

## AVANCES EN FLOTACIÓN COLUMNAR

Ing. Ángel Azañero Ortiz\*, Ing. Pablo Antonio Núñez Jara\*, Ing. Elard León Delgado\*  
Ing. Marco Morales Valencia\*\*, July Jara Izacupe\*\*\*, Jorge Luis Rendón López\*\*\*

### RESUMEN

La flotación en columna es particularmente atractiva para aplicaciones que implican múltiples etapas de limpieza en celdas convencionales y para minerales complejos que presentan problemas de selectividad, elevando sustancialmente el grado del concentrado (2-4%) y de mayor recuperación (2-3 %), con una sola etapa de limpieza, adaptándose muy bien este equipo al control por computadora.

Su aceptación en la industria minera está incrementándose debido a múltiples ventajas que incluyen menor costo de instalación y operación, menor ocupación de espacio, disminución sustancial del consumo de energía, principalmente porque no tiene sistema de agitación mecánica, y menor consumo de reactivos.

**Palabras Clave:** Flotación en columna.

### ABSTRACT

The flotation in column cell is particularly attractive for applications that involve many stages of cleaning in conventional cells and for complex minerals that show selectivity problems, raising substantially the degree of the concentrate 2- 4 % and major recovery: 2-3 % with one stage of cleaning alone, adapting very well to computer control.

Its acceptance in the mining industry is increasing due to many advantages that involve a lower cost of installation and operation, needing of less space, and important decrease of energy consumption mainly because it doesn't have a mechanical agitation system and a lower reagent consumption.

**Key words:** Flotation in column.

### I. ANTECEDENTES

Los canadienses Pierre Boutin, Remy Tremblay y Don Wheeler introdujeron el concepto de celda-columna los primeros años de la década del 60 con el objeto de procesar minerales finos y aplicarlos en las etapas de limpieza de los circuitos de flotación; con cierta cautela, varias compañías mineras productoras de cobre y molibdeno lo adoptaron para la etapa de separación y limpieza con resultados muy alentadores, y posteriormente se probó en las etapas de relimpieza y rougher, en

algunos casos con éxito, como por ejemplo, con plomo, zinc, oro y carbón.

Algunas compañías mineras en el Perú lo están implementando; no obstante, otros prefieren las celdas tradicionales o de gran volumen. Por esta razón, este trabajo de investigación está orientado a recopilar y evaluar los avances técnico-científicos y los resultados que se han logrado en mejorar el grado del concentrado e incrementar la recuperación, y luego difundirlo a todos los sectores interesados en actualizar los conocimientos

\* Profesores del Departamento de Ingeniería Metalúrgica. UNMSM.

\*\* Colaborador externo

\*\*\* Alumnos EAP de Ingeniería Metalúrgica. UNMSM.

sobre celda-columna, flotación columnar y su aplicación en todas las etapas del proceso y con la mayoría de minerales principalmente complejos o de difícil tratamiento metalúrgico, que es el caso de la mayoría de minerales en el Perú.

## II. METODOLOGÍA DEL TRABAJO

El estudio de investigación se ha desarrollado primeramente recopilando información actualizada sobre celda-columna y flotación columnar, conocimiento y método de operación del equipo, variables importantes que gobiernan el sistema - como alimentación, inyección de aire, agua de lavado, control de flujos, dimensionamiento y diagramas de flujo-, aplicaciones industriales, resultados que se han obtenido con diferentes tipos de minerales, como por ejemplo: oro, cobre, plomo y zinc. De todo lo estudiado anteriormente, se arribó a algunas interesantes conclusiones, como implementar celdas-columna en cualquier punto del circuito y la aplicación a minerales complejos de difícil selectividad, donde será factible mejorar el grado del concentrado e incrementar las recuperaciones con menor costo de tratamiento, debido a que la celda-columna no tiene sistema de agitación mecánica, lo que implica menor consumo de energía y ocupar menor espacio dentro de la planta concentradora.

### 2.1. Celda-columna

Los mismos principios de fisicoquímica de superficie que se aplica a flotación en celdas convencionales son válidos para la flotación en celda-columna, siendo la cinética de flotación mucho más rápida en esta última; de esa manera las partículas hidrofóbicas son adheridas a las burbujas, las cuales ascienden y son removidas como concentrado. A diferencia de las celdas convencionales, no usan agitadores mecánicos, la pulpa entra a unas 2/3 partes de la zona inferior de la celda y encuentra una corriente de aire ascendente, el concentrado rebosa por la parte superior, y simultáneamente un *spray* de agua colocado en la parte superior lava las espumas removiendo la ganga o estéril, que se descarga por la parte inferior.

El aire a presión es introducido mediante generadores internos o externos de burbujas y son los inyectores de aire los que reciben mayor atención en toda instalación antigua o nueva; se puede afirmar que los generadores de burbujas son el "corazón" de la celda-columna.

Aquí algunos conceptos básicos importantes:

1. Holdup.- Se define como el % de volumen en la columna usada por el aire en cualquier momento, el límite del holdup es 16%. Para fines prácticos se puede usar la siguiente fórmula:

$$\text{Holdup} = (H \text{ espuma} / H \text{ columna}) \times 100$$

2. Impending holdup.- Deficiencia para trasladar el concentrado al labio del overflow.
3. Bías.- Es la relación que hay entre el flujo del relave y el flujo de alimentación; este valor es igual o mayor que la unidad por adición de agua de lavado.
4. Spargers.- Son generadores de burbujas en forma tubular con pequeños agujeros a través de los cuales se inyecta aire.
5. Coalescencia.- Periodo en el que no puede extenderse el holdup en una columna; en este punto las burbujas colapsan y se crea una caída en la recuperación.

Variables más importantes en su operación son:

1. Flujo de alimentación
2. Flujo de aire
3. Flujo de agua de lavado
4. Nivel de pulpa y espuma
5. % de sólidos
6. Dosificación de reactivos

#### 2.1.1. Zonas de la celda-columna

Se distinguen dos zonas básicas en la celda (figura N.º 1): zona de recuperación o colección y zona de limpieza; sin embargo, cuando se trata de realizar trabajos de investigación (figura N.º 2) se debe estudiar la celda de acuerdo con lo que a continuación se indica:

1. Zona de limpieza: fase espuma, región que se extiende hacia arriba desde la interfaz pulpa-espuma hasta el rebalse de la columna.
2. Zona de limpieza: interfaz pulpa-espuma, región de longitud arbitraria en la interfase pulpa-espuma; a esta región se le asigna el espacio entre 0.15 m sobre la interfaz 0.15 m por debajo de la interfaz.
3. Zona de limpieza: fase pulpa; región que se extiende hacia abajo desde la interfaz pulpa-espuma hasta la tobera de inyección del material de alimentación.

- Zona de colección, región que se extiende hacia abajo desde la tobera de inyección o alimentación hasta los difusores.

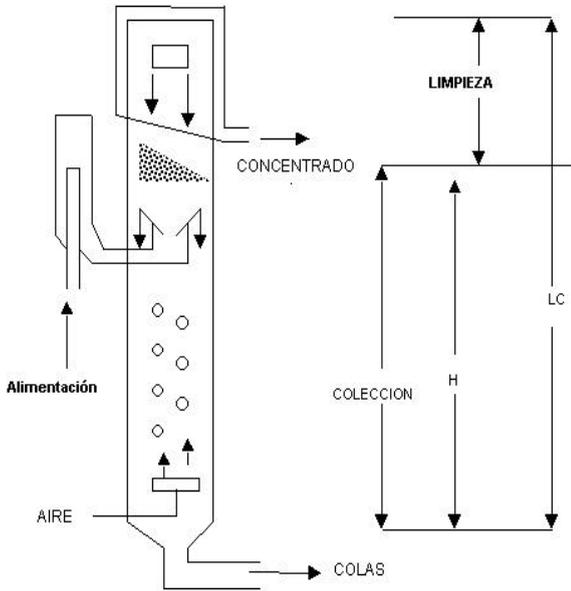


Figura N.º 1. Celda-columna (22)

### 2.1.2. Forma de la celda-columna

Se caracteriza por su forma rectangular, cuadrada o redonda con poco diámetro y una gran altura. Prevalece la forma redonda; las formas cuadradas y rectangulares requieren fierro extra, lo que representa un gasto adicional.

### 2.1.3. Aireación de la celda

El sistema de inyección de aire es la parte fundamental de la celda y se realiza mediante inyectoros internos o externos que buscan mejorar la producción del enjambre de burbujas y el tamaño de las mismas; así, por ejemplo, se han usado inyectoros cerámicos, tubos perforados, cubiertos con lonas de filtro y últimamente el generador de burbujas desarrollado por el Bureau de Minas de Estados Unidos. El sistema consiste en la disolución de aire en agua alimentados convenientemente a una cámara pequeña que contiene gravas, de preferencia de canto rodado, a presiones que fluctúan entre 60 a 70 PSI. También es importante el burbujeador microcel de Process Engineering Resources, Inc., que es un mezclador estático para disponerse fuera de la columna formando microburbujas que van desde 1000 a 600 micras. Finalmente, podemos mencionar los *slam jet sparger* de Canadian Process Technologies de regulación automática de gas, que trabajan fuera de la columna y son diseñadas para fácil instalación y mantenimiento en línea.

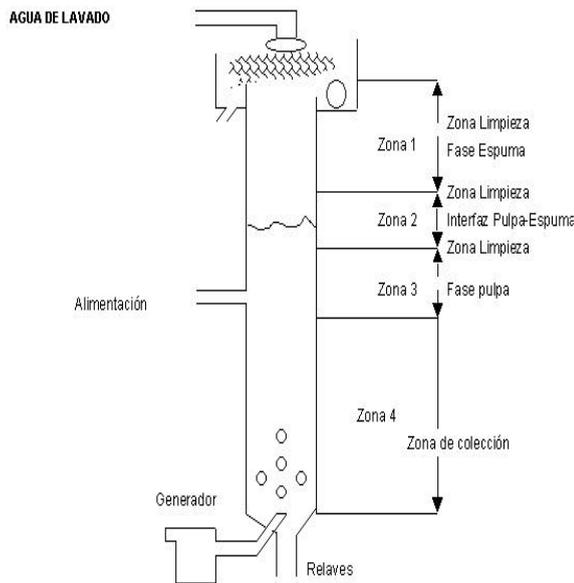


Figura N.º 2. Zonas de la celda-columna (8)

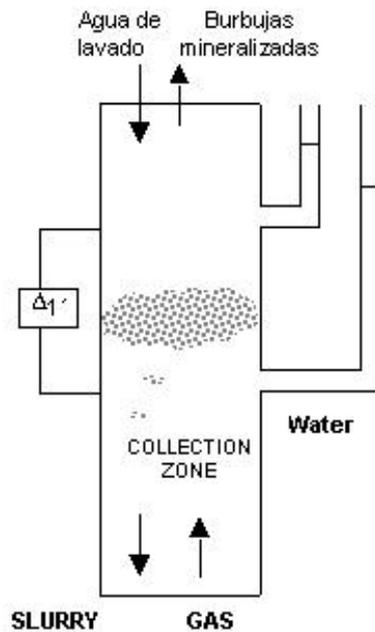


Figura N.º 3. Medida de la presión del gas y dirección de flujo en celda-columna (22)

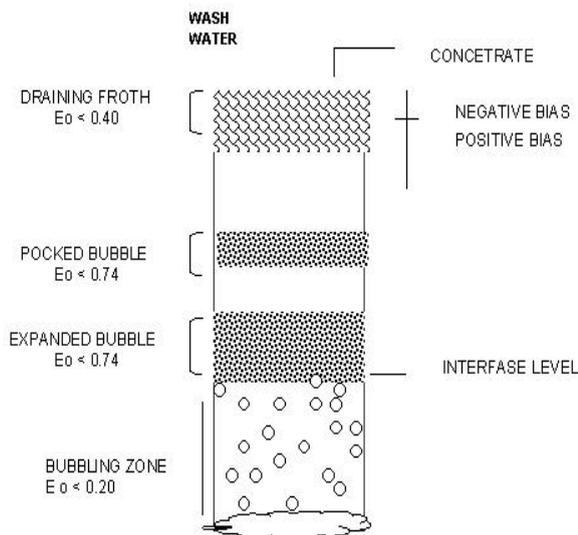
El control de aire en la celda se hace midiendo el tiempo de éste en el interior de la misma, lo que en inglés se llama *holdup*, que se define como la fracción de aire presente en la pulpa de cualquier celda de flotación expresada en porcentaje y se determina fácilmente implementando dos visores: uno en la parte inferior y otro en la parte superior de la columna (figura N.º 3), deduciendo que la diferencia de niveles a través de dichos visores debe ser proporcional al aire contenido dentro de la celda.

**2.1.4. Agua de lavado**

En la figura N.º 4, podemos apreciar el perfil de la espuma en la celda-columna, zona muy importante del proceso de flotación; la forma y calidad de espuma serán factores importantes en la eficiencia del proceso.

En la celda-columna el agua de lavado tiene funciones muy importantes:

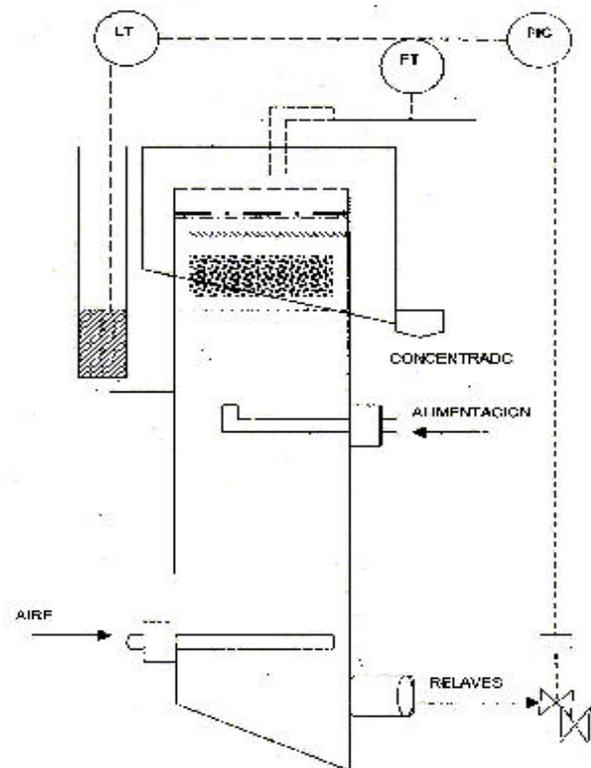
1. Formar el bias.
2. Mantener el nivel de pulpa y espuma
3. Limpiar el concentrado.
4. Lubricante de las partículas minerales.



**Figura N.º 4.** Perfil de la zona de la espuma y anatos 1985 (6)

**2.1.5. Instrumentación y control**

La celda-columna es muy versátil; su control se puede hacer en forma manual, mediante instrumentación básica (figura N.º 5) o automatizada y conectada a un computador desde donde se puede efectuar el control del proceso.



**Figura N.º 5.** Celda-columna con instrumentación básica (23)

**2.1.6. Instalación**

La instalación de la celda-columna se puede realizar para trabajar en serie (figura N.º 6) o en paralelo (figura N.º 7); en el primer caso se hace con el objeto de realizar todo el proceso en celdas-columna y la instalación en paralelo generalmente trabajará con un circuito adicional de celdas convencionales donde se flotará un scavenger para lograr resultados aceptables en grado y recuperación.

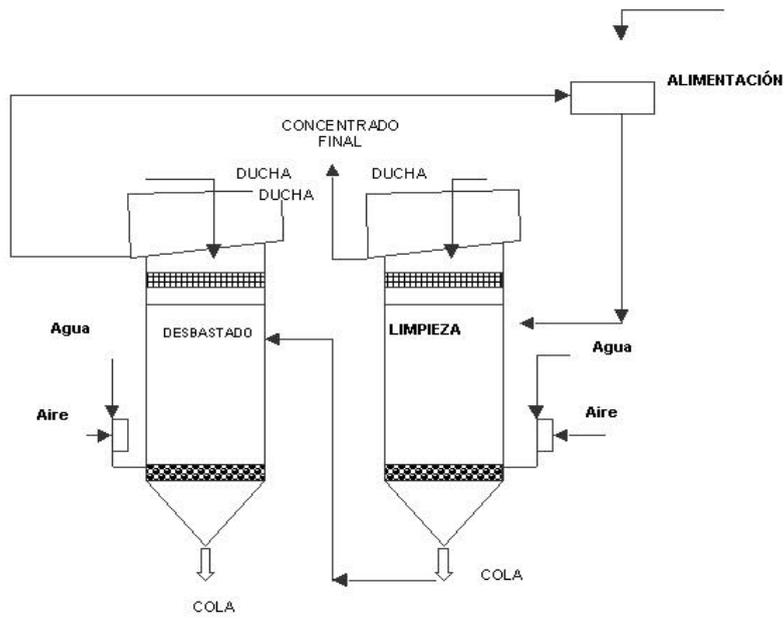


Figura N.º 6. Instalación en serie (18)

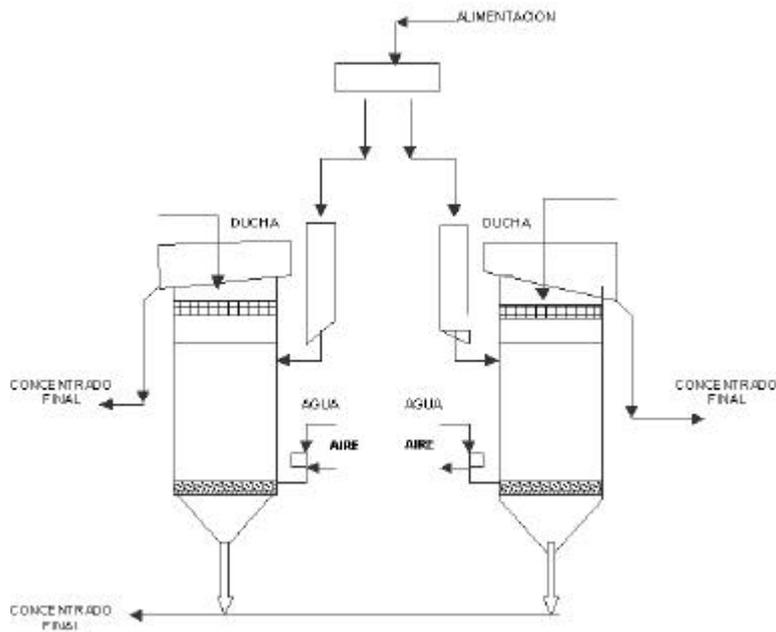


Figura N.º 7 Instalación en paralelo (18)

**2.1.7. Nuevos modelos de celda-columna**

Con el objeto de mejorar la performance metalúrgica y de operación de la celda-columna, se han desarrollado otros modelos, como por ejemplo la celda-columna de 3 productos: C3P (figura N.º 8), que considera un drenado de partículas mixtas para su posterior remolienda y retorno al

circuito de flotación. Otro ejemplo es la celda Packed Flotation Colum (figura N.º 9), que posee en su interior una cama de empaques reticulados, pudiendo ser éstos de plástico o metal corrugados para producir microburbujas, los que van colocados en módulos orientados en 90 grados respecto al eje vertical de la columna.

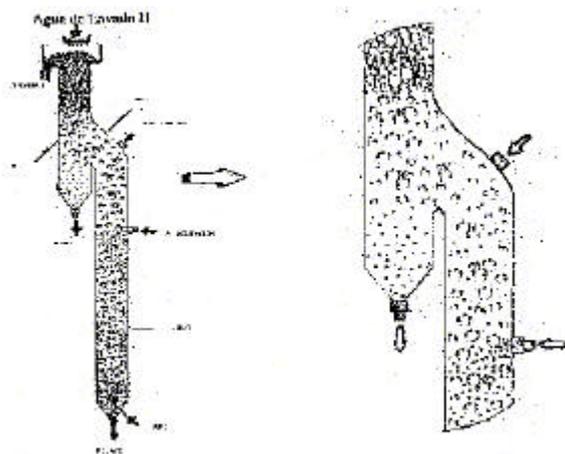


Figura N.º 8. Celda-columna de 3 productos:  
c3p (19)

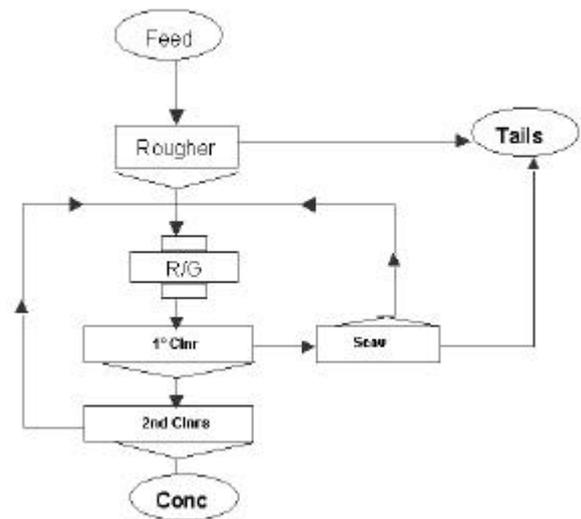


Figura N.º 10. Circuito convencional

## PACKED FLOTATION COLUMN

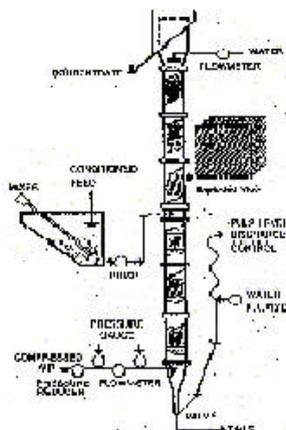


Figura N.º 9. Celda de flotación (15)

### 2.1.8. Diagrama de flujo

La ubicación de la celda-columna dentro del circuito de flotación convencional (figura N.º 10) puede ser en forma parcial dentro del circuito (figura N.º 11) o reemplazar todas las celdas convencionales (figura N.º 12) por celdas-columna.

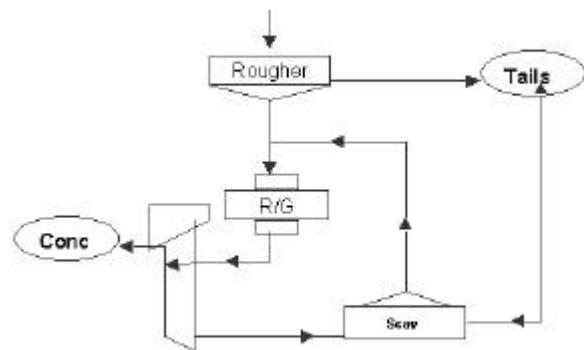


Figura N.º 11. Circuito convencional con celda-columna

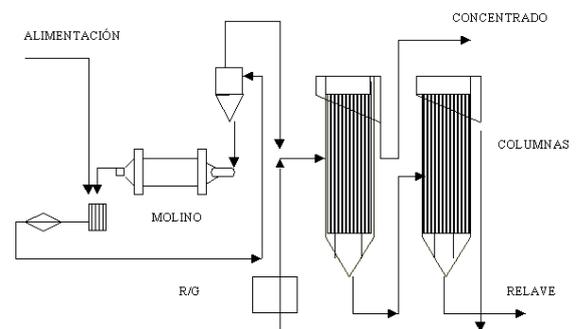


Figura N.º 12. Celdas-columna en todo el circuito de flotación

III. RESULTADOS

**Cuadro N.º 1**  
**Mineral de oro**

Mineral	COLUMNA PACKED			CELDA CONVENCIONAL			Diferencia
	Etapas	G/T	Recup. %	Etapas	G/t	Recup. %	Recup. %
ORO	1	4.3	95.3	3	4.3	85.0	10.3%

**Cuadro N.º 2**  
**Mineral de cobre**

Resultados	Celda Columna	Celda Convencional	Diferencia
% Recup.	86.55	85.63	0.92
% Cu en conc.	29.14	26.29	2.85
% Insolubles en conc.	7.00	7.68	-0.68

**Cuadro N.º 3**  
**Mineral de Pb-Zn: Celda convencional-circuito limpieza zinc**

PRODUC.	PESO %	LEYES %			RECUPERACIÓN %		
		Pb	Zn	Fe	Pb	Zn	Fe
ALIMENTO	100.00	1.17	45.47	6.95	100.00	100.00	100.00
CONCENTR.	16.20	1.20	54.60	5.90	16.70	19.50	13.80
RELAVE	83.80	1.16	43.70	7.15	83.30	80.50	86.20

**Cuadro N.º 4**  
**Mineral de Pb-Zn: Celda columna-circuito limpieza de zinc**

PRODUC.	PESO %	LEYES %			RECUPERACION %		
		Pb	Zn	Fe	Pb	Zn	Fe
ALIMENTO	100.00	1.24	45.50	6.90	100.00	100.00	100.00
CONCENTR.	18.06	1.00	56.00	5.02	14.56	22.22	13.14
RELAVE	81.94	1.26	42.50	7.70	85.44	77.78	86.86

**Cuadro N.º 5**  
**Mineral Pb-Zn: Celda convencional-circuito limpieza Pb**

PRODUC.	PESO %	LEYES %			RECUPERACION %		
		Pb	Zn	Fe	Pb	Zn	Fe
ALIMENTO	100.00	26.76	19.28	9.07	100.00	100.00	100.00
CONCENTR.	9.48	60.40	10.00	7.00	21.40	4.92	7.32
RELAVE	90.52	17.60	20.25	9.29	78.60	95.08	92.68

Cuadro N.<sup>o</sup> 6

Mineral: Pb-Zn: Celda columna-circuito limpieza de plomo

PRODUC.	PESO %	LEYES %			RECUPERACION %		
		Pb	Zn	Fe	Pb	Zn	Fe
ALIMENTO	100.00	26.76	19.28	9.07	100.00	100.00	100.00
CONCENTR.	10.80	63.50	8.00	4.10	25.63	4.48	4.88
RELAVE	89.20	14.10	20.65	9.67	74.37	95.52	95.12

Cuadro N.<sup>o</sup> 7

Resumen de resultados para el mineral de plomo-zinc

PRODUCTO	CELDA CONVENCIONAL			CELDA COLUMNA			DIFERENCIA		
	Pb	Zn	Fe	Pb	Zn	Fe	Pb	Zn	Fe
Conc. Pb. (Ley)	60.40	10.00	7.00	63.50	8.00	4.10	+ 3.10	- 2.00	- 2.90
Recuperaci3n	21.40	4.92	7.32	25.63	4.48	4.88	+ 4.23	- 0.44	- 2.44
Conc. Zn (Ley)	1.20	54.60	5.90	1.00	56.00	5.02	- 0.20	+ 1.40	- 0.88
Recuperaci3n	16.70	19.50	13.80	14.56	22.20	13.14	- 2.14	+ 2.70	- 0.66

#### IV. CONCLUSIONES

- En todos los trabajos sobre investigaci3n columnar se puede apreciar que la celda-columna tiene buena aceptaci3n en la industria minera, principalmente en las etapas de limpieza y con materiales finos.
- Se est3n haciendo grandes esfuerzos para implementarlo en las etapas Rougher y con minerales relativamente gruesos y ampliar su aplicaci3n a una mayor variedad de minerales, especialmente en aquellos llamados complejos o de difícil selectividad, donde puede dar buenos resultados.
- Una vez logrado el perfeccionamiento del difusor de aire externo para la generaci3n de burbujas con di3metros promedio de 4,000 a 400 mm, de buena calidad, con un mínimo de espumante, mayores inventarios de aire en su interior, control del tamaño de burbujas y permitiendo el mantenimiento en línea sin interrumpir la operaci3n normal de la celda, se debe investigar su aplicaci3n a diversos minerales y ubicaciones en cualquier etapa o todo el circuito de flotaci3n.
- Principales ventajas de la implementaci3n de la celda-columna:
  - ? Menor costo de instalaci3n, operaci3n y mantenimiento.

- ? F3cil automatizaci3n y control por computadora.
- ? Consumo de energía y reactivos de flotaci3n menores que las celdas de agitaci3n mec3nica.
- ? Trabaja con b as positivos y menor tiempo de retenci3n.
- ? Mejores resultados en grado (2 a 4%) y mayor recuperaci3n: 2 a 3 % adicional con respecto a las celdas convencionales, los cuadros 1, 2 y 7 nos ilustran mejor, para el caso de minerales de oro, cobre, plomo y zinc respectivamente.

#### V. BIBLIOGRAFÍA

1. Alvarez Moisan, Jaime y Bocaz Bocas, Jorge. Recuperaci3n de Partículas Finas-Flotaci3n en Columna. Universidad de Concepci3n Chile, 1987, pp. 2.1-2.17. (OJO con los puntos).
2. Barrios, Godofredo. Avances Tecnol3gicos en Celdas de Flotaci3n. Mundo Minero, Edici3n 2002, abril 2001. OJO con las fechas.
3. Canadian Process Technologies "Sparging Sistem", p. 1, 05 julio de 2001.
4. C3rdenas, Dima T.; D. Begazo; T. M3rquez y M. Torres. Celdas Convencionales vs. Celdas Columna. Escuela de Postgrado de Ing. Metalúrgica, UNSA, ILO, junio de 2000.

5. Compañía Minera Milpo S.A. Flotación Columnar a Nivel Piloto en la Planta Concentradora Milpo, 1988, pp. 1-6.
6. Cía. Minera San Ignacio de Morococha S.A. Manual de Operación de Celdas Columnas. Agosto de 1990, pp. 1- 53.
7. Di Yorio, C.; Sánchez, C. y Martiz, M. Análisis Estadístico Aplicado a la Flotación en Columna de Grafito Proveniente de Ozumita Edo Cojedes". Dpto. Metalurgia, Universidad Central de Venezuela, noviembre de 1997.
8. Foot Jr., Donald. Estudios de Flotación Columnar, Bureau of Mines. Centro de Investigación de Lake City, pp. 137-148. EE.UU., 1986.
9. J.T. Furey y G. Dávila Poblete. "Integración de Celda Columna en Plantas Existentes". Cesl Engineering Ltd., West 75 th Ave. Vancouver, Canadá, pp. 1-9, 1995.
10. H.E. Wyslouzil y G. Dávila Poblete. "Aplicaciones Industriales de la Celda Columna como Rougher". Cesl Engineering Ltd., 1636, West 75 th. Ave. Vancouver, Canadá, pp. 1-7, 1995.
11. Revista Minería Panamericana "Technology Packed Flotation Column".G.L. Notario-Canadá, pp. 55-59, Set. 1993.
12. Rivadeneira G. Adalbert. "Automatización de la Flotación en la Concentradora de Toquepala". S.P.C.C. Tacna, Perú, pp. M1 - M10, 1991.
13. Rivadeneira y Wallqui H. "Flotación Columnar en la Concentradora Toquepala". S.P.C.C. Tacna, Perú, 1992.
14. Rubio, Jorge. "Nuevas Técnicas de Tratamiento de Partículas Ultrafinas y Efluentes Líquidos Minero-Metalúrgico". Dpto. Ing. de Minas, pp. 87-95, Universidad de Chile, curso del 23 al 27 de octubre de 2001.
15. Sierra García, Francisco "Evaluación Tecnológica del Proceso de Flotación: Celda Columna", Revista Rocas y Minerales, p. 50, junio de 1987.
16. Socolich Guzmán, Eduardo y Llerena Rodríguez R.. "Determinación del Hold-up en Celdas de Flotación Columnar. Caso Mina Cuajone". XIX Convención de Minería de Tacna, Revista Minería, pp. 18-20, Nov-Dic 1988.
17. Universidad Nacional de Ingeniería. "Tecnología de la Flotación de Minerales-Flotación Columnar". Seminario Taller del 30 de setiembre al 03 de octubre de 1997, MEM, Lima, Perú.
18. Yianatos J.B. Juan y Eng. Manager Donal J. Murdoch P. "Nuevos Avances en la Tecnología de Columnas de Flotación". Dpto. de Procesos Químicos, Universidad Técnica Federico Sta. María, Valparaiso, Chile. Revista Minería Chilena N.º 125, Nov. 1992.
19. Yianatos, J.B. "Espumas de Flotación en Columnas", Tesis Ph. D, University of Mc Gill, Montreal, Quebec, Canadá, 1987.
20. Yianatos, J.B., L. Berch, C. Sepúlveda y R. Núñez. "Measurement of axial pressure profiles in large-size industrial flotation columns". Minerals engineering, Inglaterra, Vol. 8, N.º 1/2 en Prensa, 1994.