

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Eléctrica

Tesis

**Implementación de un Sensor de pH para la mejora en la
Celda de Flotación de la Minera Las Bambas, Apurímac
2025**

Luis Alfredo Espiritu Durand

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Electricista

Huancayo, 2025

INFORME DE CONFORMIDAD DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

A : Decano de la Facultad de Ingeniería
DE : Ing. Percy Javier Juan de Dios Ortiz
Asesor de trabajo de investigación
ASUNTO : Remito resultado de evaluación de originalidad de trabajo de investigación
FECHA : 12 de Junio de 2025

Con sumo agrado me dirijo a vuestro despacho para informar que, en mi condición de asesor del trabajo de investigación:

Título:

Implementación de un Sensor de pH para la Mejora en la Celda de Flotación de la Minera Las Bambas, Apurímac 2025

Autores:

1. Luis Alfredo Espiritu Durand – EAP. Ingeniería Eléctrica

Se procedió con la carga del documento a la plataforma "Turnitin" y se realizó la verificación completa de las coincidencias resaltadas por el software dando por resultado 18 % de similitud sin encontrarse hallazgos relacionados a plagio. Se utilizaron los siguientes filtros:

- | | | |
|---|-----------------------------|--|
| • Filtro de exclusión de bibliografía | SI ☐ | NO ☒ |
| • Filtro de exclusión de grupos de palabras menores
Nº de palabras excluidas (en caso de elegir "SI"): | SI ☐ | NO ☒ |
| • Exclusión de fuente por trabajo anterior del mismo estudiante | SI ☐ | NO ☒ |

En consecuencia, se determina que el trabajo de investigación constituye un documento original al presentar similitud de otros autores (citas) por debajo del porcentaje establecido por la Universidad Continental.

Recae toda responsabilidad del contenido del trabajo de investigación sobre el autor y asesor, en concordancia a los principios expresados en el Reglamento del Registro Nacional de Trabajos conducentes a Grados y Títulos – RENATI y en la normativa de la Universidad Continental.

Atentamente,

La firma del asesor obra en el archivo original

(No se muestra en este documento por estar expuesto a publicación)

ÍNDICE DE CONTENIDO

Agradecimiento	v
Dedicatoria	vi
Índice de contenido	vii
Lista de tablas.....	xi
Lista de figuras.....	xii
Resumen.....	xiv
Abstract.....	xv
Introducción	xvi
Capítulo I	18
Planteamiento del estudio.....	18
1.1. Planteamiento y formulación del problema	18
1.2. Problema	19
1.2.1. Problema general	19
1.2.2. Problemas específicos	20
1.3. Objetivos	20
1.3.1. Objetivo general.....	20
1.3.2. Objetivos específicos	20
1.4. Justificación.....	20
1.4.1. Técnica.....	20
1.4.2. Económica	21
1.4.3. Teórica	21
1.4.4. Ambiental.....	22
1.5. Importancia	22
1.6. Limitaciones.....	23
1.7. Hipótesis.....	23
1.7.1. Hipótesis general.....	23
1.7.2. Hipótesis específicas	23
1.8. Descripción de variables	24
1.8.1. Variable independiente	24
1.8.2. Variable dependiente	24
1.9. Operacionalización de variables.....	25
Capítulo II	27
Marco teórico	27
2.1. Antecedentes del problema	27
2.1.1. Sensor de pH.....	27

2.1.2. Celda de flotación	31
2.2. Bases Teóricas.....	35
2.2.1. Sensores pH	35
2.2.2. Celdas de flotación.....	36
2.3. Definición en términos básicos	37
2.3.1. Tipos de sensores de pH	37
2.3.1.1. Sensores electroquímicos	37
2.3.1.2. Sensores con electrodos de vidrio.....	38
2.3.1.3. Sensores ópticos.....	38
2.3.2. Regulación del pH en minería.....	39
2.3.3. Procesos de regulación del pH en minería	40
2.3.3.1. Neutralización de aguas acidas.....	40
2.3.3.2. Monitoreo y control.....	41
2.3.4. Principio eléctrico de funcionamiento de un sensor	41
2.3.5. Ecuación de Nernst	42
2.3.6. Componentes y zonas de la celda de flotación	43
2.3.6.1. Zona de agitación (agitador/impulsor)	43
2.3.6.2. Zona de burbujeo y recuperación de espuma	44
2.3.6.3. Operación y configuración	44
2.3.6.4. Bombas de alimentación de pulpa.....	45
2.3.6.5. Sensores de pH y control automatizado	45
2.3.6.6. Tuberías, válvulas y accesos.....	46
2.3.6.7. Codificación industrial y etiquetado.....	46
2.3.6.8. Especificaciones técnicas y normativas.....	47
2.3.7. Tipos de celdas de flotación.....	47
2.3.7.1. Celdas Rougher (primarias).....	47
2.3.7.2. Celdas Cleaner (limpiadoras)	47
2.3.7.3. Celdas Scavenger (de barrido).....	48
2.3.7.4. Celdas mecánicas.....	48
2.3.7.5. Columnas de flotación (celda de flotación columnar).....	49
2.3.7.6. Celdas neumáticas	49
2.3.7.7. Celdas Jameson	50
2.3.8. Parámetros eléctricos en las celdas de flotación	51
2.3.9. Fundamentos de operación de una celda de flotación.....	52
2.3.9.1. Dispersión y generación de burbujas de aire	52
2.3.9.2. Suspensión y mezcla homogénea de la pulpa.....	53
2.3.9.3. Formación, estabilidad y transporte de la espuma mineralizada	53

2.3.9.4. Zonas hidrodinámicas dentro de la celda	54
2.3.9.5. Control del nivel de pulpa y aireación.....	54
2.3.9.6. Circuitos y etapas de flotación	55
2.3.9.7. Rol de los reactivos químicos y el pH	57
2.3.10. Regulación de reactivos y pH en minería.....	57
2.3.11. Regulación de electricidad en minería	57
2.4. Definición de términos.....	58
Capítulo III.....	60
Metodología	60
3.1. Método de investigación	60
3.2. Tipo de investigación	60
3.3. Nivel de investigación.....	61
3.4. Diseño de investigación	61
3.4.1. Población	62
3.4.2. Muestra	64
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	64
3.5.1. Técnicas de recolección de datos.....	64
3.5.2. Instrumento de recolección de datos.....	65
3.6. Procedimiento de recolección de datos	66
3.7. Procesamiento de datos	66
3.7.1. Integración de técnicas estadísticas y de minería de datos	66
3.7.2. Aplicación de la prueba t-Student en un diseño correlacional.....	67
3.7.3. Triangulación y validación técnica	67
Capítulo IV	70
Resultados y discusión	70
4.1. Resultado del tratamiento y análisis de la información.....	70
4.1.1. Proceso de flotación en la minera Las Bambas.....	70
4.1.2. pH en la flotación.....	70
4.1.3. Reactivos y etapas del proceso	71
4.1.3.1. Sensor de pH Orbipore CPS91 - D.....	72
4.1.3.2. Problemática del sensor de pH Orbipore CPS91D.....	74
4.1.4. Parámetros de salida del sensor de pH Orbipore CPS91D	78
4.1.4.1. Orbipore CPS91D: Parámetro de deriva térmica	79
4.1.4.2. Orbipore CPS91D: Parámetro de estabilidad	79
4.1.4.3. Orbipore CPS91D: Parámetro de pérdida de señal de salida	80
4.1.4.4. Orbipore CPS91D: Parámetro de costos de reactivos	81
4.1.5. Implementación del sensor Orbipac CPF82 - D	81

4.1.5.1. Reemplazo de sensores modelo Orbipac	82
4.1.5.2. Proceso de calibración del sensor Orbipac CPF82D	83
4.1.6. Parámetros de salida del sensor de pH Orbipac CPF82D	85
4.1.6.1. Comparación de tecnologías.....	86
4.2. Análisis estadístico.....	88
4.2.1. Estadística de muestras emparejadas	88
4.2.2. Correlaciones de muestras emparejadas	89
4.2.3. Pruebas de hipótesis.....	90
4.2.3.1. Hipótesis específica 1	91
4.2.3.2. Hipótesis específica 2	91
4.2.3.3. Hipótesis específica 3	92
4.2.3.4. Hipótesis general	92
Conclusiones	94
Recomendaciones	96
Referencias	97
Anexos	104

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Identificación de las condiciones adversas en las celdas de flotación	19
Tabla 2. Operacionalización de variables	25
Tabla 3. Ventajas y desventajas de las celdas de flotación	51
Tabla 4. Circuitos de flotación.....	56
Tabla 5. Regulación de reactivos y pH	57
Tabla 6. Regulación de electricidad en minería	58
Tabla 7. Esquematizado del tipo de sensor -TAG y la ubicación en planta de Molibdeno – Las Bambas	63
Tabla 8. Muestreo TAG – RFID de la planta de Molibdeno	64
Tabla 9. Instrumento de recolección de datos.....	65
Tabla 10. Resume del proceso de flotación y control de pH en las Bambas.	72
Tabla 11. Aspectos técnicos del sensor Orbipore CPS91 y Orbipore CPS91 - D.....	73
Tabla 12. Esquematizado del tipo de sensor -TAG y la ubicación en planta de molibdeno – Las Bambas	75
Tabla 13. Equipos de medición de parámetros TAG en sensor Orbipore.....	77
Tabla 14. Parámetros de salida del sensor de pH Orbipore CPS91D	78
Tabla 15. Ventajas del sensor Orbipac	82
Tabla 16. Parámetros de salida del sensor de pH Orbipac CPF82D	85
Tabla 17. Estadística de muestras emparejadas para ambos sensores	89
Tabla 18. Correlaciones de muestras emparejadas para ambos sensores.....	89
Tabla 19. Prueba T – Student para cada par de parámetros de medición de los sensores	90

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sensor electroquímico Sensorex.....	37
Figura 2. Sensor con electrodo de vidrio PHHC729.....	38
Figura 3. Sensor con óptico CPS11E.....	39
Figura 4. Escala de pH.....	40
Figura 5. Proceso de neutralización de aguas ácidas	41
Figura 6. Monitoreo en tiempo real de pH.....	41
Figura 7. Electrofísica de la membrana	42
Figura 8. Electrodo de pH.....	42
Figura 9. Agitador G&G.....	44
Figura 10. Generadores y deflectores de burbujas	44
Figura 11. Bomba de alimentación de pulpa.....	45
Figura 12. Simbología en diagramas de flotación.....	46
Figura 13. Celda Rhouger 911 – primaria.....	47
Figura 14. Celda de flotación Cleanner	48
Figura 15. Celda Scavenger pelambres.....	48
Figura 16. Celda de flotación tipo mecánica.....	49
Figura 17. Celda de flotación columnar.....	49
Figura 18. Celda de flotación neumática	50
Figura 19. Celda de flotación Jameson	50
Figura 20. Mecanismo general de un sistema de flotación	52
Figura 21. Efectos de flotación – burbujas	53
Figura 22. Esquema de partículas flotadas.....	53
Figura 23. Diagrama de flotación de espuma mineralizada.....	54
Figura 24. Control del nivel de pulpa en sistemas de flotación	55
Figura 25. Circuito de flotación.....	56
Figura 26. Esquema de control eficiente de reactivos y pH.....	57
Figura 27. Colector sulfhídrico (hidrofobizante)	71
Figura 28. Adicionamiento de reactivos por etapa de flotación.....	71
Figura 29. Celda de flotación Las Bambas	72
Figura 30. Sensor Orbipore CPS91 - D.....	73
Figura 31. Deficiencias del sensor Orbipore en la planta de molibdeno	76
Figura 32. Orbipore CPS91D – Iteración de la deriva térmica	79
Figura 33. Orbipore CPS91D – Iteración de estabilidad.....	80

Figura 34. Orbipore CPS91D – Iteración de pérdida de señal de salida.....	80
Figura 35. Orbipore CPS91D – Iteración de costos por reactivos	81
Figura 36. Sensor Orbipac CPF82D	82
Figura 37. Calibración y transporte del sensor Orbipac CPF82D.....	83
Figura 38. Proceso de calibración y sensores de pH y ORP	84
Figura 39. Kit de calibración de sensores Orbipac	84
Figura 40. Comparación de parámetros de deriva térmica entre ambos sensores.....	86
Figura 41. Comparación de parámetros de estabilidad entre sensores.....	86
Figura 42. Comparación de parámetros de pérdidas de señal.....	87
Figura 43. Comparación de costos de reactivos.....	88

RESUMEN

La presente investigación responde a la pregunta de ¿Qué efectos tiene la implementación del sensor de pH en la mejora de la celda de flotación de la minera Las Bambas, Apurímac-2025?, como objetivo se determinó qué efectos tiene la implementación del sensor de pH en la mejora de la celda de flotación de la minera Las Bambas, Apurímac-2025, implementando un diseño de sensor de pH que permita una mejora en las deficiencias del almacenamiento de los sensores de pH remojando en diferentes soluciones tales como: buffer 7pH, buffer de 12pH, agua (H₂O) y en ocasiones hasta ácido clorhídrico (HCL) al 10 % sin identificar la solución en la que se está remojando los sensores. La hipótesis planteada es que la propuesta de implementación del sensor de pH digital mejora significativamente el control del pH en las celdas de flotación de la minera Las Bambas, Apurímac, dicha mejora está fundamentada por un sustento estadístico que respalda tal afirmación. El método de investigación es el método cuantitativo, ya que reclama la intervención de variables numéricas, el tipo de investigación es descriptiva puesto que se enfoca en la observación y la sistematización de datos arraigados a las variables electroquímicas del sensor de pH y la de las celdas de flotación. El diseño propuesto es el diseño correlacional donde se verificó la mejora de los parámetros de las variables mediante la prueba T - Student. Analizando estadísticamente los datos presentados en los resultados generales, se encontró que el *p-valor* asociado al modelo T - Student obtenido es significativamente menor al nivel de significancia propuesto ($\alpha = 0.05$). Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis general, la implementación del sensor de pH digital mejora significativamente el control del pH en las celdas de flotación de la minera Las Bambas, Apurímac.

Palabras claves: celdas de flotación, consumo energético, sensor de pH

ABSTRACT

This research answers the question of what effects does the implementation of the pH sensor have on the improvement of the flotation cell of the Las Bambas mine, Apurímac-2025? The objective is to determine what effects the implementation of the pH sensor has on the improvement of the flotation cell of the Las Bambas mine, Apurímac-2025, implementing a pH sensor design that allows an improvement in the storage deficiencies of the pH sensors by soaking in different solutions such as: 7pH buffer, 12pH buffer, water (H₂O) and sometimes even 10 % hydrochloric acid (HCL) without identifying the solution in which the sensors are being soaked. The hypothesis is that the proposed implementation of the digital pH sensor significantly improves pH control in the flotation cells of the Las Bambas mine, Apurímac, this improvement is based on statistical support that supports this statement. The research method is quantitative because it requires the use of numerical variables. The research type is descriptive, focusing on the observation and systematization of data based on the electrochemical variables of the pH sensor and the flotation cells. The proposed design is a correlational design, where the improvement in the variables' parameters will be verified using the Student t-test. Statistically analyzing the data presented in the general results, it was found that the p-value associated with the Student t-test obtained is significantly lower than the proposed significance level ($\alpha = 0.05$). Therefore, the null hypothesis is rejected, and the general hypothesis is accepted: the implementation of a digital pH sensor significantly improves pH control in the flotation cells of the Las Bambas mine, Apurímac.

Keywords: energy consumption, flotation cells, pH Sensor