalla TFT en el diseño mecatrónico ofrecerá un mayor control y monitoreo de las variables del sistema, lo cual se traducirá en una mayor precisión y calidad en el proceso de electrólisis de la aleación plomo-bismuto-estaño. La Figura 13 representa visualmente la apariencia de la pantalla seleccionada y su ubicación dentro del sistema.



Fuente: Elaboración propia

La interfaz permite el control de los motores para dar movimiento al sistema, también se incluye un reloj con el fin de controlar el tiempo de uso del prototipo y verificar el tiempo de electrólisis que se está llevando.

### Parte experimental.

El proceso experimental de electrólisis se llevó a cabo en un entorno de laboratorio especializado, que proporcionaba las condiciones necesarias para garantizar la seguridad durante el procedimiento. El diseño experimental se basó en los cálculos previos realizados, los cuales se presentan en la tabla 8 como referencia. Durante el proceso experimental, se recopilaban los datos y se registraron en la tabla 8, para posteriormente analizar los resultados obtenidos. Estos datos son de vital importancia para evaluar la eficiencia y el rendimiento del proceso de electrólisis, así como para compararlos con los cálculos teóricos previos.

Tabla 8. Balance de electrólisis

Balance químico electrólisis de plomo-bismuto						
Elementos	Pb	Bi	Sn	Fe	Cu	Ag
% De elementos	39,64	44,68	1,06	0,06	0,0009	0,065
% Dentro de 1000g de Pb-Bi	396,4g	446,8g	10,6g	0,6g	0,009g	0,65g
Electrólisis 2h-5A(g)	38,65		barro anódico 458g			

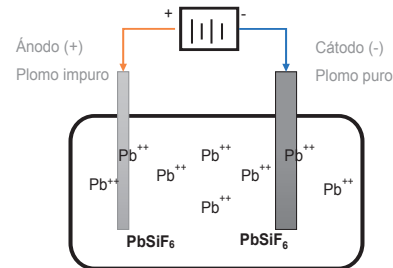
Fuente: Elaboración propia

Entonces se procedió a realizar la electrólisis del plomo esperando obtener la calculado en la tabla 8.

Siguiendo el proceso de electrólisis del plomo el cual se muestra en la Figura 15 se debe trabajar con ácido Fluosilícico el cual al actuar como medio electrolítico nos ayudara a la reducción del plomo en la aleación plomo-bismuto, se realizó las pruebas con una concentración

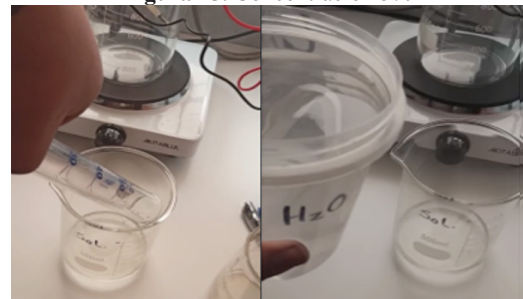
del 5% de ácido Fluosilícico disuelto en H<sub>2</sub>O con se muestra en la siguiente figura 15.

Figura 14. Proceso de electrólisis



Fuente: Elaboración propia

Figura 15. Concentración 5%



Fuente: Elaboración propia

Después de realizar las pruebas preliminares con una concentración del 5% de ácido Fluosilícico disuelto en agua, se procede a llevar a cabo el proceso de electrólisis del plomo. Para ello, se utiliza la solución preparada anteriormente y se controla el proceso mediante la fuente de energía regulable que se ha implementado previamente. Es importante destacar que, en la electrólisis del plomo, no se requiere un voltaje elevado, sino más bien un amperaje controlado y constante. Durante la electrólisis, el ácido Fluosilícico actúa como el medio electrolítico, facilitando la reducción del plomo presente en la aleación plomo-bismuto. Esta reducción se logra mediante la aplicación de corriente eléctrica controlada, lo que permite que los iones de plomo se depositen en el cátodo, mientras que los iones de bismuto se desplazan hacia el ánodo.

El proceso de electrólisis se realiza siguiendo los parámetros y las condiciones establecidas en el diseño experimental, y se controla cuidadosamente para garantizar resultados precisos y reproducibles. La Figura 16 muestra una representación visual del proceso de electrólisis del plomo en la solución de ácido Fluosilícico.

Es importante resaltar que este método de electrólisis del plomo con ácido Fluosilícico como medio electrolítico tiene aplicaciones específicas y es necesario realizar un seguimiento riguroso de los protocolos de seguridad y disposición adecuada de los productos y residuos generados durante el proceso.

Figura 16. Proceso de electrólisis de plomo



Fuente: Elaboración propia

Figura 17. Proceso de electrólisis de plomo (continuación)



Fuente: Elaboración propia

Los datos obtenidos del proceso de electrólisis de plomo se muestran en la siguiente tabla 9.

Tabla 9. Datos obtenidos

Peso Inicial Pb	Peso inicial Pb-Bi	Distancia
87,58gr	25,86gr	8cm
Temp inicial		Temp final
inicio 12:00		15°C
		40°C
Amp	Volt	Temperatura
12:10	1A	1,83 V
12:20	1A	1,33V
12:30	1A	1,26 V
12:40	1A	1,23 V
12:50	1A	1,64 V
Peso final Pb	Peso final Pb-Bi	Distancia
93,86 gr	23,62 gr	8cm

Fuente: Elaboración propia

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Alcanzados todos los objetivos del proyecto se llegó a lo siguiente:

- Se desarrollo un proceso electrolítico para la obtención de plomo metálico de una aleación plomo-bismuto a partir del proceso de electrólisis mediante un sistema mecatrónico,

La recuperación de plomo (Pb) fue realizada exitosamente, a partir de la aleación plomo-bismuto (Pb-Bi).

- Se seleccionó un proceso de electrólisis para la identificación de factores químicos para electrólisis de aleación Pb-Bi.

El proceso de electrólisis de plomo de una aleación Pb-Bi consistió definiendo como cátodo al Pb en estado sólido, como ánodo a la aleación de Pb-Bi y el medio electrolítico seleccionado es ácido Fluosilícico, siendo estos los componentes necesarios para la electrólisis del plomo.

- Se diseñó un sistema mecánico de electrólisis de plomo que permita soportar las características del plomo y aleaciones de plomo para un correcto funcionamiento.

El sistema mecánico desarrollado tomo en consideración el análisis de las características presentes en aleación Pb-Bi sometida bajo un proceso de electrólisis de plomo, donde se logró obtener un diseño mecánico el cual cumple con las características para desarrollar un proceso de electrólisis de plomo.

- Se realizó el diseño del sistema electrónico para el control del sistema mecánico para la electrólisis de plomo.

El sistema electrónico consiste en la selección de componentes electrónicos como motores que cumplen con los parámetros del diseño mecánico, el controlador para el control de los motores, el microcontrolador para el control general del sistema electrónico.

- Se desarrolló una interfaz para la interacción con el sistema mecatrónico para la realización del proceso electrolítico.

La Interfaz permite al usuario controlar la activación de los motores, también cuenta con un reloj que permite la cuantificación del tiempo

### RECOMENDACIONES

- La implementación de un sistema de purificación del electrolito es fundamental para la optimización del proceso debido a que el electrolito se saturará con iones de plomo con el uso constante del mismo bajando las propiedades conductivas del mismo.
- La inclusión de dispositivos para el control de la concentración del ácido es fundamental para optimizar el proceso de electrólisis. La integración tecnológica de módulos externos en la estructura mecánica del prototipo permite la incorporación de dispositivos para monitorear y controlar la concentración del ácido durante el proceso de electrólisis.
- La implementación de un sistema de extracción de láminas de plomo es esencial para el control del porcentaje de recuperación de plomo optimizando la cuantificación de recuperación de plomo y la exposición de las láminas al proceso de electrólisis.

### CONFLICTO DE INTERÉS

El autor declara que no tiene conflictos de interés con la presente investigación.

### AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue posible gracias al apoyo de la Escuela Militar de Ingeniería, Dirección Nacional de Investigación Ciencia y Tecnología – DNICYT y la Carrera de Ingeniería Mecatrónica – EMI La Paz, por incentivar al desarrollo de nuevos conocimientos. Finalmente, un especial agradecimiento al Ing. Eddy Mier Cornejo por su constante apoyo.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] (ÁVILA, 2017) Ávila Rey, M. J. D. P. y Ortega Cantero, E. (2017). Química de los elementos metálicos. Madrid, UNED - Universidad Nacional de Educación a Distancia. Recuperado de <https://elibro.net/es/ereader/biblioemi>
- [2] (BARBA, 2014) Barba Juan, A. y Clausell Terol, C. (2014). Reactores químicos y bioquímicos. “Castelló de la Plana, Spain: D - Universitat Jaume I. Servei de Comunicació i Publicacions.” Recuperado de <https://elibro.net/es/ereader/biblioemi>
- [3] (ESTUDIOS MINEROS, 2020) Estudios Mineros del Perú S. A. C. E. (2020) Manual de Minería. Perú, Instituto de Educación Superior Tecnológico Público Oyón Recuperado de: [https://www.iestpoyon.edu.pe/web/documentos/Manual\\_de\\_Mineria.pdf](https://www.iestpoyon.edu.pe/web/documentos/Manual_de_Mineria.pdf)
- [4] (FERNÁNDEZ, 2020) Fernández Domene, R. M. Roselló Márquez, G. y Batista Grau, P. (2020). Fundamentos de teoría electroquímica. Valencia, Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia. Recuperado de <https://elibro.net/es/ereader/biblioemi>
- [5] (GARAVITO, 2008) Julio Garavito, E. (2008) Fundición Protocolo, Curso de procesos de manufactura, Colombia, Escuela Colombiana de Ingeniería. Recuperado de [https://escuelaing.s3.amazonaws.com/production/documents/9627\\_fundicion.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAWFY3NGTFBJGCIWME & Signature=t%2FflAtk5c842y%2BDvnnAcDQ6KiiU%3D&Expires=1654254225](https://escuelaing.s3.amazonaws.com/production/documents/9627_fundicion.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAWFY3NGTFBJGCIWME & Signature=t%2FflAtk5c842y%2BDvnnAcDQ6KiiU%3D&Expires=1654254225)
- [6] (HOLGUÍN, 2000) Saúl Holguín Quiñones, J. M. Daniel Estrada Guerrero y Margarita Chávez Martínez. E. (2000) Métodos de separación de los elementos metálicos. México, UAM – Universidad Autónoma Metropolitana. Recuperado de [http://zaloamati.azc.uam.mx/bitstream/handle/11191/419/Metodos\\_separacion\\_elementos.pdf?sequence=3](http://zaloamati.azc.uam.mx/bitstream/handle/11191/419/Metodos_separacion_elementos.pdf?sequence=3)
- [7] (MINISTERIO DE MINERÍA Y METALURGIA, 2019) Viceministerio de política minera, regulación y fiscalización, Unidad de análisis y política minera. (“MINISTERIO DE MINERÍA Y METALURGIA”) (2019) Situación de la minería y boletín estadístico Tercer Trimestre 2019, La Paz, Bolivia, Ministerio de Minería y Metalurgia Recuperado de <http://www.mineria.gob.bo/revista/pdf/boletin3t2019.pdf>

- [8] (MINISTERIO DE MINERÍA Y METALURGIA, 2021) Viceministerio de política minera, regulación y fiscalización, Unidad de análisis y política minera.
- [9] (“MINISTERIO DE MINERÍA Y METALURGIA”) (2021) Situación de la minería y boletín estadístico Primer Trimestre 2021, La Paz, Bolivia, Ministerio de Minería y Metalurgia  
Ministerio de Minería y Metalurgia Recuperado (2022, febrero-marzo) Precio de Minerales Recuperado de <http://www.mineria.gob.bo/>
- [10] (PARDO, 2019) Pardo Vicente María Teresa E. (2019). Celdas electrolíticas. Leyes de Faraday de la electrólisis. Valencia, UVP – Universitat Politècnica De Valencia. Recuperado de <http://www.upv.es/visor/media/0e90c9a0-5f6b-11e9-a3b0-cf96b1704ae8/c>
- [11] (Rodríguez, 2022) Hermenegildo Rodríguez Galbarro (2022, agosto) Calculo de transportadores de Tonillo Sin Fin recuperado de. <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn143.html>
- [12] (Rodríguez-Gómez, 2012) Rocío Leira Rodríguez, Jorge Gómez Suarez, E. (2012) Electrónica Analógica Conselleria de cultura, educación e universidade recuperado [https://www.edu.xunta.gal/centros/iesblancoamorculledo/aulavirtual/pluginfile.php/37095/mod\\_resource/content/2/analogo%CC%81gica.pdf#:~:text=Los%20sistemas%20electr%C3%B3nicos%20son%20conjuntos,teclado%2C%20temperatura%2C%20etc.](https://www.edu.xunta.gal/centros/iesblancoamorculledo/aulavirtual/pluginfile.php/37095/mod_resource/content/2/analogo%CC%81gica.pdf#:~:text=Los%20sistemas%20electr%C3%B3nicos%20son%20conjuntos,teclado%2C%20temperatura%2C%20etc.))
- [13] (Villalba, 2011) IES Villalba Hervás (2011) Elementos de Máquinas y Sistemas, Blog de profesores de Tecnología para la enseñanza Recuperado de <https://iesvillalbahervastecnologia.files.wordpress.com/2011/03/elementos-de-mc3a1quinas-y-sistemas.pdf>



**Bertil Arturo Zubieta Beltrán.**

Nació en Oruro - Bolivia, es Ingeniero Mecatrónico de la Escuela Militar de Ingeniería – Unidad Académica La Paz. e investigador junior en la Dirección Nacional de Investigación, Ciencia y Tecnología DNICYT-EMI.