



UNIVERSIDAD
SAN SEBASTIAN
VOCACIÓN POR LA EXCELENCIA

Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño.
Escuela de Ingeniería.
Ingeniería Civil en Minas.
Sede Bellavista.



EVALUACIÓN DE LA PRECISIÓN DE RECUPERACIONES GLOBALES EN PROCESOS DE FLOTACIÓN DE PI-SYSTEM Y PYTHON ENTREGA FINAL

Integrantes

Patricio Flores
Nayareth Muñoz
Felipe Cisternas

Fecha de entrega

Martes 09 de julio de 2024

Docente

Andrés Soto

Cliente

Gonzalo Montes, ISMP Integral
Solutions for Mineral Processing

Índice

Resumen ejecutivo	03
Introducción	04
Objetivo general.	05
Objetivos específicos	05
Proceso de flotación	06
Datos para análisis	07 - 08
Ecuaciones	09
Depuración de datos	10 - 11
Diagrama de bloques con recirculación	12
Recuperaciones extraídas	13
Cálculos Recuperación Global y errores	14
Grafica de recuperación	15 - 16
Modelamiento en Python	17
Resultado modelo	19
Análisis	23
Conclusión	24
Bibliografía	25
Anexo	29

Resumen ejecutivo

Según los requerimientos del servicio de la empresa, se pide desarrollar patrones de recuperación y ley de concentrado como parámetros de eficiencia de flotación en la industria minera, llevar a cabo un estudio que incluya modelado predictivo y validación de análisis de datos históricos proporcionados por la empresa, desarrollo de modelos predictivos utilizando como herramienta en Python.

Ejecución de un análisis desde la recopilación y análisis de datos históricos hasta el desarrollo de un modelo teórico semiempírico. Este enfoque integral permite identificar patrones, tendencias y anticipar el comportamiento futuro del proceso de flotación, realizando pruebas piloto para verificar la eficacia de los modelos desarrollados y establecer estándares claros para evaluar la eficiencia en el proceso. Esto proporciona a la empresa minera una herramienta efectiva para mejorar sus operaciones de manera continua, mejorando su rendimiento y competitividad en el mercado y analizar la eficiencia en el proceso.

El análisis del diagrama de bloques del proceso de flotación y sus recirculaciones permite entender las interrelaciones entre los bancos y su impacto en la recuperación global. La evaluación de recuperaciones individuales y la identificación de puntos críticos destacaron áreas para mejorar la eficiencia. Utilizando herramientas de visualización y estudio de patrones de datos, en este caso, diseñar un modelo teórico semiempírico mediante Python, se identificaron tendencias significativas que facilitan la toma de decisiones. La recuperación global de cobre en la recuperación de Rougher y Limpieza entrega como resultado que en esta última, la recuperación incrementa significativamente con 24,92% respecto de la recuperación de cobre en Rougher. En la recuperación de molibdeno, en la etapa de limpieza se mejora en un 16.71% respecto la etapa de Rougher. Finalmente, respecto al hierro, la recuperación global disminuye en la etapa de limpieza en un 23,37% respecto a Rougher. En resumen, las cifras indican que la etapa de Limpieza juega un papel crucial en la maximización de la recuperación de cobre y molibdeno, y en la reducción de hierro, lo cual es esencial para la obtención de concentrados de alta calidad.

Introducción

El proyecto busca desarrollar patrones de recuperación y la ley de concentrado como parámetros de eficiencia en la flotación minera, utilizando un modelo teórico semiempírico. Se realizará un análisis exhaustivo de datos históricos y actuales, desarrollando un modelo predictivo validándolo con pruebas. Esto permitirá identificar patrones y tendencias para mejorar el proceso de flotación.

El análisis detallado del diagrama de bloques del proceso de flotación, incluyendo recirculaciones, permitirá una comprensión integral de las interrelaciones entre los diferentes bancos, su impacto en la recuperación global y además implementar una nueva limpieza, cleaner Scavenger (recuperación de cola), ya que esta etapa trata los residuos de la etapa rougher para recuperar cualquier mineral valioso que no se haya recuperado inicialmente.

Mediante el estudio de patrones de cambio en los datos y la implementación de herramientas de visualización, se podrán identificar tendencias significativas que facilitarán la toma de decisiones.

Objetivo general

Evaluar la recuperación global del proceso de flotación mediante el análisis detallado del diagrama de bloques del proceso, incluyendo recirculaciones, y el estudio de patrones de cambio en los datos de los bancos involucrados.

Objetivos específicos

1. Depurar base de datos disponibles.
2. Descomponer el proceso de flotación en sus componentes básicos y entender las interrelaciones entre los diferentes bancos. Incluir recirculaciones en el análisis para tener una visión completa del proceso.
3. Calcular la Recuperación Global en proceso de flotación, en función de las recuperaciones individuales de los bancos involucrados.
4. Identificar los puntos críticos en el proceso que afectan la recuperación global.
5. Análisis de datos históricos y actuales de los bancos de flotación para identificar patrones y tendencias.
6. Implementación de gráficos y figuras para visualizar los datos y la identificación de patrones significativos.
7. Implementar un modelo teórico semiempírico en Python, mediante este programa, se pueda obtener la recuperación Global desde los bancos de recuperación presentados inicialmente.

Proceso de Flotación

El proceso de flotación en minería es una técnica que se utiliza para separar minerales valiosos de los minerales que son no deseados, que se les conoce como ganga. Este proceso se basa en las diferencias que se encuentran en las propiedades físico-químicas de las partículas de minerales. Este proceso, es crucial en la minería para la recuperación eficiente de minerales valiosos, y realizar su correcta improntacron puede mejorar significativamente la rentabilidad y la eficiencia en la industria minera

En primer lugar el mineral se tritura hasta obtener un tamaño adecuado y luego se mezcla con agua en un recipiente que es conocido como celda de flotación. Posteriormente se agregan reactivos químicos, tales como, espumantes y colectores, que interactúan selectivamente con las partículas de mineral valioso. Los colectores se adhieren a las partículas de mineral valioso, haciendo que se vuelvan hidrofóbicas, mientras que por otro lado los espumantes crean burbujas de aire que se adhieren a las partículas hidrofóbicas y las hacen flotar hacia la superficie del agua en forma de espuma. Las partículas de mineral valioso se acumulan en la espuma, formando un concentrado que se recolecta y se separa del agua. Luego, el concentrado se somete a procesos adicionales, tal como, secado y fundición, para obtener el producto final, el cual puede ser un metal como el cobre, oro, plata, entre otros. Por otro lado, lo que sucede con las partículas de ganga y otros minerales no deseados, es permanecer en el agua y se descartan como desechos o se someten a procesos adicionales para su eliminación.

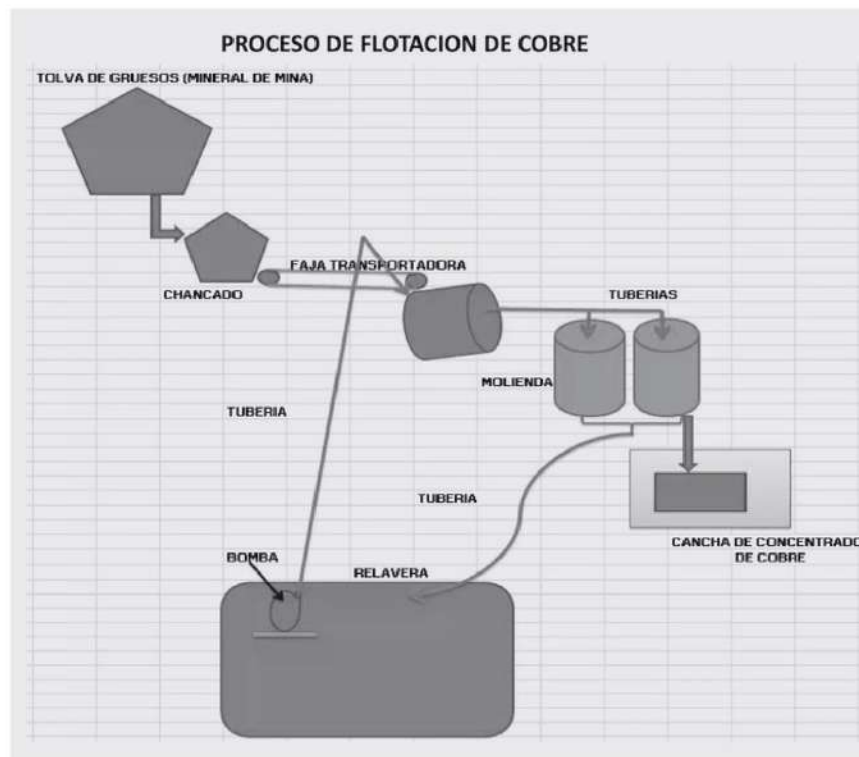


Figura 1. Quispe, S. H. (2015, 2 agosto).

Datos para análisis

Los datos mostrados en la tabla N°1, han sido obtenidos desde la fecha 15 de abril del año 2020, en intervalos de 12 horas, iniciando a las 20:00 horas de la fecha dicha. El análisis termina el día 26 de octubre a las 7:59 horas del mismo año.

Parámetros trabajados en el sistema:

- CuT: Cobre en el concentrado.
- CuSol: Cobre en solución.
- Mo: Molibdeno.
- Fe: Hierro.

	Rec. Rougher	Rec. Global	Rec. Peso Conc.	Rec. Peso Ali.	Rec. Rougher	Rec. Global	Rec. limpieza
CuT	85,7%	82,3%	/	/	85,4%	81,8%	95,7%
CuSol	6,2%	-239,7%	4,85176	11,21169	**	**	**
Mo	/	/	4,00215	5,43176	**	**	**
Fe	40,5%	20,4%	471,886	1165,326	**	**	**

Tabla 1. Promedio de proceso de recuperación de los 4 parámetros en el sistema. Análisis trabajado sobre el proceso de recuperación para rougher, global, peso concentrado, peso alimentado y limpieza.

Como se puede observar en la tabla, hay datos mostrados con una leyenda distinta a la numérica, estos mostrados con un "/" y "***". Estos corresponden a que no se analizaron y que dan error al análisis correspondiente.

La tabla muestra los promedios de los análisis de Excel, donde CuT muestra una estabilidad promedio hasta llegar a la recuperación de limpieza, por otro lado, no se puede hacer análisis al peso.

Debido a que la tabla muestra dígitos o análisis que arrojan error al calcularse, estos presentan aún así porcentaje analizable, pero no completos, por lo que se espera a que el problema o fallo se encuentre en estos parametros.

Según el análisis se busca algún modelo matemático para la mejora de este y encontrar la respuesta a porcentajes y toneladas no procesados.

Tratamiento	%Sólido STP	Flujo Ali LT	pH Rougher	Válvula cal	%Sólidos	Flujo alim rougher	#65	Colector	Espumante	Diésel
2177,780908	55,78602892	2462,494739	10,55428881	42,21326675	31,76799858	/	18,80029926	45,35619174	24,06095705	11,70783183

Tabla 2. Promedio de datos de análisis desde el día 15 abril 2020 20:00 horas - 26 octubre 2020 7:59 horas.

Ecuaciones

Recuperación Rougher

$$R = \frac{C \times c}{F \times f} \times 100$$

Donde:

C: masa del concentrado

c: ley de molibdeno en el concentrado

F: masa de la alimentación

f: ley de molibdeno en la alimentación

Ecuación 1. Fuente: *Recuperación Rougher - s. f.*

Recuperación Global

$$R_{global} = R_{rougher} \cdot R_{cleaner}$$

Ecuación 2. Fuente: *Hydrometallurgy of Copper.*

Recuperación Peso Concentrado

$$= \frac{\text{masa del concentrado}}{\text{masa de la alimentación}} \times 100$$

Ecuación 3. Fuente: *Hydrometallurgy: Fundamentals and Applications*

Recuperación Peso Alimentado

$$= \frac{\text{masa de la alimentación}}{\text{masa total procesada}} \times 100$$

Ecuación 4. Fuente: *Hydrometallurgy: Fundamentals and Applications*

Average Absolute Deviation o Desviación Absoluta Media

$$AAD = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\eta_{exp,i} - \eta_{cal,i}}{\eta_{exp,i}} \right| \right) \times 100$$

Donde:

- $\eta_{exp,i}$ son los valores experimentales.
- $\eta_{cal,i}$ son los valores calculados.
- n es el número total de datos.

Ecuación 4. Fuente: *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*

Depuración de datos

En relación con los datos manejados en Excel, se implementaron las siguientes modificaciones para mejorar la calidad de la información:

- Se eliminaron filas enteras que contenían datos erróneos, como valores negativos o aquellos que superaban el umbral de -70,000%.
- Filas completas fueron borradas en fechas donde se asumía que no se había realizado trabajo ni mantenimiento del proceso, lo cual se evidenciaba por la presencia de ceros o campos en blanco.
- Además, se descartaron filas que presentaban errores de división por cero, indicados por el símbolo #DIV/0!.

Estos cambios fueron fundamentales para asegurar que los datos analizados fueran precisos y confiables, permitiendo así una evaluación más efectiva del proceso.

Gracias al análisis se llegó a que no existe proceso de CS (cleaner scavenger), por lo que se buscará un modelo de bloques que no incluya este proceso.

El Cleaner Scavenger (CS) es una etapa crucial en el proceso de flotación, especialmente en la industria minera. Su función principal es recoger los minerales no recuperados en las etapas anteriores y reintroducirlos en el proceso para una segunda oportunidad de recuperación¹.

La ausencia del CS en el proceso de flotación puede tener varias implicaciones negativas:

- **Reducción de la eficiencia:** Sin el CS, los minerales no recuperados en las etapas anteriores podrían ser desperdiciados, lo que disminuiría la eficiencia general del proceso.
- **Impacto en la recuperación global:** La recuperación global podría verse afectada negativamente, ya que los minerales que podrían haber sido recuperados en una segunda etapa no lo serán.
- **Costos operativos:** Podría haber un aumento en los costos operativos debido a la necesidad de procesar más material para alcanzar los mismos niveles de recuperación.

Por lo tanto, es importante considerar la inclusión del paso del CS en el modelo de flotación para optimizar la recuperación de minerales y mejorar la eficiencia del proceso. Además, el CS puede ayudar a reducir los residuos y mejorar la sostenibilidad ambiental del proceso de flotación.

Siguiendo las indicaciones del cliente, se requiere un modelo de bloques para el proceso de flotación. Este modelo es una representación gráfica y simplificada que muestra las etapas principales y el flujo del material a través de un proceso de flotación en la minería.

El proceso de flotación en minería incluye varias etapas que pueden ser representadas en un modelo de bloques de la siguiente manera:

1. Trituración y Molienda: El mineral extraído se tritura y muele para reducir el tamaño de las partículas.
2. Pulpa: El mineral molido se mezcla con agua y reactivos químicos para formar una pulpa.
3. Flotación: Se inyecta aire en la pulpa, generando burbujas a las que se adhieren las partículas de mineral valioso, elevándolas a la superficie.
4. Concentración: El mineral adherido a las burbujas se recoge como concentrado.
5. Espesado: Se reduce el contenido de agua del concentrado, aumentando su concentración.
6. Filtración: Se elimina más agua del concentrado para obtener un producto sólido.
7. Secado: El concentrado se seca para su transporte y venta.

En este caso, el diagrama de bloques constaría con los datos de recuperación rougher, recuperación cleaner, recuperación global, recuperación peso alimentado y recuperación peso concentrado.

Diagrama de bloques con recirculación

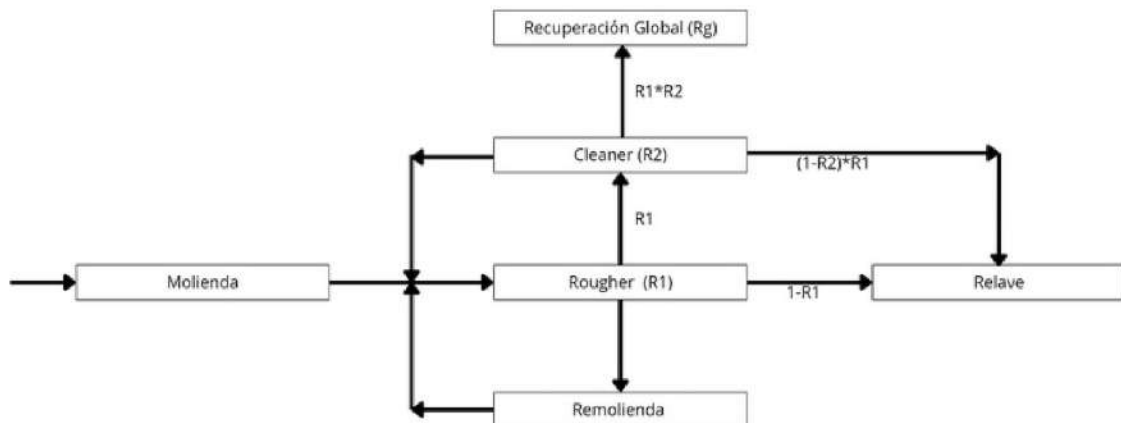


Figura 3 . Elaboración propia.

La figura 3 representa un diagrama de flujo de un proceso de beneficio de minerales, específicamente el proceso de flotación.

Eficiencia y Recuperación: La eficiencia del proceso está representada por las recuperaciones $R1$ y $R2$ en cada etapa de flotación. La recuperación global (Rg) es el producto de ambas recuperaciones, lo que significa que la eficiencia de cada etapa impacta directamente en la recuperación total del proceso.

Gestión de Residuos: Muestra claramente la separación de materiales valiosos y residuos. Es crucial gestionar los relaves adecuadamente para minimizar el impacto ambiental.

Optimización del Proceso: La inclusión de una etapa de remolienda indica un intento de maximizar la recuperación de minerales valiosos al permitir que las partículas no liberadas completamente en la primera molienda tengan otra oportunidad de ser liberadas y recuperadas.

Flexibilidad del Proceso: La estructura del diagrama sugiere que el proceso es flexible y puede adaptarse para mejorar la eficiencia de recuperación en función de la naturaleza del mineral tratado.

Este diagrama es una representación simplificada pero efectiva de un proceso típico de flotación de minerales, subrayando la importancia de cada etapa en la maximización de la recuperación de minerales valiosos.

Recuperaciones extraídas desde base de datos

Recuperación Rougher							
CuT		CuSol		Mo		Fe	
%	Millares	%	Millares	%	Millares	%	Millares
72,66%	0,7266	84,82%	0,8482	101,54%	1,0154	40,67%	0,4067
87,31%	0,8731	22,48%	0,2248	39,41%	0,3941	21,91%	0,2191
89,45%	0,8945	44,21%	0,4421	86,13%	0,8613	56,11%	0,5611
89,34%	0,8934	63,67%	0,6367	42,62%	0,4262	49,47%	0,4947
86,18%	0,8618	44,73%	0,4473	66,00%	0,6600	37,93%	0,3793
85,39%	0,8539	41,76%	0,4176	60,42%	0,6042	35,27%	0,3527
87,68%	0,8768	36,27%	0,3627	54,24%	0,5424	72,68%	0,7268
88,50%	0,8850	43,56%	0,4356	118,22%	1,1822	47,44%	0,4744
90,54%	0,9054	61,67%	0,6167	100,01%	1,0001	62,79%	0,6279
90,22%	0,9022	14,13%	0,1413	24,30%	0,2430	17,94%	0,1794
87,39%	0,8739	63,20%	0,6320	136,23%	1,3623	76,86%	0,7686
85,81%	0,8581	42,09%	0,4209	85,41%	0,8541	38,93%	0,3893
84,45%	0,8445	39,73%	0,3973	129,85%	1,2985	35,53%	0,3553
84,22%	0,8422	55,67%	0,5567	132,46%	1,3246	31,11%	0,3111
89,07%	0,8907	34,67%	0,3467	92,85%	0,9285	53,45%	0,5345
88,47%	0,8847	9,28%	0,0928	18,04%	0,1804	10,14%	0,1014

Tabla 3. Recuperación rougher extraídos desde Excel de PI System ordenados en millares

Recuperación Limpieza							
CuT		CuSol		Mo		Fe	
%	Millares	%	Millares	%	Millares	%	Millares
67,21%	0,6721	34,79%	0,3479	30,1%	0,3009	50,3%	0,5028
95,80%	0,9580	43,83%	0,4383	68,2%	0,6822	32,9%	0,3293
96,69%	0,9669	91,45%	0,9145	115,6%	1,1564	60,6%	0,6058
95,89%	0,9589	31,50%	0,3150	122,9%	1,2293	37,1%	0,3706
97,31%	0,9731	58,65%	0,5865	93,6%	0,9356	61,7%	0,6174
96,38%	0,9638	57,91%	0,5791	105,5%	1,0551	63,2%	0,6318
96,36%	0,9636	64,40%	0,6440	129,8%	1,2984	33,6%	0,3362
96,98%	0,9698	52,72%	0,5272	58,1%	0,5805	32,2%	0,3220
96,95%	0,9695	48,22%	0,4822	82,3%	0,8233	35,6%	0,3564
97,36%	0,9736	58,94%	0,5894	91,0%	0,9103	37,4%	0,3735
96,93%	0,9693	41,77%	0,4177	94,3%	0,9425	34,3%	0,3431
96,50%	0,9650	52,87%	0,5287	83,9%	0,8386	46,7%	0,4666
96,76%	0,9676	51,13%	0,5113	55,6%	0,5559	51,4%	0,5136
96,72%	0,9672	53,46%	0,5346	52,8%	0,5284	46,4%	0,4635
98,12%	0,9812	67,93%	0,6793	89,5%	0,8948	39,4%	0,3939
97,78%	0,9778	65,11%	0,6511	97,1%	0,9708	41,7%	0,4169

Tabla 4. Recuperación cleaner extraídos desde Excel de PI System ordenados en millares

Recuperación Global							
CuT		CuSol		Mo		Fe	
%	Millares	%	Millares	%	Millares	%	Millares
48,83%	0,488344	29,51%	0,295051	30,55%	0,305485	20,45%	0,204503
83,65%	0,836512	9,85%	0,098526	26,88%	0,268844	7,22%	0,072165
86,49%	0,864936	40,43%	0,404294	99,60%	0,995983	33,99%	0,339906
85,67%	0,856701	20,06%	0,200560	52,39%	0,523935	18,34%	0,183357
83,86%	0,838630	26,23%	0,262344	61,75%	0,617495	23,42%	0,234188
82,30%	0,823035	24,18%	0,241815	63,75%	0,637455	22,28%	0,222836
84,48%	0,844833	23,36%	0,233577	70,43%	0,704275	24,43%	0,244339
85,83%	0,858323	22,96%	0,229646	68,62%	0,686237	15,27%	0,152722
87,78%	0,877847	29,74%	0,297375	82,34%	0,823444	22,38%	0,223812
87,84%	0,878399	8,33%	0,083262	22,12%	0,221223	6,70%	0,067027
84,71%	0,847082	26,40%	0,263991	128,40%	1,283969	26,37%	0,263703
82,81%	0,828101	22,25%	0,222536	71,62%	0,716202	18,17%	0,181673
81,70%	0,817007	20,31%	0,203150	72,19%	0,721912	18,25%	0,182458
81,45%	0,814519	29,76%	0,297594	70,00%	0,699980	14,42%	0,144201
87,40%	0,874011	23,55%	0,235484	83,08%	0,830774	21,05%	0,210529
86,51%	0,865062	6,04%	0,060399	17,51%	0,175112	4,23%	0,042267

Tabla 5. Recuperación global extraídos desde Excel de PI System ordenados en millares

Cálculos Recuperación Global y error relativo

Recuperación Global Calculada R(Rougher* Cleaner)							
CuT		CuSol		Mo		Fe	
%	Millares	%	Millares	%	Millares	%	Millares
48,83%	0,488348	29,51%	0,29509	30,55%	0,305534	20,45%	0,204489
83,64%	0,836430	9,85%	0,09853	26,89%	0,268855	7,21%	0,072150
86,49%	0,864892	40,43%	0,40430	99,60%	0,996007	33,99%	0,339914
85,67%	0,856681	20,06%	0,20056	52,39%	0,523928	18,33%	0,183336
83,86%	0,838618	26,23%	0,26234	61,75%	0,617496	23,42%	0,234180
82,30%	0,822989	24,18%	0,24183	63,75%	0,637491	22,28%	0,222836
84,49%	0,844884	23,36%	0,23358	70,43%	0,704252	24,44%	0,244350
85,83%	0,858273	22,96%	0,22965	68,63%	0,686267	15,28%	0,152757
87,78%	0,877785	29,74%	0,29737	82,34%	0,823382	22,38%	0,223784
87,84%	0,878382	8,33%	0,08328	22,12%	0,221203	6,70%	0,067006
84,71%	0,847071	26,40%	0,26399	128,40%	1,283968	26,37%	0,263707
82,81%	0,828067	22,25%	0,22253	71,62%	0,716248	18,16%	0,181647
81,71%	0,817138	20,31%	0,20314	72,18%	0,721836	18,25%	0,182482
81,46%	0,814576	29,76%	0,29761	69,99%	0,699919	14,42%	0,144195
87,40%	0,873955	23,55%	0,23551	83,08%	0,830822	21,05%	0,210540
86,51%	0,865060	6,04%	0,06042	17,51%	0,175132	4,23%	0,042274

Tabla 6. Recuperación global calculada R(rougher * cleaner)

Error relativo entre Recuperación Global Calculada y Recuperación Global PI-System							
CuT		CuSol		Mo		Fe	
%	Millares	%	Millares	%	Millares	%	Millares
0,00085%	0,00000847	0,013%	0,00012959	0,02%	0,00015976	-0,01%	-0,00007106
-0,00978%	-0,00009783	0,004%	0,00004081	0,00%	0,00003941	-0,02%	-0,00021945
-0,00509%	-0,00005094	0,002%	0,00001518	0,00%	0,00002483	0,00%	0,00002496
-0,00236%	-0,00002359	0,000%	0,00000102	0,00%	-0,00001381	-0,01%	-0,00011541
-0,00153%	-0,00001526	-0,001%	-0,00000887	0,00%	0,00000098	0,00%	-0,00003604
-0,00561%	-0,00005610	0,007%	0,00007105	0,01%	0,00005704	0,00%	-0,00000152
0,00610%	0,00006098	0,001%	0,00000660	0,00%	-0,00003283	0,00%	0,00004667
-0,00588%	-0,00005881	0,001%	0,00000878	0,00%	0,00004349	0,02%	0,00023051
-0,00704%	-0,00007040	-0,001%	-0,00000856	-0,01%	-0,00007539	-0,01%	-0,00012740
-0,00190%	-0,00001900	0,024%	0,00024312	-0,01%	-0,00009160	-0,03%	-0,00032203
-0,00126%	-0,00001262	-0,002%	-0,00001745	0,00%	-0,00000071	0,00%	0,00001328
-0,00422%	-0,00004217	-0,003%	-0,00002745	0,01%	0,00006455	-0,01%	-0,00013966
0,01606%	0,00016062	-0,005%	-0,00005150	-0,01%	-0,00010498	0,01%	0,00013213
0,00695%	0,00006947	0,006%	0,00005936	-0,01%	-0,00008736	0,00%	-0,00004273
-0,00647%	-0,00006465	0,012%	0,00012500	0,01%	0,00005741	0,01%	0,00005198
-0,00021%	-0,00000214	0,039%	0,00038979	0,01%	0,00011738	0,02%	0,00016351

Tabla 7. Datos de error relativo entre recuperación global calculada y recuperación global PI-System

Interpretación de errores negativos expresado en porcentajes

Un error negativo en porcentaje indica que el valor calculado es inferior al valor entregado. El valor del error genera una idea de cuánto más pequeño es el valor calculado en comparación con el valor entregado.

Se demuestra mediante un ejemplo:

1. Valor Entregado (VE): 80,4%
2. Error Calculado (EC): -0,2%

Para encontrar el Valor Calculado (VC) usando el error, se puede utilizar la siguiente relación:

$$VC (\%) = VE (\%) + EC (\%)$$

Dado que el error es negativo, el valor calculado será menor que el valor entregado.

Cálculo:

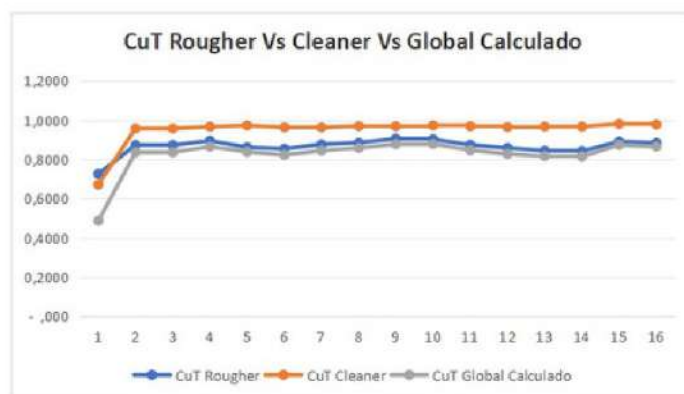
$$VC (\%) = 80,4\% + (-0,2\%)$$

$$VC (\%) = 80,4\% - 0,2\%$$

$$VC (\%) = 80,2\%$$

Un error de -0,2% indica que el valor calculado es un 0,2% menor que el valor entregado, resultando en un valor calculado de 80,2%.

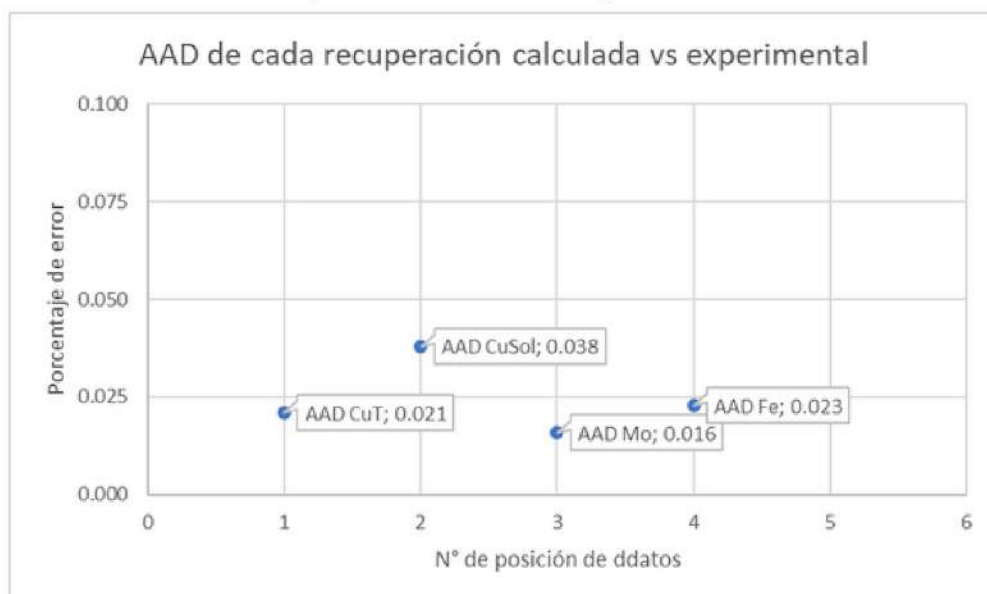
Cálculos Recuperación Global



Gráfica N1. Datos de recuperación global calculada R (rougher * cleaner)

En la gráfica 1, se observan tres conjuntos de datos principales: CuT Rougher, CuT Cleaner y CuT Global calculado. El CuT Global se obtiene multiplicando los valores de CuT Rougher y CuT Cleaner. En el eje X se representan los 16 puntos de datos considerados, mientras que en el eje Y se muestra la escala en millares. Además, se visualiza que el valor de CuT Cleaner se mantiene constante a lo largo de los datos analizados.

Gráfico de error entre Recuperación Global Calculada y Recuperación Global Experimental



Gráfica 2. Gráfico de recuperaciones calculada vs experimental

- El gráfico presenta los valores de Desviación Absoluta Media (AAD) correspondientes a cada recuperación global calculada (CuT, CuSol, Mo, Fe). Estos valores permiten evaluar la precisión de las recuperaciones calculadas en comparación con las experimentales. Por ejemplo, el AAD para CuT (0.021) sugiere que la recuperación global calculada tiene un error del 2% respecto a la recuperación experimental. Esto implica que existe una discrepancia del 2% entre los valores calculados y experimentales de la recuperación de CuT. Este análisis es fundamental para validar la exactitud y confiabilidad del modelo utilizado en el cálculo de las recuperaciones.

Modelamiento en Python

El uso de Python para el desarrollo de un script que cree y visualice un diagrama de bloques, junto con el cálculo de la recuperación global del proceso, presentando varias ventajas significativas.

- **Recopilación de Datos:** Recolectar datos de diferentes fuentes y sensores en tiempo real, permitiendo vigilar constantemente las variables del proceso de flotación.
- **Análisis de Datos:** Aplicar algoritmos matemáticos para procesar y analizar la información recolectada, identificando patrones, tendencias y relaciones que podrían no ser evidentes a simple vista.
- **Modelado de Procesos:** Crear modelos matemáticos que representen los procesos de flotación, utilizando datos históricos y en tiempo real para prever comportamientos y optimizar las operaciones.
- **Presentación de datos y resultados del análisis** en formatos gráficos y tabulares, facilitando la interpretación y la toma de decisiones basadas en información precisa y actualizada.
- **Facilidad de uso:** Python es conocido por su sintaxis clara y legible, lo que facilita la creación y mantenimiento del código, especialmente para tareas complejas como la simulación de procesos y la creación de gráficos.
- **Integración con herramientas intuitivas.**

Python es una opción poderosa y flexible para desarrollar scripts que impliquen la creación de diagramas de bloques y el cálculo de recuperación en procesos, en este caso, recuperación global, gracias a su facilidad de uso, bibliotecas especializadas y gran soporte comunitario.

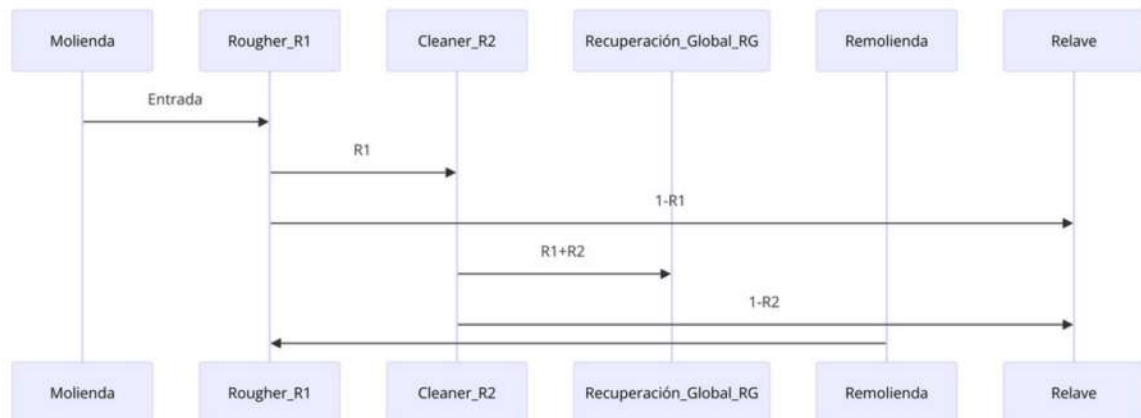


Figura 2 . Diagrama de bloques elaborado en Python. Fuente: Elaboración propia.

Explicando brevemente el código que se implementará, existen tres anotaciones; se deben cargar y convertir las tablas de datos (3 y 4) en Dataframes de panda, posteriormente calcular la recuperación Global y finalmente el programa generará un diagrama de bloques del proceso completo.

Por otro lado, se efectuará un código en el cual mediante la recuperación de limpieza y cleaner se obtendrá la recuperación global, todo esto se demostrará en un diagrama de bloques con respectivos datos.

Este enfoque proporciona una manera clara y visual de analizar la eficiencia de cada etapa del proceso y su contribución a la recuperación global, facilitando la identificación de posibles áreas de mejora.

Resultados modelo teórico semiempírico en Python

1. Cálculo recuperación Global

1.a Recuperación Global en Rougher

Recuperación global de Cu en Rougher:		Recuperación global de Mo en Rougher:		Recuperación global de Fe en Rougher:	
0	61.630212	0	86.126228	0	34.496294
1	19.627288	1	8.859368	1	4.925368
2	39.545845	2	38.078073	2	24.806231
3	56.882778	3	27.136154	3	31.497549
4	38.548314	4	29.521800	4	16.966089
5	35.658864	5	25.231392	5	14.728752
6	32.196096	6	19.916928	6	26.688096
7	38.550600	7	51.496632	7	20.664864
8	55.836018	8	61.676167	8	38.722593
9	12.748086	9	3.433590	9	2.532096
10	55.230480	10	86.097360	10	48.575520
11	36.117429	11	35.949069	11	16.385637
12	33.551985	12	51.589405	12	14.116069
13	46.885274	13	73.740482	13	17.318937
14	30.880569	14	32.191095	14	18.531115
15	8.210016	15	1.674112	15	0.940992

dtype: float64 dtype: float64 dtype: float64

Imagen 1. Resultados modelo en Python. Fuente: Elaboración propia.

1.b Recuperación Global en Limpieza

Recuperación global de Cu en Limpieza:		Recuperación global de Mo en Limpieza:		Recuperación global de Fe en Limpieza:	
0	23.382359	0	10.47179	0	17.49937
1	41.989140	1	29.89206	1	14.42007
2	88.423005	2	105.71620	2	55.41870
3	30.205350	3	38.71350	3	11.68650
4	57.072315	4	54.89640	4	36.18705
5	55.813658	5	61.09505	5	36.59912
6	62.055840	6	83.59120	6	21.63840
7	51.127856	7	30.63032	7	16.97584
8	46.749290	8	39.68506	8	17.16632
9	57.383984	9	55.58042	9	20.21642
10	40.487661	10	35.04503	10	14.36888
11	51.019550	11	29.39572	11	24.69029
12	49.473388	12	26.99664	12	23.72432
13	51.706512	13	44.63910	13	27.47844
14	66.652916	14	39.33147	14	26.76442
15	63.664558	15	63.22181	15	27.15087

dtype: float64 dtype: float64 dtype: float64

Imagen 2. Resultados modelo en Python. Fuente: Elaboración propia.

* Datos de la imagen 1 y 2 expresados en porcentaje (%).

Las imágenes 1 y 2 presentan la ejecución del código en Python junto con sus resultados correspondientes. En estas imágenes, se puede observar cómo se ejecuta el código para cada tipo de limpieza, mostrando la recuperación específica para cada una de ellas. Además, en cada caso, se calcula la recuperación global correspondiente. La ejecución del código abarca diferentes etapas de procesamiento y limpieza de datos. Cada etapa de limpieza, denominada Cleaner y Rougher, se analiza por separado, permitiendo obtener resultados específicos de recuperación para cada una. A continuación, se realiza el cálculo de la recuperación global, integrando los resultados obtenidos en las etapas anteriores. De esta forma, se proporciona una visión completa del proceso y se asegura que todas las etapas de limpieza contribuyan al cálculo final de la recuperación global.

2. Diagrama de bloques

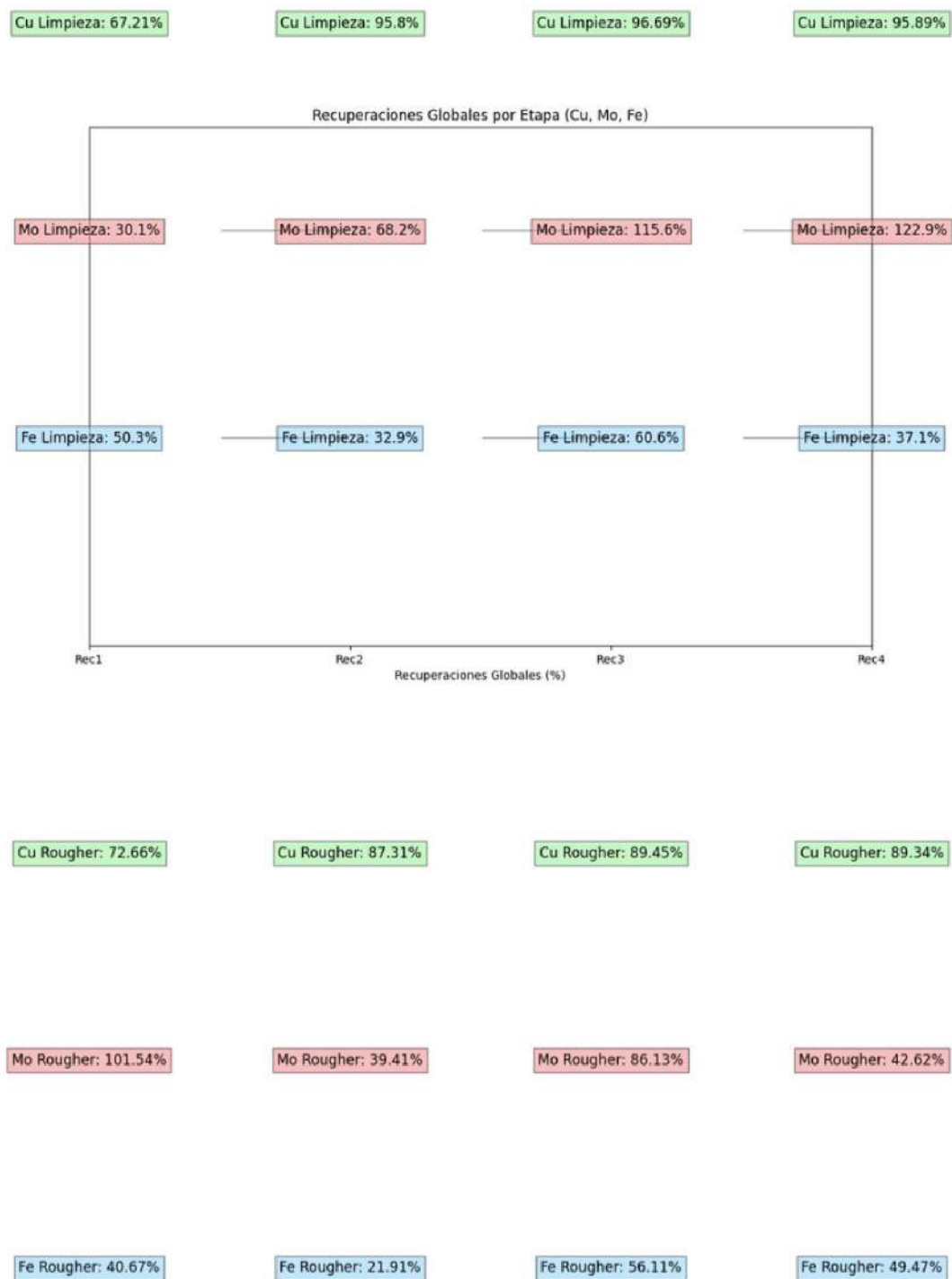


Imagen 3. Diagrama de bloques obtenido mediante Python. Fuente: Elaboración propia.

La Imagen 3 muestra un diagrama de bloques creado en Python para demostrar el proceso con 4 datos seleccionados. Este diagrama visualiza los porcentajes de recuperación global de cada mineral en diferentes etapas del proceso. Cada bloque representa una etapa y muestra las recuperaciones específicas, facilitando la comprensión y evaluación del rendimiento del proceso de recuperación de minerales.

3. Gráfica Recuperación Global

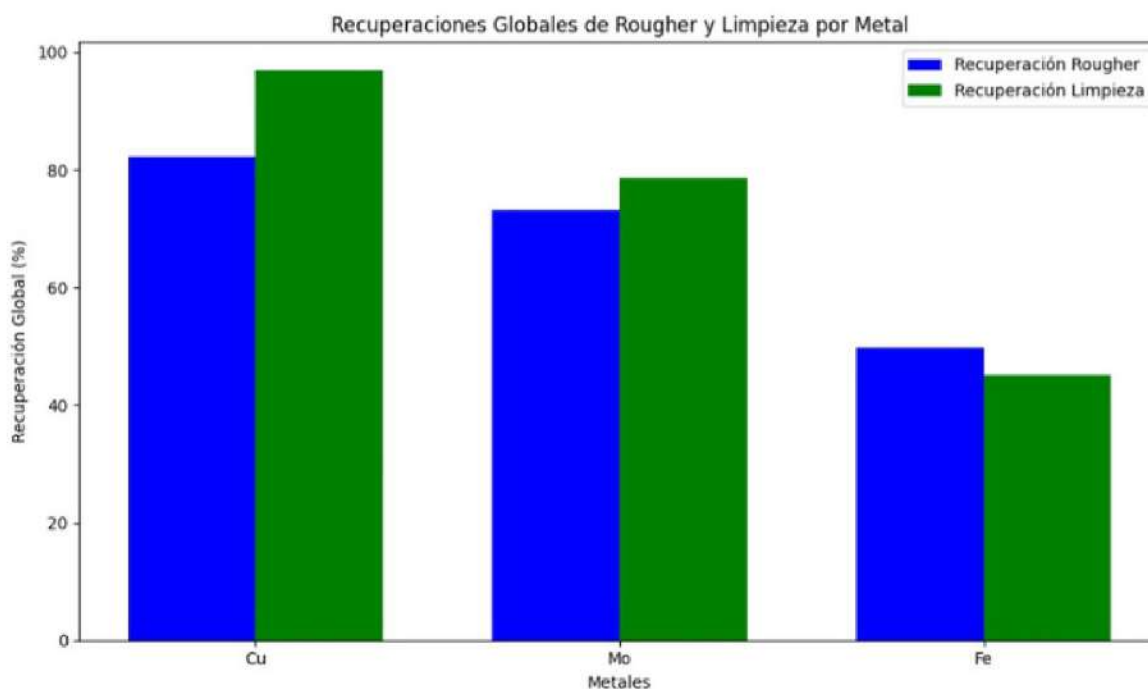


Imagen 4. Recuperación global y limpieza con respectivos minerales (Cobre Cu, Molibdeno Mo y Hierro Fe).

La imagen 4 muestra la gráfica de las recuperaciones globales. Al visualizar los datos en forma de gráfica, se facilita la identificación de patrones, tendencias y posibles áreas de mejora. El análisis mostrado en la imagen 4, no solo ilustra el método de obtención de la gráfica, sino que también destaca la importancia de utilizar herramientas visuales para entender y mejorar los procesos de recuperación de metales. Esta comprensión es crucial para implementar cambios que optimicen los resultados y aumenten la eficiencia global del proceso.

La recuperación Global Rougher es menor en cobre y molibdeno respecto a la recuperación Global Limpieza, mientras que en el hierro, la recuperación Global es mayor que la recuperación limpieza.

4. Promedio Recuperación Global en Rougher y Limpieza.

➡ Promedio de recuperación global de Cu en Limpieza: 52.325461375
Promedio de recuperación global de Mo en Limpieza: 46.806360624999996
Promedio de recuperación global de Fe en Limpieza: 24.499063125

Promedio de recuperación global de Cu en Rougher: 37.631240875
Promedio de recuperación global de Mo en Rougher: 39.5448659375
Promedio de recuperación global de Fe en Rougher: 20.743512625

Imagen 5. Promedio de recuperación global en Rougher y limpieza con respectivos minerales (Cobre Cu, Molibdeno Mo y Hierro Fe). (Fuente: Elaboración propia).

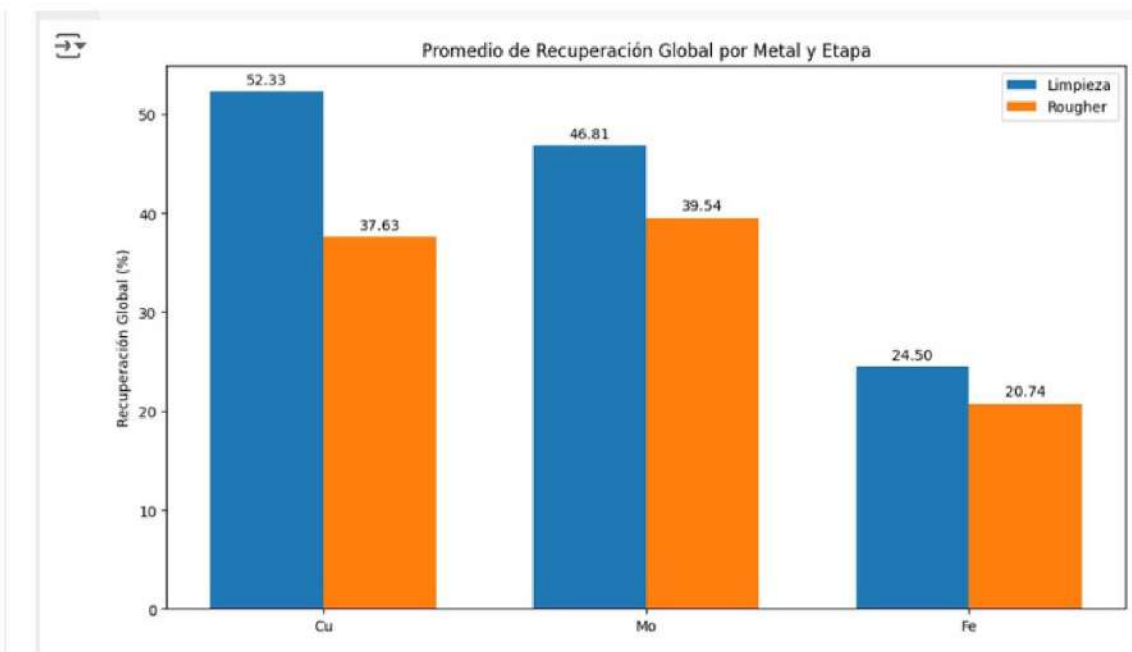


Imagen 6. Gráfica promedio Recuperación Global por metal (cobre, molibdeno y hierro) y etapa (Rougher y Limpieza). (Fuente: Elaboración propia).

La imagen 5 refleja el promedio calculado de la recuperación global obtenida de cada etapa (Rougher y Limpieza) de cada mineral (cobre, molibdeno y hierro), expresado en porcentaje.

La imagen 6, muestra la gráfica de las recuperaciones globales. Al visualizar los datos en forma de gráfica, se facilita la identificación de patrones, tendencias y posibles áreas de mejora. El análisis mostrado en la imagen 4, no solo ilustra el método de obtención de la gráfica, sino que también destaca la importancia de utilizar herramientas visuales para entender y mejorar los procesos de recuperación de metales. Esta comprensión es crucial para implementar cambios que optimicen los resultados y aumenten la eficiencia global del proceso.

La recuperación Global Rougher es menor en cobre y molibdeno respecto a la recuperación Global Limpieza, mientras que en el hierro, la recuperación Global es mayor que la recuperación limpieza.

Análisis

Durante la investigación, se realiza un análisis detallado de la base de datos en Excel proporcionado como referencia para el análisis. Cliente solicita examinar el diagrama de bloques del proceso de flotación, incluyendo las recirculaciones, y evaluación de la recuperación global en función de las recuperaciones de los bancos involucrados. Se lleva a cabo el análisis mencionado y, al identificar posibles errores humanos o instrumentales en los datos negativos y exorbitantes en la base de datos, se encontraron atascados debido a la confusión. Se procede a realizar una limpieza efectiva de la base de datos, esto, permitió avanzar con mayor eficacia en el desarrollo del modelo de bloques.

Cabe destacar, que la implementación de Python, emerge como una herramienta poderosa al ser utilizada para desarrollar un código que visualice un diagrama de bloques, incorporando además los datos necesarios para la realización de una gráfica clara. Este enfoque no solo facilita una representación detallada y comprensible del flujo y las interacciones dentro del proceso, sino que también permite realizar evaluaciones exhaustivas sobre cómo cada componente contribuye al objetivo final de recuperación.

Al emplear bibliotecas especializadas como Matplotlib o Plotly, Python posibilita la creación de representaciones claras y efectivas. Estas visualizaciones mejoran la comunicación de los resultados, y ayudan en la identificación de patrones y tendencias críticas en el proceso en cuestión.

La flexibilidad de Python permite adaptar el código rápidamente según los resultados obtenidos, y también facilita la documentación detallada de los métodos y resultados. Esta documentación no solo apoya la reproducibilidad de los análisis, sino que también promueve la transparencia y la validación de los hallazgos por parte de otros investigadores y profesionales del campo.

En síntesis, el uso de Python ayudó a desarrollar un código que integra la proyección de diagramas de bloques con el cálculo de recuperación global representando una estrategia robusta y versátil para el análisis avanzado de procesos, proporcionando herramientas efectivas para la mejora continua y la optimización de la eficiencia operativa en diversos contextos industriales y científicos.

Conclusión

El análisis detallado del diagrama de bloques del proceso de flotación, incluyendo recirculaciones, permitió una comprensión integral de las interrelaciones entre los diferentes bancos y su impacto en la recuperación global. La evaluación de las recuperaciones individuales y la identificación de puntos críticos en el proceso revelaron áreas clave para mejorar la eficiencia. Mediante el estudio de patrones de cambio en los datos y la implementación de herramientas de visualización, se lograron identificar tendencias significativas que facilitan la toma de decisiones.

Durante el desarrollo de la investigación se enfrentaron desafíos significativos al analizar y corregir errores en los datos proporcionados, especialmente aquellos relacionados con valores negativos o exorbitantes en el documento Excel de referencia. Estos obstáculos inicialmente generaron confusión, pero gracias a la colaboración con funcionarios y especialistas, se realizó una limpieza efectiva de la base de datos.

El uso de Python emergió fundamentalmente en este proceso, permitiendo no solo la visualización clara y detallada del diagrama de bloques del proceso de flotación, incluyendo las recirculaciones. La capacidad de Python para integrar datos complejos y realizar cálculos numéricos rigurosos facilitó un análisis exhaustivo y una representación visual efectiva mediante herramientas como Matplotlib y Plotly.

Además, la flexibilidad y documentación detallada proporcionada por Python fueron cruciales para ajustar y validar el modelo de bloques desarrollado, asegurando la transparencia y la reproducibilidad de los resultados obtenidos. Este enfoque no solo cumple con las expectativas del cliente al proporcionar una herramienta robusta para el análisis avanzado de procesos, sino que también sentó las bases para futuras mejoras en la eficiencia operativa y la toma de decisiones informadas.

El uso estratégico de Python facilitó la superación de desafíos técnicos durante la investigación, y además demostró ser una herramienta indispensable para avanzar de manera efectiva hacia los objetivos planteados, ofreciendo soluciones prácticas y precisas en un entorno complejo y dinámico como el de la industria ingenieril.

Bibliografía

- Lu, W., Wen, S., Liu, D., Wang, H., & Feng, Q. (2023). A novel method for improving sulfidization xanthate flotation of malachite: Copper–ammonium synergistic activation. *Applied Surface Science*, 618, 156660. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2023.156660>
- Farrokhpay, S. (2011). The significance of froth stability in mineral flotation — A review. *Advances In Colloid And Interface Science*, 166(1-2), 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2011.03.001>
- Morales-Aranibar, C., Linares-Gutiérrez, N., & Morales-Aranibar, L. (2021). Immobilization of copper sulfide flotation tailings through the use of geopolymers, Tacna – Perú. *IOP Conference Series. Materials Science And Engineering*, 1065(1), 012009. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1065/1/012009>
- Eberle, A., Besold, J., Ninin, J. M. L., Kerl, C. F., Kujala, K., & Planer-Friedrich, B. (2021). Potential of high pH and reduced sulfur for arsenic mobilization – Insights from a Finnish peatland treating mining waste water. *Science Of The Total Environment*, 758, 143689. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143689>
- Chen, W., Yin, S., Qu, S., Wang, L., & Chen, X. (2022). Enhanced copper recovery from low grade copper sulfide ores through bioleaching using residues produced by fermentation of agricultural wastes. *International Journal Of Minerals, Metallurgy And Materials/International Journal Of Minerals Metallurgy And Materials*, 29(12), 2136-2143. <https://doi.org/10.1007/s12613-021-2392-1>
- Panayotova, M. (2023). Control of Non-Ferrous Metal-Sulfide Minerals' Flotation via Pulp Potential. *Minerals*, 13(12), 1512. <https://doi.org/10.3390/min13121512>
- Ma, X., Nguyễn, N. G., Nguyen, A. V., & Miller, J. D. (2023). An investigation of mineral floatability versus mineral surface exposure and hydrophobicity by high-resolution X-ray microcomputed tomography, film flotation, contact angles, and modeling. *Minerals Engineering*, 200, 108139. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108139>
- Galas, J., & Litwin, D. (2022). Machine Learning Technique for Recognition of Flotation Froth Images in a Nonstable Flotation Process. *Minerals*, 12(8), 1052. <https://doi.org/10.3390/min12081052>
- Pazos, B. (s. f.). Proceso de flotación de cobre. Scribd. <https://es.scribd.com/document/491348501/Proceso-de-Flotacion-de-Cobre>
- Nilber, C. (s. f.-b). Manual-Flotación de minerales de cobre. Scribd. <https://es.scribd.com/document/670680864/Manual-Flotacion-de-minerales-de-cobre>
- JeffMG. (s. f.). 13. Separación bulk CU - PB. Scribd. <https://es.scribd.com/presentation/581494821/13-Separacion-Bulk-Cu-Pb>
- James. (s. f.). Flotacion de cobre. Scribd. <https://es.scribd.com/document/330946774/Flotacion-de-Cobre>
- Cj, N. (s. f.). Celdas-de-Flotacion. Scribd. <https://es.scribd.com/document/553838740/Celdas-de-Flotacion>
- An, A. J. (s. f.). 1. Celda de flotación Rougher de Cobre Rev 1. Scribd. <https://es.scribd.com/document/422557229/1-Celda-de-Flotacion-Rougher-de-Cobre-Rev-1>
- Choquecota, S. (s. f.). Flotación de minerales de cobre. Scribd. <https://es.scribd.com/document/518955786/Flotacion-de-Minerales-de-Cobre>

- Lundh, M., Jönsson, L., & Dahlquist, J. (2000). Experimental studies of the fluid dynamics in the separation zone in dissolved air flotation. *Water Research*, 34(1), 21–30. doi:10.1016/s0043-1354(99)00136-0
- VAZIFEH, Y., JORJANI, E., & BAGHERIAN, A. (2010). Optimization of reagent dosages for copper flotation using statistical technique. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 20(12), 23712378. doi:10.1016/s1003-6326(10)60657-7
- Vinnett, L., Contreras, F., & Yianatos, J. (2012). Gas dispersion pattern in mechanical flotation cells. *Minerals Engineering*, 26, 80–85. doi:10.1016/j.mineng.2011.11.003
- odrigues, R. T., & Rubio, J. (2007). DAF–dissolved air flotation: Potential applications in the mining and mineral processing industry. *International Journal of Mineral Processing*, 82(1), 1–13. doi:10.1016/j.minpro.2006.07.019
- Sinche-Gonzalez, M., & Fornasiero, D. (2021). Understanding the effect of sulphate in mining-process water on sulphide flotation. *Minerals Engineering*, 165, 106865. doi:10.1016/j.mineng.2021.106865
- Arbiter, N. (1956). Flotation. *Industrial & Engineering Chemistry*, 48(3), 527–531. doi:10.1021/ie51399a012
- Williams, C. M., De Ciencias Físicas y Matemáticas, F., De Ingeniería Mecánica, D., Alejandro, O. B., & Javier, L. P. (2012). Evaluación por modelación CFD del proceso de flotación en una celda de agitación mecánica y del efecto de la granulometría en la recuperación de mineral. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/110946>
- Aldo, C. B., De Ciencias Físicas y Matemáticas, F., De Ingeniería de Minas, D., Gianna, V. S., Tanai, M. A., & Ricardo, P. C. (2007). Desarrollo de un Sensor Virtual de Ley de Concentrado Rougher en Planta Las Tórtolas. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/102903>
- Soler, A., Rovira, M., Palau, J., & Otero, N. (2006). El papel de los aditivos de flotación en el impacto ambiental de la minería potásica en las aguas de la cuenca del río Llobregat (NE España). *Macla*, 6, 461. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/235684492_El_papel_de_los_aditivos_de_flotacion_en_el_impacto_ambiental_de_la_mineria_potasica_en_las_aguas_de_la_cuenca_del_rio_Llobregat_NE_Espana
- González, J. C. A., & Rivero, V. C. (2011). Evaluación de la movilidad de metales pesados en residuos mineros de flotación de minería metálica en la provincia de Huelva. *Boletín Geológico y Minero*. Recuperado de http://web.igme.es/Boletin/2011/122_2/9-Articulo%206.pdf
- Silva, N. Q. (2015). Estudio de puesta en marcha para molinos de bolas y planta de flotación en Minera Cerro Negro (Tesis de pregrado, Pontificie Universidad Católica de Valparaíso). Recuperado de http://opac.pucv.cl/pucv_txt/Txt-0000/UCD0007_01.pdf
- EMDELP SAC. (2000). Manual de minería. Recuperado de http://www.iestpoyon.edu.pe/web/documentos/Manual_de_Mineria.pdf
- Kracht, W. (2011). Flotación de Minerales. Recuperado de <https://www.academia.edu/download/31585412/ProgramaFlotacionMinerales-20131.pdf>
- González, M. S. (2021). Efecto del sulfato en el agua de proceso de minería sobre la flotación de sulfuros. *Compartir*. Recuperado de <https://revistamineria.com.pe/tecnico-cientifico/efecto-del-sulfato-en-el-agua-de-proceso-de-mineria-sobre-la-flotacion-de-sulfuros>

- Navarro Flores, A. F., & Cañadas, I. (2009). Vitrificación solar de lodos de flotación de la zona minera de Sierra Almagrera (Almería). *Residuos: revista*. Recuperado de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/6279/vitrificacion.pdf?sequence=1>
- Miguel, A., & Perceval Verde, M. Á. P. (2019). De la vieja a la nueva minería: la introducción de la flotación diferencial en las minas españolas y su impacto ambiental. *Revista de Historia Industrial*. Recuperado de <https://www.raco.cat/index.php/HistoriaIndustrial/article/view/372129>
- Chirio Infantes, J. L. (2018). Investigación para la Optimización del proceso de Flotación de Concentrado de Zinc en la Compañía Minera Yauliyacu SA (Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa). Recuperado de <https://repositorio.unsa.edu.pe/items/5c32362d-43b4-45de-8268-7a2e40e089e0>
- Gonzales Guevara, D. (s.f.). Implementación de una unidad de flotación rápida en la descarga del molino de bolas secundario en la Empresa Minera Silver Minsperu SAC (Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería). Recuperado de <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/3583122>
- Prado Cruz, D. D. (2018). Desarrollo de un aplicativo móvil para fortalecer la identificación, evaluación y control de riesgos en procesos de mantenimiento de celdas de flotación en industria minera (Tesis de pregrado, Universidad Tecnológica del Perú). Recuperado de https://repositorio.utp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12867/1620/Delly%20Prado_Tesis_Trabajo%20de%20Suficiencia%20Profesional_2018.pdf?sequence=1
- Zamudio, P., & Jackson, C. (2016). Análisis de las fallas de los equipos críticos de flotación, para reducir las perdidas de producción en la unidad minera de Yauliyacu. Recuperado de https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNCP_9545104e00ff5025610f4839f2ab9e31
- Rodríguez, R., García, C., & Zarroca, M. (2011). Características geológicas y geotécnicas de los lodos de flotación de la Sierra Minera de Cartagena-La Unión (SE España). *Boletín Geológico y Minero*. Recuperado de <https://dugi-doc.udg.edu/bitstream/handle/10256/8478/Caracter%C3%ADsticasGeol%C3%B3gicas.pdf?sequence=1>
- Puma Pino, J. M. (2014). Fabricación de celdas de flotación tipo Wemco para la Minera Antapaccay en la Empresa Imco Servicios SAC (Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa). Recuperado de <https://repositorio.unsa.edu.pe/items/09146c45-ebfb-4838-a268-1f5ef281df6c>
- Castro Chamorro, J. A. (2005). Optimización del proceso de flotación de concentrado de zinc en la Compañía Minera Yauliyacu SA mediante diseños experimentales (Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos). Recuperado de https://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/2638/Castro_cj.pdf?sequence=
- Ortiz, A. A., Jara, P. N., & Loli, A. F. (2002). Flotación de minerales oxidados de plomo. *Ingeniería Geológica*. Recuperado de <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/article/download/757/607>

- G., & Gopalakrishnan, K. (2014). Embedded image capturing system using raspberry pi system. International Journal of, 461-470. Recuperado de <https://picture.iczhiku.com/resource/paper/wyidrGyFuiSGfbbx.pdf>
- Arnaud, P., Chapuis-Cellier, C., & Creyssel, R. (1975). The Pi system: its study by means of thin-layer-gel electrofocusing in polyacrylamide gel. *Protides of the Biological Fluids*, 517-527. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080182339500969>
- Vicinanza, M., D'angelo, G., Di Campi, A., & De Matteis, M. A. (2008). Function and dysfunction of the PI system in membrane trafficking. *The EMBO Journal*, 169-178. Recuperado de <https://www.embopress.org/doi/abs/10.1038/emboj.2008.169>
- Zablocki, J., Palle, V., Blackburn, B., & Elzein, E. (2001). 2-Substituted pi system derivatives of adenosine that are coronary vasodilators acting via the A2A adenosine receptor. *Nucleosides, Nucleotides & Nucleic Acids*, 1345-1356. Recuperado de <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1081/NCN-100002306>
- Silveira, R. P., Trierweiler, J. O., & Farenzena, M. (2012). Systematic approaches for PI System™ data compression tuning. *IFAC Proceedings Volumes*, 137-144. Recuperado de <http://www.nt.ntnu.no/users/skoge/prost/proceedings/adchem-2012/files/0137.pdf>
- Bascur, O. A. (2023). Net metal production maximization and water recovery optimization in the digital era. ResearchGate. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/362185985_Net_metal_production_maximization_and_water_recovery_optimization_in_the_digital_era/links/63d02c5fd7e5841e0bf23245/Net-metal-production-maximization-and-water-recovery-optimization-in-the-digital-era.pdf
- Bascur, O. A., & Executive, E. B. (2011). Overview of the PI System in Basic Industries and Mining-Metals. OSIsoft. Recuperado de http://cdn.osisoft.com/corp/en/media/presentations/2011/RegionalSeminars/PDF/RS2011_Russia_OSIsoft_Bascur_Mining-Metals.pdf
- Frausto Gonzalez, J. (2020). The impact of classification efficiency on comminution performance and flotation recovery. CORE. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/287785930.pdf>
- Estay, H., Lois-Morales, P., & Montes-Atenas, G. (2023). On the Challenges of Applying Machine Learning in Mineral Processing and Extractive Metallurgy. *Minerals*, 13(6), 788. Recuperado de <https://www.mdpi.com/2075-163X/13/6/788/pdf>
- Bergh, L. G., & Yianatos, J. B. (2014). Engineers training in automation of flotation processes. *IFAC Proceedings Volumes*. Recuperado de <http://www.nt.ntnu.no/users/skoge/prost/proceedings/ifac2014/media/files/1536.pdf>
- Sole, K. C., & Cole, P. M. (Año). *Hydrometallurgy of Copper*.

Anexo

Xantato

El xantato es un compuesto químico ampliamente utilizado en la minería para el proceso de flotación de minerales. Químicamente, los xantatos son sales o ésteres derivados de ácidos xánticos, con una fórmula general de $(ROCS_2M)$, donde (R) representa un grupo orgánico (como un alquilo o un arilo) y (M) es un metal, típicamente sodio o potasio. Aunque no es principalmente radioactivo, puede descomponerse bajo ciertas condiciones. Una de las preocupaciones principales con respecto al xantato es su toxicidad, lo que lo hace potencialmente peligroso para el medio ambiente. Por ello, su manipulación debe realizarse con las máximas precauciones posibles. Las aplicaciones principales del xantato incluyen la flotación de minerales y la industria química.

En el contexto de la flotación en la industria minera, el xantato es un reactivo esencial para separar minerales valiosos de la ganga, especialmente en el caso de minerales sulfurosos como cobre, plomo y zinc. Su capacidad para hacer que estos minerales sean hidrofóbicos facilita su separación del material de desecho. La eficacia del xantato y su manejo adecuado son cruciales para el éxito y la sostenibilidad del proceso de flotación.

El proceso de flotación con xantato implica las siguientes etapas:

1. Preparación del Mineral: Se prepara el mineral para el proceso.

1. Adición de Reactivos: Se añade el xantato como colector, junto con espumante y modificadores.

1. Agitación y Aireación: Se agita la mezcla y se introduce aire para formar espuma.

1. Recolección de la Espuma: Se recoge la espuma que contiene los minerales hidrofóbicos.

El impacto ambiental del xantato debe ser gestionado cuidadosamente debido a su potencial para afectar negativamente al medio ambiente. Se implementan medidas como tratamientos de aguas residuales y controles estrictos durante el manejo y almacenamiento para minimizar su liberación ambiental.