



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

SEPARACIÓN DE SULFUROS DE COBRE EN PULPAS DE ALTA  
CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS UTILIZANDO CAMPOS MAGNÉTICOS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

AXEL HERNÁN MUSSONS VÁSQUEZ

PROFESOR GUÍA:  
GONZALO MONTES ATENAS

PROFESOR CO-GUÍA:  
ALDO CASALI BACELLI

MIEMBRO DE LA COMISIÓN  
CÉSAR ARREDONDO PEÑA

SANTIAGO DE CHILE

2020

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE: Ingeniero Civil de Minas  
POR: Axel Hernán Mussons Vásquez  
FECHA: 06/06/2020  
PROFESOR GUÍA: Gonzalo Montes Atenas

## SEPARACIÓN DE SULFUROS DE COBRE EN PULPAS DE ALTA CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS UTILIZANDO CAMPOS MAGNÉTICOS

Con el objetivo de utilizar menos agua en flotación, se hizo pruebas de flotación a escala piloto, usando celdas no convencionales y aplicando campo magnético de baja intensidad generado por un solenoide y campo magnético de alta intensidad generado por imanes permanentes, para una pulpa con un 52,3% de sólidos.

Se hizo pruebas de flotación en laboratorio con el mineral calcopirítico a usar en el pilotaje. En el pilotaje se hizo circular pulpa por la celda cilíndrica, celda cónica orientada de d a 2d y celda cónica orientada de 2d a d. Se varió la intensidad del campo magnético y el ingreso de aire a la celda. Se midió y tomó muestras del flujo de alimentación, flujo axial y flujo tangencial. Los valores se reconciliaron a través de dos métodos, arrojando distintos resultados.

Con el primer método, con la celda cónica orientada de 2d a d se obtiene mayores recuperaciones metalúrgicas, en promedio, de 79,79%. Con la celda cilíndrica se obtiene mayores recuperaciones másicas, en promedio, de 79,49%. Con la celda cónica orientada de 2d a d se obtiene los mayores factores de enriquecimiento, en promedio, de 1,013. Estos resultados distan mucho de los obtenidos en flotación convencional e indican que existe un corte del flujo de alimentación y una mínima concentración de partículas en el flujo axial, lo cual se debe a que son celdas nuevas, de manera que su operación aún no está optimizada.

Con el segundo método, las mejores leyes de concentrado se obtienen en la celda cónica, especialmente cuando ésta se orienta de d a 2d, con una ley promedio de 5,69%. Cuando se aplica el campo magnético de baja intensidad la ley del concentrado aumenta en promedio 0,95% y la recuperación metalúrgica disminuye en promedio 0,15%. Cuando se aplica el campo magnético de alta intensidad esta ley aumenta en promedio 2,15% y la recuperación metalúrgica disminuye en promedio 4,45%. Estos resultados están dentro de los esperados para la primera celda de un banco rougher. Sin embargo, es importante considerar los errores en los resultados obtenidos debido al proceso de minimización.

Se concluye que, independientemente del método de reconciliación, muchos otros factores inciden en la operación y deben ser incorporados para optimizar el funcionamiento de las celdas, reducir el consumo de agua y obtener resultados competentes.

## COPPER SULPHIDE SEPARATION INTO HIGH SOLIDS CONCENTRATION PULPS USING MAGNETIC FIELDS

Flotation tests were carried out on a pilot scale, using unconventional cells and applying a low intensity magnetic field generated by a solenoid and a high intensity magnetic field generated by permanent magnets, for a pulp with 52.3% solids, in order to use less water in flotation.

This laboratory flotation tests were done with the chalcopyrite ore to be used in the piloting. In this piloting, was circulated pulp through the cylindrical cell, conical cell oriented from d to 2d and conical cell oriented from 2d to d. The magnetic field strength and the air inlet to the cell were varied. Feed flow, axial flow and tangential flow were measured and sampled. The values were reconciled by two methods, giving different results.

With the first method, with the conical cell oriented from 2d to d, higher metallurgical recoveries are obtained with an average of 79.79%. With the cylindrical cell, higher mass recoveries are obtained with an average of 79.49%. With the conical cell oriented from 2d to d, the highest enrichment factors are obtained with an average of 1.013. These results are far from those obtained in the conventional flotation and indicate that there is a feed flow cut-off and a minimum concentration of particles in the axial flow, which is due to the fact that they are new cells, so that their operation is not yet optimized.

With the second method, the best concentrate grades are obtained in the conical cell, especially when the cell is oriented from d to 2d, with an average grade of 5.69%. When the low intensity magnetic field is applied, the concentrate grade increases by an average of 0.95% and the metallurgical recovery decreases by an average of 0.15%. When the high intensity magnetic field is applied, this grade increases by an average of 2.15% and the metallurgical recovery decreases by an average of 4.45%. These results are within the expected for the first cell of a rougher bank. However, it is important to consider the errors in the results obtained due to the minimization process.

It is concluded that, regardless the method of reconciliation, many other factors affect the operation and must be incorporated to optimize the operation of the cells, reduce water consumption and obtain competent results.

# Agradecimientos

Quiero partir agradeciendo a mi familia, que tanto amo. A mi mamá, Fabiola, que desde pequeño me enseñó a ser responsable de mis estudios, a mi papá, Hernán, que me inculcó todos sus valores, a mi hermana, Melanie, que siempre me ha ayudado y aconsejado, a mi perrito Tommy que siempre me acompaña y me mira con su cara que inspira felicidad y ternura. Agradezco también a mis abuelos, Luisa y Bernardo porque siempre han sido los mejores conmigo y a mis padrinos que siempre se preocupan por mí. Gracias a todos ellos soy lo que soy.

Agradezco a mi novia, Valentina Antillanca, porque me ha apoyado en todo y me ha aconsejado y ayudado a lo largo de este proceso. Te quiero mucho.

También agradezco a mis amigos, José Canales, Daniel Hidalgo, Ricardo Candia, Daniel Pedraza, Daniel Martínez y Sebastián Reyes, porque siempre puedo contar con ellos.

Agradezco también a mi psicóloga, Iris Morales, porque siempre me apoya, me ayuda y levanta el ánimo.

También le doy gracias a Batman, por ser una inspiración.

Le doy las gracias al grupo M2CS por disponer de su Laboratorio de Innovación para la Minería y al Departamento de Ingeniería de Minas por disponer del Laboratorio de Procesamiento de Minerales, en particular a la encargada de este laboratorio, Anisse Pizarro, por ayudarme en las pruebas realizadas en este lugar.

Agradezco a la empresa Ingeniería y Construcciones Salas Hermanos Ltda., por disponer de sus instalaciones para la realización de las pruebas a escala piloto y también le doy las gracias al grupo de trabajo con el cual realicé las pruebas, Rodolfo Mejías y Sebastián Caballero.

Por último, le doy gracias a los profesores Gonzalo Montes y Aldo Casali, y al ingeniero César Arredondo, por ayudarme a lo largo de esta memoria con sus correcciones y comentarios.

# Tabla de Contenido

1.	Introducción.....	1
1.1	Contexto del estudio.....	1
1.2	Objetivos.....	2
1.2.1	Objetivo general.....	2
1.2.2	Objetivos específicos .....	2
1.3	Alcances .....	2
1.4	Estructura del trabajo .....	2
2.	Revisión crítica de la literatura .....	4
2.1	Consumo de agua en concentración de minerales.....	4
2.2	Métodos de separación .....	6
2.2.1	Flotación de minerales .....	6
2.2.2	Hidrocicloneo.....	19
2.2.3	Separación magnética.....	20
2.3	Experimentos con la celda cilíndrica MGFloat® .....	29
2.4	Simulación de celda cilíndrica mediante ANSYS.....	32
3.	Metodología .....	33
3.1	Actividades en laboratorio.....	33
3.1.1	Preparación del mineral .....	33
3.1.2	Pruebas de flotación a escala de laboratorio.....	34
3.1.3	Cálculo y medición de campo magnético .....	39
3.2	Actividades a escala piloto.....	42
3.2.1	Celda cilíndrica .....	43
3.2.2	Celda cónica .....	45
3.2.3	Pulpa y estanque agitado.....	46
3.2.4	Aditivos.....	48
3.2.5	Operación de celdas a escala piloto.....	48

3.3	Reconciliación de datos.....	51
3.4	Método alternativo de reconciliación de datos.....	55
4.	Resultados y Discusión .....	57
4.1	Pruebas a escala de laboratorio .....	57
4.1.1	Prueba preliminar de flotación con mineral piloto.....	57
4.1.2	Pruebas de flotación con mineral piloto.....	57
4.1.3	Cálculo de campo magnético generado por solenoide .....	60
4.1.4	Apantallamiento de campo magnético de imán permanente .....	60
4.2	Pruebas a escala piloto .....	61
4.2.1	Prueba piloto con celda cilíndrica .....	61
4.2.2	Prueba piloto con celda cónica orientada de d a 2d .....	81
4.2.3	Prueba piloto con celda cónica orientada de 2d a d .....	103
4.2.4	Comparación de resultados obtenidos vs celda utilizada .....	125
4.2.5	Resultados reconciliados alternativos.....	137
5.	Conclusiones .....	139
6.	Trabajo futuro .....	142
7.	Bibliografía .....	143

# Índice de Tablas

Tabla 1: Susceptibilidad volumétrica de diversos materiales.....	26
Tabla 2: Dimensiones de celda prototipo.....	30
Tabla 3: Datos preliminares pulpa.....	33
Tabla 4: Cálculo preliminar de tonelaje.....	34
Tabla 5: Cálculo preliminar del volumen de pulpa.....	34
Tabla 6: Mineral total pruebas de flotación escala laboratorio.....	35
Tabla 7: Aditivos, total pruebas de flotación laboratorio.....	35
Tabla 8: Condiciones operacionales, P1, flotación laboratorio.....	36
Tabla 9: Condiciones operacionales, P2, flotación laboratorio.....	37
Tabla 10: Condiciones operacionales, P3, flotación laboratorio.....	38
Tabla 11: Condiciones operacionales, P4, flotación laboratorio.....	39
Tabla 12: Datos celda cilíndrica.....	44
Tabla 13: Jg, celda cilíndrica.....	44
Tabla 14: Datos celda cónica.....	45
Tabla 15: Jg, celda cónica.....	45
Tabla 16: Masa de mineral y volumen de pulpa para pruebas piloto.....	47
Tabla 17: Datos estanque pruebas piloto.....	47
Tabla 18: Aditivos y sus dosis.....	48
Tabla 19: Condiciones operacionales, pruebas piloto.....	48
Tabla 20: Notación muestras según condición.....	50
Tabla 21: Ejemplo valores por caso para cada variable.....	52
Tabla 22: Factor de confiabilidad.....	52
Tabla 23: Ejemplo distribución parámetros reconciliación.....	53
Tabla 24: Prueba preliminar flotación mineral utilizado.....	57
Tabla 25: Prueba 1 flotación a $C_p = 50\%$ , pulpa fresca.....	58
Tabla 26: Prueba 2 flotación a $C_p = 30\%$ , pulpa fresca.....	58
Tabla 27: Prueba 3 flotación a $C_p = 50\%$ , pulpa agitada 24 h.....	58

Tabla 28: Prueba 4 flotación a $C_p = 30\%$ , pulpa agitada 24 h.....	58
Tabla 29: Campo magnético en solenoide.....	60
Tabla 30: Apantallamiento en aire.....	61
Tabla 31: Apantallamiento en pulpa.....	61
Tabla 32: Campo medido solenoide, celda cilíndrica. ....	62
Tabla 33: Celda cilíndrica, resultados post reconciliación.....	63
Tabla 34: Recuperación metalúrgica, celda cilíndrica. ....	64
Tabla 35: Recuperación másica, celda cilíndrica.....	64
Tabla 36: Factor de enriquecimiento, celda cilíndrica. ....	65
Tabla 37: Mediciones campo magnético, celda cónica orientada de d a 2d. ....	81
Tabla 38: Celda cónica orientada de d a 2d, resultados post reconciliación. ....	83
Tabla 39: Recuperación metalúrgica, celda cónica orientada de d a 2d. ....	84
Tabla 40: Recuperación másica, celda cónica orientada de d a 2d. ....	84
Tabla 41: Factor de enriquecimiento, celda cónica orientada de d a 2d.....	85
Tabla 42: Mediciones campo magnético solenoide, celda cónica orientada de 2d a d. .....	104
Tabla 43: Celda cónica orientada de 2d a d, resultados post reconciliación. ....	106
Tabla 44: Recuperación metalúrgica, celda cónica orientada de 2d a d. ....	107
Tabla 45: Recuperación másica, celda cónica orientada de 2d a d. ....	107
Tabla 46: Factor de enriquecimiento, celda cónica de 2d a d.....	108
Tabla 47: Requerimientos reactivos, P1 flotación laboratorio. ....	151
Tabla 48: Requerimientos reactivos, P2 flotación laboratorio. ....	151
Tabla 49: Requerimientos reactivos, P3 flotación laboratorio. ....	151
Tabla 50: Requerimientos reactivos, P4 flotación laboratorio. ....	152
Tabla 51: Cálculo tiempo mínimo de muestreo. ....	152
Tabla 52: Mediciones de flujos de salida, CA2, celda cilíndrica. ....	153
Tabla 53: Medición de flujo de aire, celda cilíndrica.....	153
Tabla 54: Mediciones de presiones de aire, celda cilíndrica. ....	153



Tabla 55: Mediciones de flujos, CA1, celda cónica de d a 2d. ....	153
Tabla 56: Mediciones de flujos de salida, SA1, celda cónica de d a 2d.....	154
Tabla 57: Mediciones de flujos, CA1, celda cónica de 2d a d. ....	154
Tabla 58: Mediciones de flujos de salida, SA1, celda cónica de 2d a d.....	154
Tabla 59: Ajuste de valores experimentales, celda cilíndrica, confiabilidad $La=0,5$ .	155
Tabla 60: Balance de masa y metalúrgico, celda cilíndrica, confiabilidad $La=0,5$ . ..	156
Tabla 61: Resumen de errores, celda cilíndrica, confiabilidad $La=0,5$ .....	156
Tabla 62: Ajuste de valores experimentales, celda cilíndrica, confiabilidad $La=0,4$ .	157
Tabla 63: Balance de masa y metalúrgico, celda cilíndrica, confiabilidad $La=0,4$ . ..	158
Tabla 64: Resumen de errores, celda cilíndrica, confiabilidad $La=0,4$ .....	158
Tabla 65: Ajuste de valores experimentales, celda cilíndrica, confiabilidad $La=0,3$ .	159
Tabla 66: Balance de masa y metalúrgico, celda cilíndrica, confiabilidad $La=0,3$ . ..	160
Tabla 67: Resumen de errores, celda cilíndrica, confiabilidad $La=0,3$ .....	160
Tabla 68: Ajuste de valores experimentales, celda cilíndrica, confiabilidad $La=0,2$ .	161
Tabla 69: Balance de masa y metalúrgico, celda cilíndrica, confiabilidad $La=0,2$ . ..	162
Tabla 70: Resumen de errores, celda cilíndrica, confiabilidad $La=0,2$ .....	162
Tabla 71: Ajuste de valores experimentales, celda cilíndrica, confiabilidad $La=0,1$ .	163
Tabla 72: Balance de masa y metalúrgico, celda cilíndrica, confiabilidad $La=0,1$ . ..	164
Tabla 73: Resumen de errores, celda cilíndrica, confiabilidad $La=0,1$ .....	164
Tabla 74: Ajuste de valores experimentales, celda cónica de d a 2d, confiabilidad $La=0,5$ .....	165
Tabla 75: Balance de masa y metalúrgico, celda cónica de d a 2d, confiabilidad $La=0,5$ . .....	166
Tabla 76: Resumen de errores, celda cónica de d a 2d, confiabilidad $La=0,5$ . ....	166
Tabla 77: Ajuste de valores experimentales, celda cónica de d a 2d, confiabilidad $La=0,4$ .....	167
Tabla 78: Balance de masa y metalúrgico, celda cónica de d a 2d, confiabilidad $La=0,4$ . .....	168
Tabla 79: Resumen de errores, celda cónica de d a 2d, confiabilidad $La=0,4$ . ....	168

Tabla 80: Ajuste de valores experimentales, celda cónica de d a 2d, confiabilidad $La=0,3$ .....	169
Tabla 81: Balance de masa y metalúrgico, celda cónica de d a 2d, confiabilidad $La=0,3$ . .....	170
Tabla 82: Resumen de errores, celda cónica de d a 2d, confiabilidad $La=0,3$ . ....	170
Tabla 83: Ajuste de valores experimentales, celda cónica de d a 2d, confiabilidad $La=0,2$ .....	171
Tabla 84: Balance de masa y metalúrgico, celda cónica de d a 2d, confiabilidad $La=0,2$ . .....	172
Tabla 85: Resumen de errores, celda cónica de d a 2d, confiabilidad $La=0,2$ . ....	172
Tabla 86: Ajuste de valores experimentales, celda cónica de d a 2d, confiabilidad $La=0,1$ .....	173
Tabla 87: Balance de masa y metalúrgico, celda cónica de d a 2d, confiabilidad $La=0,1$ . .....	174
Tabla 88: Resumen de errores, celda cónica de d a 2d, confiabilidad $La=0,1$ . ....	174
Tabla 89: Ajuste de valores experimentales, celda cónica de 2d a d, confiabilidad $La=0,5$ .....	175
Tabla 90: Balance de masa y metalúrgico, celda cónica de 2d a d, confiabilidad $La=0,5$ . .....	176
Tabla 91: Resumen de errores, celda cónica de 2d a d, confiabilidad $La=0,5$ . ....	176
Tabla 92: Ajuste de valores experimentales, celda cónica de 2d a d, confiabilidad $La=0,4$ .....	177
Tabla 93: Balance de masa y metalúrgico, celda cónica de 2d a d, confiabilidad $La=0,4$ . .....	178
Tabla 94: Resumen de errores, celda cónica de 2d a d, confiabilidad $La=0,4$ . ....	178
Tabla 95: Ajuste de valores experimentales, celda cónica de 2d a d, confiabilidad $La=0,3$ .....	179
Tabla 96: Balance de masa y metalúrgico, celda cónica de 2d a d, confiabilidad $La=0,3$ . .....	180
Tabla 97: Resumen de errores, celda cónica de 2d a d, confiabilidad $La=0,3$ . ....	180
Tabla 98: Ajuste de valores experimentales, celda cónica de 2d a d, confiabilidad $La=0,2$ .....	181

Tabla 99: Balance de masa y metalúrgico, celda cónica de 2d a d, confiabilidad $La=0,2$ . .....	182
Tabla 100: Resumen de errores, celda cónica de 2d a d, confiabilidad $La=0,2$ . .....	182
Tabla 101: Ajuste de valores experimentales, celda cónica de 2d a d, confiabilidad $La=0,1$ . .....	183
Tabla 102: Balance de masa y metalúrgico, celda cónica de 2d a d, confiabilidad $La=0,1$ . .....	184
Tabla 103: Resumen de errores, celda cónica de 2d a d, confiabilidad $La=0,1$ . .....	184
Tabla 104: Celda cilíndrica, según caso. Valores ajustados para confiabilidad $La=0,4$ . .....	185
Tabla 105: Celda cilíndrica, recuperación metalúrgica, confiabilidad $La=0,4$ . .....	186
Tabla 106: Celda cilíndrica, recuperación másica, confiabilidad $La=0,4$ . .....	186
Tabla 107: Celda cilíndrica, factor enriquecimiento, confiabilidad $La=0,4$ . .....	186
Tabla 108: Celda cilíndrica, según caso. Valores ajustados para confiabilidad $La=0,3$ . .....	187
Tabla 109: Celda cilíndrica, recuperación metalúrgica, confiabilidad $La=0,3$ . .....	188
Tabla 110: Celda cilíndrica, recuperación másica, confiabilidad $La=0,3$ . .....	188
Tabla 111: Celda cilíndrica, factor de enriquecimiento, confiabilidad $La=0,3$ . .....	188
Tabla 112: Celda cilíndrica, según caso. Valores ajustados para confiabilidad $La=0,2$ . .....	189
Tabla 113: Celda cilíndrica, recuperación metalúrgica, confiabilidad $La=0,2$ . .....	190
Tabla 114: Celda cilíndrica, recuperación másica, confiabilidad $La=0,2$ . .....	190
Tabla 115: Celda cilíndrica, factor de enriquecimiento, confiabilidad $La=0,2$ . .....	190
Tabla 116: Celda cilíndrica, según caso. Valores ajustados para confiabilidad $La=0,1$ . .....	191
Tabla 117: Celda cilíndrica, recuperación metalúrgica, confiabilidad $La=0,1$ . .....	192
Tabla 118: Celda cilíndrica, recuperación másica, confiabilidad $La=0,1$ . .....	192
Tabla 119: Celda cilíndrica, factor de enriquecimiento, confiabilidad $La=0,1$ . .....	192
Tabla 120: Celda cónica de d a 2d, según caso. Valores ajustados para confiabilidad $La=0,4$ . .....	193

Tabla 121: Celda cónica de d a 2d, recuperación metalúrgica, confiabilidad $La=0,4$ . .....	194
Tabla 122: Celda cónica de d a 2d, recuperación másica, confiabilidad $La=0,4$ .....	194
Tabla 123: Celda cónica de d a 2d, factor de enriquecimiento, confiabilidad $La=0,4$ . .....	194
Tabla 124: Celda cónica de d a 2d, según caso. Valores ajustados para confiabilidad $La=0,3$ .....	195
Tabla 125: Celda cónica de d a 2d, recuperación metalúrgica, confiabilidad $La=0,3$ . .....	196
Tabla 126: Celda cónica de d a 2d, recuperación másica, confiabilidad $La=0,3$ .....	196
Tabla 127: Celda cónica de d a 2d, factor de enriquecimiento, confiabilidad $La=0,3$ . .....	196
Tabla 128: Celda cónica de d a 2d, según caso. Valores ajustados para confiabilidad $La=0,2$ .....	197
Tabla 129: Celda cónica de d a 2d, recuperación metalúrgica, confiabilidad $La=0,2$ . .....	198
Tabla 130: Celda cónica de d a 2d, recuperación másica, confiabilidad $La=0,3$ .....	198
Tabla 131: Celda cónica de d a 2d, factor de enriquecimiento, confiabilidad $La=0,2$ . .....	198
Tabla 132: Celda cónica de d a 2d, según caso. valores ajustados para confiabilidad $La=0,1$ .....	199
Tabla 133: Celda cónica de d a 2d, recuperación metalúrgica, confiabilidad $La=0,1$ . .....	200
Tabla 134: Celda cónica de d a 2d, recuperación másica, confiabilidad $La=0,1$ .....	200
Tabla 135: Celda cónica de d a 2d, factor de enriquecimiento, confiabilidad $La=0,1$ . .....	200
Tabla 136: Celda cónica de 2d a d, según caso. Valores ajustados para confiabilidad $La=0,4$ .....	201
Tabla 137: Celda cónica de d a 2d, recuperación metalúrgica, confiabilidad $La=0,4$ . .....	202
Tabla 138: Celda cónica de d a 2d, recuperación másica, confiabilidad $La=0,4$ .....	202

Tabla 139: Celda cónica de d a 2d, factor de enriquecimiento, confiabilidad $La=0,4$ . .....	202
Tabla 140: Celda cónica de d a 2d, según caso. Valores ajustados para confiabilidad $La=0,3$ . .....	203
Tabla 141: Celda cónica de d a 2d, recuperación metalúrgica, confiabilidad $La=0,3$ . .....	204
Tabla 142: Celda cónica de d a 2d, recuperación másica, confiabilidad $La=0,3$ . .....	204
Tabla 143: Celda cónica de d a 2d, factor de enriquecimiento, confiabilidad $La=0,3$ . .....	204
Tabla 144: Celda cónica de d a 2d, según caso. Valores ajustados para confiabilidad $La=0,2$ . .....	205
Tabla 145: Celda cónica de d a 2d, recuperación metalúrgica, confiabilidad $La=0,2$ . .....	206
Tabla 146: Celda cónica de d a 2d, recuperación másica, confiabilidad $La=0,2$ . .....	206
Tabla 147: Celda cónica de d a 2d, factor de enriquecimiento, confiabilidad $La=0,2$ . .....	206
Tabla 148: Celda cónica de d a 2d, según caso. Valores ajustados para confiabilidad $La=0,1$ . .....	207
Tabla 149: Celda cónica de d a 2d, recuperación metalúrgica, confiabilidad $La=0,1$ . .....	208
Tabla 150: Celda cónica de d a 2d, recuperación másica, confiabilidad $La=0,1$ . .....	208
Tabla 151: Celda cónica de d a 2d, factor de enriquecimiento, confiabilidad $La=0,1$ . .....	208

# Índice de Ilustraciones

Ilustración 1: Celda flotación 300 m <sup>3</sup> . .....	9
Ilustración 2: Celda de flotación FLSmidth. ....	9
Ilustración 3: Celda de flotación de base cuadrada. ....	10
Ilustración 4: Celdas de flotación de base circular. ....	10
Ilustración 5: Celdas de flotación columnares. ....	10
Ilustración 6: Celda de flotación por aire disuelto. ....	14
Ilustración 8: Solenoide en celda cilíndrica. ....	40
Ilustración 9: Solenoide en celda cónica orientada de d a 2d. ....	40
Ilustración 10: Solenoide en celda cónica orientada de 2d a d. ....	40
Ilustración 11: Imán permanente de neodimio en forma de disco. ....	42
Ilustración 12: Celda cilíndrica. ....	44
Ilustración 13: Celda cónica, de 2d a d. ....	46
Ilustración 14: Celda cónica, de d a 2d. ....	46
Ilustración 15: Imanes permanentes cilíndricos. ....	50
Ilustración 16: Chancador de mandíbulas, laboratorio. ....	147
Ilustración 17: Chancador, laboratorio. ....	147
Ilustración 18: Molino de bolas, laboratorio. ....	148
Ilustración 19: Harnero vibratorio, laboratorio. ....	148
Ilustración 20: Balanza. ....	149
Ilustración 21: Balanza de precisión. ....	149
Ilustración 22: Celda de flotación, escala laboratorio. ....	150
Ilustración 23: Gaussímetro. ....	150

# Índice de Figuras

Figura 1: Esquema de circuito de molienda. ....	4
Figura 2: Proyección de consumo de agua en concentración de minerales 2019-2030. 5	5
Figura 3: Proyección de demanda de agua en la minería del cobre 2019-2030. ....	6
Figura 4: Esquema de celda de flotación mecánica. ....	8
Figura 5: Esquema de celda de flotación columnar. ....	8
Figura 6: Celda auto aspirante. ....	11
Figura 7: Celda con aire forzado. ....	12
Figura 8: Celda Jameson. ....	13
Figura 9: Esquema celda de electro-flotación. ....	13
Figura 10: Esquema de celda Concorde ....	14
Figura 11: Tamaño de burbuja, la agitación aumenta de izquierda a derecha. ....	15
Figura 12: Esquema rotor-estator. ....	16
Figura 13: Esquema de Sistema fluidizado de flotación. ....	16
Figura 14: Celda de flotación con remoción natural de espuma. ....	17
Figura 15: Esquema de celda con <i>crowder</i> de espuma. ....	17
Figura 16: Esquema de un hidrociclón. ....	20
Figura 17: Corriente circular afectando un punto P. ....	22
Figura 18: Solenoide afectando punto P. ....	24
Figura 19: Campo generado por un solenoide. ....	25
Figura 20: Hidrociclón de tambor. ....	27
Figura 21: Líneas de campo, imán permanente. ....	28
Figura 22: Campo magnético, imán permanente. ....	28
Figura 23: Celda de flotación prototipo. ....	29
Figura 24: Interacción fuerza de Lorentz en celda prototipo. ....	30
Figura 25: Polarización discos de neodimio. ....	42
Figura 26: Esquema celda. ....	49
Figura 27: Disposición imanes permanentes en celda cilíndrica. ....	50

Figura 28: Recuperación acumulada vs tiempo, pruebas flotación laboratorio.....	59
Figura 29: Flujo de alimentación según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de alimentación, celda cilíndrica.....	66
Figura 30: Ley del flujo de alimentación según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de alimentación, celda cilíndrica.....	67
Figura 31: Ley del flujo axial según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de alimentación, celda cilíndrica.....	67
Figura 32: Ley del flujo tangencial según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de alimentación, celda cilíndrica.....	68
Figura 33: Flujo axial según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de alimentación, celda cilíndrica.....	69
Figura 34: Flujo tangencial según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de alimentación, celda cilíndrica.....	69
Figura 35: Recuperación metalúrgica según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de alimentación, celda cilíndrica.....	70
Figura 36: Recuperación másica según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de alimentación, celda cilíndrica.....	71
Figura 37: Factor de enriquecimiento según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de alimentación, celda cilíndrica.....	71
Figura 38: Flujo de alimentación vs cada caso, celda cilíndrica.....	72
Figura 39: Ley del flujo de alimentación vs cada caso, celda cilíndrica.....	73
Figura 40: Ley del flujo axial vs cada caso, celda cilíndrica.....	74
Figura 41: Ley del flujo tangencial vs cada caso, celda cilíndrica.....	75
Figura 42: Flujo axial vs cada caso, celda cilíndrica.....	76
Figura 43: Flujo tangencial vs cada caso, celda cilíndrica.....	77
Figura 44: Recuperación metalúrgica vs cada caso, celda cilíndrica.....	78
Figura 45: Recuperación másica vs cada caso. celda cilíndrica.....	79
Figura 46: Factor de enriquecimiento vs cada caso, celda cilíndrica.....	80
Figura 47: Flujo de alimentación según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de alimentación, celda cónica orientada de $d$ a $2d$ . .....	86



Figura 48: Ley del flujo de alimentación según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de alimentación, celda cónica orientada de d a 2d. ....	87
Figura 49: Ley del flujo axial según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de alimentación, celda cónica orientada de d a 2d. ....	88
Figura 50: Ley del flujo tangencial según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de del flujo de alimentación, celda cónica orientada de d a 2d. ....	89
Figura 51: Flujo axial según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de alimentación, celda cónica orientada de d a 2d. ....	90
Figura 52: Flujo tangencial según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de alimentación, celda cónica orientada de d a 2d. ....	91
Figura 53: Recuperación metalúrgica según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de alimentación, celda cónica orientada de d a 2d. ....	92
Figura 54: Recuperación másica según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de alimentación, celda cónica orientada de d a 2d. ....	93
Figura 55: Factor de enriquecimiento según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de alimentación, celda cónica orientada de d a 2d. ....	94
Figura 56: Flujo de alimentación vs cada caso, celda cónica orientada de d a 2d. ....	95
Figura 57: Ley del flujo de alimentación vs cada caso, celda cónica orientada de d a 2d. ....	96
Figura 58: Ley del flujo axial vs cada caso, celda cónica orientada de d a 2d. ....	97
Figura 59: Ley del flujo tangencial vs cada caso, celda cónica orientada de d a 2d. .	98
Figura 60: Flujo axial vs cada caso, celda cónica orientada de d a 2d. ....	99
Figura 61: Flujo tangencial vs cada caso, celda cónica orientada de d a 2d. ....	100
Figura 62: Recuperación metalúrgica vs cada caso, celda cónica orientada de d a 2d. ....	101
Figura 63: Recuperación másica vs cada caso, celda cónica orientada de d a 2d. ....	102
Figura 64: Factor de enriquecimiento vs cada caso, celda cónica orientada de d a 2d. ....	103
Figura 65: Flujo de alimentación según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de alimentación, celda cónica orientada de 2d a d. ....	109
Figura 66: Ley del flujo de alimentación según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de alimentación, celda cónica orientada de 2d a d. ....	110

Figura 67: Ley del flujo axial según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de alimentación, celda cónica orientada de 2d a d. ....	111
Figura 68: Ley del flujo tangencial según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de alimentación, celda cónica orientada de 2d a d.....	112
Figura 69: Flujo axial según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de alimentación, celda cónica orientada de 2d a d. ....	113
Figura 70: Flujo tangencial según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de alimentación, celda cónica orientada de 2d a d. ....	114
Figura 71: Recuperación metalúrgica según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de alimentación, celda cónica orientada de 2d a d.. ....	115
Figura 72: Recuperación másica según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de alimentación, celda cónica de 2d a d.....	115
Figura 73: Factor de enriquecimiento según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de alimentación, celda cónica orientada de 2d a d. ....	116
Figura 74: Flujo de alimentación vs cada caso, celda cónica orientada de 2d a d....	117
Figura 75: Ley del flujo de alimentación vs cada caso, celda cónica orientada de 2d a d. ....	118
Figura 76: Ley del flujo axial vs cada caso, celda cónica orientada de 2d a d.....	118
Figura 77: Ley del flujo tangencial vs cada caso, celda cónica orientada de 2d a d. ....	119
Figura 78: Flujo axial vs cada caso, celda cónica orientada de 2d a d. ....	120
Figura 79: Flujo tangencial vs cada caso, celda cónica orientada de 2d a d.....	121
Figura 80: Recuperación metalúrgica vs cada caso, celda cónica orientada de 2d a d. ....	122
Figura 81: Recuperación másica vs cada caso, celda cónica orientada de 2d a d. ....	123
Figura 82: Factor de enriquecimiento vs cada caso, celda cónica orientada de 2d a d. ....	124
Figura 83: Flujo de alimentación vs celda, seis casos. ....	125
Figura 84: Ley del flujo de alimentación vs celda, seis casos.....	126
Figura 85: Ley del flujo axial vs celda, seis casos. ....	127
Figura 86: Ley del flujo tangencial vs celda, seis casos.....	128
Figura 87: Flujo axial vs celda, seis casos.....	129

Figura 88: Flujo tangencial vs celda, seis casos. ....	130
Figura 89: Recuperación metalúrgica vs celda, seis casos. ....	131
Figura 90: Balance másico y metalúrgico, mejor recuperación metalúrgica, celda cilíndrica, caso SA2. ....	132
Figura 91: Balances másico y metalúrgicos, peor recuperación metalúrgica, celda cónica de d a 2d, caso CA2. ....	133
Figura 92: Recuperación másica vs celda, seis casos. ....	133
Figura 93: Balance másico y metalúrgico, mejor recuperación másica, celda cilíndrica, caso SA2. ....	135
Figura 94: Balances másico y metalúrgicos, peor recuperación másica, celda cónica de d a 2d, caso CA2. ....	136
Figura 95: Factor de enriquecimiento vs celda, seis casos. ....	136
Figura 96: Resultados reconciliados alternativos. ....	137

# Índice de Ecuaciones

Ecuación 1: Recuperación metalúrgica.....	17
Ecuación 2: Recuperación metalúrgica a partir sólo de leyes conocidas. ....	18
Ecuación 3: Recuperación másica.....	18
Ecuación 4: Recuperación másica a partir sólo de leyes conocidas. ....	18
Ecuación 5: Factor de enriquecimiento. ....	19
Ecuación 6: Fracción acumulada bajo tamaño.....	19
Ecuación 7: Fuerza de Lorentz.....	20
Ecuación 8: Susceptibilidad magnética. ....	21
Ecuación 9: Inducción magnética.....	21
Ecuación 10: Ecuación de Jean Biot 1. ....	21
Ecuación 11: Ecuación de Jean Biot 2. ....	22
Ecuación 12: Ecuación de Jean Biot 3. ....	22
Ecuación 13: Ecuación de Jean Biot 4. ....	23
Ecuación 14: Ecuación de Jean Biot 5. ....	23
Ecuación 15: Ecuación de Jean Biot 6. ....	23
Ecuación 16: Campo generado por una corriente circular 1.....	23
Ecuación 17: Campo generado por una corriente circular 2.....	23
Ecuación 18: Campo generado por una corriente circular 3.....	23
Ecuación 19: Campo generado por una corriente circular 4.....	24
Ecuación 20: Campo generado por una corriente circular 5.....	24
Ecuación 21: Campo generado por una corriente circular 6.....	24
Ecuación 22: Campo generado por un solenoide 1. ....	24
Ecuación 23: Campo generado por un solenoide 2. ....	25
Ecuación 24: Campo generado por un solenoide 3. ....	25
Ecuación 25: Campo generado dentro de un solenoide. ....	41
Ecuación 26: Permeabilidad. ....	41
Ecuación 27: Volumen de sólido.....	46

Ecuación 28: Volumen de líquido.....	46
Ecuación 29: Densidad de pulpa. ....	47
Ecuación 30: Balance de flujos másicos.....	51
Ecuación 31: Balance de Finos.....	51
Ecuación 32: Error por confiabilidad. ....	53
Ecuación 33: Suma 1, errores por confiabilidad. ....	54
Ecuación 34: Error por balance másico.....	54
Ecuación 35: Error por balance metalúrgico. ....	54
Ecuación 36: Suma 2, errores por balance másico y por balance metalúrgico. ....	54
Ecuación 37: Suma 3. ....	54
Ecuación 38: Función objetivo, reconciliación de datos alternativa.....	55
Ecuación 39: Restricción 1. ....	55
Ecuación 40: Restricción 2. ....	56
Ecuación 41: Restricción 3. ....	56
Ecuación 42: Restricción 4. ....	56

# 1. Introducción

## 1.1 Contexto del estudio

Los métodos de separación y/o concentración de minerales han existido desde tiempos inmemoriales. Todos estos buscan ya sea, o concentrar el mineral de interés para un determinado propósito o, como en el caso de la separación sólido/líquido, separar ambas fases provenientes, por ejemplo, de un concentrado o de un relave, con el fin de disminuir la humedad de éstos y así, por ejemplo, cumplir con los estándares para que el concentrado sea comercializable y, así mismo, cumplir con las necesidades técnicas requeridas para que el tranque de relaves sea estable. Además de esto, esta separación de fases permite recuperar agua con el fin de recircularla y, de esta manera, tener que incorporar menos agua fresca al sistema (*Make up*).

Existen diversos métodos de separación y/o concentración, estos pueden ser del tipo gravitacional (por gravedad específica), utilizando la fuerza centrífuga y de arrastre como en un hidrociclón, separación del tipo magnética (susceptibilidad magnética), utilizando equipos tales como tambores, solenoides, imanes permanentes, etc., diseñados para separar los minerales más susceptibles a campos magnéticos de los menos susceptibles. Así mismo, se tiene también la concentración por flotación (hidrofobicidad), que corresponde ya a un tipo de separación fisicoquímica, debido a que utiliza las distintas propiedades fisicoquímicas de la superficie de los materiales para lograr una concentración de las partículas de interés.

Es en este contexto que este trabajo se centra en estudiar una nueva tecnología que incorpore los distintos efectos que tienen en la eficiencia de separación los métodos antes mencionados al combinar éstos en celdas especiales, las cuales están diseñadas de tal manera de poder aislar cada método o tenerlos todos funcionando en conjunto. Esta versatilidad de las celdas antes mencionadas permite generar distintos casos, cada uno de ellos con condiciones operacionales distintas, cuyas pruebas experimentales generarán resultados que permitirán determinar, entre otras cosas, cuales combinaciones son las óptimas, por ejemplo, en términos de recuperación global, por tamaño, etc.

Así mismo, una de las hipótesis de este trabajo es que se utiliza una pulpa que tiene un porcentaje de sólidos de 55%, el cual es más alto que el utilizado en las celdas convencionales de flotación, típicamente 30% de sólidos. Luego, este aumento en el porcentaje de sólidos puede implicar una disminución en el uso de agua, recurso natural que cada día se vuelve más escaso.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo general

Evaluar la eficiencia de separación de un mineral de tipo sulfuro metálico reducido en tamaño de un proceso en continuo en celdas piloto del tipo hidrociclón magnético frente a varias intensidades de campo magnético y diferentes geometrías de campo y de celda, para una pulpa de alta concentración de sólidos.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Analizar resultados de pruebas de flotación *batch* a escala de laboratorio de mineral a utilizar en pilotaje
- Determinar la distribución de la intensidad del campo magnético en distintos materiales, a partir de mediciones de campo magnético en el laboratorio.
- Analizar resultados metalúrgicos derivados de pruebas a escala piloto para determinar el efecto acoplado de campo magnético e incorporación de aire para un flujo helicoidal (centrifugación).
- Evaluar el efecto hidrociclón en presencia y ausencia de ingreso de aire, de campos magnéticos de alta y baja intensidad, y de ambos efectos acoplados.

## 1.3 Alcances

Los resultados obtenidos tanto en el laboratorio como en el pilotaje sólo son pertinentes bajo las condiciones especificadas en cada una de las actividades, por lo tanto, sólo aplican a las condiciones operacionales establecidas en las pruebas antes mencionadas, al equipo utilizado en dichas pruebas y al mineral utilizado en éstas.

No se caracterizarán el flujo de alimentación, flujo axial y flujo tangencial en cuanto a la distribución de tamaño de partículas.

## 1.4 Estructura del trabajo

A continuación, la estructura de este trabajo, con el fin de orientar al lector. El orden es el siguiente:

1. Realizar una revisión crítica de la literatura, revisando antecedentes teóricos, de simulaciones y de experimentos realizados con anterioridad, como motivación del trabajo a realizar.

2. Explicar la metodología utilizada para los experimentos realizados, esto implica primero mostrar la preparación del mineral utilizado, el montaje de los equipos y explicar cada caso generado de acuerdo con condiciones operacionales específicas.
3. Mostrar los resultados más importantes obtenidos en estas pruebas, esto para cada caso generado. Los resultados intermedios o no tan concluyentes, tablas y cálculos se muestran en la sección Anexos.
4. Cada uno de estos resultados va acompañado de su correspondiente análisis, esto es, por ejemplo, comparación de recuperación del metal de interés según caso generado, determinación de concentrado y relave, qué caso resultó ser más eficiente en cuanto a separación, etc.
5. Concluir de acuerdo con los análisis realizados en la sección anterior, destacando los resultados más importantes y explicando las razones de por qué se produjeron estos. Explicar qué es lo que se aprendió con este trabajo
6. Se finaliza con la sección de trabajos futuros, donde se realizan ciertas recomendaciones para futuros trabajos, se establece cierto nivel de detalle para esto, etc. En general, se entregan ideas consistentes y ordenadas para la realización de estas futuras labores, en caso de que se llevasen a cabo.



## 2. Revisión crítica de la literatura

### 2.1 Consumo de agua en concentración de minerales

En la industria minera, después de ser extraído el mineral, éste debe pasar por los procesos de conminución, con el fin de reducir su tamaño. El primer proceso de conminución es el chancado. Si el destino del mineral es la planta de flotación, el siguiente proceso de reducción de tamaño es la molienda. Luego, a través de una clasificación por gravedad específica, se asegura que el producto final tenga la granulometría requerida para ser enviada a flotación. (Drzymala, 2007).

Normalmente, el proceso de chancado no requiere agua, salvo para reducir las partículas en suspensión, ya que el objetivo de esta fase es entregar una granulometría apropiada para el siguiente proceso. En la molienda, cuyo objetivo es liberar las partículas de interés, se hace uso de agua. Luego, las pulpas en este proceso tienen del orden del 70% de sólidos. En la Figura 1 se muestra el esquema de un circuito de molienda:

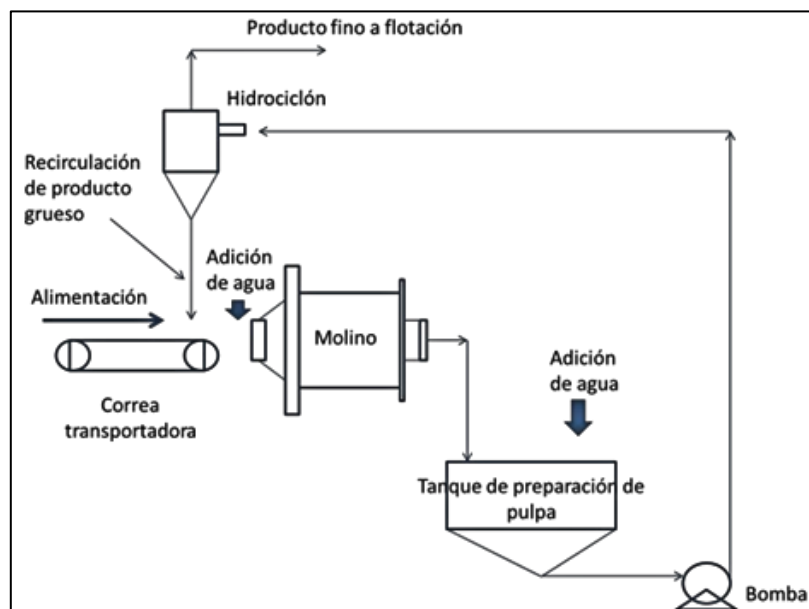


Figura 1: Esquema de circuito de molienda.

Luego, al producto de molienda se le adiciona agua para que el siguiente proceso, hidrociclonaaje, funcione adecuadamente. El producto final del hidrociclón tiene entre 30 y 40% de sólidos.

Las partículas seleccionadas por este proceso pasan a la planta de flotación de minerales, en éste se utiliza un porcentaje de sólidos en peso del orden del 30%. Se puede apreciar que, con cada etapa se disminuye el porcentaje de sólidos en peso y con ello aumenta el porcentaje

de agua. Los porcentajes de sólidos presentados se deben considerar una referencia, en la práctica estos varían por tipo de mineral, equipo utilizado y de autor en autor.

Luego, el área de planta concentradora comprende el procesamiento de minerales, el cual representa el mayor consumo de agua con respecto a los volúmenes totales en minería. Esta área involucra la conminución del mineral, luego la flotación, clasificación y espesamiento (Cochilco, 2019). A continuación, en la Figura 2 se muestra una proyección del consumo de agua [m<sup>3</sup>/s] en la concentración de minerales para el período 2019-2030.

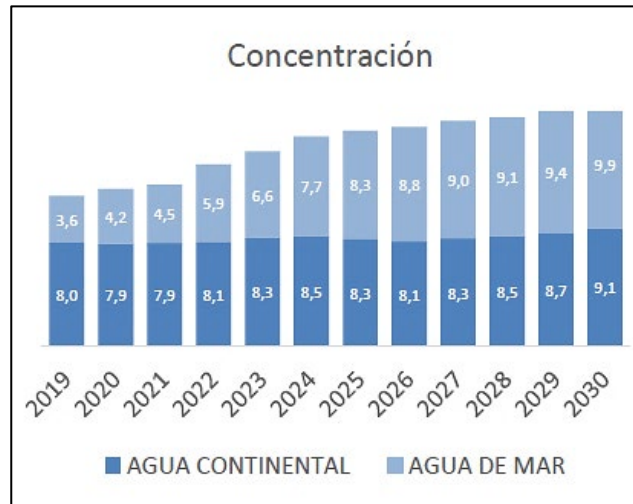


Figura 2: Proyección de consumo de agua en concentración de minerales 2019-2030, informe Cochilco “Proyección de consumo de agua en la minería del cobre 2019-2030”, 2019.

La baja en las leyes implica extraer una mayor cantidad de mineral a procesar para obtener la misma cantidad de material valioso (Dold, 2015; Vieira et al., 2012). Esto significa mayor procesamiento y, por tanto, mayor requerimiento de agua.

Ahora bien, la proyección del consumo a nivel nacional para el período 2019-2030 se basa en la proyección de producción ya que determina el mineral procesado en concentrados y la producción de fino en concentrados junto con la producción de cobre fino en cátodos SxEw. En seguida, en la Figura 3 se muestra esta proyección, donde se debe destacar el cambio de la matriz de producción, que en los próximos años se vuelca a los minerales de sulfuros, que deben ser procesados a través de flotación, proceso que es más intensivo en el uso de agua (Cochilco, 2019).

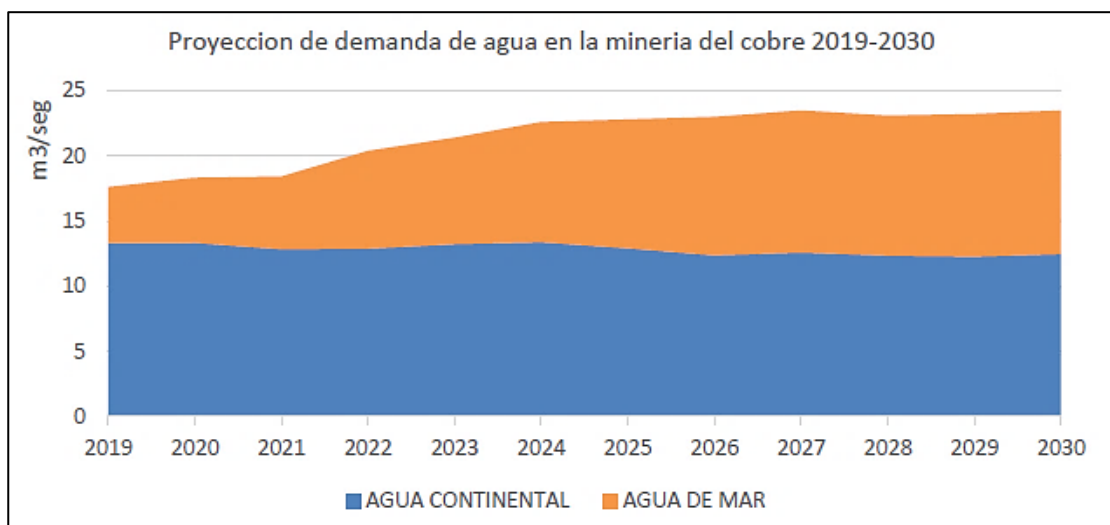


Figura 3: Proyección de demanda de agua en la minería del cobre 2019-2030, informe Cochilco “Proyección de consumo de agua en la minería del cobre 2019-2030”, 2019.

## 2.2 Métodos de separación

A continuación, se describen las principales características de los métodos de separación presentes en los experimentos a escala piloto que se realizan en el presente estudio.

### 2.2.1 Flotación de minerales

La flotación de minerales corresponde a la separación de especies mineralógicas por diferencia de mojabilidad o hidrofobicidad.

Para lograr la separación es necesario contar con un sistema heterogéneo, es decir, que involucre más de una fase. En este caso se consideran las tres fases: sólido (mineral), líquido (agua) y gas (normalmente aire).

Industrialmente, este proceso se lleva a cabo con celdas de flotación, a través de las cuales se hace circular una pulpa que se pone en contacto con aire en forma de burbujas. Entre las partículas presentes en la suspensión, existen partículas hidrofóbicas, normalmente hidrofobizadas previamente, las que se adhieren espontáneamente a las burbujas en forma selectiva y son transportadas por estas a la superficie de la celda. En la superficie, compuesta por las burbujas y las partículas de mineral colectado, se forma una capa de espuma, que al removerla permite separar los minerales con valor económico (Abramov & Forssberg, 2005).

Previo a flotación, la pulpa a tratar se acondiciona con los siguientes reactivos (Bulatovic, 2007; Cytec Industries Inc., 2002):

Los colectores tienen la función de proporcionar propiedades hidrofóbicas a la superficie de minerales, no todas las especies minerales tienen esta propiedad naturalmente.

- Espumantes permiten una formación de espuma estable, tamaño de burbujas apropiado para el proceso de flotación.
- Los modificadores crean condiciones favorables en la superficie de los minerales, principalmente para el funcionamiento selectivo de los colectores.

Después de su acondicionamiento, el material pasa a la planta de flotación, la que se caracteriza por tener celdas con ingreso de aire en la parte inferior y aspas giratorias que mantienen la pulpa en movimiento.

Las celdas de flotación se agrupan formando bancos. Según su función se denominan Rougher, Scavenger y Cleaner. En los dos primeros se aumenta la recuperación de partículas de interés, mientras que en el último se aumenta la ley del concentrado. Habitualmente, en etapas tempranas se busca aumentar la recuperación y en las etapas siguientes aumentar la ley (Abu-Ali & Abdel Sabour, 2003).

La flotación de minerales tiene una eficiencia que en la práctica no llega al 100% (Drzymala, 2007). Las investigaciones en el campo del diseño de celdas de flotación han sido abundantemente desarrolladas para estudiar su impacto en la selección de material valioso.

## **i. Equipos de flotación**

Una máquina de flotación es esencialmente un reactor que recibe el nombre de celda de flotación. Ahí se produce: el contacto burbuja partícula, la adhesión entre ellas y la separación selectiva de especies.

La máquina o celda de flotación debe ser capaz de:

- Mantener una adecuada suspensión y dispersión de la pulpa.
- Posibilitar la incorporación de gas (aire).
- Disponer de una zona sin turbulencia, para formación y remoción de la espuma.
- Ser adecuada a las necesidades de recuperación y/o calidad (ley) del concentrado.
- Permitir la variación de algunos parámetros operacionales (flujo de aire, nivel, etc.).

Las celdas de flotación se clasifican en dos grandes familias: Celdas mecánicas y Celdas neumáticas.

Las celdas mecánicas o convencionales se caracterizan por tener un impulsor o agitador mecánico (rotor o impeler). Alrededor del eje del rotor se tiene un tubo concéntrico hueco que sirve de conducto para el ingreso del gas al interior de la pulpa, lo que ocurre en el espacio entre el rotor y un estator o difusor, donde es dispersado en pequeñas burbujas (1 - 3 mm). Su volumen está entre 0,5 y 300 m<sup>3</sup>. En la Figura 4 se muestra el esquema de una celda de flotación mecánica (Metso, 2020):

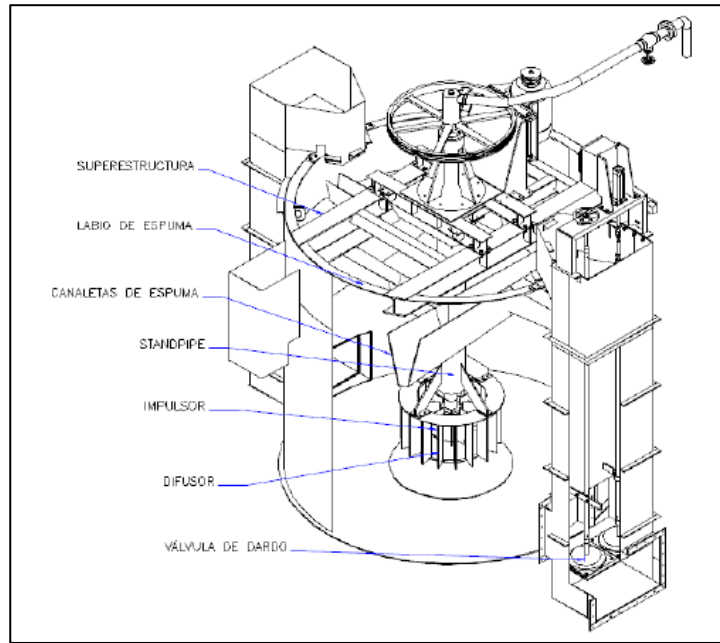


Figura 4: Esquema de celda de flotación mecánica (Manual de usuario, Celdas de flotación RCS, Metso, 2020).

Las celdas de columna son los equipos neumáticos más usados en flotación, en especial en etapas de limpieza de concentrados. Se caracterizan por la producción de concentrados de mayor ley que las celdas mecánicas, aunque con una recuperación menor.

Típicamente tienen una altura de 9 a 15 m. Pueden ser cilíndricas o estar compuestas por secciones cuadradas o rectangulares. Es común encontrarlas en combinaciones de 4 a 16 secciones de 1 m<sup>2</sup> en una misma estructura. En la Figura 5 se muestra el esquema de una celda columnar:

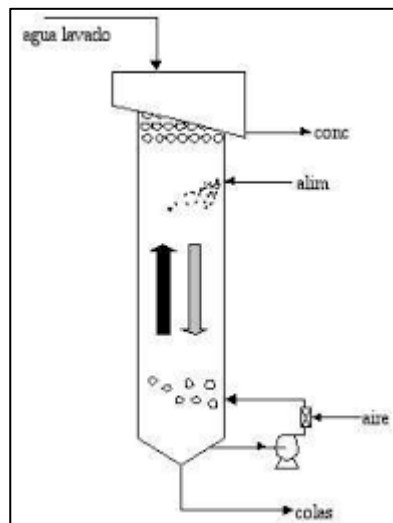


Figura 5: Esquema de celda de flotación columnar.

Las celdas de flotación además se diferencian por la geometría, las dimensiones, el mecanismo de ingreso de aire, el diseño del mecanismo de agitación y por los mecanismos que generan la interacción entre la burbuja y el material de interés

## ii. Geometría y dimensiones

La geometría de la celda incide en la eficiencia del proceso, mientras que las dimensiones se relacionan directamente con la capacidad de tratamiento disponible. En seguida, en la Ilustración 1 se muestra una celda de tamaño convencional, de 300 m<sup>3</sup> (Outotec, 2016).



Ilustración 1: Celda flotación 300 m<sup>3</sup> (Outotec TankCell e300, Outotec Flotation Tankcell® e-Series).

Debido a la necesidad de una mayor capacidad de tratamiento, a través de un mayor control de las condiciones operacionales, se ha logrado incrementar el volumen de material tratado mediante el aumento del tamaño de las celdas (Alexander et al., 2003; Breau et al., 2001). Actualmente, existen celdas de 660 metros cúbicos en el mercado (FLSmidth, 2015), como la que se muestra en la Ilustración 2:



Ilustración 2: Celda de flotación FLSmidth, Aprimin, 2015.

Las celdas de flotación solían construirse considerando una base cuadrada (Lynch et al., 2010), como las de la Ilustración 3:



Ilustración 3: Celda de flotación de base cuadrada (SERVINGSA, Ingeniería y servicios asociados).

Sin embargo, en las aristas de éstas se apreciaba embancamiento de sólidos y zonas muertas. Por ello se han implementado baffles, los cuales son conocidos por ayudar con estos efectos negativos. Hoy en día la tendencia es a desarrollar celdas de base circular, como las que se muestran en la Ilustración 4:



Ilustración 4: Celdas de flotación de base circular (Celdas de flotación RS<sup>TM</sup> - Metso).

En las últimas etapas del proceso, se requiere una mayor ley de concentrado, por ello se diseñan celdas que puedan cumplir este requisito. Por ello se hace referencia a las celdas con forma de columna, las cuales permiten una mayor separación de material valioso, lo que resulta en una mayor ley de concentrado que en otras celdas (Holuszko et al., 2010; Rule & Anyimadu, 2007; Abu-Ali & Abdel Sabour, 2003; Casali et al., 2002; Yianatos & Bergh, 1992). En la Ilustración 5 se aprecian dos celdas de flotación columnares:



Ilustración 5: Celdas de flotación columnares (PENTA, Ingenieros asociados).



### iii. Ingreso de aire

Las celdas convencionales o neumáticas se clasifican según el tipo de aireación en:

- Celdas autos aspirantes: utilizan el vacío creado por el movimiento del rotor para inducir o succionar el aire desde la atmósfera hacia abajo, por el tubo concéntrico alrededor del eje del rotor.
- Celdas con aire forzado: reciben el aire desde un soplador.

En las Figuras Figura 6 y Figura 7 se muestra un esquema de cada celda según el tipo de aireación:

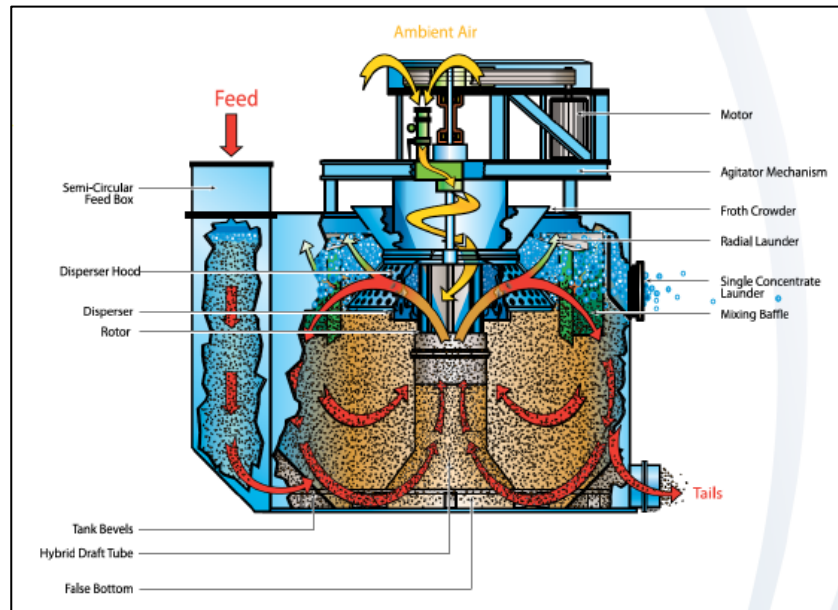


Figura 6: Celda auto aspirante (Wemco).



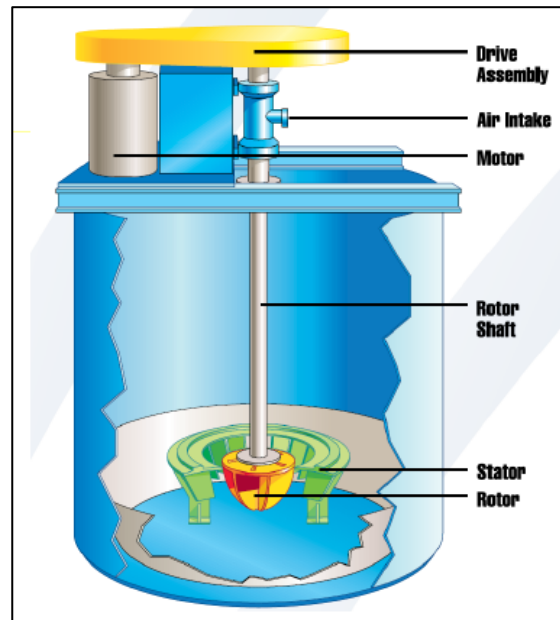


Figura 7: Celda con aire forzado (Dorr - Oliver).

Varios estudios publicados señalan que la forma en la cual se ingresa el gas en las celdas de flotación puede afectar la recuperación. Celdas que hacen uso de aire forzado recuperan preferentemente material intermedio a grueso, mientras que las auto aspirantes recuperan preferentemente material particulado fino (Fan et al., 2008; Kerns & Pagnotti, 2006). En la industria se han obtenido beneficios de ambos sistemas implementando estas tecnologías en puntos distintos del circuito de flotación.

Por otra parte, existen celdas donde la pulpa se hace pasar por una restricción de diámetro y con un orificio se genera un vacío que permite la entrada de aire, con ello se mezcla este íntimamente con la suspensión. Esta configuración genera turbulencia, la cual provoca burbujas de menor tamaño a lo visto anteriormente y esto fomenta la recuperación de finos (Jameson & Lambert, 2001). Este fue un desarrollo de Jameson y colaboradores de *Mount Isa Copper Mine*, siendo éste un sistema similar a un Venturi, pero a escala industrial. En la Figura 8 se muestra un esquema de esta celda con sus partes (Jameson Cell, 2015):

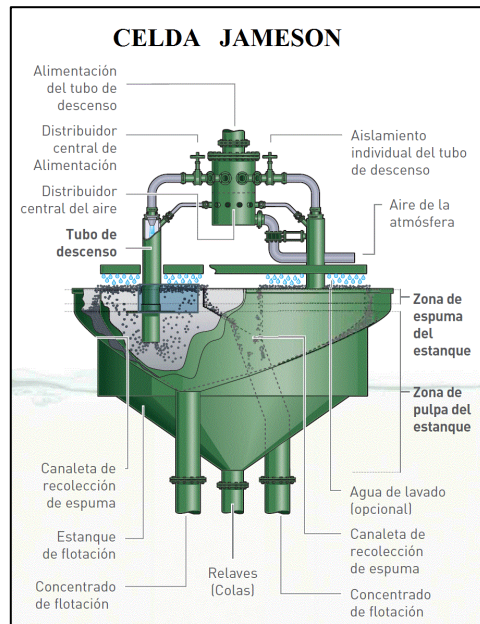


Figura 8: Celda Jameson (Jameson Cell, 2015).

Existe la tecnología donde se hace uso de hidrólisis electroquímica del agua con el fin de generar burbujas (Montes-atenas et al., 2010). Esta hidrólisis tiene como producto oxígeno e hidrógeno molecular, lo cual genera burbujas de un tamaño aún menor a lo provisto con el sistema de aire disuelto. El oxígeno generado es altamente reactivo, lo cual es favorable en caso de la interacción con el colector mientras que en otros perjudica la operación al oxidar de manera irreversible la superficie del mineral y/o los reactivos (Wen-qing et al., 2012; Venkatachalam, 1992).

A continuación, se muestra en la Figura 9 un esquema de la celda de electro-flotación:

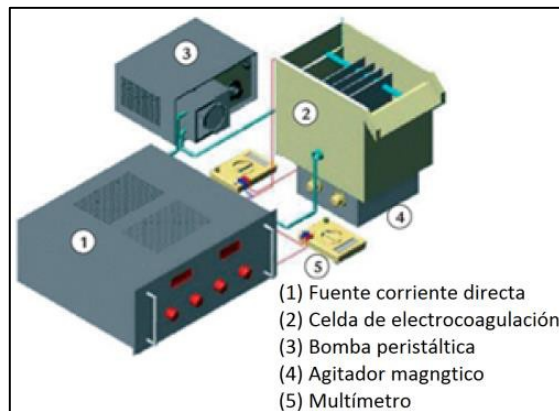


Figura 9: Esquema celda de electro-flotación.

*Dissolved Air Flotation (DAF)* es una tecnología que permite reducir el tamaño de burbujas. Se basa en un aumento de presión del gas en el líquido seguido por una expansión. Lo anterior hace nuclear el gas disuelto en el medio acuoso, generando burbujas de menor tamaño, las cuales tienen una hidrodinámica más compatible con la recuperación de

partículas finas (Cotnoir et al., 2005; Scheiner & Jordan, 1989). En la Ilustración 6 se muestra una celda de flotación por aire disuelto (Veolia, 2020):



Ilustración 6: Celda de flotación por aire disuelto (Veolia, Idraflot™).

La celda de flotación Concorde tiene como objetivo maximizar la turbulencia para recuperar partículas finas (Jameson, 2010) y fue diseñada por el grupo de investigación de la Universidad de Newcastle en Australia. En la Figura 10 se muestra un esquema de esta celda:

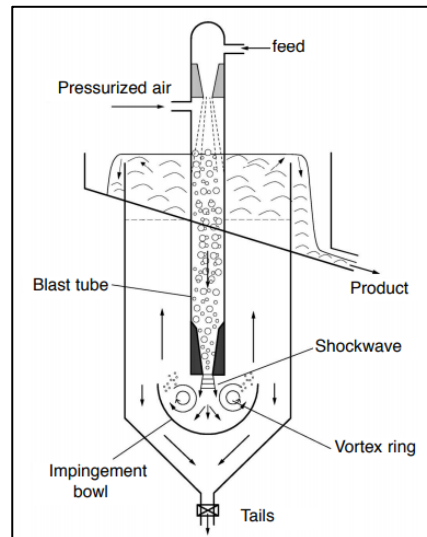


Figura 10: Esquema de celda Concorde (Concorde Cell™, Jameson, 2010).

#### iv. Agitación de la pulpa

Dentro de lo que es la velocidad específica de flotación, estudios indican que existe una serie de submecanismos que ocurren a escala microscópica, y que uno de ellos tiene relación con la formación del agregado partícula-burbuja. En estos estudios se postula que la formación de este agregado guarda relación directa con el número de choques efectivos

que existe en el medio, y por ello la agitación tendría un rol primordial (Wu et al., 2012). Se han construido celdas con base en esta idea, en la que el aumento de agitación permite aumentar la recuperación de finos al disminuir el tamaño de burbujas y aumentar la eficiencia de recuperación global. En la Figura 11 se muestra la disminución del tamaño de burbuja producto del aumento de la agitación:

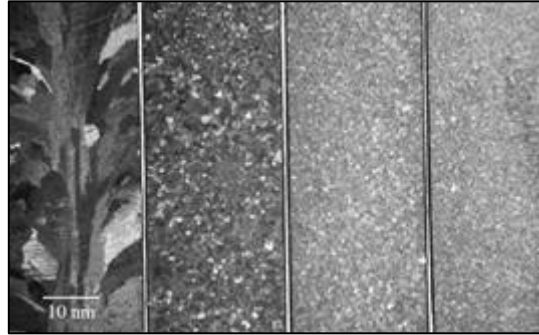


Figura 11: Tamaño de burbuja, la agitación aumenta de izquierda a derecha.

La celda de flotación columnar se puede dividir en dos grandes zonas o fases: una zona de limpieza donde a los agregados partícula-burbuja en forma de espuma se les aplica agua de lavado para posteriormente extraer el concentrado y una zona de colección donde se produce la interacción entre las burbujas y las partículas de interés. Las partículas al descender a la zona de colección se encuentran con las burbujas en contra-corriente (Harris & Rimmer, 1966). Existen modelos que particionan las distintas fases de pulpa y espuma. Estos modelos describen los gradientes de concentración de la columna de espuma y el efecto del tiempo de residencia de la pulpa. Estos modelos multifase pueden ser reducidos al caso de dos fases (Harris, 1978).

En la zona de colección, las velocidades de las partículas y burbujas se encuentran alrededor de 1m/s (Wu et al., 2010; Xu et al., 2010). El uso del rotor-estator entrega una turbulencia local donde se generan velocidades mayores a la mencionada, y gradientes de velocidades cuya magnitud mejoran la interacción partícula burbuja. Con esto se aumenta el número de colisiones efectivas y, con ello, mejoras en la recuperación. A continuación, en la Figura 12 se muestra el esquema de un sistema rotor-estator.

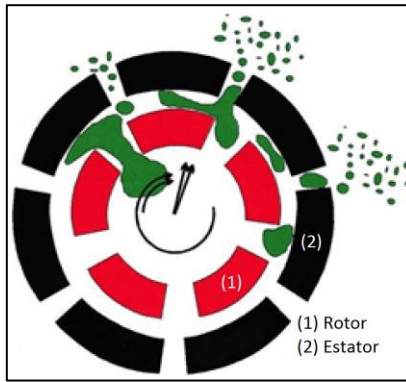


Figura 12: Esquema rotor-estator.

Para la recuperación de partículas gruesas se propone un sistema fluidizado de flotación, que permite flotar partículas de diámetro cercano a 1 mm ( Kohmuenchet al., 1969; Morris, 1952). Este sistema consiste en un estanque donde se disminuye la velocidad de sedimentación de partículas gruesas en conjunto con el empuje de las burbujas, generando una suma de fuerzas que permite transportar estas partículas (Atkinson et al., 1995; Levenspiel, 1962). A continuación, en la Figura 13 se muestra el esquema de este sistema:

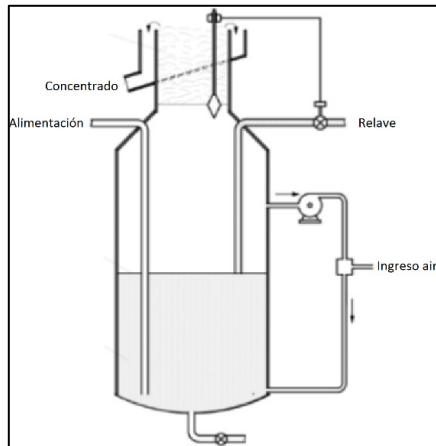


Figura 13: Esquema de Sistema fluidizado de flotación.

## v. Remoción de la espuma

En las últimas décadas se han llevado a cabo múltiples esfuerzos para comprender el movimiento de las espumas (Vanegas & Holtham, 2008a, 2008b; Hans et al., 1963).

La espuma que contiene el mineral de interés es clave para el funcionamiento apropiado de una planta de concentración. La remoción de ésta normalmente es natural a nivel industrial. A nivel piloto y de laboratorio normalmente se usan removedores mecánicos (Cilliers, 2012; Hulbert, 2007, 2001; Moudgil, 1993). En la Figura 14 se muestra el esquema de una remoción natural de espuma.

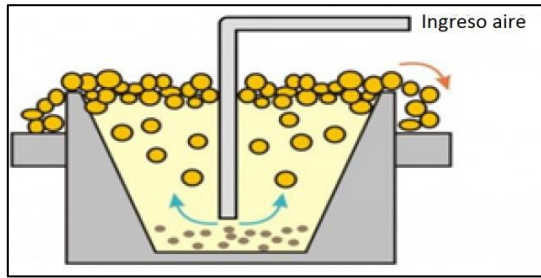


Figura 14: Celda de flotación con remoción natural de espuma.

Con el fin de aumentar la cantidad de material que efectivamente es transferido al concentrado, se han diseñado celdas con superficies inclinadas que ayudan a remover la espuma a nivel industrial, entre ellas el uso de *crowders* (Palosaari, 2003; Ajerch, 1997). En la Figura 15 se muestra el esquema de una celda Imhoflot, la que tiene *crowder* de espuma (J. Yianatos, 2009):

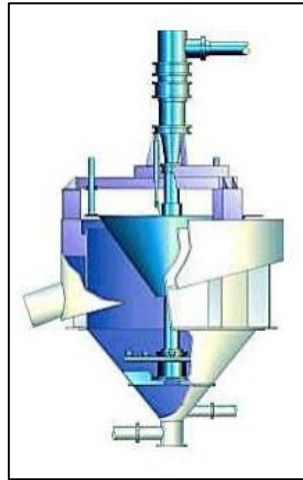


Figura 15: Esquema de celda con *crowder* de espuma (Celda Imhoflot, J. Yianatos, 2009).

Esta tecnología ha tenido resultados positivos, sin embargo, el contacto de la espuma con esta superficie puede romper la burbuja (Barns et al., 2009; Falutsu, 1994).

## vi. Parámetros de rendimiento de una celda de flotación

La recuperación metalúrgica se define como la proporción de la masa del material de interés en el flujo de concentrado con respecto a la masa del material de interés en el flujo de alimentación. Se calcula a partir de la Ecuación 1:

$$\text{Recuperación metalúrgica}[\%] = \frac{G_{sc} * L_c}{G_{sa} * L_a}$$

Ecuación 1: Recuperación metalúrgica.

donde

$G_{sc}$ : flujo de concentrado [kg/s].

$G_{sa}$ : flujo de alimentación [kg/s].

$L_c$ : ley del flujo de concentrado [%].

$L_a$ : ley del flujo de alimentación [%].

La recuperación metalúrgica también se puede calcular a partir sólo de leyes conocidas, como se muestra en la Ecuación 2:

$$\text{Recuperación metalúrgica [\%]} = \frac{(L_a - L_r)}{(L_c - L_r)} * L_c$$

Ecuación 2: Recuperación metalúrgica a partir sólo de leyes conocidas.

donde

$L_a$ : ley del flujo de alimentación [%].

$L_r$ : ley del flujo de relave [%].

$L_c$ : ley del flujo de concentrado [%].

Se define la recuperación en peso o másica como la proporción en masa del flujo de concentrado con respecto al flujo de alimentación. Se calcula según la Ecuación 3:

$$\text{Recuperación másica [\%]} = \frac{G_{sc}}{G_{sa}}$$

Ecuación 3: Recuperación másica.

donde

$G_{sc}$ : flujo de concentrado [kg/s].

$G_{sa}$ : flujo de alimentación [kg/s].

La recuperación másica también se puede calcular a partir sólo de leyes conocidas, como se muestra en la Ecuación 4:

$$\text{Recuperación másica [\%]} = \frac{L_a - L_r}{L_c - L_r}$$

Ecuación 4: Recuperación másica a partir sólo de leyes conocidas.

donde

$L_a$ : ley del flujo de alimentación [%].

$L_r$ : ley del flujo de relave [%].

$L_c$ : ley del flujo de concentrado [%].

Se define el factor de enriquecimiento como la proporción de la ley del material de interés en el flujo de concentrado con respecto a la ley del material de interés en el flujo de alimentación. Se calcula según la Ecuación 5:

$$\text{Factor de enriquecimiento} = \frac{L_c}{L_a}$$

Ecuación 5: Factor de enriquecimiento.

donde

$L_c$ : ley del flujo de concentrado [%]

$L_a$ : ley del flujo de alimentación [%].

Por último, el porcentaje acumulado bajo tamaño se define como el porcentaje de la masa total acumulada bajo cierta malla o tamaño de partícula. Se define  $P_{80}$  como el tamaño de partícula donde el 80% de la masa se encuentra debajo de tal tamaño. Se calcula según la Ecuación 6:

$$F_u(x_i) = \sum_{k=i+1}^N f_k$$

Ecuación 6: Fracción acumulada bajo tamaño.

donde

$F_u(x_i)$ : Fracción acumulada bajo tamaño.

$f_k$ : fracción retenida.

## 2.2.2 Hidrocicloneo

El hidrocicloneo es un proceso de clasificación de partículas según su masa, en la que influyen la densidad y el tamaño, en presencia de agua, con el fin de asegurar el tamaño de las partículas alimentadas a flotación de minerales. Este proceso consiste en un recipiente cilíndrico que termina en forma de cono, al que se ingresa la pulpa de manera tangencial y a una presión superior a la atmosférica, generándose un remolino en el interior. Luego, este remolino provoca que las partículas de mayor masa tiendan a irse hacia los bordes y retirarse por la salida inferior del ciclón (*underflow*), mientras que las partículas con menor masa se ubican cercanas al centro, donde por diferencia de presión, son expulsadas por la salida superior (*overflow*). En la Figura 16 se muestra el esquema de un hidrociclón, donde se identifica la trayectoria de las partículas según su masa:



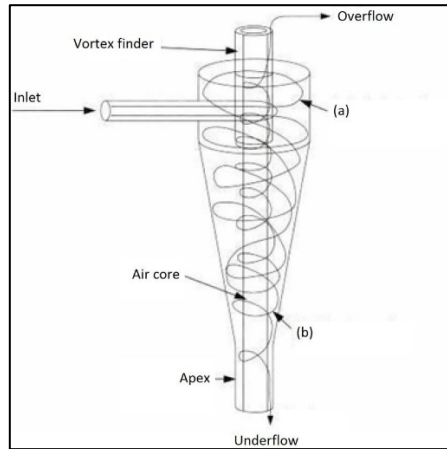


Figura 16: Esquema de un hidrociclón. Trayectoria de partículas de mayor masa (a) y de menor masa (b).

La eficiencia de un hidrociclón se define por una curva de rendimiento también conocida como la curva de Tromp. En teoría esta curva debería corresponder a la función escalón, sin embargo, en la práctica se ha visto que se comporta como una curva con dos asíntotas horizontales (Hwang et al., 2009). Esto se debe a partículas gruesas que son retiradas por el flujo superior y partículas finas arrastradas al fondo, lo que ocurre inevitablemente en estos equipos. Es conocido que el porcentaje de sólidos afecta la eficiencia de un hidrociclón, en particular el *cut point* de la distribución de tamaño (Yuxin & Bingchen, 1993).

### 2.2.3 Separación magnética

La separación magnética se utiliza para concentrar minerales de acuerdo con su susceptibilidad magnética. Este factor está relacionado con el tipo de magnetismo de cada material, lo que clasifica a los materiales en paramagnético, ferromagnéticos y diamagnéticos. El tipo de separación magnética depende del medio, húmedo o seco, y de la intensidad del campo magnético, baja o alta. Un ejemplo de separación magnética que se realiza en medio húmedo con un campo magnético de baja intensidad es la concentración de arenas ferromagnéticas.

#### i. Fuerza de Lorentz

La fuerza de Lorentz (1895) afecta a toda partícula con carga en movimiento en presencia de un campo magnético. En este estudio los experimentos a realizar con las celdas pueden ser afectados por esta fuerza. Debido a esto, es pertinente entender el funcionamiento de ésta. Esta fuerza se calcula según la Ecuación 7:

$$\vec{F} = q[\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}]$$

Ecuación 7: Fuerza de Lorentz.

donde

$q$ : representa la carga [C].

$\vec{E}$ : el campo eléctrico [N/C].

$\vec{v}$ : velocidad de la partícula [m/s].

$\vec{B}$ : campo magnético [T].

Se hace notar que 1 T es la intensidad de un campo magnético que provoca una fuerza de 1 N a una partícula cargada de un Coulomb que se mueve a una velocidad de 1 m/s perpendicularmente a dicho campo magnético.

En electromagnetismo se define la permeabilidad como la magnetización un material por unidad de volumen. Mientras que la susceptibilidad magnética se define como una constante adimensional que indica el grado de magnetización de un material en presencia de un campo magnético. Se calcula según la Ecuación 8:

$$M = \chi H$$

Ecuación 8: Susceptibilidad magnética.

donde

$M$ : magnetización [A/m].

$\chi$ : susceptibilidad magnética del material.

$H$ : intensidad de campo magnético [A/m].

También se define la inducción magnética según la Ecuación 9:

$$B = \mu_0(1 + \chi)H = \mu H$$

Ecuación 9: Inducción magnética.

donde

$B$ : inducción magnética [T].

$\mu_0$ : permeabilidad magnética en el vacío [N/A<sup>2</sup>].

$\mu$ : permeabilidad del material [N/A<sup>2</sup>].

La ecuación de los físicos Jean Biot y Félix Savart (1819) permite calcular el campo magnético  $\vec{B}$ , creado por un alambre recorrido por una corriente  $i$ [A]. Esto se muestra en la Ecuación 10:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \oint \frac{\hat{\mu}_t \times \hat{\mu}_r}{r^2} dl$$

Ecuación 10: Ecuación de Jean Biot 1.

donde

$\mu_0$ : es la permeabilidad en el vacío [N/A<sup>2</sup>].

$\hat{\mu}_t$ : vector unitario dirección tangente al circuito que indica el sentido de la corriente.

$\hat{\mu}_r$ : vector unitario con dirección al punto P. Este punto se ubica a una distancia  $r$  del alambre.

L: es el largo total del alambre [m].

$dl$ : son secciones suficientemente pequeñas de este [m].

Entonces para una corriente circular de radio  $a$  y un punto P ubicado en el eje de ésta, a una distancia  $z$  del centro de la corriente circular, se puede describir el campo  $\vec{dB}$  generado por  $dl$ . Esto se aprecia en la Ecuación 11 y en la Figura 17.

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \oint \frac{\hat{\mu}_t \times \hat{\mu}_r}{r^2} dl$$

Ecuación 11: Ecuación de Jean Biot 2.

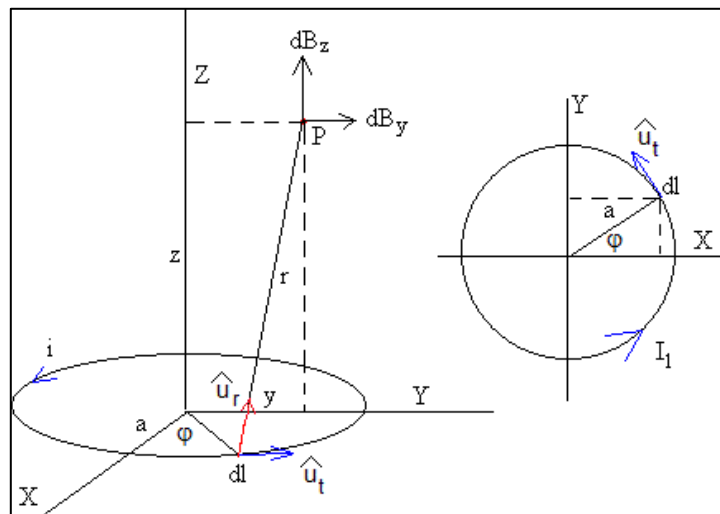


Figura 17: Corriente circular afectando un punto P.

Los vectores unitarios forman un ángulo de 90 grados en esta configuración. Esto se aprecia en la Ecuación 12.

$$\vec{dB} = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \frac{\hat{\mu}_t \times \hat{\mu}_r}{r^2} dl$$

Ecuación 12: Ecuación de Jean Biot 3.

En el punto P se tiene dos componentes del campo magnético, una paralela al eje de la corriente circular y otra perpendicular a este. Por simetría, las componentes perpendiculares creadas por cada  $dl$  en un círculo se cancelan entre sí. Por ello, solo resulta un campo

magnético paralelo al eje de la corriente circular. Se describe como  $\theta$  el ángulo formado entre la proyección del eje de la corriente y la recta entre el punto P y el largo  $dl$ . También se puede analizar como un cono, donde el punto P es la punta de éste y la corriente circular la base,  $\theta$  se define como el ángulo entre el eje del cono y sus paredes. Lo anterior se muestra en las Ecuaciones 13 y 14.

$$B = \int dB * \cos(90 - \theta)$$

Ecuación 13: Ecuación de Jean Biot 4.

$$B = \oint \frac{\mu_0 i}{4\pi r^2} dl * \cos(90 - \theta)$$

Ecuación 14: Ecuación de Jean Biot 5.

Son constantes adentro de la integral  $\theta$  y  $r$ . Se resuelve la integral. Luego se tiene la Ecuación 15.

$$B = \frac{\mu_0 i}{4\pi r^2} \sin(\theta) \oint dl = \frac{\mu_0 i}{4\pi r^2} 2\pi \sin(\theta)$$

Ecuación 15: Ecuación de Jean Biot 6.

Lo anterior también se puede escribir en función del radio  $a$  de la corriente circular y la distancia  $z$  del punto P al centro de esta. Con lo que se obtiene la Ecuación 16.

$$B = \frac{\mu_0 i a^2}{2(\sqrt{z^2 + a^2})^3}$$

Ecuación 16: Campo generado por una corriente circular 1.

Una espira se puede considerar como un conjunto de corrientes circulares agrupadas con cierta distancia entre ellas. El número de espiras comprendido en un intervalo  $dx$  se puede describir según la Ecuación 17.

$$dn = \frac{N dx}{L}$$

Ecuación 17: Campo generado por una corriente circular 2.

Con  $N$  el número total de espiras y  $L$  el largo total del solenoide. Por lo tanto, el campo generado por estas espiras se puede escribir como aparece en las Ecuaciones 18 y 19.

$$dB = \frac{\mu_0 i a^2}{2(\sqrt{z^2 + a^2})^3} \frac{N dx}{L}$$

Ecuación 18: Campo generado por una corriente circular 3.

$$B = \oint \frac{\mu_0 i a^2}{2(\sqrt{z^2 + a^2})^3} \frac{N dx}{L}$$

Ecuación 19: Campo generado por una corriente circular 4.

Se usa el siguiente cambio de variable  $a = z \tan(\theta)$ . Siendo  $\theta$  el ángulo descrito anteriormente, sin embargo, debido a que se trabaja con más de una espira se tiene  $\theta_1$  y  $\theta_2$ , el primero es el ángulo a la espira más cercana y el segundo a la más lejana. Se obtiene la Ecuación 20.

$$B = \frac{\mu_0 i N}{2 L} \int_{\theta_1}^{\theta_2} -\sin(\theta) d\theta = \frac{\mu_0 i N}{2 L} (\cos(\theta_2) - \cos(\theta_1))$$

Ecuación 20: Campo generado por una corriente circular 5.

Considerando un punto P dentro de un solenoide lo suficientemente largo respecto a su radio,  $\theta_1 \rightarrow \pi$  y  $\theta_2 \rightarrow 0$ . El campo en este caso se define como el campo generado en su interior por un solenoide de largo tendiendo a infinito. Luego, se obtiene la Ecuación 21.

$$B_0 = \frac{\mu_0 i N}{2 L}$$

Ecuación 21: Campo generado por una corriente circular 6.

Se grafica el campo generado por el solenoide en función de la distancia con respecto al campo magnético  $B_0$ . En la Ecuación 22 y Figura 18 se muestra esto.

$$\frac{B}{B_0} = \frac{(\cos(\theta_2) - \cos(\theta_1))}{2}$$

Ecuación 22: Campo generado por un solenoide 1.

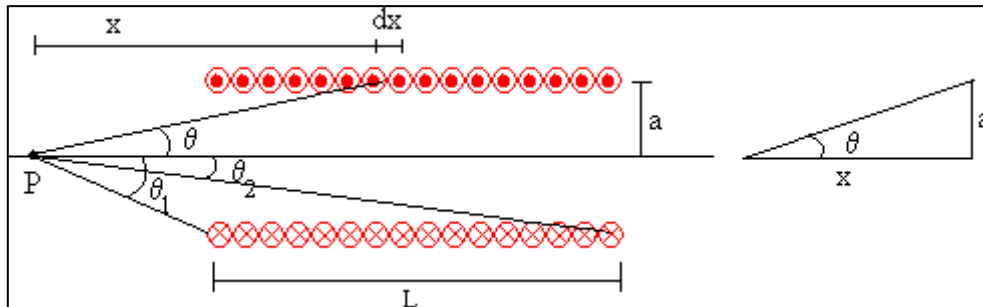


Figura 18: Solenoide afectando punto P.

Los ángulos  $\theta_1$  y  $\theta_2$ , se pueden escribir en función de las dimensiones del solenoide, como se ve en las Ecuaciones 23 y 24.

$$\cos(\theta_2) = \frac{\frac{L}{2} - z}{\sqrt{(\frac{L}{2} - z)^2 + a^2}}$$

Ecuación 23: Campo generado por un solenoide 2.

$$\cos(\theta_1) = \frac{-\frac{L}{2} - z}{\sqrt{(-\frac{L}{2} - z)^2 + a^2}}$$

Ecuación 24: Campo generado por un solenoide 3.

Donde  $L$  es el largo del solenoide,  $a$  su radio y  $z$  la distancia del punto P, ubicado en el eje de éste, al centro del solenoide. Se gráfica  $\frac{B}{B_0}$  por el largo del solenoide, como se muestra en la Figura 19.

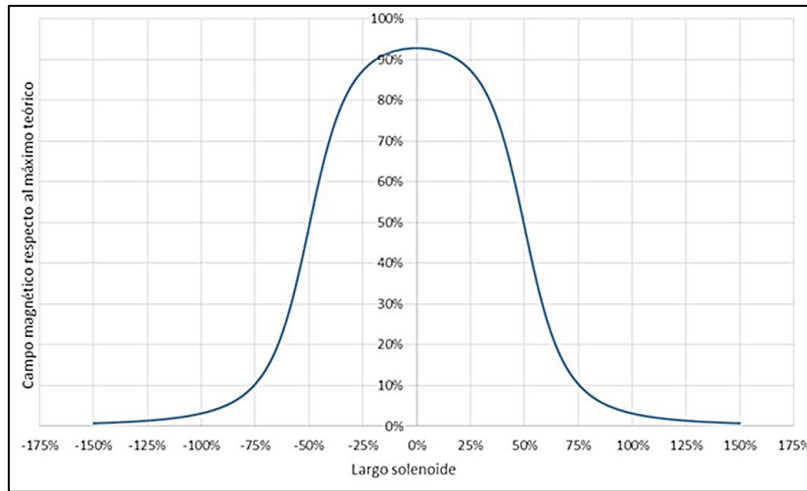


Figura 19: Campo generado por un solenoide.

El solenoide inicia en -50% y termina en 50%, donde alcanza 100% de su extensión horizontal. En los bordes del solenoide el campo es 50% comparado con centro de éste.

En la siguiente tabla (Hunt et al., 1995) se muestra la susceptibilidad magnética de algunos minerales relevantes para este estudio, se utiliza el sistema internacional de unidades. En la Tabla 1 se muestra la susceptibilidad de ciertos materiales:

Tabla 1: Susceptibilidad volumétrica de diversos materiales.

Mineral	Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]	Susceptibilidad volumétrica SI 10 <sup>-6</sup>
Forsterita	3,2	-12
Hielo	0,92	-9
Halita	2,17	-10 - 16
Ortoclasa	2,57	-13 - 17
Cuarzo	2,65	-13 - 17
Carbón	1,35	25
Yeso	2,34	-13 - 29
Calcita	2,83	-7,5 - 39
Anhidrita	2,98	-14 - 60
Grafito	2,16	-80 - 200
Calcopirita	4,2	23 - 400
Pirita	5,02	35 - 5000

La calcopirita es un material antiferromagnético con inusuales propiedades magnéticas. Experimentos con difracción de neutrones revelan un fase de transición cercana a los 50 K que se ha atribuido a una inesperada aparición de momentos magnéticos de los iones de cobre, comportándose como un material paramagnético para luego volver a su estado antiferromagnético al descender la temperatura (Conejeros et al., 2015).

Por otra parte, un estudio donde se aplica reducción mecanoquímica a la calcopirita, utilizando hierro elemental, muestra que se obtiene un incremento en la saturación magnética como resultado de la molienda (Osserov et al., 2017).

Otro estudio muestra el efecto que tiene la aplicación de radiación de microondas y tratamientos de calor convencionales en las propiedades magnéticas de la pirita y de la calcopirita. La susceptibilidad magnética de la calcopirita se incrementa significativamente al incrementar la potencia de las microondas y aumentar el tiempo de tratamiento, mientras que para el magnetismo de la pirita sólo se ve afectado cuando se aplica una potencia de 500 W. Por otra parte, la susceptibilidad magnética de ambos se incrementa significativamente cuando se aumenta la temperatura. Análisis XRD Y XPS muestran que la formación de más fases magnéticas después del tratamiento es lo que genera el incremento en el magnetismo. Esto indica que la separación magnética selectiva de la calcopirita con respecto a la pirita es posible cuando se aplican microondas de baja potencia (Elmahdy et al., 2016).

## ii. Hidrociclón con campo magnético

El primer diseño publicado encontrado sobre hidrociclónaje con campos magnéticos es el de Fricker (Fricker, 1984). Este modelo ha sido usado en otras industrias, como el tratamiento de residuos de acero (Rawlins & Watson, 1993). En todos estos casos se usa

una intensidad de campo magnético en el rango  $[0,2 - 1]$  T. En la Figura 20 se muestra un sistema que permite la recuperación de material magnético desde una pulpa donde el magneto se encuentra al interior de un cilindro que rota (Allen, 2000).

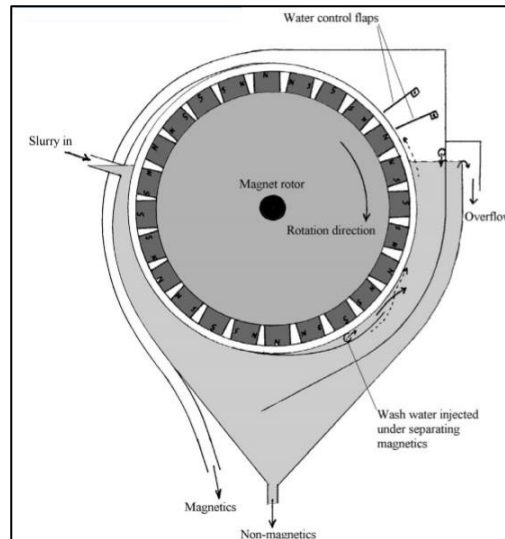


Figura 20: Hidrociclón de tambor.

En este diseño la atracción de las partículas paramagnéticas al campo magnético es suficiente para separarlas de las que no presentan esta interacción. Es decir, que su magnetización puede usarse en separación. Este es el mismo principio que se busca en la nuevas celdas cilíndrica y cónica.

### iii. Líneas de campo magnético

Las líneas de campo magnético son líneas invisibles imaginarias que conceptualizan un fenómeno. Éstas se extienden en el rango de imanes permanentes desde el polo norte hasta el polo sur. Las líneas de campo magnético son una consecuencia de la magnetización de los imanes permanentes y caracterizan la disposición geométrica de sus campos magnéticos.

Cuanto más fuerte es un campo magnético, más densas son las líneas del campo magnético. Si se pulveriza polvo de hierro en un pedazo de papel y se coloca en posición justo encima del imán, el polvo de hierro recogerá estructuras que muestran el curso de las líneas del campo magnético.

Un imán permanente obtiene sus propiedades magnéticas en el curso de su producción cuando se aplica un campo magnético externo a su cuerpo inicialmente no magnético.

Las partículas más pequeñas de los imanes permanentes, que representan sus imanes elementales, están dispuestas uniformemente en estructuras geométricas. Este principio de ordenamiento es el proceso real que otorga a los imanes permanentes sus propiedades magnéticas.



El efecto inmediato de estas propiedades magnéticas es la formación de esas líneas de campo magnético que rodean al imán permanente y también pasan a través de su cuerpo interno. Sin embargo, son las estructuras cerradas de las líneas del campo magnético, que no tienen principio ni fin.

A continuación, en las Figuras 21 y 22 se muestran las líneas de campo magnético teóricas para un imán permanente.

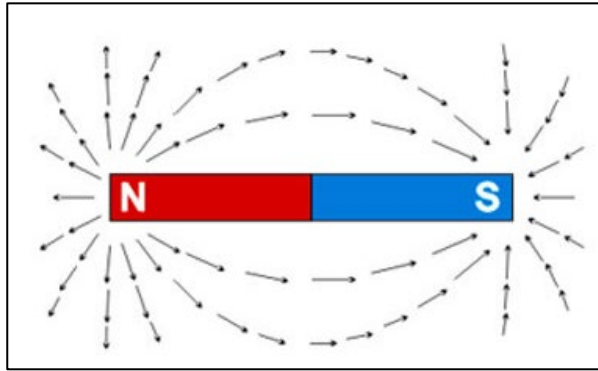


Figura 21: Líneas de campo, imán permanente.

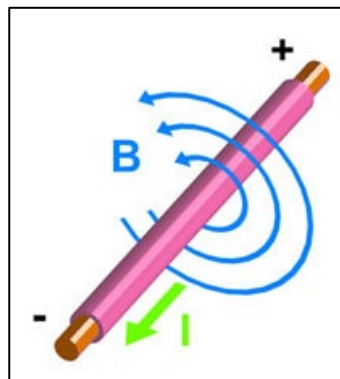


Figura 22: Campo magnético, imán permanente.

Como resultado, el campo magnético también tiene un carácter continuo en su efecto. La fuerza y la intensidad del campo magnético no tienen aumentos ni desperdicios repentinos. Las líneas de campo magnético siempre tienen una curvatura constante y nunca pueden ser rectas.

Este fenómeno es causado por el hecho de que incluso el imán permanente más pequeño siempre está compuesto por un polo norte y un polo sur. Un imán permanente nunca puede ser polarizado en un solo lado, como un electrón que lleva una carga negativa o incluso como un protón que está cargado positivamente. Esta propiedad fundamental del magnetismo afecta a todos los manes permanentes, independientemente de su forma geométrica y diseño.

Las líneas del campo magnético son forzadas por esta ley de la naturaleza a tener geometrías curvas, que están parcialmente fuera y dentro del cuerpo magnético.

## 2.3 Experimentos con la celda cilíndrica MGFloat®

En su memoria de pregado, Cereceda estudia el funcionamiento de la celda cilíndrica, MGFloat®, que se utilizará en las pruebas a escala piloto. De su trabajo lo que más aporta al estudio realizado en esta memoria son las razones por las cuales se diseña esta celda de la manera en que hoy existe.

De la revisión bibliográfica se extrae la necesidad de reducir el tamaño de burbujas con el fin de promover la recuperación de finos presentes en la pulpa. Este tamaño se puede alcanzar de múltiples maneras tales como hidrólisis electroquímica, aire disuelto, turbulencia, entre otros. En este estudio se opta por trabajar con aire forzado, esperando que la turbulencia de la fuerza centrífuga generada disperse las burbujas y la agitación aumente la cantidad de choques efectivos. Sobre la velocidad de entrada se sigue lo propuesto para celdas con rotor-estator de 1 m/s. Respecto a la remoción de espuma, no se interfiere activamente en esta etapa, con el fin de no promover la ruptura de las burbujas (Cereceda, 2018).

Teniendo en consideración lo anterior, se diseña la celda de flotación, que consiste en un cilindro con 4 entradas/salidas:

- Dos dispuestas de manera axial en los extremos, perpendiculares a la tapa superior e inferior de la misma.
- Dos son entradas/salidas tangenciales al cilindro, ubicadas lateralmente, resaltando que pueden cambiar de sentido.

En seguida, en la Figura 23 se muestra el diseño de la celda prototipo cilíndrica.

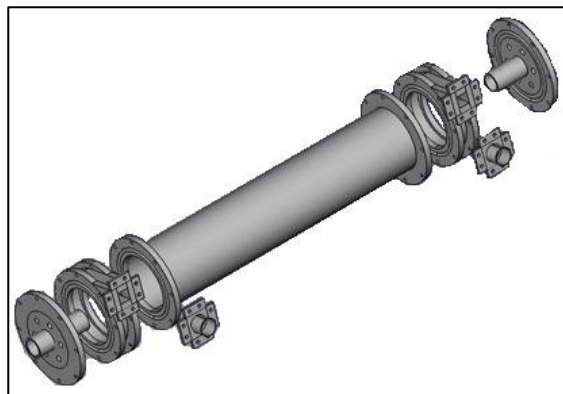


Figura 23: Celda de flotación prototipo.

Además de las entradas y salidas de pulpa, se incluye 6 agujeros de menor tamaño en uno de los extremos de la celda, por donde se puede ingresar aire a presión. A continuación, se presentan las dimensiones de la celda en la Tabla 2.

Tabla 2: Dimensiones de celda prototipo.

Dimensiones celda	
Largo celda [cm]	50
Radio celda [cm]	5
Volumen celda [cm <sup>3</sup> ]	3900
Radio entrada [cm]	1,5
Área entrada [cm <sup>2</sup> ]	7,1

En la Figura 24 se presenta el funcionamiento teórico de la fuerza de Lorentz, considerando el diseño de la celda.

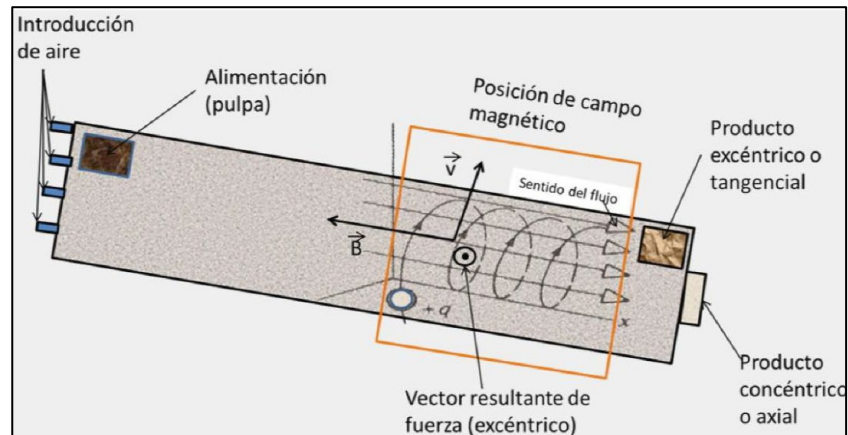


Figura 24: Interacción fuerza de Lorentz en celda prototipo.

Se puede apreciar que el campo magnético y el sentido del flujo van en sentidos opuestos. En teoría una partícula cargada de manera negativa debería sentir una fuerza hacia el centro de la celda. Dependiendo de la carga, se puede invertir este comportamiento. Para estos experimentos se conserva esta configuración. Se coloca un solenoide de cobre de 200 metros en la parte final de la celda, con el sentido del campo magnético como indica la Figura 24. Este solenoide cubre el 50% de la celda.

Uno de los resultados de este trabajo es que colocar un campo magnético dentro de un hidrociclón aumenta la separación por fracción de tamaño de minerales de cobre sulfurado, lo cual indica interacción con la propiedad paramagnética de estos. Su atracción al origen del campo genera una fuerza opuesta al sentido del flujo de pulpa, esto puede aumentar su tiempo de residencia y con ello su exposición a la fuerza centrífuga. Para esta interacción no se precisa que las partículas tengan una superficie de mineral expuesta, por ello se requiere menos reducción de tamaño. Esto implica menor consumo de energía en molienda. En principio, esta tecnología se podría usar en hidrociclones actualmente presentes en la industria (Cereceda, 2018).

Para los 4 rangos analizados en este trabajo se obtiene como máximo mejoras de 4%, 10%, 5% y 2% en la eficiencia técnica de flotación, para los tamaños debajo de 44, 44 a 74,

74 a 105 y sobre 105  $\mu\text{m}$ , respectivamente. Con la configuración actual, aumentar la eficiencia en un rango puede disminuir la de otro. El aumento de eficiencia global más alto registrado al introducir un campo magnético en la celda prototipo es de un 4%.

La mejor configuración de esta celda prototipo, en comparación con una planta de flotación, alcanza 71% de la recuperación metalúrgica y 6% de la eficiencia de flotación en 0,35% del tiempo. Además, la celda tiene un 0,06% del volumen y trata el 16% del flujo volumétrico.

El principal problema al realizar las pruebas de esta celda es que en su trabajo de título Cereceda utiliza una pulpa con una concentración de sólidos cercana al 17%. Es por esto por lo que sus resultados experimentales no aportan mucho al trabajo presente, ya que la diferencia de porcentaje en sólidos entre su trabajo y el que se presenta actualmente es demasiado alta. Además, en sus experimentos a escala piloto el campo magnético generado por el solenoide se orienta en el sentido contrario al flujo mientras que en el trabajo presente se trabaja con el campo magnético del solenoide orientado en sentido del flujo, lo cual genera cambios en los resultados obtenidos. De esta manera, resultados respecto del efecto del campo magnético del solenoide en el flujo no son relevantes en el trabajo actual.

## 2.4 Simulación de celda cilíndrica mediante ANSYS

En su tesis de magíster, Rojas simula una celda cilíndrica, semejante a la utilizada en las pruebas de pilotaje, bajo distintas condiciones operacionales ocupando el programa ANSYS, específicamente el módulo FLUENT.

Se tiene como objetivo estudiar la fluidodinámica de la celda, bajo los efectos gravitatorios, de cicloneo y magnéticos para determinar los parámetros de operación óptimos para esta celda (Rojas, 2018).

En sus simulaciones varía el flujo de alimentación, el largo de la celda y la aplicación de distintos campos magnéticos.

Tiene dos enfoques para sus simulaciones. El primer enfoque es considerar que el fluido está constituido por partículas de calcopirita de distintas densidades y tamaños, mientras que el segundo modela el fluido como si éste tomase distintas densidades, como un plástico de Bingham.

Como resultado de sus simulaciones llega a que el campo magnético afecta positivamente en la recuperación de partículas de cobre. Se tiene que el campo magnético induce una fuerza en las partículas de calcopirita, ésta es la fuerza de Lorentz. Sin embargo, esta fuerza depende de la intensidad del campo, de la velocidad y carga de las partículas. La calcopirita tiene una carga muy débil, por lo tanto, en términos operacionales, no se puede aumentar el campo magnético debido al costo, ante lo cual sólo queda aumentar la velocidad de las partículas.

Concluye que al simular el fluido como Newtoniano, el comportamiento que tiene éste dentro de la celda es helicoidal. Por otra parte, variar los parámetros geométricos de la celda, como el diámetro y el largo perjudican las condiciones del régimen y velocidad del fluido.

En particular, se da cuenta de que al aplicar un campo magnético externo a la celda la recuperación de calcopirita mejora significativamente. La recuperación mejora bajo la presencia de un campo magnético de 0,001 T o 10 Gauss.

Por otra parte, la recuperación de partículas finas no mejora con la aplicación de un campo magnético externo, sino con el aumento de la velocidad de la alimentación.

Los resultados obtenidos por Rojas (2018) dan un atisbo de lo que puede ocurrir en la operación de la celda cilíndrica. Sin embargo, no se habla de un alto porcentaje de sólidos ni tampoco de celdas con otra geometría como es el caso de este estudio.

A priori se puede considerar que aplicar campos magnéticos externos debiese aumentar la recuperación de partículas de cobre y que la velocidad de los flujos incide en esta recuperación por aplicación de campos magnéticos

### 3. Metodología

Para cumplir con los objetivos planteados anteriormente se deben realizar actividades tanto en laboratorio como a escala piloto. A continuación, se muestran las actividades según escala.

#### 3.1 Actividades en laboratorio

Las actividades realizadas en el laboratorio de Procesamiento de Minerales de la FCFM fueron las siguientes:

- Preparación del mineral.
- Pruebas de flotación a escala de laboratorio.
- Cálculo y medición de campo magnético en solenoide a escala piloto.

En seguida se explica lo realizado con mayor detalle.

##### 3.1.1 Preparación del mineral

El mineral utilizado en las pruebas a escala piloto corresponde a uno compuesto por sulfuros de cobre, principalmente calcopirita, y carbonatos.

Antes de preparar este mineral, se llevó a cabo una prueba preliminar de laboratorio, con el fin de evaluar la flotabilidad de este mineral, considerando los carbonatos presentes en él.

Ahora bien, para el cálculo preliminar de cantidad de mineral a preparar para las pruebas a escala piloto, se supuso en un comienzo una concentración de sólidos de 60% y una densidad del mineral de 2,7 t/m<sup>3</sup>. Dicho esto, el cálculo realizado arroja una cantidad de mineral mayor a la que se preparó para las pruebas (C<sub>p</sub> = 52,3% y densidad de mineral = 2,43 t/m<sup>3</sup>). Además, no se considera la recirculación de pulpa. En las Tablas 3, 4 y 5 se muestran estos cálculos preliminares.

Tabla 3: Datos preliminares pulpa.

<b>Densidad de la pulpa</b>	
C <sub>p</sub> [%]	60
$\rho_s$ [t/m <sup>3</sup> ]	2,700
$\rho_l$ [t/m <sup>3</sup> ]	1,000
$\rho_t$ [t/m <sup>3</sup> ]	1,607

Tabla 4: Cálculo preliminar de tonelaje.

<b>Caudal de entrada</b>	
Caudal [m <sup>3</sup> /s]	0,001
Cp [%]	60
Flujo Sólido [m <sup>3</sup> /s]	0,0006
Densidad sólido [t/m <sup>3</sup> ]	2,7
Flujo sólido [t/s]	0,00162
Flujo sólido [t/min]	0,0972
Ton 15 min operación	1,458

Tabla 5: Cálculo preliminar del volumen de pulpa.

<b>Volumen de pulpa para 15 minutos de operación</b>	
Celda Cilindro	
Ton mineral [t]	1,458
Ton agua [t]	0,972
Cp [%]	60
Masa pulpa [t]	2,43
Volumen pulpa [m <sup>3</sup> ]	1,512

Una vez realizados estos cálculos la siguiente tarea fue preparar el mineral para las pruebas, llevarlo desde un tamaño promedio sobre los 20  $\mu\text{m}$  hasta un  $P_{80}$  promedio de 150  $\mu\text{m}$ . Las labores de chancado y molienda se hicieron en el laboratorio de procesamiento de minerales, tarea que duró alrededor de dos semanas debido a la capacidad de los equipos.

Finalmente, el tonelaje total molido fue de 1014 kg, el cual resultó suficiente debido a la recirculación, la disminución del porcentaje de sólidos impuesto en los cálculos y la disminución de la densidad del mineral inicialmente asumida. Los equipos utilizados fueron chancadores, molino de bolas, harnero vibratorio, balanza, mallas ASTM, palas. La mayoría de estos equipos se ilustran en ANEXOS, A.1.

### 3.1.2 Pruebas de flotación a escala de laboratorio

Las pruebas de flotación *batch* se hicieron en el Laboratorio de Procesamiento de Minerales. Los aditivos utilizados fueron los siguientes:

- Colector: Xantato, dosificación: 40 g/t.
- Espumante: Aerofroth 76E, dosificación: 30 g/t.
- Modificador:  $KOH^-$ , dosificación: 1073 g/t.

Es importante destacar que este mineral presentaba muchos carbonatos, por lo tanto, se requería de un modificador de pH adecuado para la realización de las pruebas a escala piloto y de laboratorio. Se decidió entonces utilizar  $KOH^-$  para modificar el pH.

Se realizó 4 pruebas. Dos pruebas en el primer día, a Cp 30 y 50%, y otras dos pruebas al día siguiente, vale decir, 24 h después, también a Cp 30 y 50 %. Las pruebas que se realizaron el primer día se hicieron utilizando pulpas frescas mientras que las realizadas al segundo día fueron hechas utilizando dos pulpas agitadas previamente durante 24 h a 400 rpm.

Esta distribución temporal de las pruebas se debe a que las pruebas a escala piloto se realizaron durante dos días seguidos, el primer día con pulpa fresca en el estanque agitado y el segundo día con pulpa agitada previamente en el estanque durante 24 h a una velocidad semejante a la del laboratorio. La razón de mantener la pulpa agitada es evitar que los sólidos decanten en el fondo del estanque, más aún cuando se tiene un alto porcentaje de sólidos.

La información relativa a masa de mineral, agua y reactivos, así como la densidad de la pulpa, agitación durante el acondicionamiento y durante la operación, pH y agua de reposición se muestran en las Tablas 6, 7, 8, 9, 10 y 11.

Tabla 6: Mineral total pruebas de flotación escala laboratorio.

<b>Cálculo mineral necesario pruebas</b>	
Masa mineral total [g]	2789,2
Densidad mineral [g]	2,43
Agua para pulpa [mL]	4052,2
Agua de reposición [mL]	4000,0
Densidad agua [g/mL]	1
Densidad pulpa para Cp 50% [g/mL]	1,42
Densidad pulpa para Cp 30% [g/mL]	1,21
Peso promedio pellet KOH [g]	0,2137
Número de pellets total pruebas	14
Flujo de aire, común para todas las pruebas [L/min]	10

Tabla 7: Aditivos, total pruebas de flotación laboratorio.

<b>Total pruebas</b>	
Colector: Xantato [mL]	73,304
Espumante: Aerofroth 76E [μL]	282,9
Modificador: KOH [g]	2,9918



Tabla 8: Condiciones operacionales, P1, flotación laboratorio.

<b>Prueba 1</b>	
Cp [%]	50%
Muestra [g]	921
Agua [mL]	921
Agua de reposición [mL]	1000
Pulpa de alimentación [g]	1842
Pulpa de alimentación [mL]	1300
Densidad de la pulpa [g/mL]	1,42
Xantato [g]	0,037
Xantato [ $\mu$ L]	24,2
Aerofroth 76E[g]	0,078
Aerofroth 76E [ $\mu$ L]	77,4
Número de pellets de KOH	3
KOH [g]	0,641
Tiempo de acondicionamiento [min]	5
Agitación acondicionamiento [rpm]	600
pH acondicionamiento	10
Tiempo prueba [min]	17
Agitación [rpm]	700
pH	10
Aerofroth 76E en agua de reposición [ $\mu$ L]	84,0

Tabla 9: Condiciones operacionales, P2, flotación laboratorio.

<b>Prueba 2</b>	
Cp [%]	30%
Muestra [g]	474
Agua [mL]	1105
Agua de reposición [mL]	1000
Pulpa de alimentación [g]	1579
Pulpa de alimentación [mL]	1300
Densidad de la pulpa [g/mL]	1,21
Xantato [g]	0,019
Xantato [ $\mu$ L]	12,4
Aerofroth 76E [g]	0,065
Aerofroth 76E [ $\mu$ L]	64,1
Número de pellets de KOH	3
KOH [g]	0,641
Tiempo de acondicionamiento [min]	5
Agitación acondicionamiento [rpm]	600
pH acondicionamiento	10
Tiempo prueba [min]	17
Agitación [rpm}	700
pH	10
Aerofroth 76E en agua de reposición [ $\mu$ L]	58,0

Tabla 10: Condiciones operacionales, P3, flotación laboratorio.

<b>Prueba 3 (Post 24 h agitación a 400 [rpm])</b>	
Cp [%]	50%
Muestra [g]	921
Agua [mL]	921
Agua de reposición [mL]	1000
Pulpa de alimentación [g]	1842
Pulpa de alimentación [mL]	1300
Densidad de la pulpa [g/mL]	1,42
Xantato [g]	0,037
Xantato [ $\mu$ L]	24,2
Aerofroth 76E [g]	0,078
Aerofroth 76E [ $\mu$ L]	77,4
Número de pellets de KOH	4
KOH [g]	0,855
Tiempo de acondicionamiento [min]	5
Agitación acondicionamiento [rpm]	600
pH acondicionamiento	10
Tiempo prueba [min]	17
Agitación [rpm}	700
pH	10
Aerofroth 76E en agua de reposición [ $\mu$ L]	84,0

Tabla 11: Condiciones operacionales, P4, flotación laboratorio.

<b>Prueba 4 (Post 24 h agitación a 400 [rpm])</b>	
Cp [%]	30%
Muestra [g]	474
Agua [mL]	1105
Agua de reposición [mL]	1000
Pulpa de alimentación [g]	1579
Pulpa de alimentación [mL]	1300
Densidad de la pulpa [g/mL]	1,21
Xantato [g]	0,019
Xantato [ $\mu$ L]	12,4
Aerofroth 76E [g]	0,065
Aerofroth 76E [ $\mu$ L]	64,1
Número de pellets de KOH	4
KOH [g]	0,855
Tiempo de acondicionamiento [min]	5
Agitación acondicionamiento [rpm]	600
pH acondicionamiento	10
Tiempo prueba [min]	17
Agitación [rpm}	700
pH	10
Aerofroth 76E en agua de reposición [ $\mu$ L]	58,0

Los requerimientos teóricos de colector, espumante y modificador, para cada prueba se muestran en ANEXOS, A.2.

Finalmente, la razón por la cual se aumenta el porcentaje de sólidos de 30 a 50% es para estudiar los cambios en la eficiencia de la flotación convencional al variar el porcentaje de sólidos de una pulpa.

### **3.1.3 Cálculo y medición de campo magnético**

En seguida se muestran las actividades realizadas para calcular y medir el campo magnético para solenoide e imán permanente, respectivamente.

#### **i. Cálculo de campo magnético generado por solenoide**

Los solenoides utilizados en las pruebas a escala piloto se muestran en las Ilustraciones 7, 8 y 9.



Ilustración 7: Solenoide en celda cilíndrica.



Ilustración 8: Solenoide en celda cónica orientada de  $d$  a  $2d$ .



Ilustración 9: Solenoide en celda cónica orientada de  $2d$  a  $d$ .

En este caso, el solenoide se forma utilizando alambre de cobre forrado, el cual se enrolla a lo largo de la segunda mitad de la celda. Luego, se conecta un extremo del alambre al positivo de una fuente de poder y el otro extremo se conectó al negativo. Al encender la fuente la corriente circula por el alambre generándose un campo magnético orientado hacia la salida de la pulpa, para todas las celdas.

La primera celda es cilíndrica, con un diámetro constante  $d$ . La celda cónica tiene un diámetro variable, el menor es  $d$  y el mayor es  $2d$ . Luego, la cantidad de vueltas del alambre o espiras depende de qué celda se utilice.

Ahora bien, se calculó el máximo campo magnético que se podría generar teóricamente por el solenoide utilizado en la prueba SA2 y CA2. Para calcular este campo magnético se utilizó la Ecuación 25:

$$B = \frac{N * \mu * I}{L}$$

Ecuación 25: Campo generado dentro de un solenoide.

donde

B: campo magnético generado [T].

$\mu$ : permeabilidad [N/A<sup>2</sup>].

N: número de espiras [-].

I: intensidad de corriente [A].

L: longitud [m]

Para calcular la permeabilidad se debe ocupar la fórmula que se muestra en la Ecuación 26:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_o}$$

Ecuación 26: Permeabilidad.

donde

$\mu_r$ : permeabilidad relativa S.I. [-].

$\mu$ : permeabilidad del vacío [N/A<sup>2</sup>].

Los resultados del cálculo de estos campos magnéticos teóricos ante ambas situaciones se muestran en la sección Resultados y Discusión, en la subsección 4.1.3. Es importante destacar que este cálculo se realizó para tener una referencia con respecto a lo medido en las pruebas piloto.

Por último, dicho cálculo del campo B se entrega también en Gauss ya que el instrumento de medición utilizado en las pruebas piloto fue un Gaussímetro, el cual entrega los valores en la unidad antes mencionada.

## **ii. Apantallamiento de campo magnético generado por imán permanente**

Se utilizó un imán permanente de neodimio de 3000 Gauss teóricos, con forma de disco, como el que se muestra en la Ilustración 10.



Ilustración 10: Imán permanente de neodimio en forma de disco.

En la Figura 25 se muestra un esquema de la magnetización con la que cuentan este tipo de imanes:

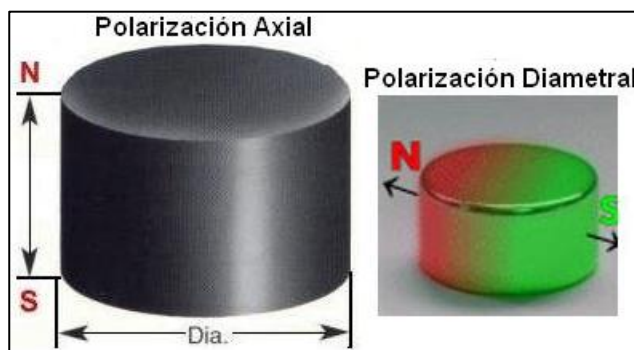


Figura 25: Polarización discos de neodimio.

Se observa que estos discos magnetizan tanto en el eje axial como diametralmente. Luego, para las pruebas realizadas se midió el campo magnético generado en la dirección del diámetro del disco.

Para llevar a cabo la primera prueba se mide primero el campo magnético lo más cerca posible del imán. Luego, se puso un recipiente entre el imán y el Gaussímetro. Después se hicieron mediciones de la intensidad del campo magnético dentro del recipiente cada 5 cm.

Para la segunda prueba, se incorporó pulpa con un  $C_p = 50\%$  y mineral preparado para las pruebas piloto.

De esta manera, se obtuvo mediciones de decaimiento del campo magnético generado por este imán, cuando el medio que atraviesa es aire y pulpa.

### 3.2 Actividades a escala piloto

Una vez molido el mineral, se transportó en sacos a las dependencias de la empresa Ingeniería y Construcciones Salas Hermanos Ltda. Allí lo que se hizo fue lo siguiente:

- Planificar el montaje de los equipos.

- Comprar los materiales necesarios para las conexiones: mangueras, abrazaderas.
- Acordar con los trabajadores de la empresa la realización de las pruebas y pedir su colaboración.
- Montar el circuito.
- Realizar las pruebas, primero con la celda cilíndrica y luego con la cónica.
- Desmontar los equipos y limpiar la zona de trabajo.

Para llevar a cabo las pruebas a escala piloto se requieren las dos celdas no convencionales: cilíndrica y cónica. También se necesita un estanque, una bomba, una fuente de poder, alambre de cobre, dos imanes permanentes de neodimio cilíndricos, mangueras y abrazaderas, un medidor de presión, un gaussímetro, un compresor y recipientes.

Para realizar las pruebas, primero se conectan los equipos utilizando las mangueras y abrazaderas. Se enrolla el alambre de cobre alrededor de la segunda mitad de la celda para formar el solenoide, mientras se mantiene agitada la pulpa en el estanque. Luego se enciende la bomba y se extrae la pulpa a través de una manguera que conecta la bomba con el estanque. Ésta última envía la pulpa a través de otra manguera hacia la celda que se esté utilizando en ese momento. Luego la pulpa egresa de la celda por las salidas axial y tangencial. Con los recipientes se extraen muestras de los flujos. Por las mangueras de salida axial y tangencial se recircula la pulpa hacia el estanque. Se inyecta aire utilizando el compresor, cuando sea requerido. La fuente de poder está conectada al solenoide y se enciende cuando se requiere campo magnético de baja intensidad. Cuando se necesita campo magnético de alta intensidad se utilizan los dos imanes permanentes de neodimio cilíndricos, los cuales se ubican en la segunda mitad de la celda, diametralmente opuestos.

A continuación, se describen las características de las celdas utilizadas, del estanque y las dosis de aditivos requeridas.

### **3.2.1 Celda cilíndrica**

Esta celda posee una entrada de pulpa tangencial y dos salidas de pulpa: axial y tangencial. El aire ingresa axialmente por la celda, a través de orificios equidistantes distribuidos circunferencialmente. El diámetro de la celda es  $d$ .

En seguida, en la Tabla 12 se muestran los datos relacionados tanto con las dimensiones de la celda cilíndrica como los datos que tienen que ver con la operación de ésta en la prueba piloto.



Tabla 12: Datos celda cilíndrica.

<b>Datos celda cilíndrica</b>	
Diámetro interno [m]	0,1
Área transversal [m <sup>2</sup> ]	0,008
Largo [m]	0,5
Volumen cilindro [m <sup>3</sup> ]	0,004
Volumen cilindro [L]	3,927
Diámetro entrada [m]	0,028
Área transversal entrada [m <sup>2</sup> ]	0,001
Velocidad de ingreso pulpa [m/s]	1,624
Caudal de alimentación [m <sup>3</sup> /s]	0,001
Caudal de alimentación [L/s]	1
Tiempo de residencia [s]	3,927
Número de veces de que pasa por la celda	259,3
Tiempo de prueba [s]	1018
Tiempo de prueba [min]	17

El flujo de aire necesario para generar un Jg de 1 cm/s se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13: Jg, celda cilíndrica.

<b>Jg</b>	
<i>Celda cilíndrica</i>	
Área transversal [m <sup>2</sup> ]	$7,85 * 10^{-3}$
Área transversal [cm <sup>2</sup> ]	78,54
Flujo de gas [cm <sup>3</sup> /s]	78,54
Flujo de gas [L/min]	4,71
Jg [cm/s]	1

Por último, se muestra esta celda en operación en la Ilustración 11.



Ilustración 11: Celda cilíndrica.

### 3.2.2 Celda cónica

Esta celda posee una entrada de pulpa tangencial y dos salidas de pulpa: axial y tangencial. El aire ingresa axialmente por la celda, a través de orificios equidistantes distribuidos circunferencialmente.

Para la celda cónica los datos relacionados tanto con las dimensiones de la celda como los datos que tienen que ver con la operación de ésta en la prueba piloto se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14: Datos celda cónica.

<b>Datos celda cónica</b>	
Diámetro menor (entrada) [m]	0,1
Diámetro mayor (salida) [m]	0,2
Largo [m]	0,5
Volumen cono truncado [m <sup>3</sup> ]	0,009
Volumen cono truncado [L]	9,163
Diámetro entrada [m]	0,035
Área transversal entrada [m <sup>2</sup> ]	0,001
Velocidad de ingreso pulpa [m/s]	1,039
Caudal de alimentación [m <sup>3</sup> /s]	0,001
Caudal de alimentación [L/s]	1
Tiempo de residencia [s]	9,163
Número de veces de que pasa por la celda	111,1
Tiempo de prueba [s]	1018
Tiempo de prueba [min]	17

Así como en el caso anterior, el flujo de aire necesario para generar un  $J_g$  de 1 [cm/s] se muestra en la Tabla 15.

Tabla 15:  $J_g$ , celda cónica.

<b><math>J_g</math></b>	
<i>Celda cónica</i>	
Área transversal promedio [m <sup>2</sup> ]	$1,96 * 10^{-2}$
Área transversal promedio [cm <sup>2</sup> ]	196,35
Flujo de gas [cm <sup>3</sup> /s]	196,35
Flujo de gas [L/min]	11,78
$J_g$ [cm/s]	1

Esta celda se orienta de dos maneras: una donde el ingreso de la pulpa se hace por el lado cuyo diámetro es mayor, específicamente el doble del diámetro del otro lado, es decir de  $2d$  a  $d$ ; y otra orientación, donde la pulpa ingresa por el lado de diámetro menor, o sea, de  $d$  a  $2d$ .

En la Ilustración 12 se muestra esta celda dispuesta de 2d a d, mientras que en la Ilustración 13 se muestra operando bajo la orientación d a 2d.



Ilustración 12: Celda cónica, de 2d a d.



Ilustración 13: Celda cónica, de d a 2d.

### 3.2.3 Pulpa y estanque agitado

Para calcular la cantidad de mineral a utilizar, de los 1014 kg molidos, se utilizó las Ecuaciones 27, 28 y 29.

$$V_s = \frac{M_s}{\rho_s}$$

Ecuación 27: Volumen de sólido.

$$V_l = \frac{M_l}{\rho_l}$$

Ecuación 28: Volumen de líquido.

$$\rho_t = \frac{\rho_s * \rho_l}{(1 - C_p) * \rho_l + C_p * \rho_s}$$

Ecuación 29: Densidad de pulpa.

Lo que se hizo fue buscar, con el Software *Solver*, la cantidad de mineral y de agua cuyo volumen conjunto fuese 1,1 [m<sup>3</sup>], volumen que se impuso debido a un margen de seguridad con respecto al volumen total del estanque. Lo que también fue impuesto es el Cp, cuyo valor fue 53%.

A continuación, en la Tabla 16 se muestra la cantidad de mineral y agua que fueron agregadas, la cantidad de pulpa generada, la concentración en peso de los sólidos como también el volumen de pulpa y su densidad.

Tabla 16: Masa de mineral y volumen de pulpa para pruebas piloto.

<b>Cálculo masa de mineral a agregar y volumen de pulpa efectivo</b>			
Dato	Teórico	Real	Real con volumen efectivo (-10%)
Cp [%]	53,0%	52,3%	52,3%
Volumen de agua [m <sup>3</sup> ]	0,751	0,780	0,702
Densidad de agua [t/m <sup>3</sup> ]	1,000	1,000	1,000
Masa de agua [t]	0,751	0,780	0,702
Densidad mineral [t/m <sup>3</sup> ]	2,430	2,430	2,430
Masa de mineral [t]	0,847	0,854	0,769
Volumen de mineral [m <sup>3</sup> ]	0,349	0,351	0,316
Volumen de pulpa [m <sup>3</sup> ]	1,100	1,131	1,018
Densidad de pulpa [t/m <sup>3</sup> ]	1,453	1,444	1,444
Masa de pulpa [t]	1,599	1,634	1,471

Es importante destacar que los datos calculados difieren de los reales efectivos ya que en estos últimos se considera el volumen efectivo del estanque, luego el Cp efectivo fue 52,3%.

En seguida en la Tabla 17 se muestran los datos del estanque como el requerimiento de la altura de agua y de pulpa.

Tabla 17: Datos estanque pruebas piloto.

<b>Datos Estanque</b>	
Altura [m]	1,600
Diámetro [m]	1,000
Área sección [m <sup>2</sup> ]	0,785
Volumen estanque [m <sup>3</sup> ]	1,257
Altura requerida pulpa[m]	1,401
Altura requerida agua [m]	0,957

### 3.2.4 Aditivos

A continuación, en la Tabla 18 se muestran las dosis de espumante Aerofroth 76E y de colector Xantato utilizadas.

Tabla 18: Aditivos y sus dosis.

Especificaciones aditivos	
Dosificación espumante para 1 ton [mL/t]	55,56
Dosificación espumante para 0,769 ton [mL/t]	42,70
Dosificación colector para 1 ton [g/t]	20
Dosificación colector para 0,769 ton [g/t]	15,37

El modificador  $KOH^-$  se fue agregando paulatinamente a medida que el pH descendía hasta llegar a un pH en el rango [9 - 10].

### 3.2.5 Operación de celdas a escala piloto

Se realizan las pruebas con la celda cilíndrica, luego con la cónica, primero orientada de 2d a d y luego orientada de d a 2d.

En la operación de las celdas se varía la inyección de aire y la intensidad del campo magnético: sin campo, campo bajo (solenoides) y campo alto (imanes permanentes de neodimio).

En la Tabla 19 se muestra un resumen de las condiciones operacionales:

Tabla 19: Condiciones operacionales, pruebas piloto.

Condiciones operacionales		
Inyección de aire	Campo magnético	Nombre condición o caso
Sin aire (SA)	Sin campo (1)	SA1
	Con campo bajo (2)	SA2
	Con campo alto (3)	SA3
Con aire (CA)	Sin campo (1)	CA1
	Con campo bajo (2)	CA2
	Con campo alto (3)	CA3

Luego, según la tabla anterior, se tienen seis condiciones operacionales.

A continuación, en la Figura 26 se muestra un esquema de las zonas de la celda cilíndrica. Para la celda cónica es similar.

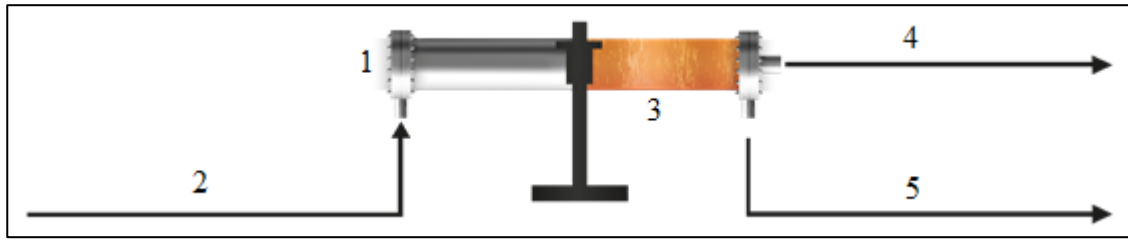


Figura 26: Esquema celda.

Donde

- 1: Zona de ingreso de aire a presión.
- 2: Flujo de alimentación.
- 3: Zona de ubicación de solenoide o de imanes permanentes.
- 4: Flujo de salida axial.
- 5: Flujo de salida tangencial.

El aire se inyecta por ductos que se encuentran uniformemente distribuidos, en el lado donde ingresa la pulpa (1).

El campo magnético es aplicado a la mitad del tramo posterior al soporte de la celda, es decir, al lado donde están las salidas de la pulpa (3).

Las dos primeras condiciones consisten en hacer circular la pulpa sin generar campo magnético, primero sin inyectar aire y luego, con inyección de aire.

En las dos siguientes condiciones se suministra una corriente al solenoide de 13 A, para generar el campo magnético, primero sin inyectar aire y luego inyectando aire. Este campo se mide con el Gaussímetro.

Por último, en las dos últimas condiciones se quita el solenoide y se ubican los imanes permanentes de neodimio de alta intensidad (10.000 Gauss) diametralmente opuestos en (3), primero sin inyectar aire y posteriormente inyectando aire.

Los imanes permanentes cilíndricos utilizados tienen un largo de 20 cm aproximadamente. En la Ilustración 14 se muestra un par de estos imanes, semejantes a los utilizados en las pruebas piloto:



Ilustración 14: Imanes permanentes cilíndricos.

La disposición de estos imanes se muestra en la Figura 27:

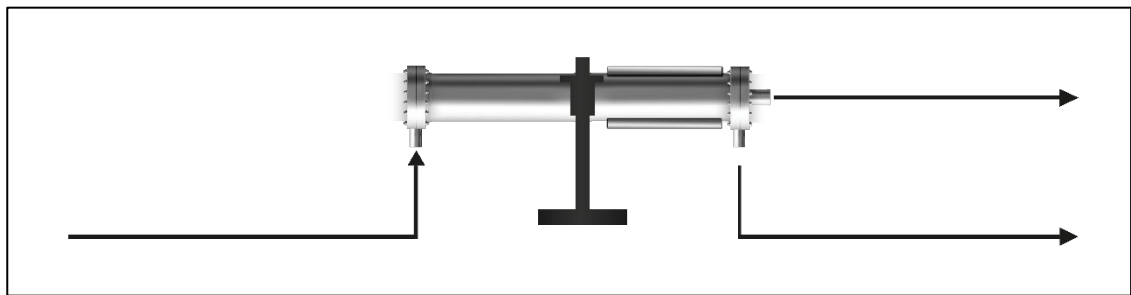


Figura 27: Disposición imanes permanentes en celda cilíndrica.

Esta disposición es similar para la celda cónica, diametralmente opuestos, en la mitad posterior de la celda.

Durante la operación de cada celda se tomaron muestras del flujo de alimentación, flujo de salida axial y flujo de salida tangencial. Es decir, 3 muestras para cada condición.

La notación para las muestras según condición se muestra en la Tabla 20.

Tabla 20: Notación muestras según condición.

Notación Muestras según condición					
Aire		Campo Magnético		Flujo	
SA	Sin Aire	1	Sin campo	Alim	Alimentación
CA	Con Aire	2	Solenoide	A	Axial
		3	Imanes	T	Tangencial

Se realizó el cálculo de los tiempos de muestreo, de manera que estos tiempos cumplen con los requerimientos de representatividad según la teoría de muestro. El tiempo total de operación para cada celda, de acuerdo con este cálculo, se fijó en 17 min. El cálculo de estos tiempos se muestra en ANEXOS, B.

Se midió los caudales de salida axial y tangencial, así como los flujos y presiones de aire a la entrada de la celda. El detalle de estas mediciones se encuentra en ANEXOS, B.1, B.2 y B.3.

Las pruebas para la celda cilíndrica se realizan en el primer día de pruebas a escala piloto, mientras que en el segundo día se realizan las pruebas con la celda cónica. Con el fin de evitar que el sólido (52,3%) decante en el estanque entre una jornada y otra se mantiene agitada la pulpa durante estas 24 horas aproximadamente.

### 3.3 Reconciliación de datos

La reconciliación de datos corresponde, de manera general, al ajuste que se aplica a los resultados obtenidos preliminarmente en pruebas, variando ciertos valores de confiabilidad aplicados a parámetros específicos, con el fin de que los balances máxicos y metalúrgicos que gobiernan el proceso cierren correctamente.

A continuación, se exponen los pasos a seguir para realizar la reconciliación:

Lo primero es plantear las ecuaciones de balance máxico y metalúrgico a utilizar. Se utiliza las Ecuaciones 30 y 31.

$$G_{sa} = G_{s \text{ axial}} + G_{s \text{ tangencial}}$$

Ecuación 30: Balance de flujos máxicos.

$$G_{sa} * L_a = G_{s \text{ axial}} * L_{axial} + G_{s \text{ tangencial}} * L_{tangencial}$$

Ecuación 31: Balance de Finos.

Donde

$G_{sa}$ : flujo de alimentación [kg/s].

$G_{s \text{ axial}}$ : flujo axial [kg/s].

$G_{s \text{ tangencial}}$ : flujo tangencial [kg/s].

$L_a$ : ley del flujo de alimentación [%].

$L_{axial}$ : ley del flujo axial [%].

$L_{tangencial}$ : ley del flujo tangencial [%].

Luego, se debe plantear la forma en cómo se ajustarán los datos. Se tiene que ordenar las variables que participan en el balance. Para el caso de las pruebas piloto, las variables son:  $G_{sa}$ ,  $G_{s \text{ axial}}$ ,  $G_{s \text{ tangencial}}$ ,  $L_a$ ,  $L_{axial}$  y  $L_{tangencial}$ .



Cada una de estas variables es medida durante cada prueba realizada. Como son seis pruebas, SA1, SA2, SA3, CA1, CA2, CA3, entonces se tienen seis valores experimentales por variable. Estos valores son de entrada. En la Tabla 21 se muestra un ejemplo:

Tabla 21: Ejemplo valores por caso para cada variable.

Variable		Experimental
Flujo de alimentación [kg/s]	SA 1	0,7548
	SA 2	0,7548
	SA 3	0,7548
	CA 1	0,7548
	CA 2	0,7548
	CA 3	0,7548

Es importante destacar que el valor de medición para el flujo másico de alimentación se considera constante debido a que la pulpa es impulsada a través de una bomba, como se mencionó anteriormente.

Para continuar, se deja en la siguiente columna los valores ajustados para cada variable. Inicialmente estos son iguales a los experimentales, sin embargo, dichos valores serán los que variarán al realizar el algoritmo de reconciliación.

En seguida, para la siguiente columna se establece un factor de confiabilidad, el cual está dentro de [0-1]. Este factor de confiabilidad lo que busca es expresar cuán fiable es el valor obtenido experimentalmente, desde el punto de vista de la rigurosidad en el proceso de la toma de muestras, representatividad de éstas, seguimiento de protocolos de muestreo, etc.

Entonces, de acuerdo con la realización de las pruebas, en la Tabla 22 se muestran los valores establecidos para las variables, independiente del caso.

Tabla 22: Factor de confiabilidad.

Variable	F confiabilidad
Flujo de alimentación	0,9
Ley del flujo de alimentación	0,5
Ley del flujo axial	0,5
Ley del flujo tangencial	0,7
Flujo axial	0,001
Flujo tangencial	0,01

La confiabilidad de 0,9 para el flujo de alimentación se debe a que la pulpa se alimenta a través de una bomba y, por tanto, el caudal de alimentación es relativamente constante.

Para la ley del flujo de alimentación y la ley del flujo axial la confiabilidad de 0,5 se debe a que estos flujos eran altos en comparación al flujo tangencial y si bien los procedimientos de toma de muestras pueden ser correctos, al ser grandes caudales la representatividad de las muestras extraídas no es alta.

La ley del flujo tangencial tiene una confiabilidad de 0,7 debido a que, como se dijo, el flujo es menor en esta salida y, por tanto, se obtienen muestras más representativas.

Por otra parte, medir los flujos de salida con precisión es sumamente difícil, luego se tiene la confiabilidad del flujo axial es muy baja, de 0,001 mientras que la confiabilidad del flujo tangencial es un poco más alta que la del anterior, de 0,01; lo cual se debe a que en la salida tangencial el caudal es menor al de la salida axial.

Luego, se utilizará un parámetro que arroja el error entre el valor experimental y el ajustado, para cada variable y caso  $i$ . Este parámetro estará compuesto por el factor de confiabilidad y la diferencia cuadrática entre el valor experimental y el valor ajustado, se le llamará error por confiabilidad y se calcula como se muestra en la Ecuación 32:

$$Error\ por\ confiabilidad_i = F\ confiabilidad_i * (exp - ajust)_i^2$$

Ecuación 32: Error por confiabilidad.

donde

$F\ confiabilidad$ : factor de confiabilidad.

$exp$ : valor experimental.

$ajust$ : valor ajustado

Entonces, para cada variable se debe tener inicialmente una tabla como la Tabla 23.

Tabla 23: Ejemplo distribución parámetros reconciliación. F confiabilidad para todos los casos es 0,5 y el error por confiabilidad para todos los casos es 0.

Variable	Experimental	Ajustado	F confiabilidad	F confiabilidad * $(exp - ajust)^2$
Ley del flujo de alimentación [%]	SA 1	1,61	0,5	0
	SA 2	1,70		
	SA 3	1,65		
	CA 1	1,66		
	CA 2	1,66		
	CA 3	1,66		

A la suma de todos estos errores por confiabilidad se le llamará **Suma 1** y está asociada solamente al aspecto de confianza en la toma de muestras y rigurosidad en la realización de las pruebas llevas a cabo. Su cálculo se muestra en la Ecuación 33.

$$Suma 1 = \sum Error \text{ por confiabilidad}_i$$

Ecuación 33: Suma 1, errores por confiabilidad.

Ahora bien, se introducirán dos parámetros, uno que arroje el error asociado al balance másico  $B_{m\acute{a}s}$  y otro asociado al balance metalúrgico  $B_{Cu}$ . De manera tal que para cada condición  $i$  se obtengan dos errores. Es importante decir que estos errores se calculan con los valores ajustados de las variables. El cálculo de éstos se muestra en las Ecuaciones 34 y 35.

$$Error \text{ por } B_{m\acute{a}s}_i = \left( Gsa_{ajus\ t_i} - Gsaxial_{ajus\ t_i} - Gstangencial_{ajust\ i} \right)^2$$

Ecuación 34: Error por balance másico.

$$Error \text{ por } B_{Cu}_i = \left( Gsa_{ajus\ t_i} * La_i - Gsaxial_{ajus\ t_i} * Laxial_{ajus\ t_i} - Gstangencial_{ajust\ i} * Ltangencial_{ajust\ i} \right)^2$$

Ecuación 35: Error por balance metalúrgico.

Como en el caso anterior, se llamará **Suma 2** a la suma total de los errores, tanto por balance másico como por balance metalúrgico. El cálculo se muestra en la Ecuación 36.

$$Suma 2 = \sum (Error \text{ por } B_{m\acute{a}s}_i + Error \text{ por } B_{Cu}_i)$$

Ecuación 36: Suma 2, errores por balance másico y por balance metalúrgico.

Por último, se introduce un cuarto parámetro de error que corresponde a la suma ponderada de los errores antes especificados. Este factor de ponderación  $\Phi$  se establece de acuerdo con la importancia que tiene cada error para el ajuste de los valores experimentales, es decir, qué error pondera más, si el asociado a la confiabilidad del muestreo y realización de las pruebas o el asociado al balance másico y metalúrgico. De esta manera, se opta por darle un 30% de factor de ponderación  $\Phi$  al error por confiabilidad y un 70% al error por balance másico y metalúrgico, es decir, se prefiere que el balance cierre correctamente. El cálculo de este parámetro se realiza por simplicidad, utilizando las Sumas 1 y Suma 2, descritas anteriormente. Esto se muestra en la Ecuación 37.

$$Suma 3 = \Phi * Suma 1 + (1 - \Phi) * Suma 2$$

Ecuación 37: Suma 3, suma ponderada de los errores por confiabilidad y por balances.

Hecho todo lo anterior, se procede a ejecutar la herramienta *Solver* del software *Microsoft Excel*. En esta herramienta, se elige como celda objetivo la celda donde se ubica el valor de Suma 3, se desea minimizar este valor tomando como variables los valores experimentales. La restricción es que los valores ajustados a obtener deben ser mayores que cero.

### 3.4 Método alternativo de reconciliación de datos

Otro procedimiento para realizar la reconciliación de datos para el balance de masas es utilizar la información de ley de cobre y de flujo en las salidas de la celda. Para ello es necesario ajustar los datos experimentales mediante una minimización en varias variables, como se muestra en la Ecuación 38, donde la función objetivo está dada por la expresión correspondiente a la recuperación másica.

$$\text{mín } \frac{C}{C+T} - \frac{f-t}{c-t}$$

Ecuación 38: Función objetivo, reconciliación de datos alternativa.

Donde

$C$ : flujo de concentrado [kg/s].

$T$ : flujo de relave [kg/s].

$f$ : ley del flujo de alimentación [%].

$t$ : ley del flujo de relave [%].

$c$ : ley del flujo de concentrado [%].

De acuerdo con las definiciones anteriores, se tiene que  $C + T$  equivale al flujo de alimentación por balance de masa en la celda.

La recirculación de concentrado y relave al estanque agitado puede generar que al mezclarse estos flujos el concentrado quede en la parte superior de la celda al existir burbujas o que la mezcla no sea la más adecuada. Esto afecta a la ley del flujo de alimentación, por tanto, se decide no confiar en estos datos y reconstruir esta ley a partir de las leyes de los flujos de concentrado y de relave.

Para reconciliar los datos se considera como la información más confiable los datos obtenidos para el flujo de concentrado debido a que es posible medirlo con mayor exactitud mientras que para las leyes se otorga mayor confianza a los datos obtenidos para la ley de relave por presentar la mayor estabilidad en todos los casos, con una desviación estándar de 0,01% para los experimentos con la celda cilíndrica, 0,07% en el caso de la celda cónica orientada de  $d$  a  $2d$  y 0,01% cuando la celda cónica se orienta de  $2d$  a  $d$ . Con lo anterior, se recalcula el flujo de relave, la ley del flujo de alimentación y la ley del flujo de concentrado. Como restricciones, se impone lo indicado en las Ecuaciones 39, 40, 41 y 42.

$$T \geq C$$

Ecuación 39: Restricción 1, flujo de relave mayor o igual a flujo de concentrado.

$$f > t$$

Ecuación 40: Restricción 2, ley del flujo de alimentación mayor a ley del flujo de relave.

$$c > f$$

Ecuación 41: Restricción 3, ley del flujo de concentrado mayor a ley del flujo de alimentación.

$$c > t$$

Ecuación 42: Restricción 4, ley del flujo de concentrado mayor a ley del flujo de relave.

La Ecuación 39 representa lo observado experimentalmente para el comportamiento de los caudales de salida y las Ecuaciones 41, 41y 42 representan el comportamiento habitual de las leyes de material valioso en los procesos de concentración.

## 4. Resultados y Discusión

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de acuerdo con el orden de actividades presentado en la sección Metodología.

### 4.1 Pruebas a escala de laboratorio

Para comenzar, se muestran los resultados de las pruebas de laboratorio en base a análisis químicos de las muestras, así como los resultados del cálculo referencial del campo magnético generado por un solenoide para distintas condiciones.

#### 4.1.1 Prueba preliminar de flotación con mineral piloto

A continuación, en la Tabla 24 se muestran los resultados de la prueba preliminar de flotación realizada al mineral utilizado en las pruebas piloto.

Tabla 24: Prueba preliminar flotación mineral utilizado.

<b>Análisis preliminar</b>			
Muestra	Cu [%]	Tiempo [min]	Factor de enriquecimiento, FE
Alimentación	1,13	-	-
C4	7,44	4	6,58
C8	1,8	8	1,59
D4	3,66	4	3,24
D8	1,2	8	1,06

Las letras C y D se refieren a compósito y compósito deslamado, respectivamente. Los números corresponden al tiempo de toma de la muestra. Se puede apreciar que al operar con una pulpa deslamada el factor de enriquecimiento disminuye, lo que hace suponer que estas partículas tienden a flotar y así aumentar la ley del concentrado, como ocurre con el compósito 1. Tanto para las muestras obtenidas a los 4 y 8 min la ley de Cu es mayor en el caso de pulpa sin deslamar.

Esta prueba sirvió para corroborar que el mineral a utilizar era apto para las pruebas de pilotaje, mientras se controlara el pH de la pulpa, ya que los carbonatos presentes en ésta provocaban un alza de pH, el cual descendió al aplicar KOH a la solución.

#### 4.1.2 Pruebas de flotación con mineral piloto

En seguida, en las Tablas 25, 26, 27 y 28 se muestran los resultados de las cuatro pruebas de flotación, según se describió en la sección Metodología. La ley de alimentación promedio es 1,66%.

Tabla 25: Prueba 1 flotación a  $C_p = 50\%$ , pulpa fresca.

<b>Muestras concentrado P1</b>						
Tiempo [min]	Peso seco [g]	Ley Cu [%]	Rec Met [%]	Rec Más [%]	FE	Rec Met Acum [%]
0	0	0	0	0	0	0
4	56,7	2,88	10,70	6,16	1,74	10,70
8	293,9	2,71	52,20	31,91	1,64	62,90
16	82,7	1,52	8,24	8,98	0,92	71,14

Tabla 26: Prueba 2 flotación a  $C_p = 30\%$ , pulpa fresca.

<b>Muestras concentrado P2</b>						
Tiempo [min]	Peso seco [g]	Ley Cu [%]	Rec Met [%]	Rec Más [%]	FE	Rec Met Acum [%]
0	0	0	0	0	0	0
4	80,2	4,13	42,21	16,93	2,49	42,21
8	39,7	3,55	17,96	8,38	2,14	60,18
16	68,3	1,42	12,36	14,42	0,86	72,54

Tabla 27: Prueba 3 flotación a  $C_p = 50\%$ , pulpa agitada 24 h.

<b>Muestras concentrado P3</b>						
Tiempo [min]	Peso seco [g]	Ley Cu [%]	Rec Met [%]	Rec Más [%]	FE	Rec Met Acum [%]
0	0	0	0	0	0	0
4	57,9	11,92	45,23	6,29	7,20	45,23
8	162,7	2,05	21,86	17,67	1,24	67,09
16	210,5	0,688	9,49	22,86	0,42	76,59

Tabla 28: Prueba 4 flotación a  $C_p = 30\%$ , pulpa agitada 24 h.

<b>Muestras concentrado P4</b>						
Tiempo [min]	Peso seco [g]	Ley Cu [%]	Rec Met [%]	Rec Más [%]	FE	Rec Met Acum [%]
0	0	0	0	0	0	0
4	151,2	3,66	70,53	31,92	2,21	70,53
8	42,7	0,876	4,77	9,02	0,53	75,30
16	30,7	0,58	2,27	6,48	0,35	77,57

A continuación, en la Figura 28 se grafican las curvas de recuperación acumulada en función del tiempo, para las 4 pruebas realizadas.

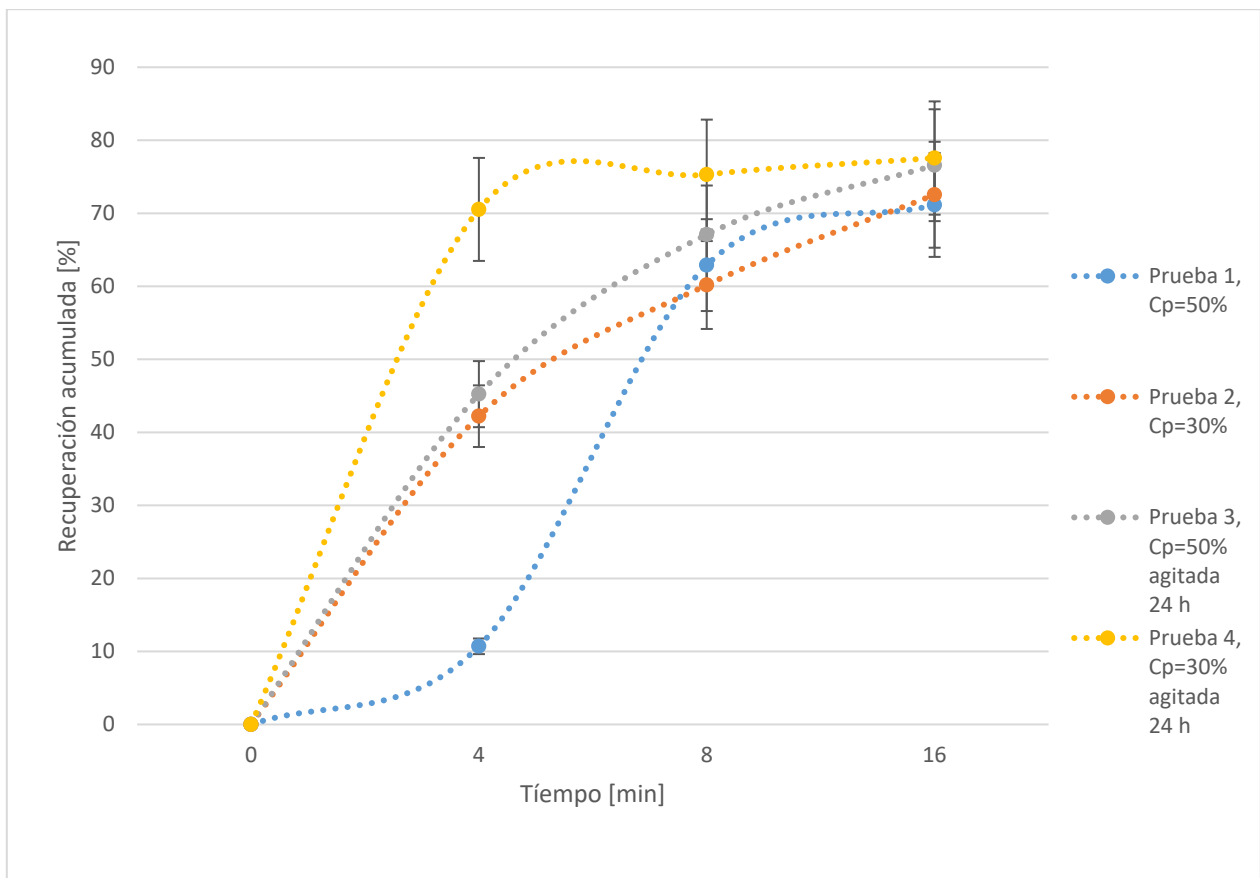


Figura 28: Recuperación acumulada vs tiempo, pruebas flotación laboratorio.

De acuerdo con la Tablas 25, 26, 27, 28 y la Figura 28, se puede apreciar que las recuperaciones acumuladas son mayores al trabajar con una concentración en sólidos del 30%, P2 y P4, en comparación con las flotaciones realizadas al 50%, P1 y P3, respectivamente. Esto demuestra nuevamente que al aumentar la concentración de sólidos sobre 30%, bajo las condiciones en que se realizaron estas pruebas, la recuperación metalúrgica desciende, lo cual se debe en gran parte a una disminución en el contacto partícula-burbuja, esto para las partículas de interés. Otro fenómeno que ocurre es que al aumentar el porcentaje de sólidos la recuperación por arrastre aumenta, lo que disminuye la recuperación metalúrgica.

Ahora bien, se puede apreciar que ocurre otro fenómeno y es que para las pruebas realizadas con pulpa agitada 24 h previas a las pruebas, P3 y P4, las recuperaciones acumuladas son mayores que en las pruebas realizadas con pulpa fresca. Esto puede deberse a que, durante la agitación de la pulpa, la distribución espacial de las partículas provocada por esta agitación prolongada promueve un mayor contacto partícula-burbuja, de manera que más partículas gruesas entran en contacto con las burbujas.

Finalmente, el propósito de estas pruebas es demostrar la baja en la recuperación al aumenta la concentración de sólidos, además de comparar estos resultados con los obtenidos



en las pruebas a escala piloto. Se destaca que en ambos casos la recuperación acumulada converge a un mismo valor.

### 4.1.3 Cálculo de campo magnético generado por solenoide

En seguida, en la Tabla 29 se muestran los resultados obtenidos al calcular el campo teórico generado por un solenoide similar al utilizado en las pruebas piloto. Lo más importante es que las diferencias en los valores obtenidos se deben a que en teoría, para el largo efectivo de la mitad de la celda, es decir 19,8 cm, se pueden tener 220 espiras, sin embargo, experimentalmente se obtuvieron 170 o valores cercanos. Esta diferencia hace que en la práctica el campo generado se reduzca un 29%, para mismas intensidades de corriente.

Ahora bien, la intensidad de corriente que entrega la fuente de poder, 3,09 A, es mucho menor que con la que se trabajó en las pruebas piloto, 13 A. Esto hace provoca que el campo magnético aumente en un 321%, para un mismo número de espiras.

Luego, disminuyendo a 170 espiras y aumentando la intensidad de corriente a 13 A, el campo magnético es un 225% mayor. Más adelante, se comparará éste con el medido experimentalmente en las pruebas piloto.

Tabla 29: Campo magnético en solenoide.

<b>Campo magnético Solenoide Cobre</b>							
N	L [m]	$\mu_0$ [N/A <sup>2</sup> ]	$\mu_r$ [N/A <sup>2</sup> ]	$\mu$ S.I.	I [A]	B [T]	B [Gauss]
170	0,198	$1,257 * 10^{-6}$	1,000	$1,257 * 10^{-6}$	13,000	0,014	140,260
220	0,198	$1,257 * 10^{-6}$	1,000	$1,257 * 10^{-6}$	3,090	0,004	43,144

### 4.1.4 Apantallamiento de campo magnético de imán permanente

En seguida, en las Tablas 30 y 31 se muestran los resultados obtenidos para las pruebas de apantallamiento donde se utilizó un imán permanente en forma de disco.

Tabla 30: Apantallamiento en aire.

<b>Decaimiento campo magnético, a través de aire</b>	
Distancia del imán [cm]	[Gauss]
0, sin recipiente como pared	2142,5
0, con recipiente como pared	1465,5
Dentro de recipiente	
1	825,2
2	264,7
3	143,1
4	86,4
5	48,3
6	31,4

Tabla 31: Apantallamiento en pulpa.

<b>Decaimiento campo magnético, a través de pulpa, Cp=50%</b>	
Distancia del imán [cm]	[Gauss]
0, con recipiente como pared	1474,5
Dentro de recipiente	
1	335,4
2	253,7
3	118,2
4	64,8
5	41,5
6	27,1

Estos resultados son referenciales ya que los imanes permanentes utilizados en las pruebas de pilotaje eran del tipo cilíndrico y de mayor intensidad (10.000 Gauss cada uno).

## 4.2 Pruebas a escala piloto

A continuación, se muestran los resultados reconciliados obtenidos en las pruebas a escala piloto. Los resultados experimentales completos y gráficos referentes a dichos resultados experimentales se muestran en ANEXOS, B.1, B.2 y B.3.

Primero se analizarán según la celda utilizada, es decir, celda cilíndrica, celda cónica d a 2d y celda cónica 2d a d. Luego se compararán entre sí.

### 4.2.1 Prueba piloto con celda cilíndrica

A continuación, se muestran los resultados más relevantes obtenidos con la operación de la celda cilíndrica.

## i. Mediciones de campo magnético de solenoide

En la Tabla 32 se muestran mediciones del campo magnético del solenoide durante la operación de la celda cilíndrica.

Tabla 32: Campo medido solenoide, celda cilíndrica.

<b>Campo medido</b>	
En pared [Gauss]	92
A la entrada [Gauss]	6
En el centro [Gauss]	10

El número de espiras fue de 170. El valor máximo obtenido fue 92 Gauss. Comparando este valor obtenido en la pared con el máximo teórico calculado anteriormente se puede apreciar que éste no dista tanto, y su disminución puede deberse a que las espiras que conforman el solenoide no quedan perfectamente lisas, provocando una disminución de la intensidad de corriente efectiva.

## ii. Resultados reconciliados

Lo primero es mostrar los resultados obtenidos luego de la reconciliación. Estos resultados se obtuvieron asignando un valor de confiabilidad de 0,5 a la ley de alimentación. Este valor fue otorgado luego de un análisis de la rigurosidad del proceso de toma de muestras y se encuentra acorde a los valores de confiabilidad asignados para las demás variables. El error de esta reconciliación fue de 1,52%, lo cual es suficiente para ser aceptado.

Todas las tablas referentes al proceso de reconciliación de datos se encuentran en ANEXOS, B.4.

A continuación, en la Tabla 33 se muestran los resultados obtenidos para cada variable, según los casos:

SA1: sin inyección de aire y sin aplicación de campo magnético.

SA2: sin inyección de aire y con aplicación de campo magnético de baja intensidad (solenoide).

SA3: sin inyección de aire y con aplicación de campo magnético de alta intensidad (imanes permanentes de neodimio).

CA1: con inyección de aire y sin aplicación de campo magnético.

CA2: con inyección de aire y con aplicación de campo magnético de baja intensidad (solenoide).

CA3: con inyección de aire y con aplicación de campo magnético de alta intensidad (imanes permanentes de neodimio).

Tabla 33: Celda cilíndrica, resultados post reconciliación para cada variable, según caso.

<b>Celda cilíndrica</b>		
Variable		Valor
Flujo de alimentación [kg/s]	SA 1	0,755
	SA 2	0,755
	SA 3	0,755
	CA 1	0,755
	CA 2	0,755
	CA 3	0,755
Ley del flujo de alimentación [%]	SA 1	1,626
	SA 2	1,694
	SA 3	1,641
	CA 1	1,660
	CA 2	1,652
	CA 3	1,668
Ley del flujo axial [%]	SA 1	1,648
	SA 2	1,695
	SA 3	1,617
	CA 1	1,660
	CA 2	1,636
	CA 3	1,684
Ley del flujo tangencial [%]	SA 1	1,648
	SA 2	1,631
	SA 3	1,662
	CA 1	1,660
	CA 2	1,661
	CA 3	1,659
Flujo axial [kg/s]	SA 1	0,597
	SA 2	0,631
	SA 3	0,582
	CA 1	0,604
	CA 2	0,595
	CA 3	0,589
Flujo tangencial [kg/s]	SA 1	0,150
	SA 2	0,127
	SA 3	0,177
	CA 1	0,151
	CA 2	0,163
	CA 3	0,162

Los resultados reconciliados arrojan que las leyes del flujo axial son semejantes a las leyes del flujo tangencial y el flujo axial es mayor al flujo tangencial, en proporción 4:1. Cuando se elige el flujo axial como concentrado, la recuperación metalúrgica promedio es de 79,50%, la recuperación másica promedio es de 79,49% y el factor de enriquecimiento promedio es de 1,000. Mientras que cuando se elige el flujo tangencial como concentrado, la recuperación metalúrgica promedio es de 20,51%, la recuperación másica promedio es de 20,51% y el factor de enriquecimiento promedio es de 0,998.

Ahora bien, cuando la recuperación metalúrgica es del orden de la recuperación másica, no hay concentración, lo que se evidencia con los factores de enriquecimiento promedios, cercanos a 1.

Por otra parte, normalmente el concentrado rougher es menor en flujo que el relave, sin embargo, se decide tomar el flujo axial como concentrado sólo por el mayor factor de enriquecimiento promedio que se obtiene en comparación al obtenido cuando se considera el flujo tangencial como concentrado.

De acuerdo con lo anterior, las recuperaciones metalúrgicas, másicas y el factor de enriquecimiento se muestran en las 34, 35 y 36.

Tabla 34: Recuperación metalúrgica, celda cilíndrica.

Caso	Rec Met [%]
SA 1	80,226
SA 2	83,718
SA 3	76,094
CA 1	80,020
CA 2	78,117
CA 3	78,797

Tabla 35: Recuperación másica, celda cilíndrica.

Caso	Rec Más [%]
SA 1	79,159
SA 2	83,638
SA 3	77,187
CA 1	80,019
CA 2	78,887
CA 3	78,028

Tabla 36: Factor de enriquecimiento, celda cilíndrica.

Caso	FE
SA 1	1,013
SA 2	1,001
SA 3	0,986
CA 1	1,000
CA 2	0,990
CA 3	1,010

Inicialmente se realiza un análisis de sensibilidad con el fin de estudiar cuánto la incidencia de la ley de alimentación en la reconciliación de datos. Se elige la ley de alimentación como variable de estudio debido a que técnicamente no es posible acceder a todas las zonas del estanque agitado, lo cual puede afectar la representatividad de las muestras.

### **iii. Análisis de sensibilidad al variar confiabilidad de ley de alimentación**

La confiabilidad otorgada a la ley de alimentación toma 5 valores, desde 0,5 hasta 0,1. Los resultados anteriormente mostrados fueron obtenidos asignando una confiabilidad de 0,5 para la ley del flujo de alimentación, mientras que las tablas con los resultados obtenidos al variar el factor de confiabilidad en la ley del flujo de alimentación de 0,4 a 0,1 se muestran en la sección ANEXOS, B.4. Luego, los resultados totales obtenidos se presentan gráficamente como sigue.

En las Figuras 29, 30, 31, 32, 33 y 34 se muestran, respectivamente, los valores obtenidos para el flujo de alimentación, ley del flujo de alimentación, ley del flujo axial, ley del flujo tangencial, flujo axial y flujo tangencial, al variar el factor de confiabilidad de la ley del flujo de alimentación de 0,5 hasta 0,1; según los casos:

SA1: sin ingreso de aire a presión y sin aplicación de campo magnético.

SA2: sin ingreso de aire a presión y con aplicación de campo magnético de baja intensidad (solenoides).

SA3: sin ingreso de aire a presión y con aplicación de campo magnético de alta intensidad (imanes permanentes de neodimio).

CA1: con ingreso de aire a presión y sin aplicación de campo magnético.

CA2: con ingreso de aire a presión y con aplicación de campo magnético de baja intensidad (solenoides).

CA3: con ingreso de aire a presión y con aplicación de campo magnético de alta intensidad (imanes permanentes de neodimio).

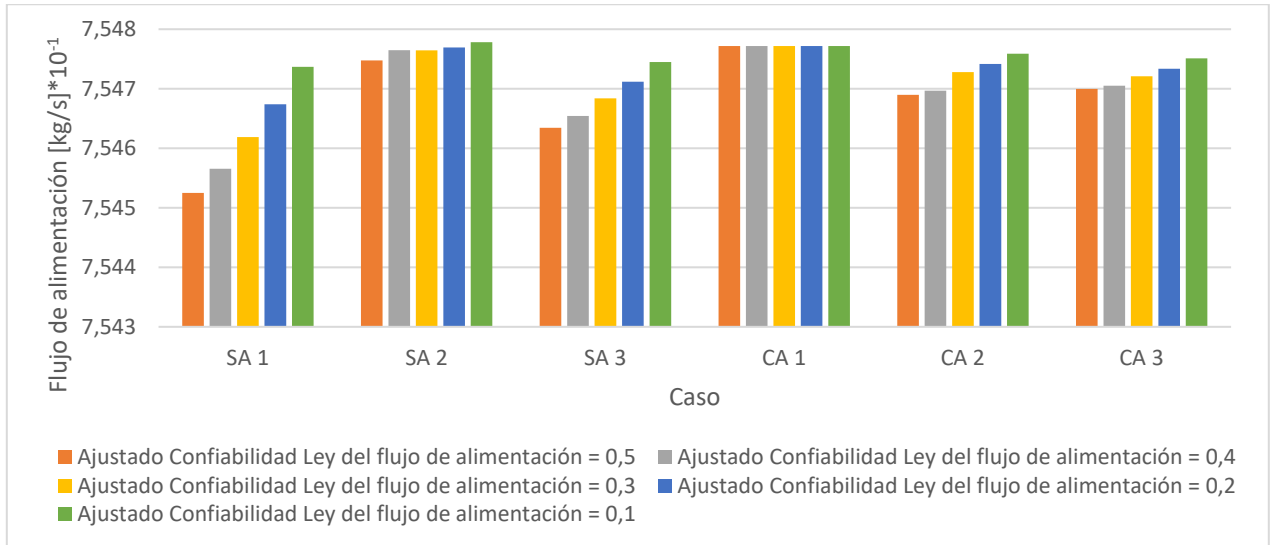


Figura 29: Flujo de alimentación según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de alimentación, celda cilíndrica. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

El flujo de alimentación tiene un valor de confiabilidad de 0,9 y se encuentra presente en el balance másico y metalúrgico.

Ahora bien, su ponderación en el error por confiabilidad es alta, y a pesar de que el error por balance másico y metalúrgico pondere un 70% del error total, variaciones en la confiabilidad de la ley de alimentación provocan variaciones poco relevantes. La desviación estándar promedio es de  $3,17 * 10^{-5}$  kg/s. Luego las diferencias mínimas en los valores dentro de cada caso se atribuyen al ajuste por balance másico y metalúrgico.

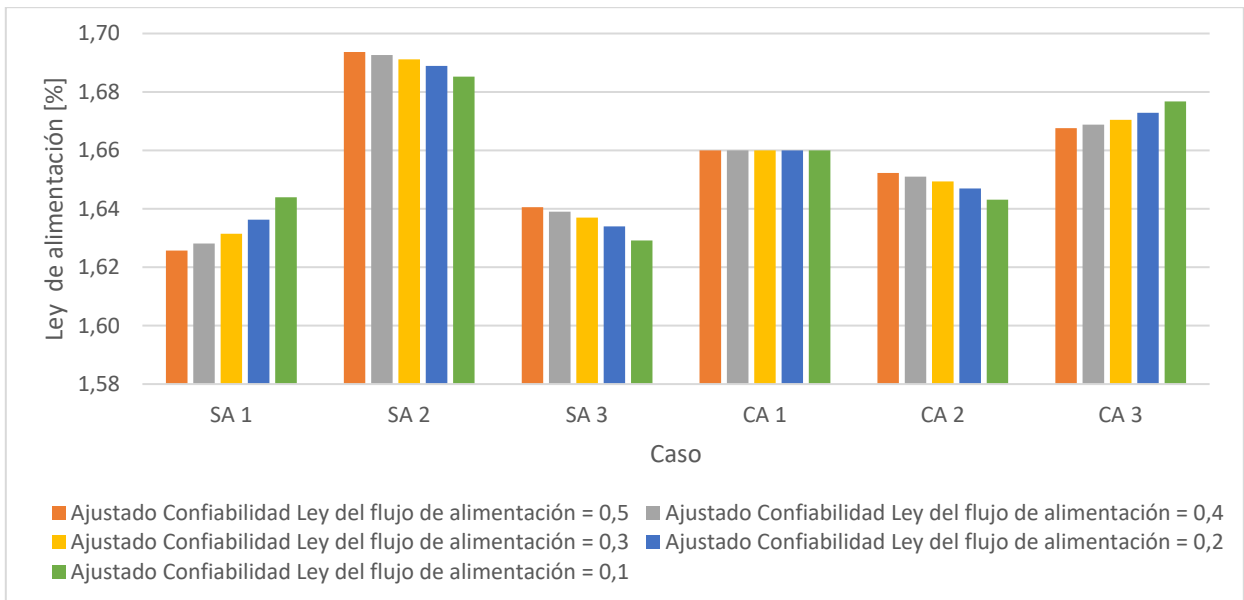


Figura 30: Ley del flujo de alimentación según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de alimentación, celda cilíndrica. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

La confiabilidad inicial de la ley del flujo de alimentación es 0,5 y esta variable se encuentra en el balance metalúrgico. Si disminuye su confiabilidad, su ponderación en el error por confiabilidad es cada vez menor y priman los ajustes para minimizar el error por balance másico y metalúrgico. Luego, al cambiar la confiabilidad de esta variable manteniendo constantes las confiabilidades de las demás, lo que ocurre es que el error por balance metalúrgico tiende a ajustar esta variable en mayor medida que las demás. La desviación estándar promedio es de  $3,73 * 10^{-3}\%$ .

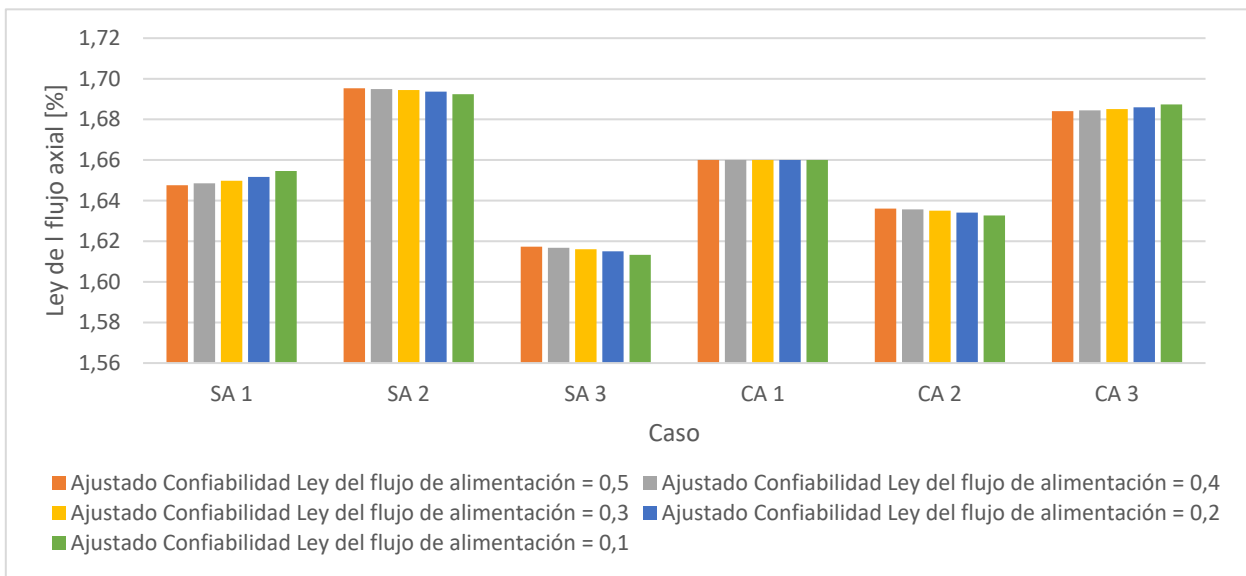


Figura 31: Ley del flujo axial según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de alimentación, celda cilíndrica. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.



La ley del flujo axial tiene una confiabilidad de 0,5 y participa en el balance metalúrgico. Luego, disminuciones en la confiabilidad de  $L_a$ , provocarán que el ajuste por balance másico y metalúrgico pondere más en el valor de esta variable.

Sin embargo, al mantenerse constante su confiabilidad, la variación en el valor de esta variable es muy baja dentro de cada caso, debido a que el sistema tiende a modificar más la variable cuya confiabilidad cambia. La desviación estándar promedio es de  $1,37 * 10^{-3}\%$ .

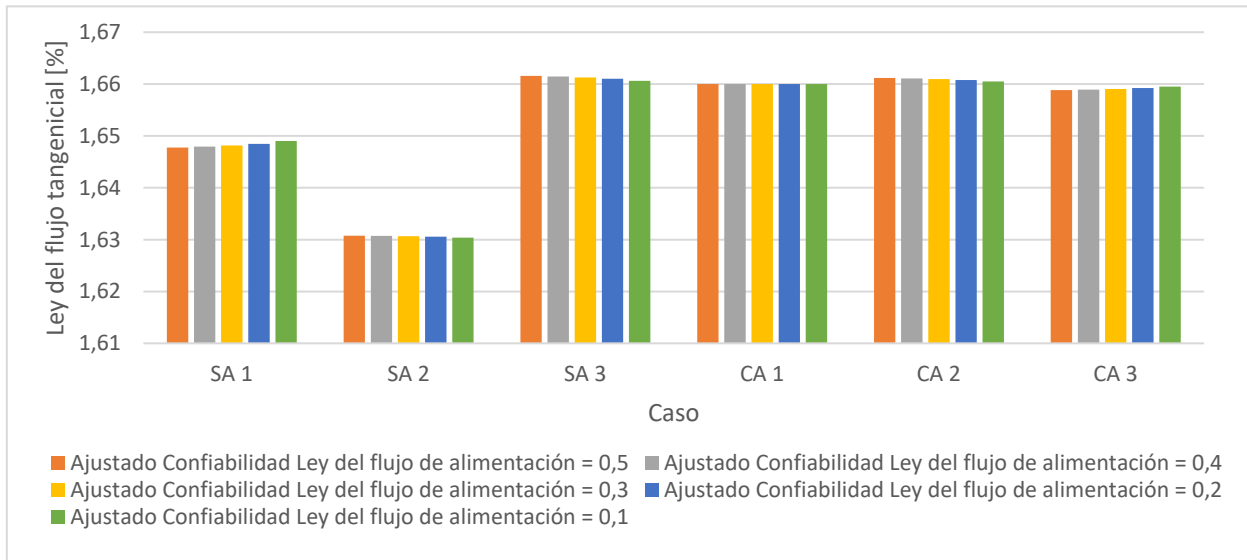


Figura 32: Ley del flujo tangencial según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de alimentación, celda cilíndrica. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

Para el caso de la ley del flujo tangencial, ésta tiene una confiabilidad de 0,7 y participa en el balance metalúrgico. Su ponderación en el error por confiabilidad es alta y por ende los ajustes por error de balance metalúrgico y másico no inciden en gran medida en los valores de esta variable. De esta manera, dentro de cada caso el valor de esta variable no tiene cambios perceptibles ante fluctuaciones en la confiabilidad de la ley de alimentación. La desviación estándar promedio es de  $2,59 * 10^{-4}\%$ .

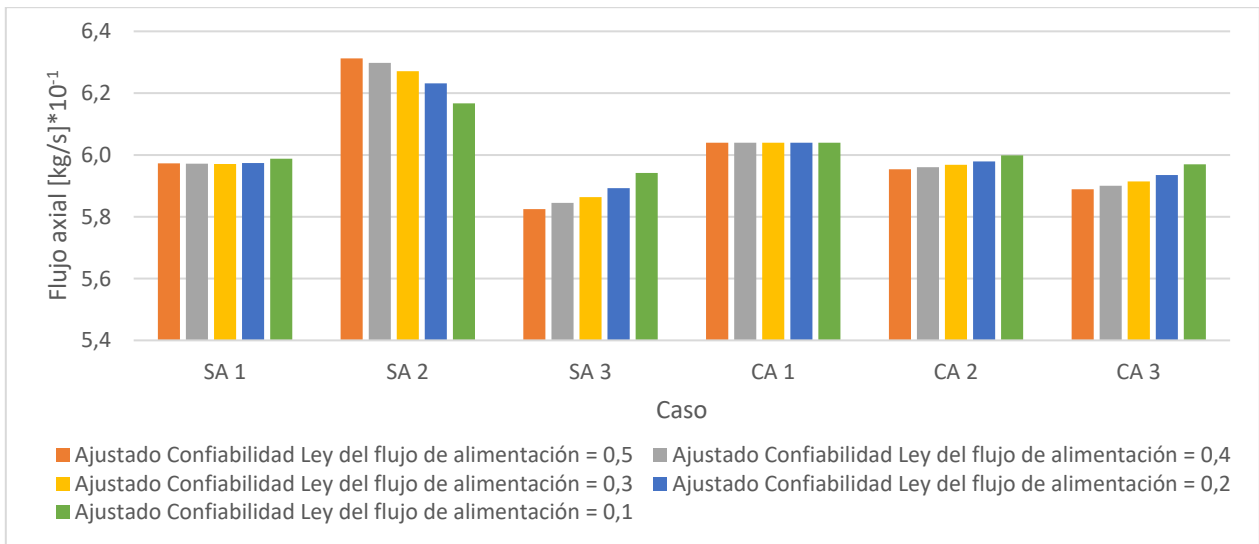


Figura 33: Flujo axial según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de alimentación, celda cilíndrica. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

El flujo axial tiene una confiabilidad de 0,001 y participa en el balance másico y metalúrgico, luego su ponderación en el error por confiabilidad es poco relevante. El ajuste del valor de esta variable recae en el error por balance másico y metalúrgico. Entonces se obtienen variaciones dentro de cada caso, las cuales se deben a la poca ponderación que tienen en el error por confiabilidad, además de las resultantes producto del balance másico y metalúrgico. La desviación estándar promedio es  $2,68 * 10^{-3}$  kg/s.

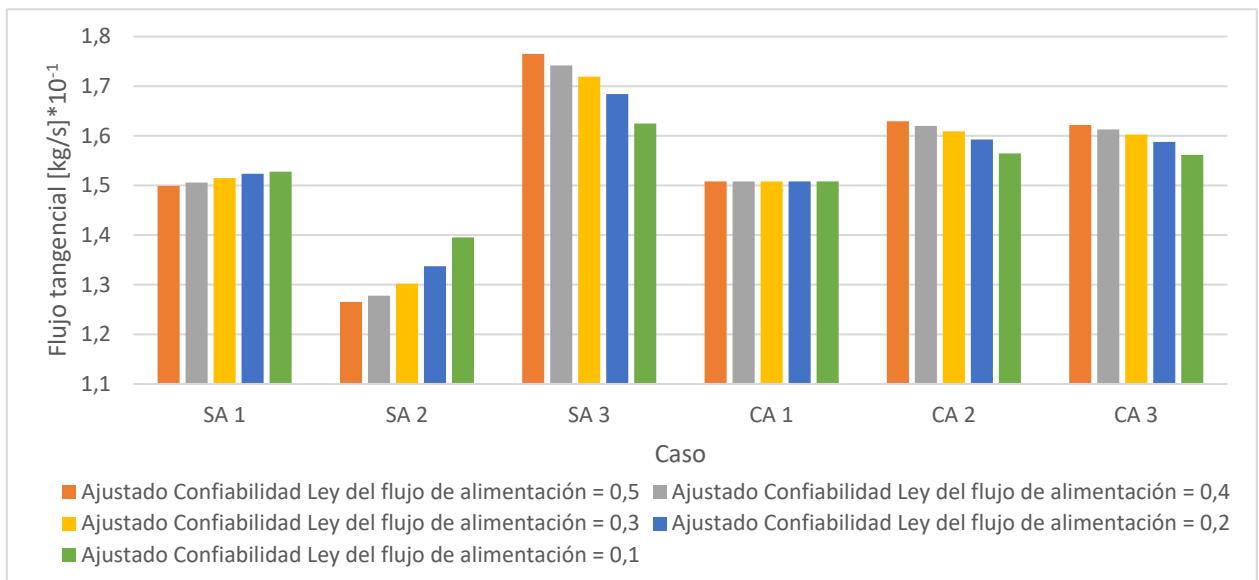


Figura 34: Flujo tangencial según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de alimentación, celda cilíndrica. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

La confiabilidad del flujo tangencial es 0,01 y participa en el balance másico y metalúrgico. Su ponderación en el error por confiabilidad también es poco relevante, por lo tanto, las ecuaciones de balance definen en mayor medida su valor. Luego, variaciones dentro cada caso son pequeñas producto también de su baja participación en el error por confiabilidad. La desviación estándar promedio es  $2,81 * 10^{-3}$  kg/s.

De acuerdo con los valores mostrados anteriormente, en las Figuras 35, 36 y 37 se muestran los valores obtenidos para la recuperación metalúrgica, recuperación másica y factor de enriquecimiento, respectivamente.

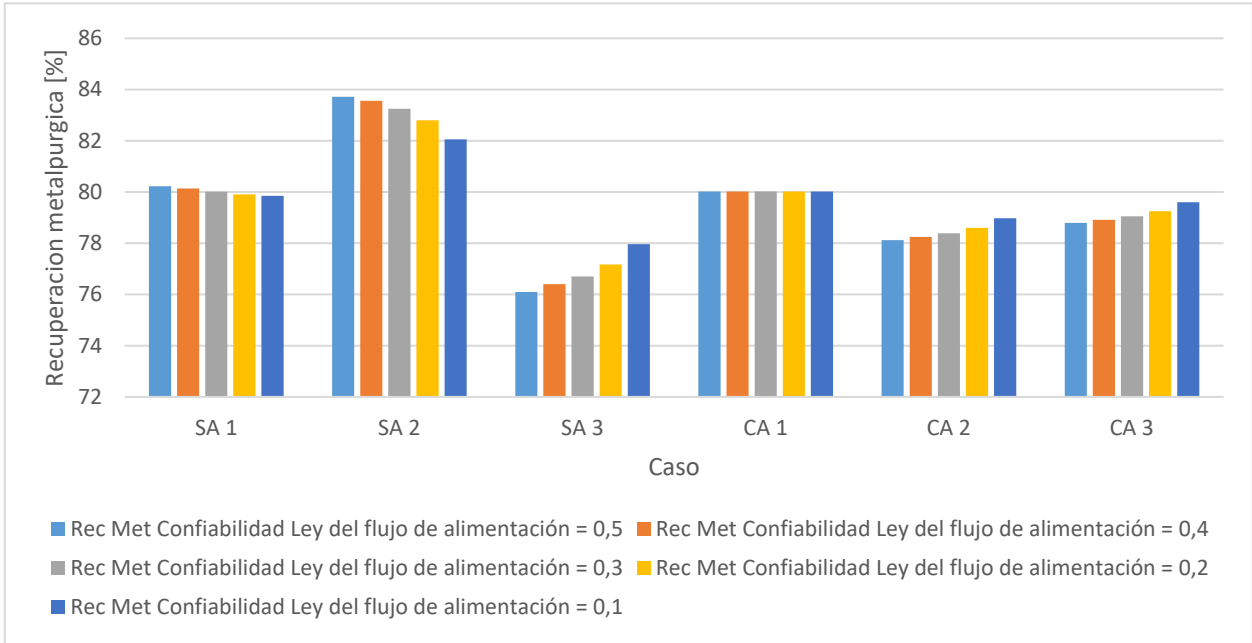


Figura 35: Recuperación metalúrgica según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de alimentación, celda cilíndrica. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

La recuperación metalúrgica es producto de la interacción entre la ley del flujo axial, el flujo axial, la ley del flujo de alimentación y el flujo de alimentación. La única variable que experimenta mayores variaciones dentro de cada caso, al variar la confiabilidad de la ley de alimentación, es la ley de alimentación.

Luego, las variaciones en esta ley provocan variaciones en la recuperación metalúrgica dentro de cada caso. La desviación estándar promedio es de 0,37%.

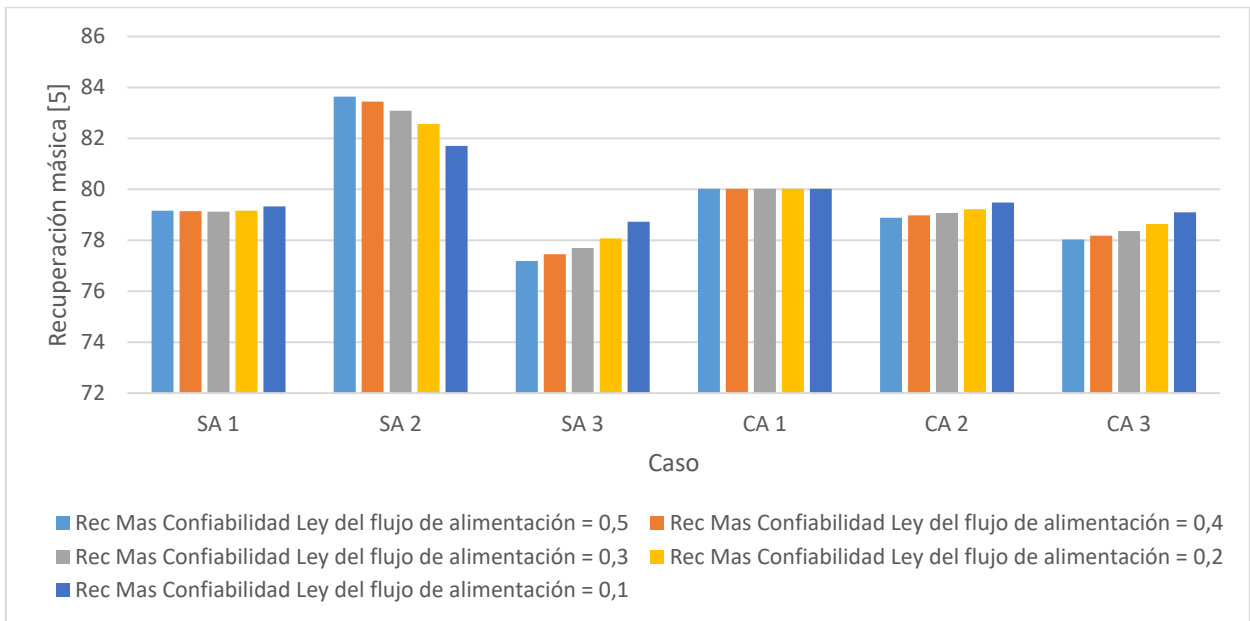


Figura 36: Recuperación másica según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de alimentación, celda cilíndrica. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

La recuperación másica se calcula utilizando las variables flujo axial y flujo de alimentación. Ambas variables se modifican al cambiar la confiabilidad de la ley de alimentación, aunque el flujo axial varía más que el flujo de alimentación. Luego, al calcular esta recuperación, ésta se modifica dentro de cada caso. La desviación estándar promedio es 0,2%.

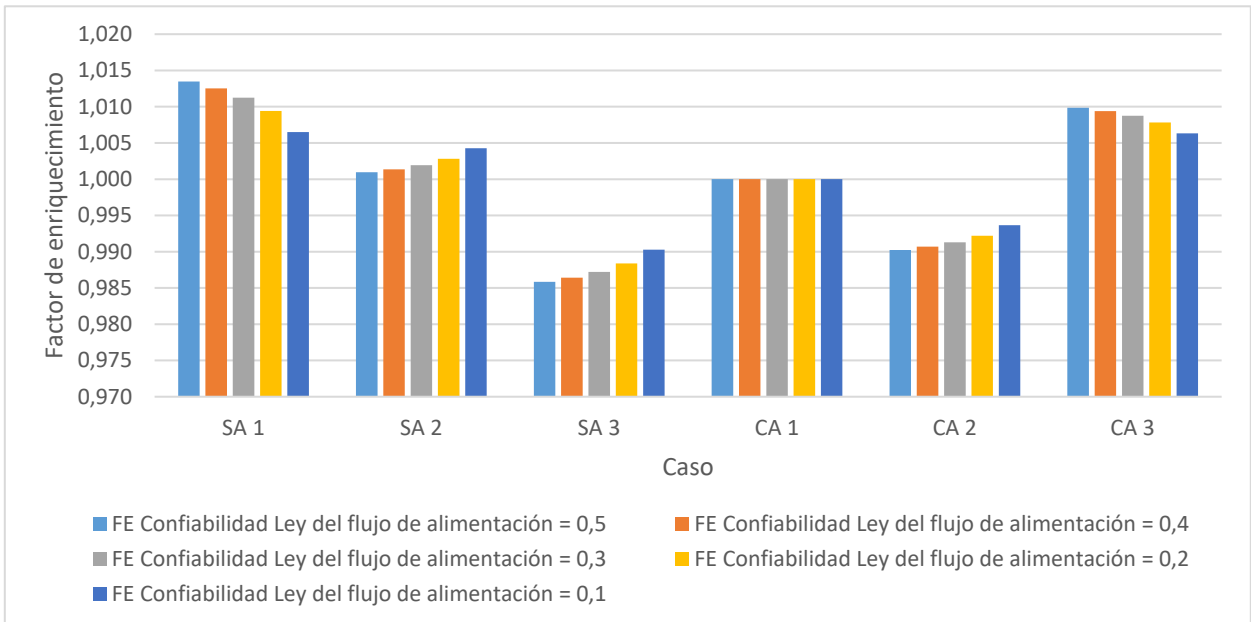


Figura 37: Factor de enriquecimiento según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de alimentación, celda cilíndrica. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

El factor de enriquecimiento se calcula a partir de la ley del flujo axial y la ley de alimentación. La primera tiene variaciones poco importantes dentro de cada caso, mientras que la segunda tiene mayores variaciones al cambiar su confiabilidad. Luego, como ambas tienen variaciones, el factor de enriquecimiento calculado también las tendrá. La desviación estándar promedio es de  $2,71 \cdot 10^{-6}$ .

#### iv. Análisis de resultados: Variable vs Condición operacional

De acuerdo con los resultados mostrados al principio de esta sección, y ya realizado un análisis de sensibilidad de éstos vs la confiabilidad del valor de la ley del flujo de alimentación, lo que ahora corresponde es analizar estos resultados obtenidos post reconciliación.

En seguida, con el objetivo de facilitar este análisis, en las Figuras 38, 39, 40, 41, 42 y 43 se grafica el valor de la variable vs cada condición operacional o caso.

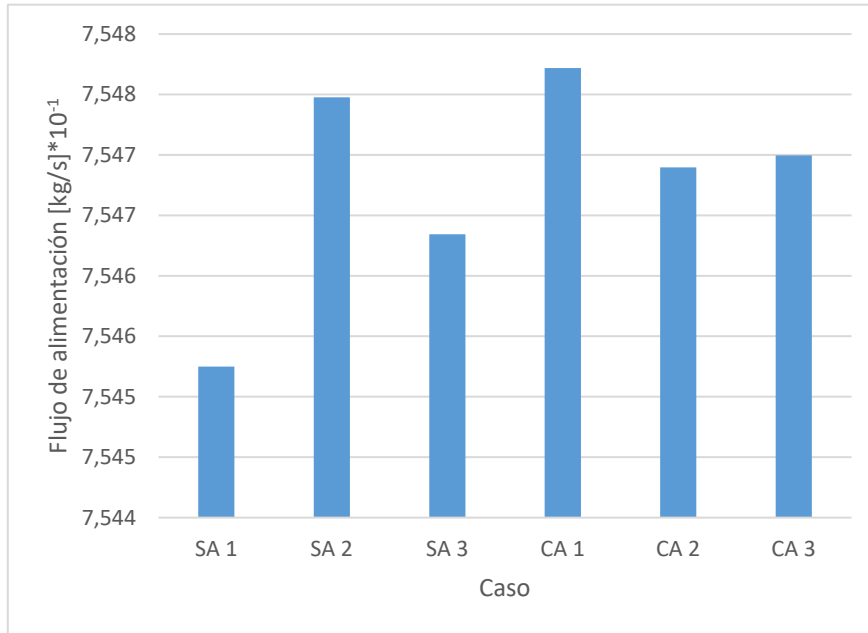


Figura 38: Flujo de alimentación vs cada caso, celda cilíndrica. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

Los flujos de alimentación prácticamente no varían entre caso ya que la bomba hace ingresar pulpa a la celda con presión constante. La desviación estándar es  $8,9 \cdot 10^{-5}$  kg/s. El flujo de alimentación promedio es 0,7547 kg/s.

Ahora bien, el ingreso de aire a presión provoca un aumento de presión dentro de la celda, el cual no sólo afecta a los flujos de salida, sino que genera una diferencia de presión en la entrada que es compensada por un aumento del flujo de alimentación. Esto explica que los casos con ingreso de aire sean levemente mayores a los casos sin incorporación de aire.

No se puede considerar el efecto del campo magnético, ya que tanto el solenoide como los imanes permanentes están ubicados en la mitad de la celda más próxima a la salida.

El caso con el mayor flujo de alimentación, de 0,7548 kg/s, es el caso CA1.

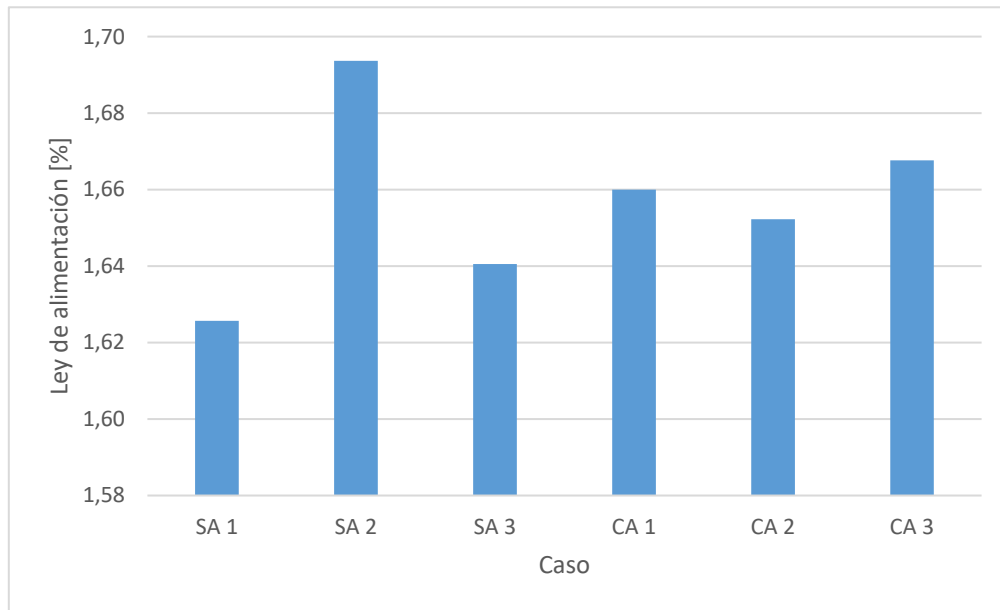


Figura 39: Ley del flujo de alimentación vs cada caso, celda cilíndrica. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

Las variaciones en la ley del flujo de alimentación se deben a la heterogeneidad propia de las muestras. La desviación estándar es 0,023%. Entre todos los casos la ley del flujo de alimentación se ubica en el rango [1,62 - 1,69]% y la mayoría está en el rango [1,64 - 1,67]%. La ley de alimentación promedio es 1,66%.

El caso SA2 tiene la mayor ley de alimentación, de 1,69%.

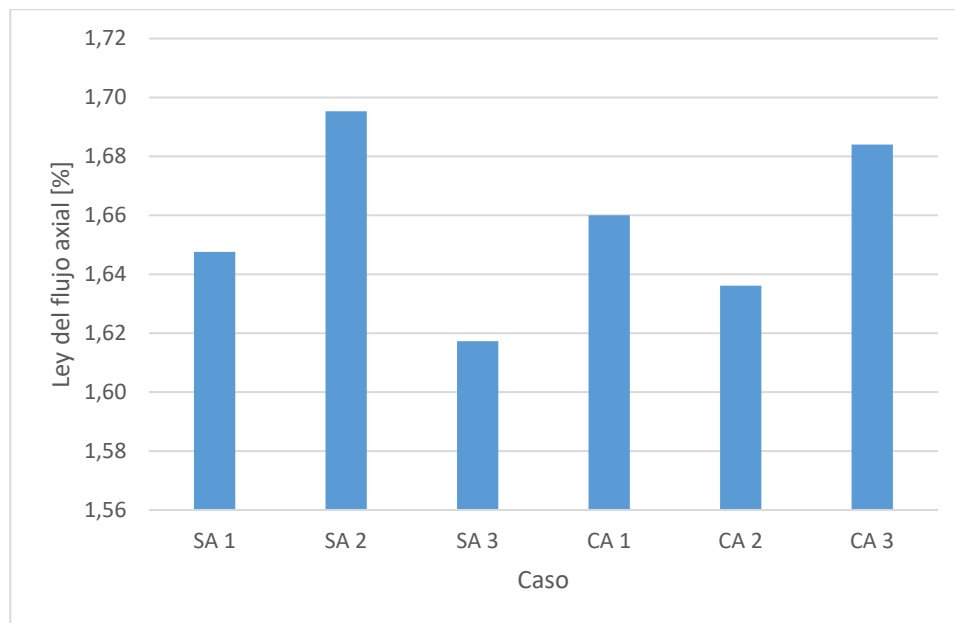


Figura 40: Ley del flujo axial vs cada caso, celda cilíndrica. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

Para los casos sin aplicación de campo magnético, al ingresar aire se obtiene una mayor ley del flujo axial con respecto al caso SA1. Esto se debe a la flotación, es decir, siempre se está concentrando, pero al ingresar aire a la celda este proceso se potencia. La ley del flujo axial aumenta en 0,01% en la ley de cobre.

Para los casos sin ingreso de aire, al aplicar el campo magnético de baja intensidad del solenoide, este campo magnético concentra partículas de cobre que se encuentran dentro del flujo axial, a pesar de la disminución del tiempo de residencia, producto de que el campo magnético apunta en la misma dirección del flujo. Luego, la ley del flujo axial aumenta con respecto al caso SA1, en 0,05% en la ley de cobre. Cuando se aplica el campo magnético de alta intensidad de los imanes permanentes, éste es perpendicular al flujo, lo cual genera una mayor concentración de partículas en el flujo tangencial. Luego la ley del flujo axial disminuye, en 0,03% en la ley de cobre con respecto al caso SA1.

Para los casos con incorporación de aire, cuando se aplica el campo magnético de baja intensidad del solenoide la fuerza centrífuga es tal que este campo magnético no afecta al flujo axial en términos de concentración de partículas de cobre, luego la ley del flujo axial disminuye, en 0,02% en la ley de cobre con respecto al caso CA1. Mientras que, al aplicar el campo magnético de alta intensidad de los imanes permanentes, el tiempo de residencia aumenta debido a que este campo magnético, al ser perpendicular al flujo, se comporta como barrera. Luego, aumenta la concentración de partículas, aumentando la ley del flujo axial, en 0,02% en la ley de cobre.

La mayor ley de material valioso en el flujo axial, de 1,7%, se obtiene en el caso SA2. La desviación estándar es 0,029%. La ley del flujo axial promedio es 1,66%.

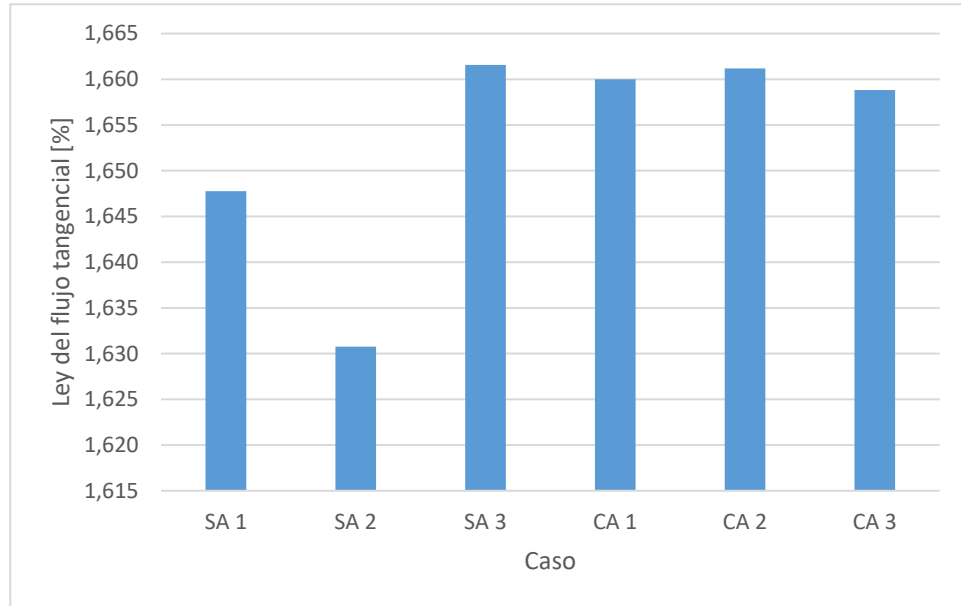


Figura 41: Ley del flujo tangencial vs cada caso, celda cilíndrica. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

En los casos sin aplicación de campo magnético, al ingresar aire a la celda aumenta la flotación y el efecto centrífugo, luego la ley del flujo tangencial aumenta, en 0,01% en la ley de cobre con respecto al caso SA1.

Para los casos sin incorporación de aire, al aplicar el campo magnético de baja intensidad del solenoide genera una menor concentración de partículas en el flujo tangencial, con respecto al caso SA1, debido a que este campo magnético se alinea con el flujo axial y el tiempo de residencia disminuye. Luego, la ley del flujo axial disminuye en 0,02% en la ley de cobre. Cuando se aplica el campo de alta intensidad de los imanes permanentes, éste es perpendicular al flujo, por lo tanto, aumenta el tiempo de residencia, de manera que se captan las partículas de cobre que se encuentran más próximas a la pared de la celda. Luego, la ley del flujo axial aumenta, con respecto al caso SA1, en 0,01% en la ley de cobre.

Para los casos con ingreso de aire, al aplicar el campo magnético de menor intensidad del solenoide, el efecto centrífugo genera que este campo magnético afecte al flujo tangencial, aumentando levemente la ley de éste, en 0,001% en la ley de cobre con respecto al caso CA1. Cuando se aplica el campo magnético de alta intensidad de los solenoides, éste es perpendicular al flujo y afecta más al flujo axial. Luego, la ley del flujo tangencial disminuye levemente, con respecto al caso CA1, en 0,001%. Sin embargo, en estos casos las leyes del flujo tangencial son similares entre sí, lo cual indica que el efecto de la flotación es más relevante en este caso que el efecto que tiene el campo magnético.



En general no existe mucha variabilidad de la ley del flujo tangencial entre los distintos casos, con excepción del caso SA2. La ley media es 1,65% y la ley obtenida en el caso SA2 es 1,63%.

El caso donde se obtiene la mayor ley del flujo tangencial, de 1,66%, es el caso SA3. La desviación estándar es 0,012%. La ley del flujo tangencial promedio es 1,65%.

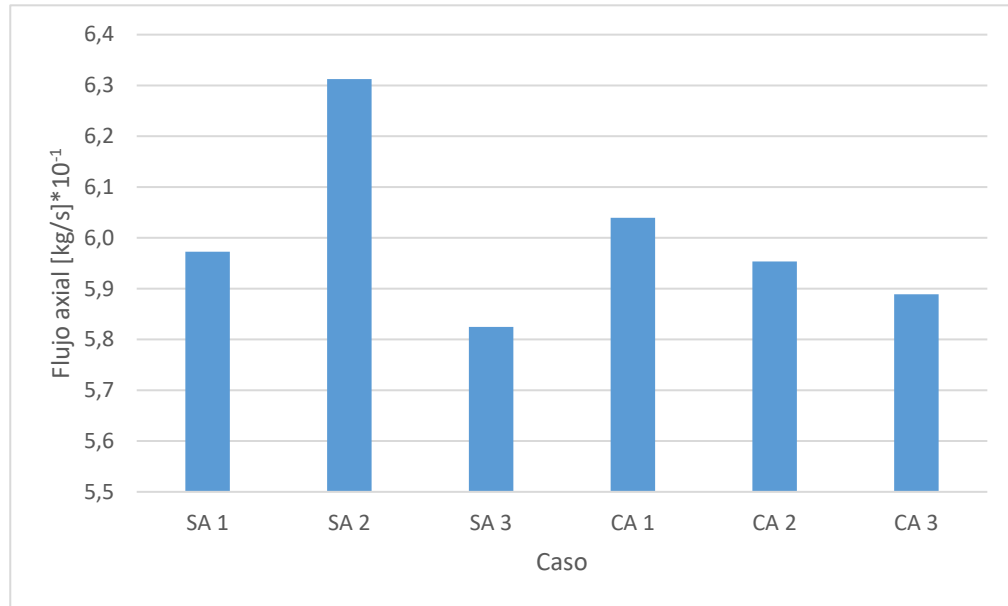


Figura 42: Flujo axial vs cada caso, celda cilíndrica. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

Para los casos sin aplicación de campo magnético, al ingresar aire el flujo axial aumenta debido a un aumento del efecto centrífugo, el que genera un aumento en la velocidad del fluido. Este aumento es de 0,01 kg/s con respecto al caso SA1.

En los casos sin ingreso de aire, al aplicar el campo magnético de baja intensidad del solenoide, el flujo axial se incrementa debido a que el campo magnético se alinea con este flujo. Este aumento, con respecto al caso SA1, es de 0,03 kg/s con respecto al caso SA1. Cuando se aplica el campo de alta intensidad de los imanes permanentes, éste es perpendicular al flujo, entonces se comporta como una barrera, y, por tanto, disminuye el flujo axial, en 0,01 kg/s con respecto al caso SA1.

Para los casos con ingreso de aire a la celda, al aplicar el campo magnético de baja intensidad del solenoide, el campo magnético afecta más al fluido próximo a la pared que al fluido en el centro ya que el efecto centrífugo es mayor que el efecto del campo magnético, provocando que el flujo axial disminuya, con respecto al caso CA1, en 0,01 kg/s. Al aplicar el campo magnético de alta intensidad de los imanes permanentes, éste afecta en mayor medida al flujo axial debido a su orientación espacial, lo que implica que este flujo disminuya con respecto al caso CA1, en 0,02 kg/s.

En el caso SA2 se obtiene el mayor flujo axial, de 0,63 kg/s. La desviación estándar es 0,017 kg/s. El flujo axial promedio es 0,6 kg/s.

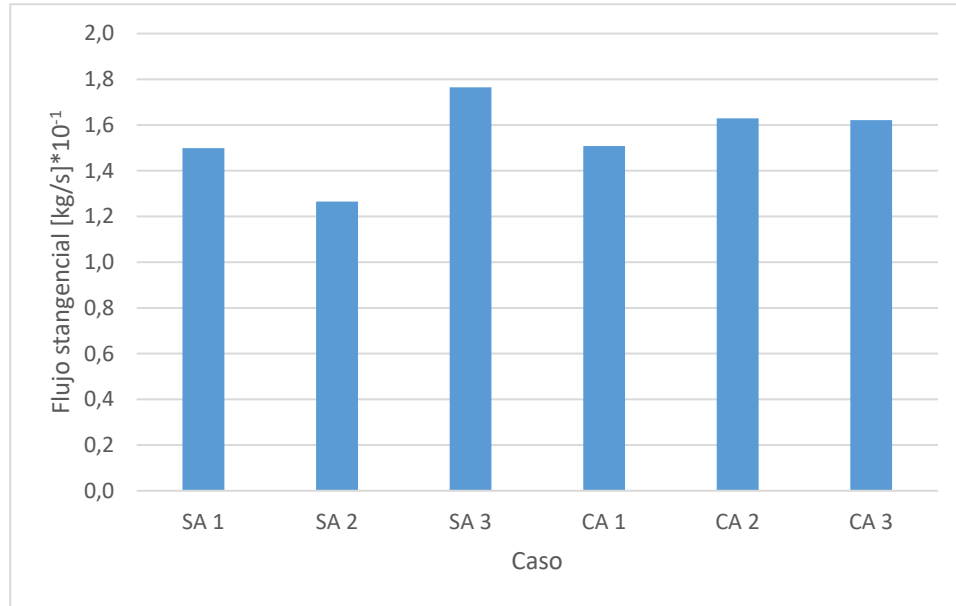


Figura 43: Flujo tangencial vs cada caso, celda cilíndrica. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

Para los casos sin aplicación de campo magnético, al ingresar aire a la celda el efecto centrífugo genera mayor velocidad del fluido. Luego, el flujo tangencial aumenta levemente, en 0,001 kg/s con respecto al caso SA1.

Para los casos sin ingreso de aire, al aplicar el campo magnético de baja intensidad del solenoide el flujo tangencial disminuye, en 0,02 kg/s con respecto al caso SA1, debido al aumento del flujo axial. Mientras que, cuando se aplica el campo de alta intensidad de los imanes permanentes el flujo tangencial aumenta, en 0,03 kg/s con respecto al caso SA1, debido a la disminución del flujo axial.

Para los casos con ingreso de aire, al aplicar el campo magnético de baja intensidad del solenoide, el efecto centrífugo potenciado por el aire hace que el campo magnético afecte más al flujo tangencial, por lo que este flujo aumenta, en 0,01 kg/s con respecto al caso CA1. Por otra parte, al aplicar el campo magnético de alta intensidad de los imanes permanentes, este campo magnético frena al flujo axial debido a que es perpendicular a éste, y, por lo tanto, aumenta el flujo tangencial, en 0,01 kg/s con respecto al caso CA1.

En el caso SA3 se obtiene el mayor flujo tangencial, de 0,18 kg/s. La desviación estándar es 0,017 kg/s. El flujo tangencial promedio es 0,155 kg/s.

De acuerdo con los valores mostrados anteriormente, en las Figuras 44, 45 y 46 se grafican los valores obtenidos para la recuperación metalúrgica, recuperación másica y factor de enriquecimiento, respectivamente.

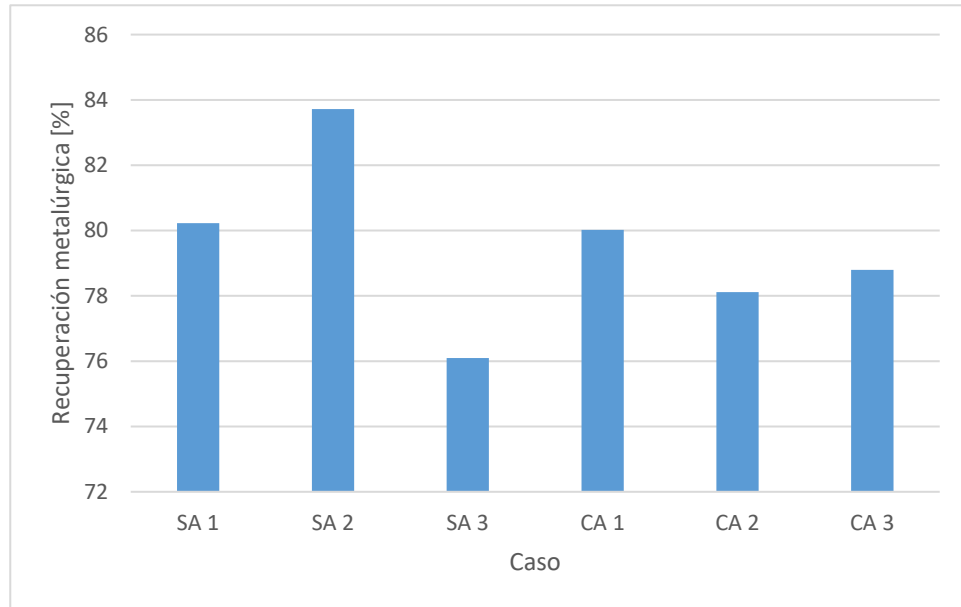


Figura 44: Recuperación metalúrgica vs cada caso, celda cilíndrica. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

La recuperación metalúrgica promedio es 79,50%. Las recuperaciones se encuentran en el rango [76 - 84]%. La desviación estándar es 2,55% de la ley cobre.

Cuando no se aplica campo magnético, la recuperación metalúrgica obtenida prácticamente no cambia ante el efecto del aire incorporado a la celda, lo cual indica que la flotación alcanza a concentrar una cantidad de partículas semejante con o sin aumento de la fuerza centrífuga generada por la incorporación de aire. La recuperación metalúrgica disminuye en 0,21% con respecto al caso SA1.

De acuerdo con los resultados reconciliados, el flujo axial es concentrado. Luego, en los casos sin ingreso de aire, cuando se aplica el campo magnético de baja intensidad del solenoide, el campo magnético se alinea con el flujo axial, provocando un aumento en la ley de este flujo. Luego, la recuperación metalúrgica aumenta, en 3,49% con respecto al caso SA1. Mientras que, al aplicar el campo magnético de alta intensidad de los imanes permanentes, éste es perpendicular al flujo axial lo que implica que aumente la ley del flujo tangencial, disminuyendo la ley del flujo axial como también el flujo axial. Luego, la recuperación metalúrgica disminuye en 4,13% con respecto al caso SA1.

En los casos con incorporación de aire al aplicar el campo magnético de baja intensidad del solenoide, éste no concentra tantas partículas de cobre en el flujo axial, por lo que estas partículas se van al flujo tangencial debido al efecto centrífugo. Luego, la recuperación

metalúrgica disminuye en 1,9% con respecto al caso CA1. Mientras que, al aplicar el campo de alta intensidad de los imanes permanentes, el tiempo de residencia aumenta para el flujo axial, lo que implica un mayor contacto con las partículas de cobre, aumentando la ley del flujo axial, pero disminuyendo su caudal. Luego, la recuperación metalúrgica disminuye en 1,22% con respecto al caso CA1.

La mayor recuperación metalúrgica, de 83,72%, se obtiene en el caso SA2.

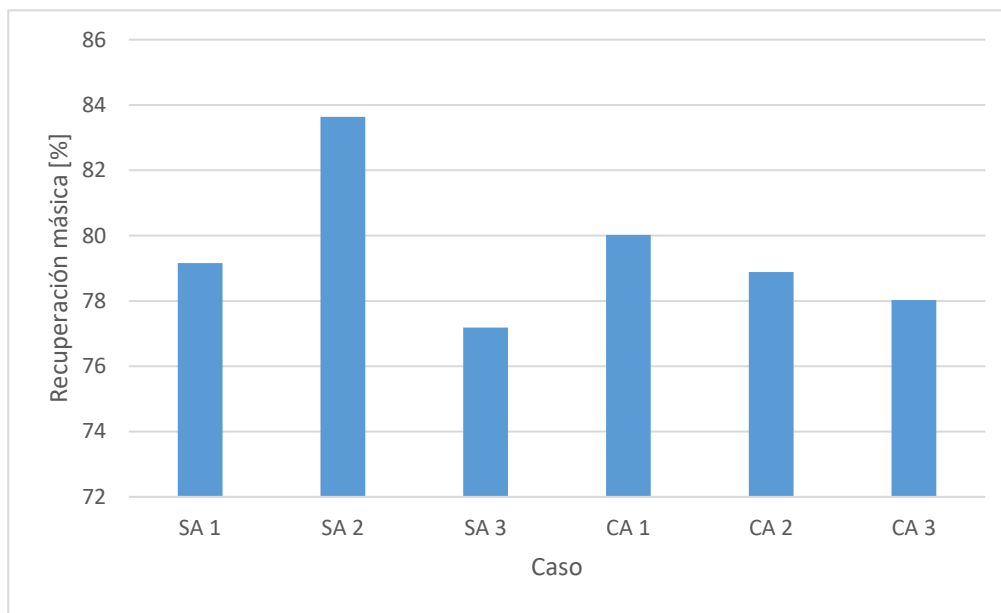


Figura 45: Recuperación másica vs cada caso. celda cilíndrica. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

La mayor recuperación másica, de 83,64%, se obtiene en el caso SA2. La recuperación másica promedio es 79,49%. La desviación estándar es 2,25% de la ley de cobre.

Cuando no se aplica campo magnético, al ingresar aire el flujo axial aumenta debido a un mayor efecto centrífugo dentro de la celda. Luego, la recuperación másica aumenta en 0,86% con respecto al caso SA1.

Para los casos sin incorporación aire, cuando se aplica el campo magnético de baja intensidad del solenoide, éste se alinea con el flujo axial, aumentando este último. Luego la recuperación másica aumenta en 4,48% con respecto al caso SA1. Cuando se aplica el campo magnético de alta intensidad de los imanes permanentes, este campo magnético se distribuye de forma tal que es perpendicular al flujo axial, creando una barrera, haciendo disminuir este flujo. Luego, la recuperación másica disminuye en 1,97% con respecto al caso SA1.

En los casos con incorporación de aire, si se aplica el campo magnético de baja intensidad del solenoide, éste afecta más al flujo tangencial producto del mismo efecto centrífugo, provocando un aumento de éste y, por ende, una disminución del flujo axial. Luego, la

recuperación másica disminuye en 1,13% con respecto al caso CA1. Cuando se aplica el campo magnético de alta intensidad de los imanes permanentes, el efecto del campo magnético es mayor al efecto centrífugo y, por lo tanto, se genera una barrera para el flujo axial, por lo que éste disminuye, en 1,99% con respecto al caso CA1.

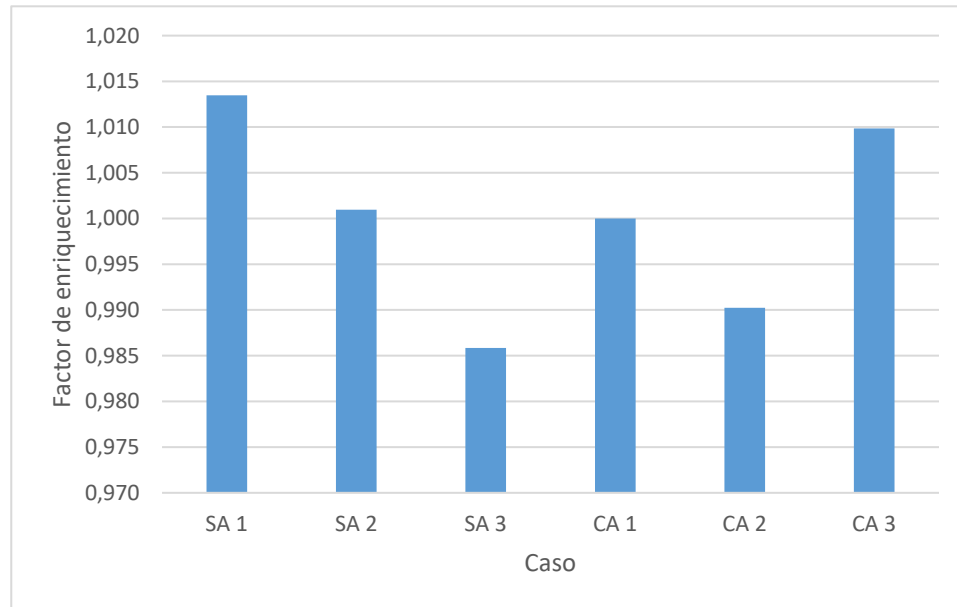


Figura 46: Factor de enriquecimiento vs cada caso, celda cilíndrica. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

El mayor factor de enriquecimiento se obtiene en el caso SA1, este es 1,013. El factor de enriquecimiento promedio es 1,000. La desviación estándar es 0,011.

Cuando no se aplica campo magnético, al ingresar aire a la celda, la ley del flujo axial aumenta con respecto al caso SA1, sin embargo, la ley de alimentación en el caso SA1 es bastante menor a la del caso CA1 y, por tanto, el factor de enriquecimiento disminuye con respecto al caso SA1, en 0,013.

Para los casos sin ingreso de aire, al aplicar el campo magnético de baja intensidad del solenoide, la ley del flujo axial aumenta con respecto al caso SA1, pero la ley de alimentación del caso SA2 es mayor a la del caso SA1 y, por lo tanto, el factor de enriquecimiento disminuye con respecto al caso SA1, en 0,013. Cuando se aplica el campo magnético de alta intensidad de los imanes permanentes, la ley del flujo axial disminuye con respecto al caso SA1 y la ley de alimentación del caso SA3 es mayor a la ley de alimentación del caso SA1. Luego, el factor de enriquecimiento disminuye con respecto al caso SA1, en 0,028.

Para los casos con ingreso de aire, al aplicar el campo magnético de baja intensidad del solenoide la ley del flujo axial disminuye con respecto al caso CA y la ley de alimentación del caso SA2 es un poco menor a la ley de alimentación del caso CA1. Luego, el factor de enriquecimiento disminuye con respecto al caso CA1, en 0,01. Cuando se aplica el campo

magnético de alta intensidad de los imanes permanentes, la ley del flujo axial aumenta con respecto al caso CA1 y la ley de alimentación del caso CA3 es levemente menor a la ley de alimentación del caso CA1. Luego, el factor de enriquecimiento aumenta con respecto al caso CA1, en 0,01.

## 4.2.2 Prueba piloto con celda cónica orientada de d a 2d

A continuación, se muestran los resultados más relevantes obtenidos con la operación de la celda cónica, con orientación de d a 2d.

### i. Mediciones de campo magnético de solenoide

En la Tabla 37 se muestran las mediciones del campo magnético generado por el solenoide durante la operación de la celda cónica orientada de d a 2d.

Tabla 37: Mediciones campo magnético, celda cónica orientada de d a 2d.

<b>Campo medido</b>	
En pared [Gauss]	63,6
A la entrada [Gauss]	43
En el centro [Gauss]	26,5

La cantidad de espiras fue 154. El valor máximo fue 63,6 Gauss, lo cual puede atribuirse a dos cosas, las espiras que conforman el solenoide no quedan perfectamente lisas, provocando una disminución de la intensidad de corriente efectiva y, por otra parte, el hecho de que el diámetro no sea constante, a diferencia de la celda cilíndrica. El campo en la pared fue menor que en la celda cilíndrica, sin embargo, los valores medidos en la entrada y en el centro son mayores, lo cual indicaría que el campo magnético generado por el solenoide en esta celda bajo la orientación d a 2d incide con mayor intensidad en estas zonas.

### ii. Resultados reconciliados

Lo primero es mostrar los resultados obtenidos luego de la reconciliación. Estos resultados se obtuvieron asignando, al igual que en el caso anterior, un valor de confiabilidad de 0,5 a la ley de alimentación. Este valor fue otorgado luego de un análisis de la rigurosidad del proceso de toma de muestras y se encuentra acorde a los valores de confiabilidad asignados para las demás variables. El error de esta reconciliación fue de 3,26%, lo cual es suficiente para ser aceptado.

Todas las tablas referentes al proceso de reconciliación de datos se encuentran en ANEXOS, B.4.

A continuación, en la Tabla 38 se muestran los resultados obtenidos para cada variable, según los casos:

SA1: sin inyección de aire y sin aplicación de campo magnético.

SA2: sin inyección de aire y con aplicación de campo magnético de baja intensidad (solenóide).

SA3: sin inyección de aire y con aplicación de campo magnético de alta intensidad (imanes permanentes de neodimio).

CA1: con inyección de aire y sin aplicación de campo magnético.

CA2: con inyección de aire y con aplicación de campo magnético de baja intensidad (solenóide).

CA3: con inyección de aire y con aplicación de campo magnético de alta intensidad (imanes permanentes de neodimio).

Tabla 38: Celda cónica orientada de d a 2d, resultados post reconciliación para cada variable, según caso.

<b>Celda cónica orientada de d a 2d</b>		
Variable		Valor
Flujo de alimentación [kg/s]	SA 1	0,755
	SA 2	0,755
	SA 3	0,755
	CA 1	0,755
	CA 2	0,756
	CA 3	0,755
Ley del flujo de alimentación [%]	SA 1	1,683
	SA 2	1,693
	SA 3	1,686
	CA 1	1,681
	CA 2	1,655
	CA 3	1,694
Ley del flujo axial [%]	SA 1	1,688
	SA 2	1,707
	SA 3	1,715
	CA 1	1,701
	CA 2	1,543
	CA 3	1,685
Ley del flujo tangencial [%]	SA 1	1,680
	SA 2	1,650
	SA 3	1,629
	CA 1	1,678
	CA 2	1,710
	CA 3	1,681
Flujo axial [kg/s]	SA 1	0,603
	SA 2	0,624
	SA 3	0,575
	CA 1	0,597
	CA 2	0,550
	CA 3	0,597
Flujo tangencial [kg/s]	SA 1	0,150
	SA 2	0,130
	SA 3	0,177
	CA 1	0,152
	CA 2	0,228
	CA 3	0,161



Los resultados reconciliados arrojan que las leyes del flujo axial son semejantes a las leyes del flujo tangencial y el flujo axial es mayor al flujo tangencial, en proporción 4:1. Cuando se elige el flujo axial como concentrado, la recuperación metalúrgica promedio es de 77,93%, la recuperación másica promedio es de 78,28% y el factor de enriquecimiento promedio es de 0,995. Mientras que cuando se elige el flujo tangencial como concentrado, la recuperación metalúrgica promedio es de 21,95%, la recuperación másica promedio es de 22,03% y el factor de enriquecimiento promedio es de 0,994.

Ahora bien, cuando la recuperación metalúrgica es del orden de la recuperación másica, no hay concentración, lo que se evidencia con los factores de enriquecimiento promedios, cercanos a 1.

Por otra parte, normalmente el concentrado rougher es menor en flujo que el relave, sin embargo, se decide tomar el flujo axial como concentrado sólo por el mayor factor de enriquecimiento promedio que se obtiene en comparación al obtenido cuando se considera el flujo tangencial como concentrado.

De acuerdo con lo anterior, las recuperaciones metalúrgicas, másicas y el factor de enriquecimiento se muestran en las Tablas 39, 40 y 41.

Tabla 39: Recuperación metalúrgica, celda cónica orientada de d a 2d.

Caso	Rec Met [%]
SA 1	80,154
SA 2	83,333
SA 3	77,463
CA 1	80,074
CA 2	67,863
CA 3	78,716

Tabla 40: Recuperación másica, celda cónica orientada de d a 2d.

Caso	Rec Más [%]
SA 1	79,900
SA 2	82,631
SA 3	76,137
CA 1	79,108
CA 2	72,770
CA 3	79,115

Tabla 41: Factor de enriquecimiento, celda cónica orientada de d a 2d.

Caso	FE
SA 1	1,003
SA 2	1,009
SA 3	1,017
CA 1	1,012
CA 2	0,933
CA 3	0,995

Inicialmente se realiza un análisis de sensibilidad con el fin de estudiar cuánto la incidencia de la ley de alimentación en la reconciliación de datos, tal cual se realizó con la celda cilíndrica.

### **iii. Análisis de sensibilidad al variar confiabilidad de ley de alimentación**

Tal como se aplicó para los resultados obtenidos con la celda cilíndrica, la confiabilidad otorgada a la ley de alimentación toma 5 valores, desde 0,5 hasta 0,1. Los resultados anteriormente mostrados fueron obtenidos asignando una confiabilidad de 0,5 para la ley del flujo de alimentación, mientras que las tablas con los resultados obtenidos al variar el factor de confiabilidad en la ley del flujo de alimentación de 0,4 a 0,1 se muestran en la sección Anexos, en la subsección B.4. Luego, los resultados totales obtenidos se presentan gráficamente como sigue.

En las Figuras 47, 48, 49, 50, 51 y 52 se muestran, respectivamente, los valores obtenidos para el flujo de alimentación, ley del flujo de alimentación, ley del flujo axial, ley del flujo tangencial, flujo axial y flujo tangencial, al variar el factor de confiabilidad de la ley del flujo de alimentación de 0,5 hasta 0,1; según los casos:

SA1: sin ingreso de aire a presión y sin aplicación de campo magnético.

SA2: sin ingreso de aire a presión y con aplicación de campo magnético de baja intensidad (solenoides).

SA3: sin ingreso de aire a presión y con aplicación de campo magnético de alta intensidad (imanes permanentes de neodimio).

CA1: con ingreso de aire a presión y sin aplicación de campo magnético.

CA2: con ingreso de aire a presión y con aplicación de campo magnético de baja intensidad (solenoides).

CA3: con ingreso de aire a presión y con aplicación de campo magnético de alta intensidad (imanes permanentes de neodimio).

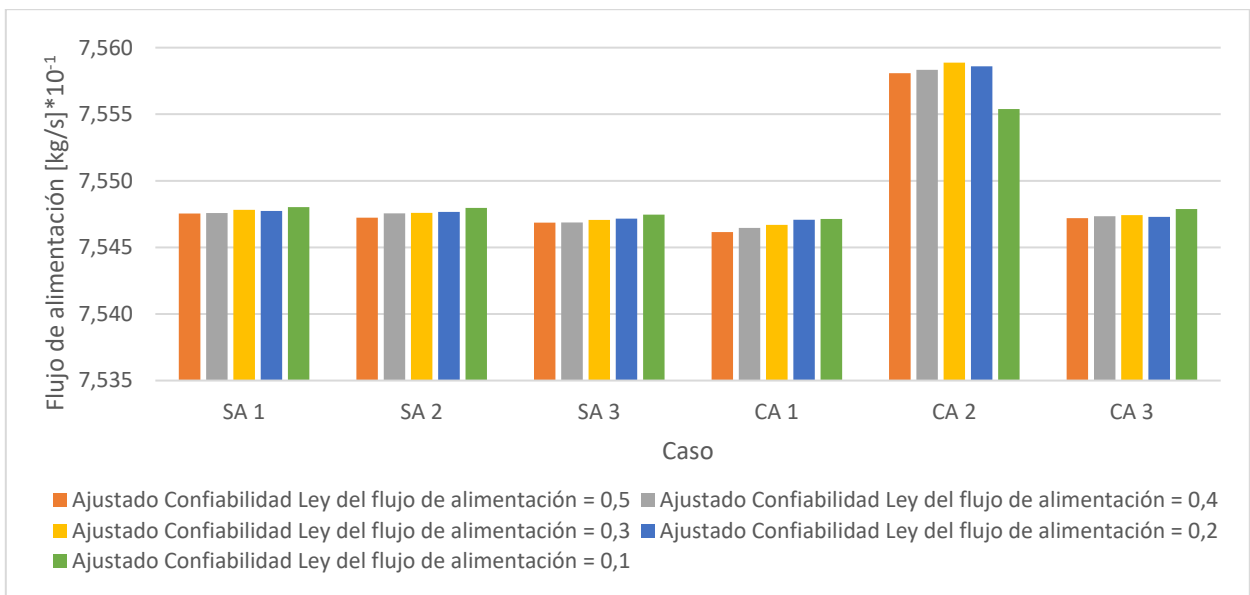


Figura 47: Flujo de alimentación según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de alimentación, celda cónica orientada de d a 2d. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

El flujo de alimentación tiene un valor de confiabilidad de 0,9 y se encuentra presente en el balance másico y metalúrgico.

Ahora bien, su ponderación en el error por confiabilidad es alta, y a pesar de que el error por balance másico y metalúrgico pondere un 70% del error total, variaciones en la confiabilidad de la ley de alimentación provocarán muy poca variación en su valor dentro de cada caso. Luego estas diferencias mínimas en los valores dentro de cada caso se atribuyen al ajuste por balance másico y metalúrgico.

En el caso CA2 se tiene mayores variaciones debido a que los valores iniciales de todas las variables eran relativamente distintos a los demás casos, luego el sistema hizo variar más sus valores para minimizar el error de las reconciliaciones.

La mayor desviación estándar, de  $1,41 * 10^{-4}$  kg/s, se obtiene en el caso CA2. La desviación estándar promedio es  $4,66 * 10^{-5}$  kg/s.

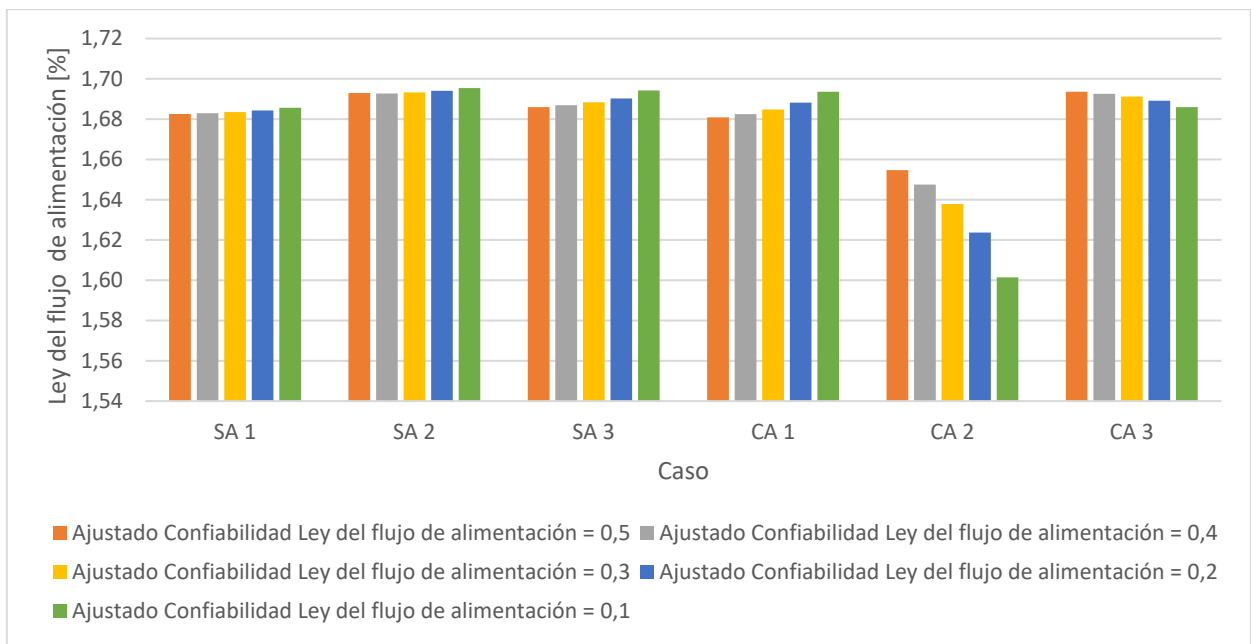


Figura 48: Ley del flujo de alimentación según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de alimentación, celda cónica orientada de d a 2d. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

La confiabilidad inicial de la ley del flujo de alimentación es 0,5 y esta variable se encuentra en el balance metalúrgico. Si disminuye su confiabilidad, su ponderación en el error por confiabilidad será cada vez menor y primarán los ajustes para minimizar el error por balance másico y metalúrgico. Luego, al cambiar la confiabilidad de esta variable manteniendo constantes las confiabilidades de las demás, lo que ocurrirá es que error por balance metalúrgico tenderá a ajustar esta variable en mayor medida que las demás.

Luego, esta variable experimentará mayores variaciones dentro de cada caso. Sin embargo, éstas no llegan a ser numéricamente altas. La única excepción sería el caso CA2, donde todas las variables tienen valores iniciales relativamente diferentes a los otros casos y el sistema va cambiando el valor de la ley de alimentación para minimizar el error por reconciliación.

La ley de alimentación varía más que el flujo de alimentación cuando la confiabilidad de la ley de alimentación disminuye.

La mayor desviación estándar, de  $2,11 * 10^{-2}\%$ , se obtiene en el caso CA2. La desviación estándar promedio es  $5,8 * 10^{-3}\%$ .

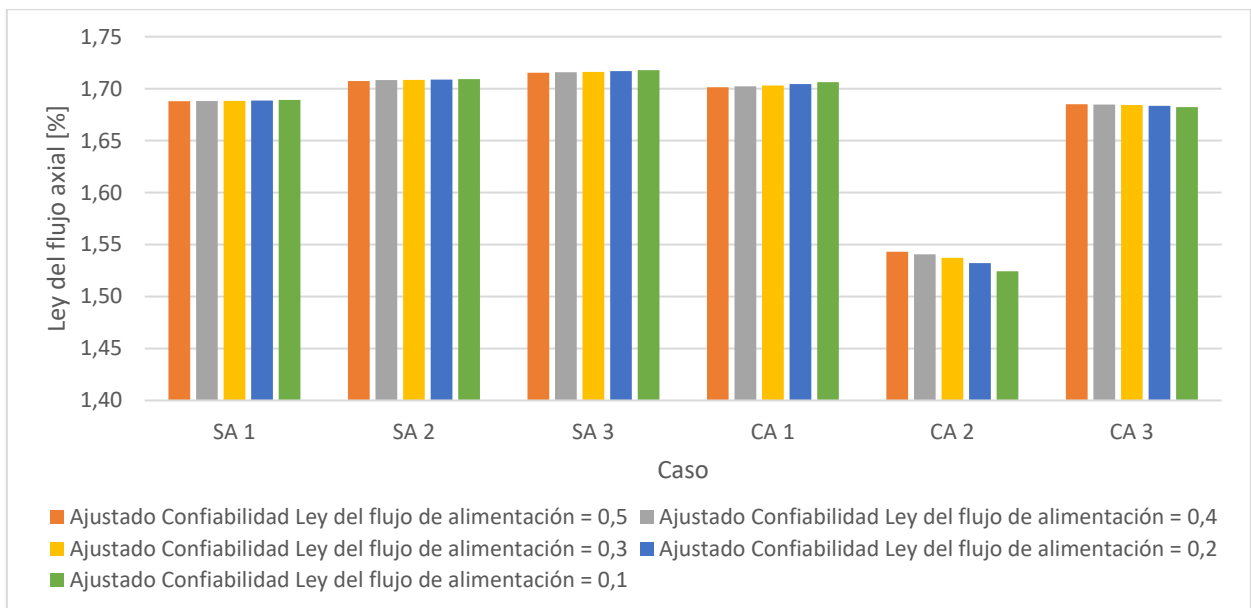


Figura 49: Ley del flujo axial según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de alimentación, celda cónica orientada de d a 2d. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

La ley del flujo axial tiene una confiabilidad de 0,5 y participa en el balance metalúrgico. Luego, variaciones disminuciones en la confiabilidad de  $L_a$ , provocarán que el ajuste por balance másico y metalúrgico pondere más en el valor de esta variable.

Sin embargo, al mantenerse constante su confiabilidad, la variación en el valor de esta variable será muy baja dentro de cada caso, debido a que el sistema tiende a variar más la variable cuya confiabilidad cambia.

En el caso CA2 las variables tienen valores relativamente distintos a los de los demás casos, luego el sistema trata de minimizar el error de reconciliación variando el valor de la ley del flujo axial, sin embargo, estas variaciones son pequeñas debido a que la confiabilidad de esta variable se mantiene constante.

La mayor desviación estándar, de  $7,45 * 10^{-3}\%$ , se obtiene en el caso CA2. La desviación estándar promedio es  $2,09 * 10^{-3}\%$ .

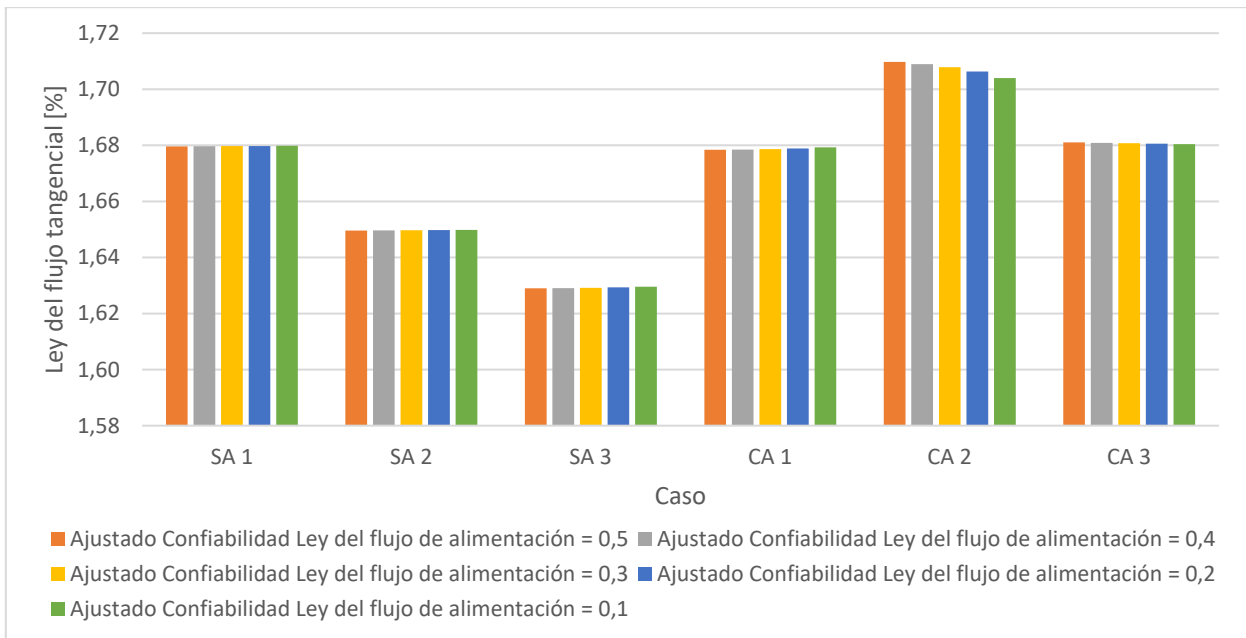


Figura 50: Ley del flujo tangencial según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de del flujo de alimentación, celda cónica orientada de d a 2d. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

Para el caso de la ley del flujo tangencial, ésta tiene una confiabilidad de 0,7 y participa en el balance metalúrgico. Su ponderación en el error por confiabilidad es alta y por ende los ajustes por error de balance metalúrgico y másico no inciden en gran medida en los valores de esta variable. De esta manera, dentro de cada caso el valor de esta variable no tiene cambios perceptibles ante fluctuaciones en la confiabilidad de la ley de alimentación.

A pesar de que inicialmente los valores en el caso CA2 son relativamente diferentes a los valores de los demás casos, el sistema modifica poco el valor de la ley del flujo tangencial dentro de este caso debido a que su confiabilidad es alta y constante.

La mayor desviación estándar, de  $2,28 * 10^{-3}\%$ , se obtiene en el caso CA2. La desviación estándar promedio es  $5,47 * 10^{-4}\%$ .

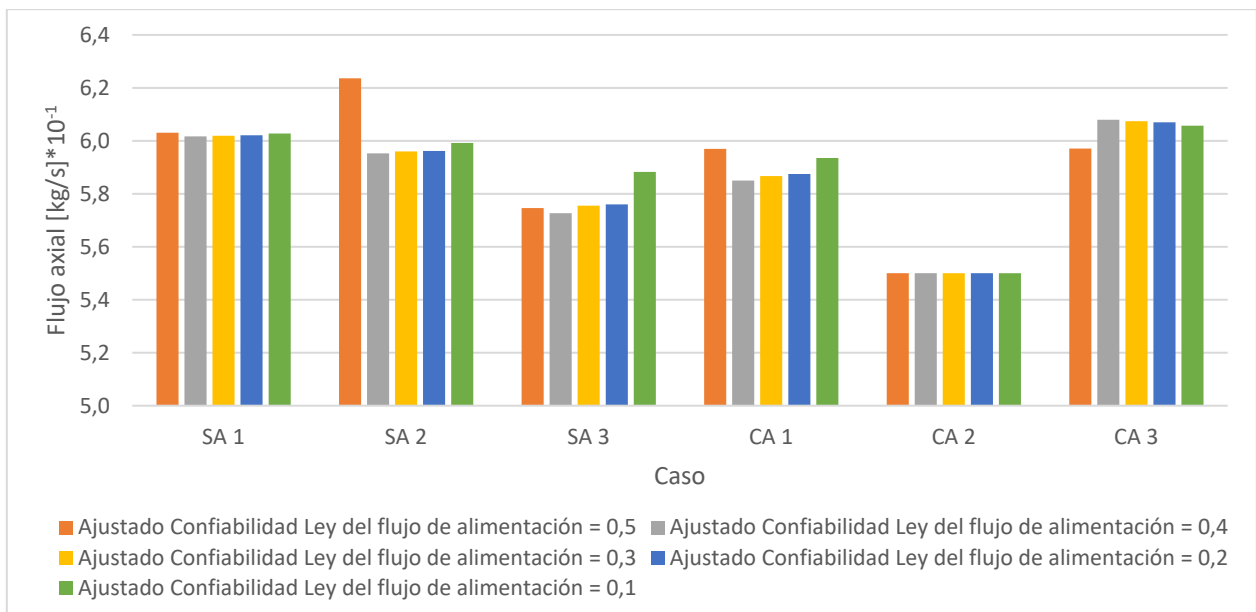


Figura 51: Flujo axial según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de alimentación, celda cónica orientada de d a 2d. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

El flujo axial tiene una confiabilidad de 0,001 y participa en el balance másico y metalúrgico, luego su ponderación en el error por confiabilidad es poco relevante. El ajuste del valor de esta variable recae en el error por balance másico y metalúrgico. Entonces se obtienen variaciones dentro de cada caso, las cuales se deben a la poca ponderación que tienen en el error por confiabilidad, además de las resultantes producto del balance másico y metalúrgico.

El valor inicial del flujo axial para el caso CA2 es relativamente distinto al de los demás casos, sin embargo, las variaciones que tuvo producto del balance másico y metalúrgico son pequeñas.

La mayor desviación estándar, de  $1,21 \cdot 10^{-2}$  kg/s, se obtiene en el caso SA2. La desviación estándar promedio es  $4,75 \cdot 10^{-3}$  kg/s.

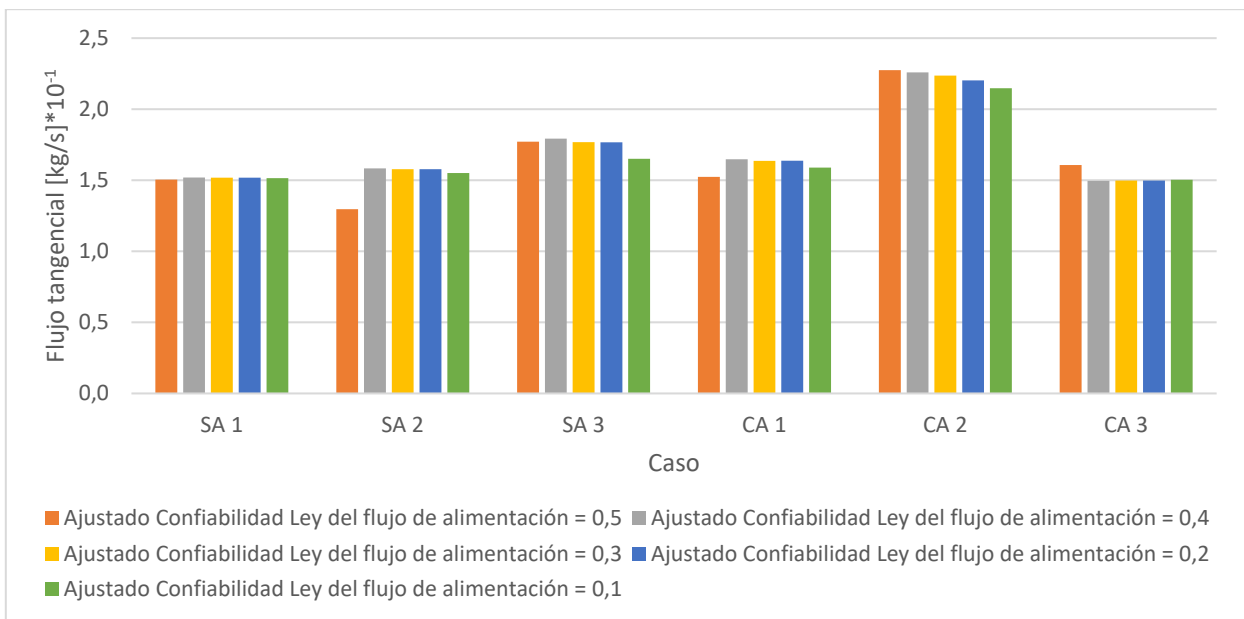


Figura 52: Flujo tangencial según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de alimentación, celda cónica orientada de d a 2d. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

La confiabilidad del flujo tangencial es 0,01 y participa en el balance másico y metalúrgico. Su ponderación en el error por confiabilidad también es poco relevante, por lo tanto, las ecuaciones de balance definen en mayor medida su valor. Luego, variaciones dentro cada caso serán pequeñas producto también de su baja participación en el error por confiabilidad.

Los valores diferentes en el caso CA2 se deben a que inicialmente el valor de esta variable fue relativamente diferente a los valores iniciales de los demás casos.

La mayor desviación estándar, de  $1,24 * 10^{-2}$  kg/s, se obtiene en el caso SA2. La desviación estándar promedio es  $5,62 * 10^{-3}$  kg/s.

De acuerdo con los valores mostrados anteriormente, en las Figuras 53, 54 y 55 se muestran los valores obtenidos para la recuperación metalúrgica, recuperación másica y factor de enriquecimiento, respectivamente.



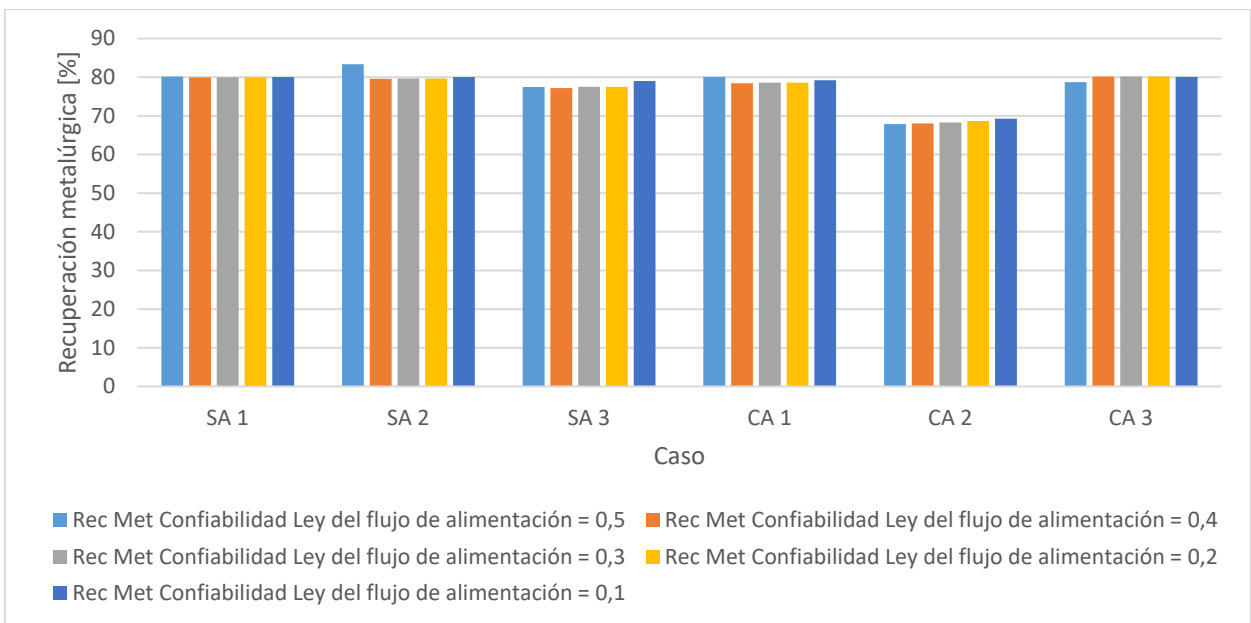


Figura 53: Recuperación metalúrgica según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de alimentación, celda cónica orientada de d a 2d. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

La recuperación metalúrgica es producto de la interacción entre la ley del flujo axial, el flujo axial, la ley del flujo de alimentación y el flujo de alimentación. La única variable que experimenta mayores variaciones dentro de cada caso, al variar la confiabilidad de la ley de alimentación, es la ley de alimentación.

Luego, las variaciones en esta ley provocan variaciones en la recuperación metalúrgica dentro de cada caso.

Los valores que más difieren dentro de todos los casos son los del caso CA2, donde los valores iniciales de las variables son relativamente diferentes a los valores de los demás casos.

La mayor desviación estándar, de 1,61%, se obtiene en el caso SA2. La desviación estándar promedio es 0,72%.

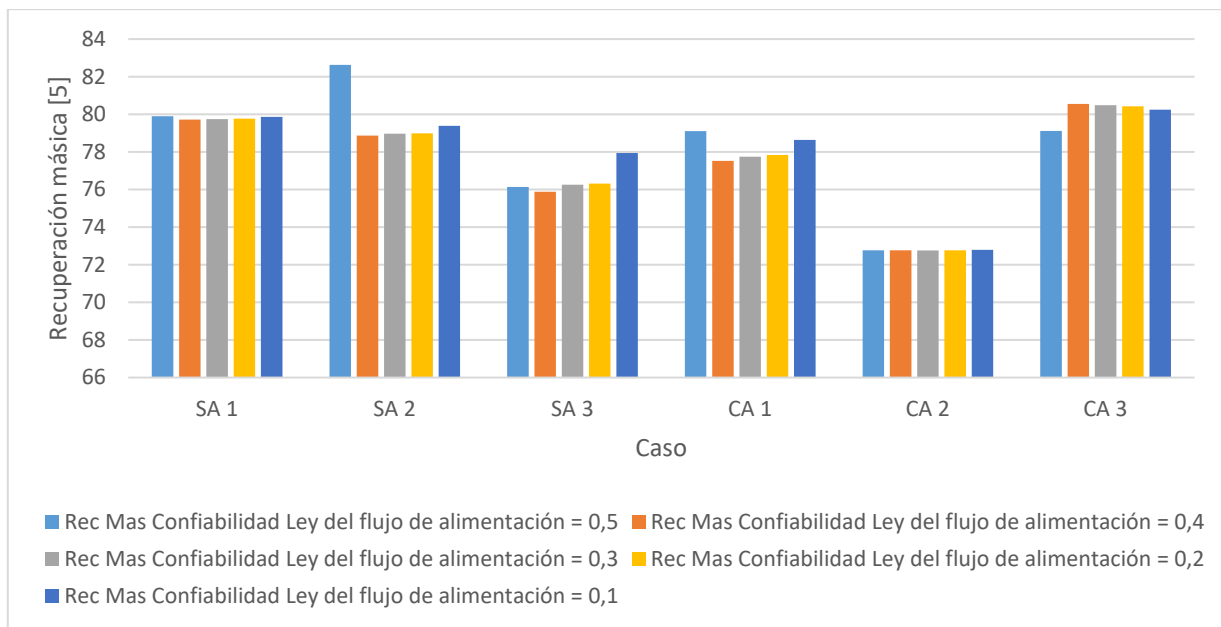


Figura 54: Recuperación másica según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de alimentación, celda cónica orientada de d a 2d. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

La recuperación másica se calcula utilizando las variables flujo axial y flujo de alimentación. Ambas variables modifican su valor al cambiar la confiabilidad de la ley de alimentación, aunque el flujo axial se modifica más que el flujo de alimentación. Luego, al calcular esta recuperación, ésta varía dentro de cada caso.

Los valores dentro del caso CA2 difieren de los demás porque los valores iniciales del flujo axial y del flujo de alimentación también difieren.

La mayor desviación estándar, de 1,61%, se obtiene en el caso SA2. La desviación estándar promedio es 0,63%.

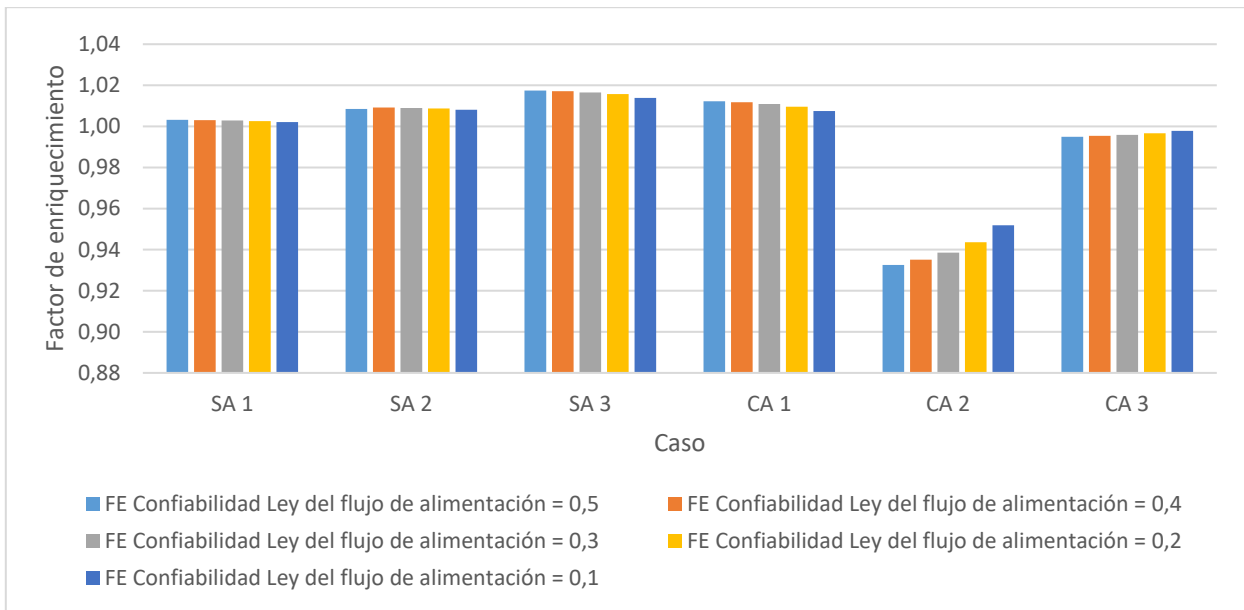


Figura 55: Factor de enriquecimiento según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de alimentación, celda cónica orientada de d a 2d. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

El factor de enriquecimiento se calcula a partir de la ley del flujo axial y la ley del flujo de alimentación. La primera variable se modifica poco dentro de cada caso, mientras que la segunda varía más al cambiar su confiabilidad. Luego, el factor de enriquecimiento tiene variaciones muy bajas dentro de cada caso.

La mayor desviación estándar, de  $7,65 * 10^{-3}$ , se obtiene en el caso CA2. La desviación estándar promedio es  $2,16 * 10^{-3}$ .

#### iv. Análisis de resultados: Variable vs Condición operacional

De manera similar a como se hizo con la celda cilíndrica, de acuerdo con los resultados mostrados al principio de esta sección, y ya realizado un análisis de sensibilidad de éstos vs la confiabilidad del valor de la ley del flujo de alimentación, lo que ahora corresponde es analizar estos resultados obtenidos post reconciliación.

En seguida, con el objetivo de facilitar este análisis, en las Figuras 56, 57, 58, 59, 60 y 61 se grafica el valor de la variable vs cada condición operacional o caso.

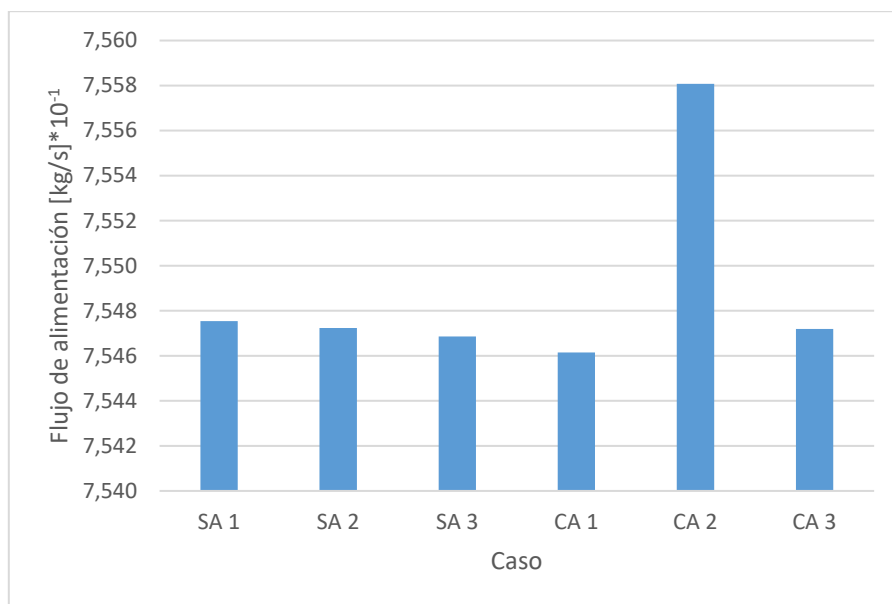


Figura 56: Flujo de alimentación vs cada caso, celda cónica orientada de d a 2d. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

El flujo de alimentación varía sumamente poco entre cada caso, con excepción del caso CA2, donde se incrementa. La media de los flujos de alimentación es 0,7549 kg/s, mientras que en el caso CA2 el valor de este flujo es 0,7558 kg/s. Luego, el incremento es despreciable. La desviación estándar es  $4,6 * 10^{-4}$  kg/s.

Esta invariabilidad del flujo de alimentación se debe a que la bomba ingresa pulpa a la celda a presión constante.

Por otra parte, el ingreso de aire a la celda no altera los flujos de alimentación, lo cual se debe a la orientación de la celda, de d a 2d, ya que el aumento del área transversal disminuye la diferencia de presión en la entrada de la celda.

No se puede considerar el efecto del campo magnético, ya que tanto el solenoide como los imanes permanentes están ubicados en la mitad de la celda más próxima a la salida.

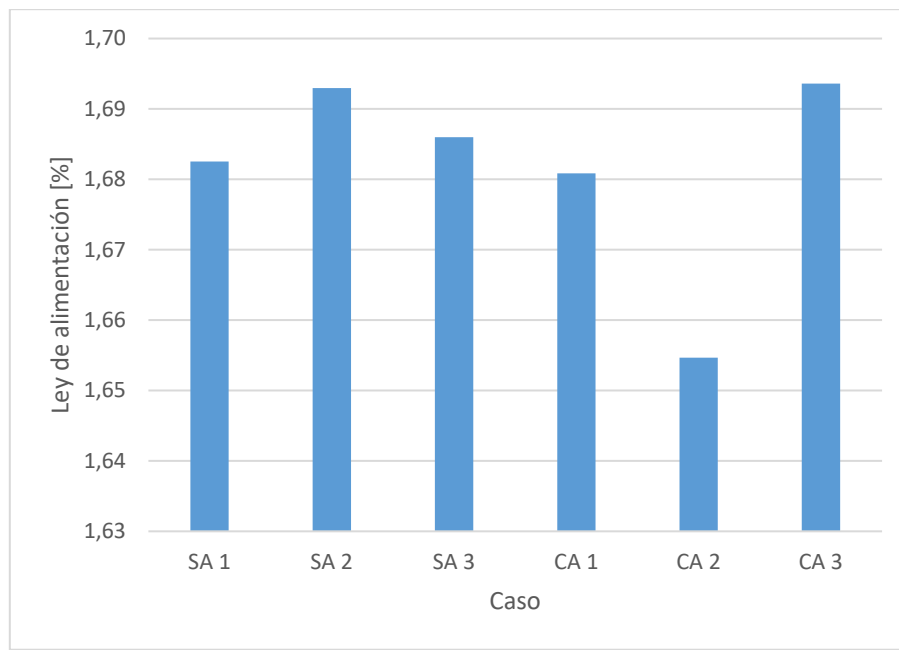


Figura 57: Ley del flujo de alimentación vs cada caso, celda cónica orientada de d a 2d. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

Las variaciones en la ley del flujo de alimentación se deben a la heterogeneidad propia de las muestras. La desviación estándar es 0,014%. La ley del flujo de alimentación se ubica en el rango [1,65 - 1,69]%, manteniéndose su mayoría entre 1,68 y 1,69%. El caso CA3 con incorporación de aire a la celda y con aplicación del campo magnético de alta intensidad de los imanes permanentes es el que tiene la mayor ley del flujo de alimentación, de 1,69%. La ley de del flujo de alimentación promedio es 1,68%.

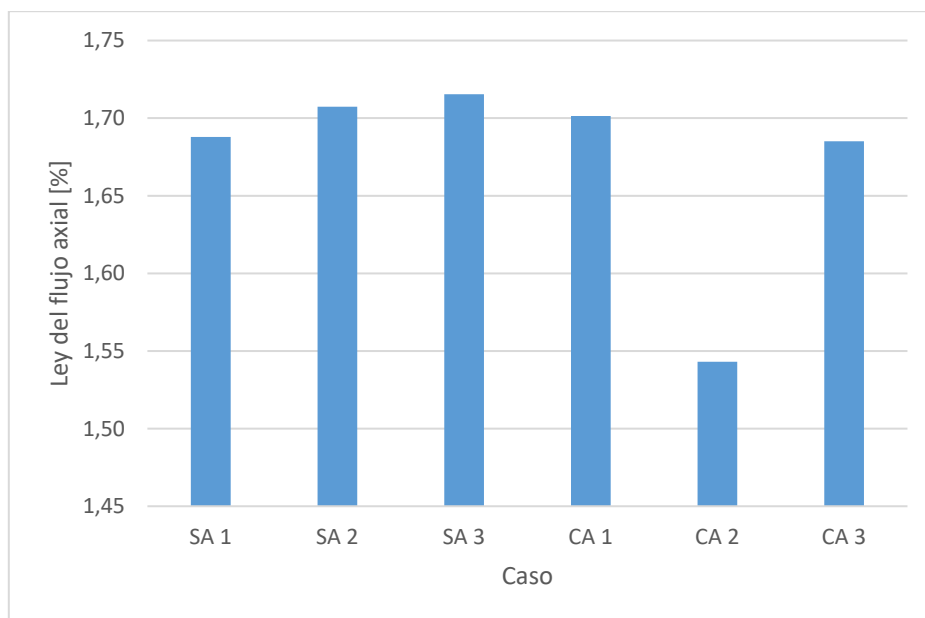


Figura 58: Ley del flujo axial vs cada caso, celda cónica orientada de d a 2d. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

En los casos sin aplicación de campo magnético, al ingresar aire a la celda la ley del flujo axial aumenta un poco con respecto al caso SA1, producto del efecto del aire en la flotación. Este aumento es de 0,01% en la ley de cobre.

Para los casos sin ingreso de aire la ley del flujo axial aumenta al aplicar el campo magnético de baja intensidad del solenoide porque la intensidad del campo magnético es suficiente como para concentrar partículas de cobre en el flujo axial. Este aumento es de 0,02% en la ley de cobre con respecto al caso SA1. Al aplicar el campo magnético de alta intensidad de los imanes permanentes las partículas se concentran más en el flujo axial, debido a una mayor separación de los flujos axial y tangencial, producto del aumento de la sección transversal, al ir de d a 2d. Luego, la ley del flujo axial aumenta, en 0,03% en la ley de cobre con respecto al caso SA1.

Para los casos con incorporación de aire, si se aplica el campo magnético de baja intensidad del solenoide, el campo magnético no logra concentrar partículas de cobre en el flujo axial debido a un mayor efecto centrífugo, concentrando en el flujo tangencial, provocando una disminución en la ley del flujo axial, de 0,16% de la ley de cobre con respecto al caso CA1. Si se aplica el campo alta intensidad de los imanes permanentes, el campo magnético afecta al flujo tangencial, y, por lo tanto, disminuye un poco la ley del flujo axial, en 0,02% de la ley de cobre con respecto al caso CA1.

La mayor ley del flujo axial, de 1,72%, se obtiene en el caso SA3. La desviación estándar es 0,06% de la ley de cobre. La ley flujo axial promedio es 1,67%.

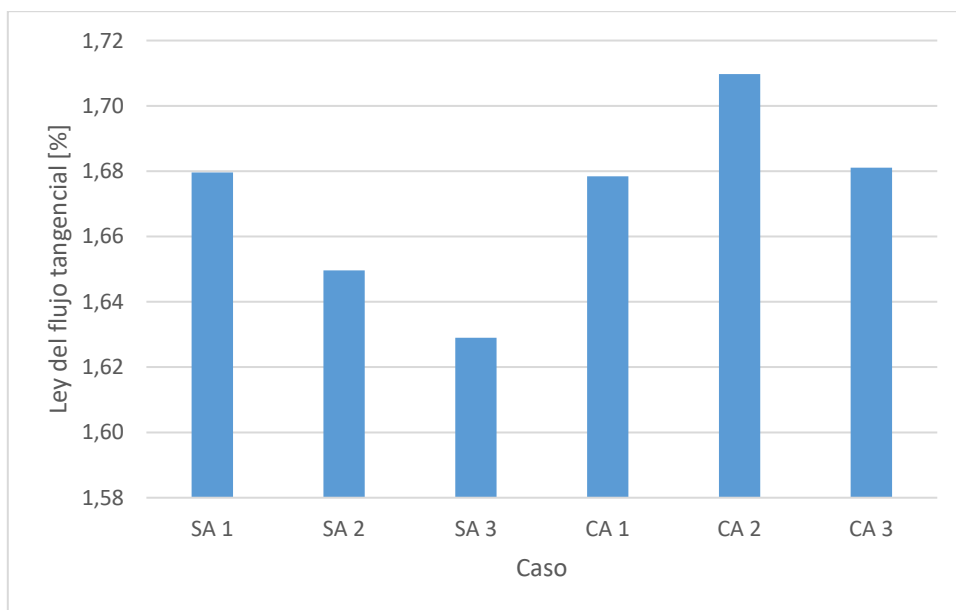


Figura 59: Ley del flujo tangencial vs cada caso, celda cónica orientada de d a 2d. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

En los casos sin aplicación de campo magnético, al ingresar aire a la celda el efecto centrífugo es mayor que el efecto del aire en la flotación, por lo que prácticamente la ley del flujo tangencial no varía. Esta ley disminuye en 0,001% en la ley de cobre con respecto al caso SA1.

En los casos sin ingreso de aire a la celda, la mayor ley del flujo tangencial se obtiene al no aplicar campo magnético ya que cuando se aplica el campo magnético de baja intensidad del solenoide, este campo magnético concentra más partículas de cobre en el flujo axial que en el caso SA1 y, por tanto, menos partículas se concentran en el flujo tangencial. Esta disminución en la ley del flujo tangencial es de 0,03% en la ley de cobre. Luego, se logra una concentración mayor en el flujo axial que en el caso SA1 cuando se aplica el campo magnético de alta intensidad de los imanes permanentes, lo que genera una disminución de la ley tangencial, de 0,05% de la ley de cobre.

Para los casos con ingreso de aire, si se aplica el campo magnético de baja intensidad del solenoide, éste tiene más contacto con el flujo tangencial producto del efecto centrífugo. Luego, la ley del flujo tangencial aumenta, en 0,03% en la ley de cobre, con respecto al caso CA1. Mientras que, cuando se aplica el campo magnético de alta intensidad de los imanes permanentes, debido a la fuerza centrífuga, éste tiene contacto con el flujo tangencial, aumentando en 0,003% la ley de este flujo, con respecto al caso CA1.

La mayor ley del flujo tangencial, de 1,7%, se obtiene en el caso CA2. La desviación estándar es 0,03% de la ley de cobre. La ley del flujo tangencial promedio es 1,67%.

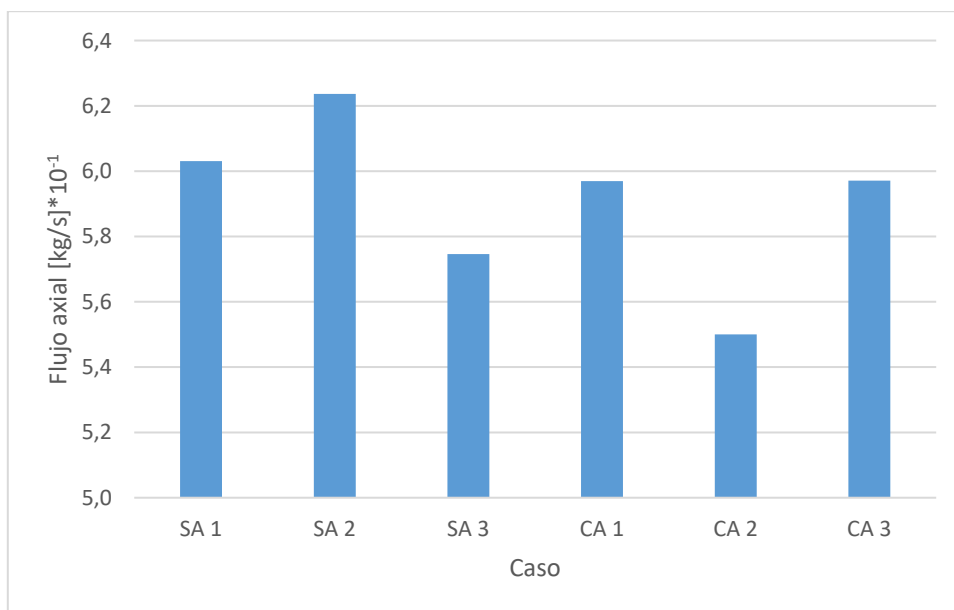


Figura 60: Flujo axial vs cada caso, celda cónica orientada de d a 2d. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

En los casos sin aplicación de campo magnético, al incorporar aire a la celda el flujo axial disminuye un poco debido a un mayor efecto centrífugo dentro de la celda. Esta disminución es de 0,01 kg/s con respecto al caso SA1.

Para los casos sin incorporación de aire, el flujo axial aumenta cuando se aplica el campo magnético de baja intensidad del solenoide debido a la alineación de este campo magnético con el flujo. Este aumento es de 0,02 kg/s con respecto al caso SA1. Al aplicar el campo magnético de alta intensidad de los imanes permanentes, éste genera una barrera al flujo axial y, por tanto, este flujo disminuye, en 0,03 kg/s con respecto al caso SA1.

Para los casos con ingreso de aire, al aplicar el campo magnético de baja intensidad del solenoide, el flujo tangencial aumenta debido a un mayor efecto centrífugo que genera mayor interacción entre este flujo y el campo magnético y, por tanto, el flujo axial disminuye, en 0,05 kg/s con respecto al caso CA1. Al aplicar el campo magnético de alta intensidad de los imanes permanentes, el efecto centrífugo es tal que el campo magnético no afecta al flujo axial y éste es similar al del caso CA1.

El mayor flujo axial, de 0,62 kg/s, se obtiene en el caso SA2. La desviación estándar es 0,03 kg/s. El flujo axial promedio es 0,591 kg/s.



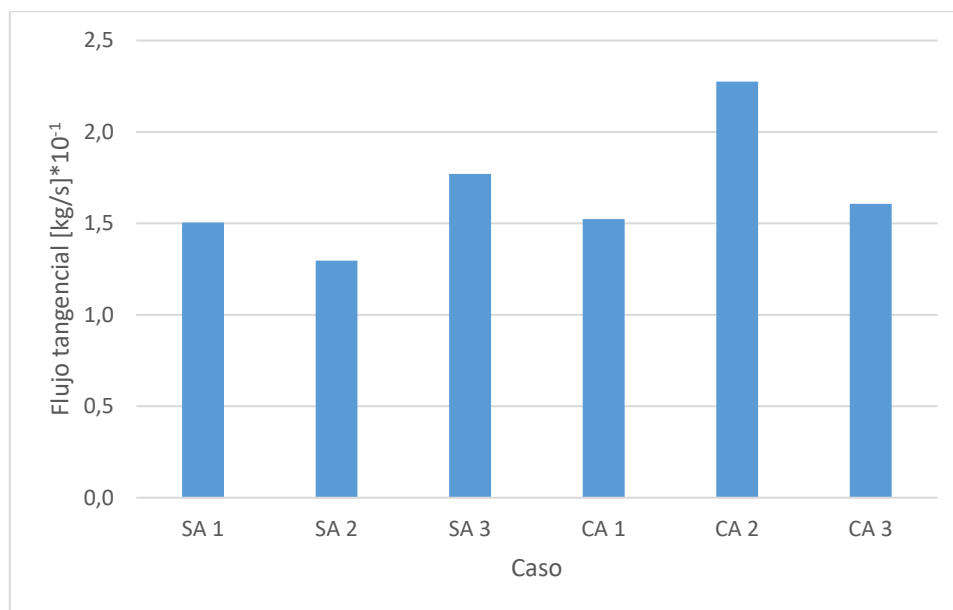


Figura 61: Flujo tangencial vs cada caso, celda cónica orientada de d a 2d. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

En los casos sin aplicación de campo magnético, al ingresar aire a la celda el flujo tangencial aumenta un poco debido a un mayor efecto centrífugo dentro de la celda. Este aumento es de  $0,002 \text{ kg/s}$  con respecto al caso SA1.

Para los casos sin ingreso de aire, si se aplica el campo magnético de baja intensidad del solenoide, este campo magnético se alinea con el flujo axial y, por tanto, este flujo aumenta, lo que genera una disminución del flujo tangencial, de  $0,02 \text{ kg/s}$  con respecto al caso SA1. Al aplicar campo magnético de alta intensidad de los imanes permanentes, se genera una barrera al flujo axial y, por ende, aumenta el flujo tangencial, en  $0,03 \text{ kg/s}$  con respecto al caso SA1.

Para los casos con ingreso de aire, si se aplica el campo magnético de baja intensidad, el alto efecto centrífugo producido por la incorporación de aire a la celda genera que los flujos se separen, por lo que el campo magnético tiene más contacto con el flujo tangencial, llevando partículas presentes en el flujo axial al flujo tangencial, y, por tanto, este flujo se incrementa, en  $0,08 \text{ kg/s}$  con respecto al caso CA1. Luego, al aplicar el campo magnético de alta intensidad de los imanes permanentes, este campo magnético afecta al flujo tangencial producto del alto efecto centrífugo, aunque en muy poca magnitud debido a la distribución espacial de este campo. Con esto se concentra un poco más de partículas de cobre en el flujo tangencial, haciendo que éste aumente, en  $0,01 \text{ kg/s}$  con respecto al caso CA1.

El mayor flujo tangencial, de  $0,23 \text{ kg/s}$ , se obtiene en el caso CA2. La desviación estándar es  $0,03 \text{ kg/s}$ . El flujo tangencial promedio es  $0,166 \text{ kg/s}$ .

De acuerdo con los valores mostrados anteriormente, en las Figuras 62, 63 y 64 se grafican los valores obtenidos para la recuperación metalúrgica, recuperación másica y factor de enriquecimiento, respectivamente.

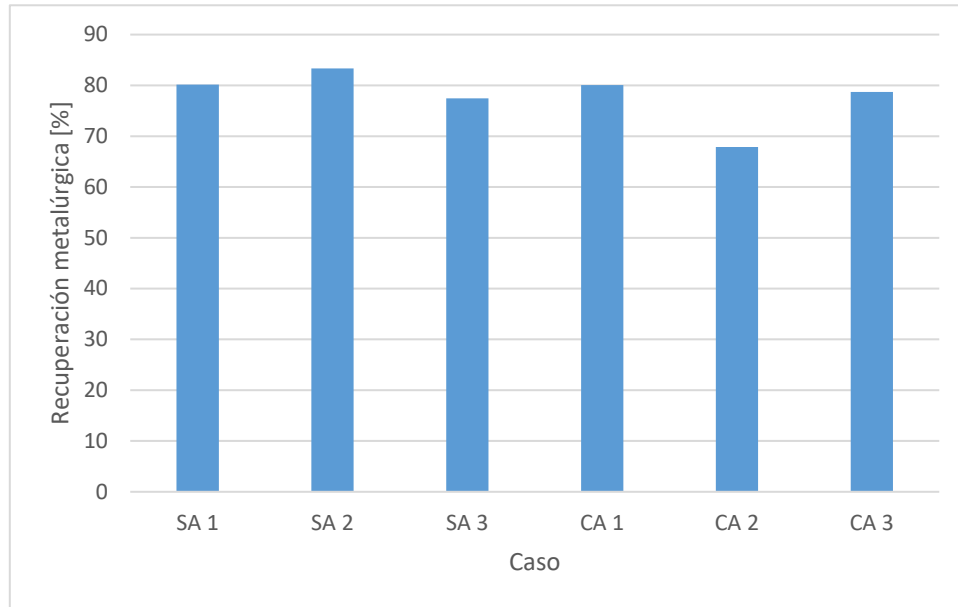


Figura 62: Recuperación metalúrgica vs cada caso, celda cónica orientada de d a 2d. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

La mayor recuperación metalúrgica, de 83,33%, se obtiene en el caso SA2. La recuperación metalúrgica promedio es 77,93%. La desviación estándar es 5,31%.

Para los casos sin aplicación de campo magnético, la recuperación metalúrgica no cambia al ingresar aire a la celda. Es decir, la concentración ocurre de igual manera con o sin el efecto centrífugo extra generado por la incorporación de aire.

Para los casos sin ingreso de aire, la recuperación metalúrgica aumenta al aplicar el campo magnético de baja intensidad del solenoide, en 3,18% con respecto al caso SA1, debido al aumento en la ley del flujo axial por el efecto del campo magnético sobre este flujo. Al aplicar el campo de alta intensidad de los imanes permanentes la recuperación metalúrgica disminuye, en 2,69% con respecto al caso SA1, debido a la disminución del flujo axial frente a este campo magnético.

Para los casos con ingreso de aire, la ley del flujo axial disminuye porque el campo magnético de baja intensidad del solenoide afecta al flujo tangencial, disminuyendo la recuperación metalúrgica, en 12,21% con respecto al caso CA1. Cuando se aplica el campo magnético de alta intensidad de los imanes permanentes, éste afecta al flujo tangencial, por lo que la concentración en el flujo axial disminuye. Luego, la recuperación metalúrgica disminuye, en 1,36% con respecto al caso CA1.

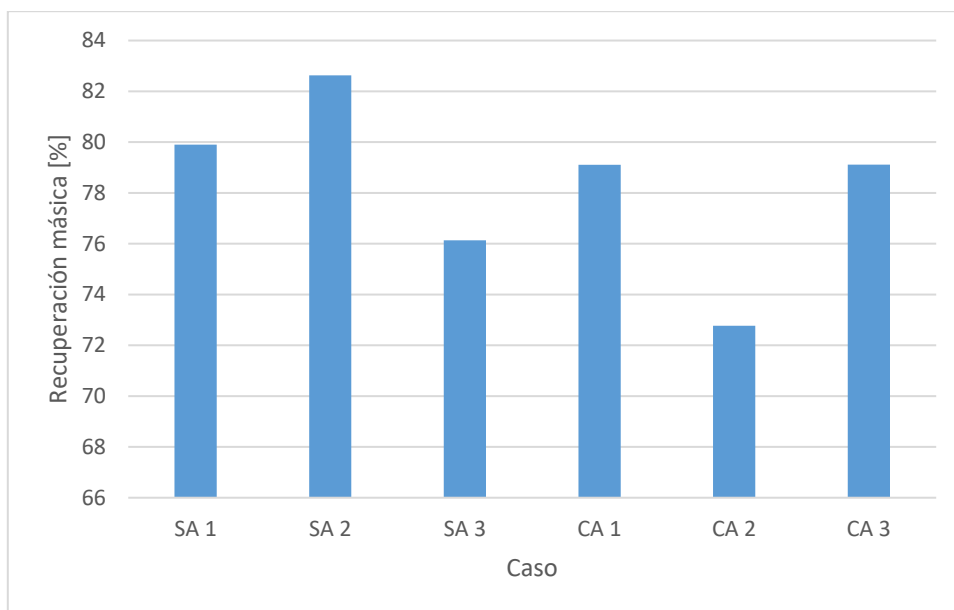


Figura 63: Recuperación másica vs cada caso, celda cónica orientada de d a 2d. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

La mayor recuperación másica, de 82,63%, se obtiene en el caso SA2. La recuperación másica promedio fue 78,28%. La desviación estándar es 3,4%.

Para los casos sin aplicación de campo magnético, al ingresar aire a la celda la recuperación másica disminuye, en 0,79% con respecto al caso SA1. Esto se debe a que el flujo axial disminuye producto del efecto centrífugo adicional generado por la incorporación de aire.

Para los casos sin ingreso de aire, el flujo axial aumenta cuando se aplica el campo magnético de baja intensidad del solenoide, debido a la alineación de este campo magnético con el flujo. Esto genera que la recuperación másica aumente, en 2,73% con respecto al caso SA1. Cuando se aplica el campo magnético de alta intensidad de los imanes permanentes el flujo axial disminuye y, por tanto, la recuperación másica también disminuye, en 3,76% con respecto al caso SA1.

Para los casos con ingreso de aire, si se aplica el campo magnético de baja intensidad del solenoide el flujo axial disminuye y, por tanto, disminuye la recuperación másica, en 6,34% con respecto al caso CA1. Al aplicar el campo magnético de alta intensidad de los imanes permanentes, el efecto centrífugo es tal que el campo magnético no afecta al flujo axial y éste último es similar al del caso CA1. Luego, la recuperación másica no varía.

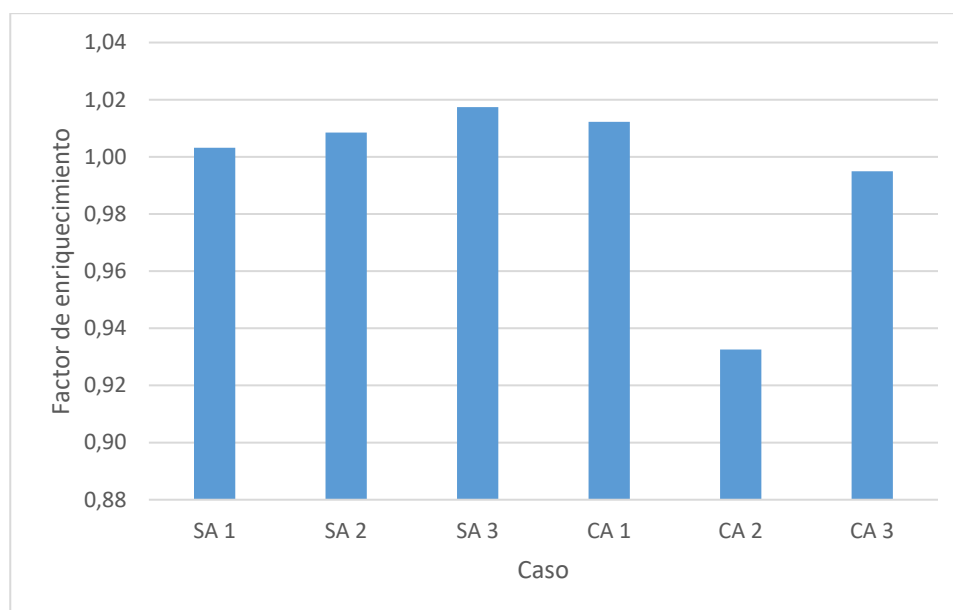


Figura 64: Factor de enriquecimiento vs cada caso, celda cónica orientada de d a 2d. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

El mayor factor de enriquecimiento, de 1,017; se obtiene en el caso SA3. El factor de enriquecimiento promedio es 0,995. La desviación estándar es 0,031.

En los casos sin aplicación de campo magnético, al ingresar aire la ley del flujo axial aumenta, debido a un aumento del efecto del aire en la flotación. Luego, el factor de enriquecimiento también aumenta, en 0,009 con respecto al caso SA1.

Para los casos sin ingreso de aire, la ley del flujo axial aumenta cuando se aplica el campo de baja intensidad del solenoide, luego el factor de enriquecimiento aumenta, en 0,005 con respecto al caso SA1. Mientras que, cuando se aplica el campo magnético de alta intensidad de los imanes permanentes, la ley del flujo axial aumenta aún más. Luego, el factor de enriquecimiento también aumenta, en 0,014 con respecto al caso SA1.

Para los casos con incorporación de aire, la ley del flujo axial disminuye al aplicar el campo magnético de baja intensidad del solenoide, luego el factor de enriquecimiento disminuye, en 0,08 con respecto al caso CA1. Mientras que cuando se aplica el campo magnético de alta intensidad de los imanes permanentes la ley del flujo también disminuye, aunque en menor medida. Luego, el factor de enriquecimiento disminuye, en 0,017 con respecto al caso CA1.

### 4.2.3 Prueba piloto con celda cónica orientada de 2d a d

A continuación, se muestran los resultados más relevantes obtenidos con la operación de la celda cónica, con orientación de 2d a d.

## i. Mediciones de campo magnético de solenoide

En seguida, en la Tabla 42 se muestran las mediciones del campo magnético generado por el solenoide durante la operación de la celda cónica orientada de 2d a d.

Tabla 42: Mediciones campo magnético solenoide, celda cónica orientada de 2d a d.

<b>Campo medido</b>	
En pared [Gauss]	120
A la entrada [Gauss]	20
En el centro [Gauss]	50

La cantidad de espiras fue 176. El valor máximo fue 120 Gauss, mayor que en los dos casos anteriores, lo cual se debe a la orientación de la celda. Para la celda cónica ubicada de d a 2d el diámetro del solenoide crece progresivamente, mientras que en este caso va disminuyendo, lo cual explica esta generación de mayor intensidad del campo magnético, al menos en la pared y en el centro. Además, la cantidad de espiras es mayor que en los demás casos lo cual afectaría el valor medido en la pared.

Por otra parte, las espiras que conforman el solenoide no quedan perfectamente lisas, provocando una disminución de la intensidad de corriente efectiva y, por ende, una disminución del campo magnético que en teoría se genera.

## ii. Resultados reconciliados

Lo primero es mostrar los resultados obtenidos luego de la reconciliación. Estos resultados se obtuvieron asignando, al igual que en el caso anterior, un valor de confiabilidad de 0,5 a la ley de alimentación. Este valor fue otorgado luego de un análisis de la rigurosidad del proceso de toma de muestras y se encuentra acorde a los valores de confiabilidad asignados para las demás variables. El error de esta reconciliación fue de 2,43%, lo cual es suficiente para ser aceptado.

Todas las tablas referentes al proceso de reconciliación de datos se encuentran en la sección Anexos, en la subsección B.4.

A continuación, en la Tabla 43 se muestran los resultados obtenidos para cada variable, según los casos:

SA1: sin inyección de aire y sin aplicación de campo magnético.

SA2: sin inyección de aire y con aplicación de campo magnético de baja intensidad (solenoide).

SA3: sin inyección de aire y con aplicación de campo magnético de alta intensidad (imanes permanentes de neodimio).

CA1: con inyección de aire y sin aplicación de campo magnético.

CA2: con inyección de aire y con aplicación de campo magnético de baja intensidad (solenoides).

CA3: con inyección de aire y con aplicación de campo magnético de alta intensidad (imanes permanentes de neodimio).

Tabla 43: Celda cónica orientada de 2d a d, resultados post reconciliación para cada variable, según caso.

<b>Celda cónica orientada de 2d a d</b>		
Variable		Valor
Flujo de alimentación [kg/s]	SA 1	0,755
	SA 2	0,755
	SA 3	0,754
	CA 1	0,754
	CA 2	0,755
	CA 3	0,755
Ley del flujo de alimentación [%]	SA 1	1,620
	SA 2	1,600
	SA 3	1,601
	CA 1	1,602
	CA 2	1,656
	CA 3	1,641
Ley del flujo axial [%]	SA 1	1,642
	SA 2	1,611
	SA 3	1,634
	CA 1	1,642
	CA 2	1,653
	CA 3	1,661
Ley del flujo tangencial [%]	SA 1	1,608
	SA 2	1,629
	SA 3	1,616
	CA 1	1,597
	CA 2	1,641
	CA 3	1,638
Flujo axial [kg/s]	SA 1	0,600
	SA 2	0,624
	SA 3	0,569
	CA 1	0,593
	CA 2	0,594
	CA 3	0,587
Flujo tangencial [kg/s]	SA 1	0,150
	SA 2	0,126
	SA 3	0,175
	CA 1	0,151
	CA 2	0,163
	CA 3	0,162

Los resultados reconciliados arrojan que las leyes del flujo axial son semejantes a las leyes del flujo tangencial y el flujo axial es mayor al flujo tangencial, en proporción 4:1. Cuando se elige el flujo axial como concentrado, la recuperación metalúrgica promedio es de 79,79%, la recuperación másica promedio es de 78,79% y el factor de enriquecimiento promedio es de 1,013. Mientras que cuando se elige el flujo tangencial como concentrado, la recuperación metalúrgica promedio es de 20,49%, la recuperación másica promedio es de 20,48% y el factor de enriquecimiento promedio es de 1,001.

Ahora bien, cuando la recuperación metalúrgica es del orden de la recuperación másica, no hay concentración, lo que se evidencia con los factores de enriquecimiento promedios, cercanos a 1.

Por otra parte, normalmente el concentrado rougher es menor en flujo que el relave, sin embargo, se decide tomar el flujo axial como concentrado sólo por el mayor factor de enriquecimiento promedio que se obtiene en comparación al obtenido cuando se considera el flujo tangencial como concentrado.

De acuerdo con lo anterior, las recuperaciones metalúrgicas, másicas y el factor de enriquecimiento se muestran en las Tablas 44, 45 y 46.

Tabla 44: Recuperación metalúrgica, celda cónica orientada de 2d a d.

Caso	Rec Met [%]
SA 1	80,491
SA 2	83,218
SA 3	77,029
CA 1	80,637
CA 2	78,545
CA 3	78,810

Tabla 45: Recuperación másica, celda cónica orientada de 2d a d.

Caso	Rec Más [%]
SA 1	79,452
SA 2	82,647
SA 3	75,460
CA 1	78,662
CA 2	78,684
CA 3	77,835



Tabla 46: Factor de enriquecimiento, celda cónica de 2d a d.

Caso	FE
SA 1	1,013
SA 2	1,007
SA 3	1,021
CA 1	1,025
CA 2	0,998
CA 3	1,013

Inicialmente se realiza un análisis de sensibilidad con el fin de estudiar cuánto la incidencia de la ley de alimentación en la reconciliación de datos, tal cual se realizó con la celda cilíndrica y cónica orientada de d a 2d.

### iii. Análisis de sensibilidad al variar confiabilidad de ley de alimentación

Tal como se aplicó para los resultados obtenidos con la celda cilíndrica y cónica orientada de d a 2d, la confiabilidad otorgada a la ley de alimentación toma 5 valores, desde 0,5 hasta 0,1. Los resultados anteriormente mostrados fueron obtenidos asignando una confiabilidad de 0,5 para la ley del flujo de alimentación, mientras que las tablas con los resultados obtenidos al variar el factor de confiabilidad en la ley del flujo de alimentación de 0,4 a 0,1 se muestran en la sección Anexos, en la subsección 8.2.4. Luego, los resultados totales obtenidos se presentan gráficamente como sigue.

En las Figuras 65, 66, 67, 68, 69 y 70 se muestran, respectivamente, los valores obtenidos para el flujo de alimentación, ley del flujo de alimentación, ley del flujo axial, ley del flujo tangencial, flujo axial y flujo tangencial, al variar el factor de confiabilidad de la ley del flujo de alimentación de 0,5 hasta 0,1; según los casos:

SA1: sin ingreso de aire a presión y sin aplicación de campo magnético.

SA2: sin ingreso de aire a presión y con aplicación de campo magnético de baja intensidad (solenoides).

SA3: sin ingreso de aire a presión y con aplicación de campo magnético de alta intensidad (imanes permanentes de neodimio).

CA1: con ingreso de aire a presión y sin aplicación de campo magnético.

CA2: con ingreso de aire a presión y con aplicación de campo magnético de baja intensidad (solenoides).

CA3: con ingreso de aire a presión y con aplicación de campo magnético de alta intensidad (imanes permanentes de neodimio).

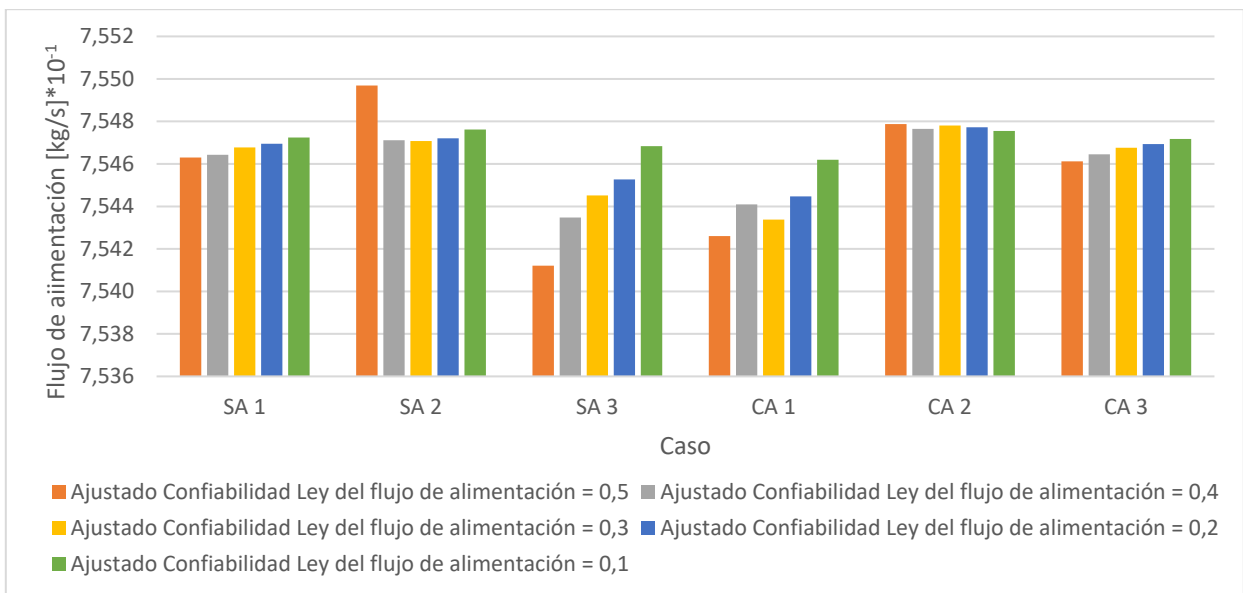


Figura 65: Flujo de alimentación según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de alimentación, celda cónica orientada de 2d a d. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

El flujo de alimentación tiene un valor de confiabilidad de 0,9 y se encuentra presente en el balance másico y metalúrgico.

Ahora bien, su ponderación en el error por confiabilidad es alta, y a pesar de que el error por balance másico y metalúrgico pondere un 70% del error total, variaciones en la confiabilidad de la ley de alimentación provocan muy poca variación en su valor dentro de cada caso. La desviación estándar promedio es  $9,13 * 10^{-5}$  kg/s. Luego estas diferencias mínimas en los valores dentro de cada caso se atribuyen al ajuste por balance másico y metalúrgico.

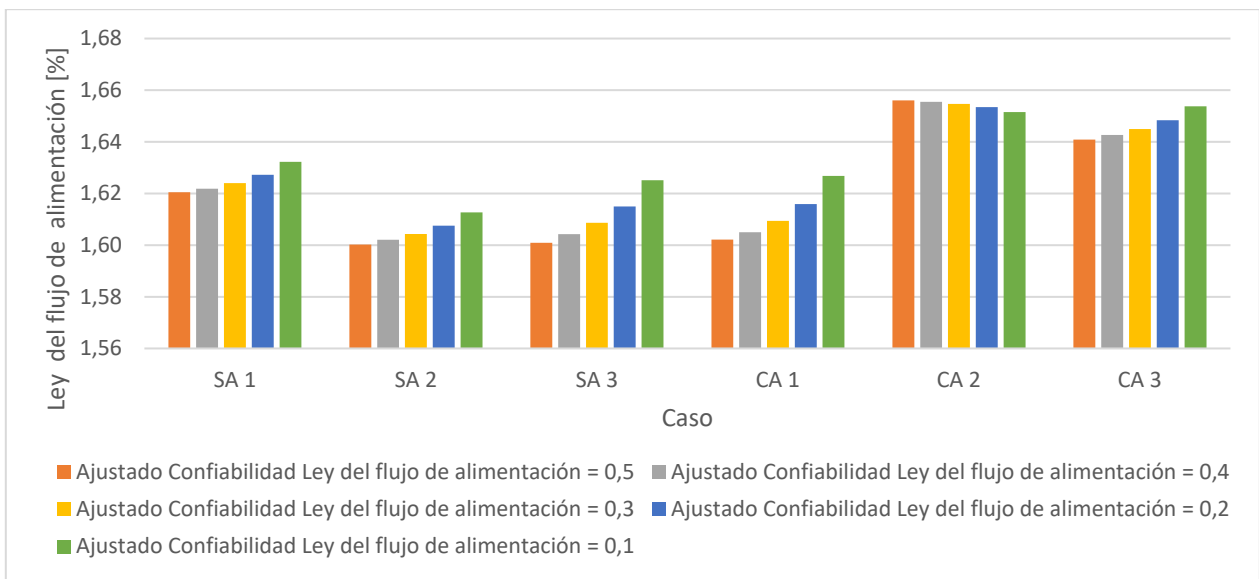


Figura 66: Ley del flujo de alimentación según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de alimentación, celda cónica orientada de 2d a d. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

La confiabilidad inicial de la ley del flujo de alimentación es 0,5 y esta variable se encuentra en el balance metalúrgico. Si disminuye su confiabilidad, su ponderación en el error por confiabilidad es cada vez menor y priman los ajustes para minimizar el error por balance másico y metalúrgico. Luego, al cambiar la confiabilidad de esta variable manteniendo constantes las confiabilidades de las demás, lo que ocurre es que error por balance metalúrgico tiende a ajustar esta variable en mayor medida que las demás.

Luego, esta variable experimenta mayores variaciones dentro de cada caso. Sin embargo, éstas no son numéricamente altas. La desviación estándar promedio es  $5,99 * 10^{-3}$  kg/s.

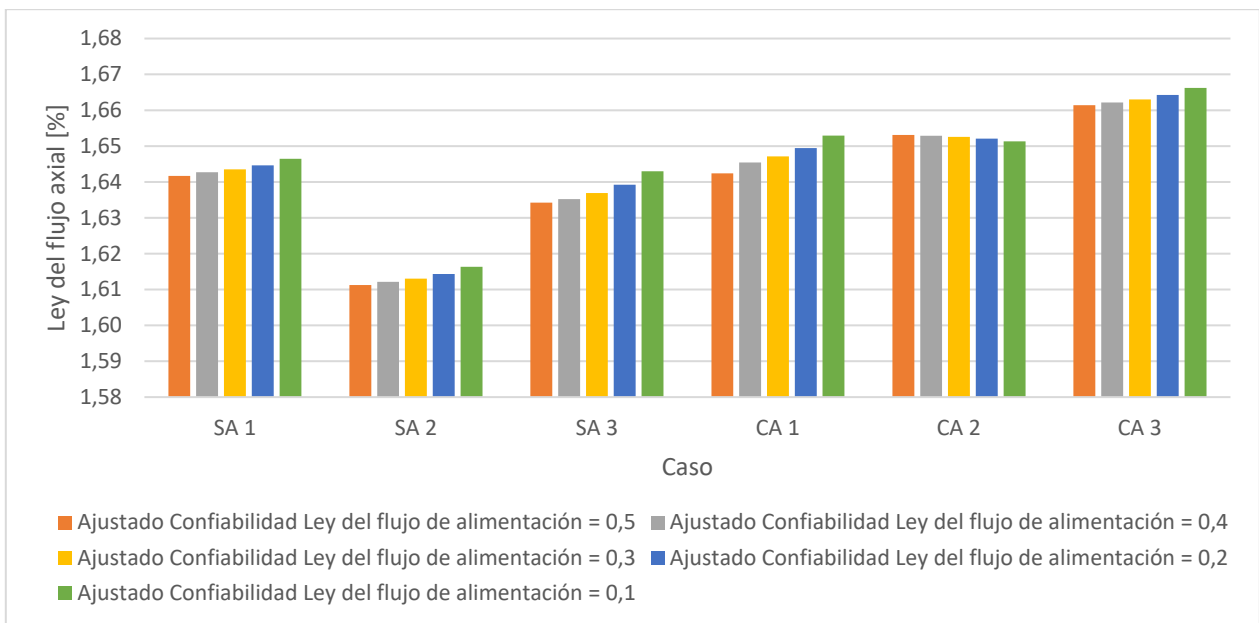


Figura 67: Ley del flujo axial según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de alimentación, celda cónica orientada de 2d a d. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

La ley del flujo axial tiene una confiabilidad de 0,5 y participa en el balance metalúrgico. Luego, disminuciones en la confiabilidad de la ley de alimentación, provocan que el ajuste por balance másico y metalúrgico pondere más en el valor de esta variable.

Sin embargo, al mantenerse constante su confiabilidad, la variación en el valor de esta variable es muy baja dentro de cada caso, debido a, como se dijo anteriormente, que el sistema tiende a variar más la variable cuya confiabilidad cambia. La desviación estándar promedio es  $2,32 * 10^{-3}\%$ .

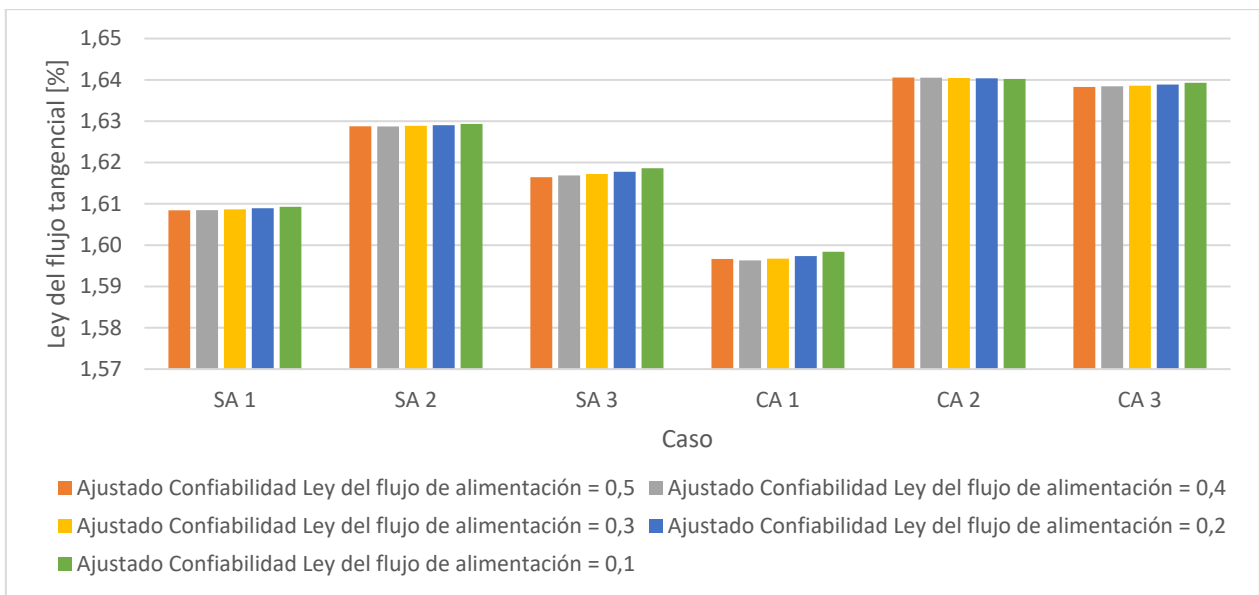


Figura 68: Ley del flujo tangencial según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de alimentación, celda cónica orientada de 2d a d. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

Para el caso de la ley del flujo tangencial, ésta tiene una confiabilidad de 0,7 y participa en el balance metalúrgico. Su ponderación en el error por confiabilidad es alta y por ende los ajustes por error de balance metalúrgico y másico no afectan tanto los valores de esta variable. De esta manera, los valores dentro de cada caso se mantienen relativamente constantes al ir variando la confiabilidad de la ley de alimentación. La desviación estándar promedio es  $4,71 * 10^{-4}\%$ .

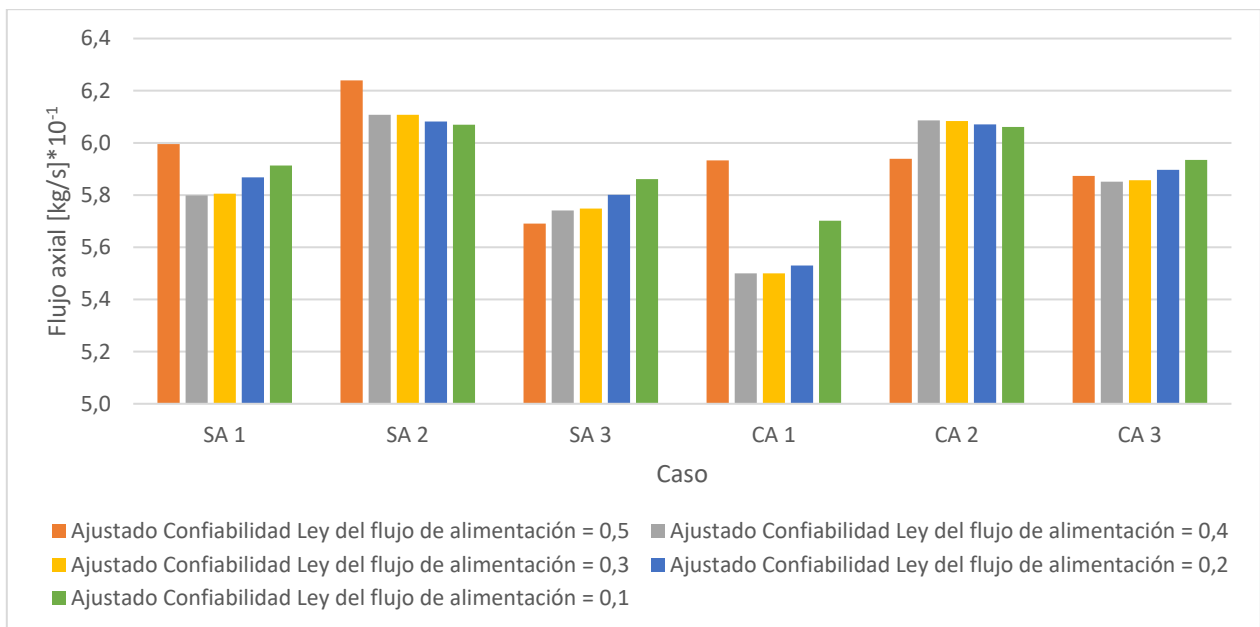


Figura 69: Flujo axial según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de alimentación, celda cónica orientada de 2d a d. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

El flujo axial tiene una confiabilidad de 0,001 y participa en el balance másico y metalúrgico, luego su ponderación en el error por confiabilidad es poco relevante. El ajuste del valor de esta variable recae en el error por balance másico y metalúrgico.

En particular se obtuvo mayores variaciones en el flujo axial y en el flujo tangencial, lo cual hace suponer que el sistema trata de minimizar el error a través del balance másico y metalúrgico, pero sobre todo del másico. Como la confiabilidad del flujo axial es menor que la del flujo tangencial, el sistema modifica más a esta última variable. Por esto se aprecian estas variaciones un poco mayores que las obtenidas para las demás variables. La desviación estándar promedio es  $8,31 * 10^{-3}$  kg/s.

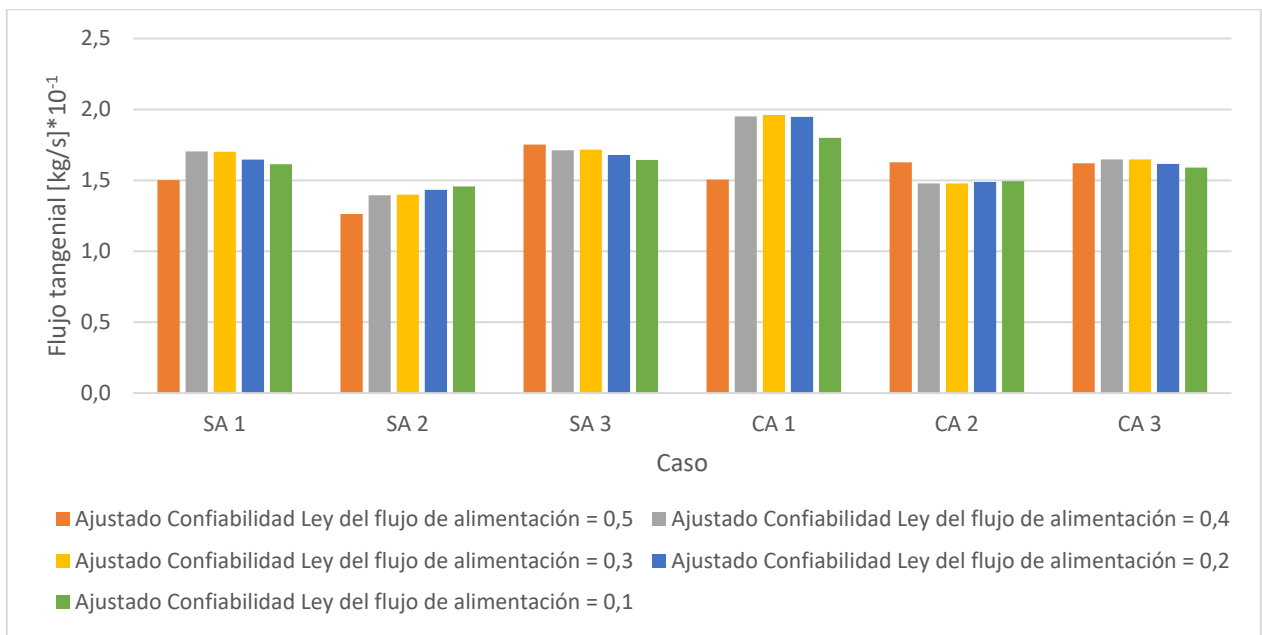


Figura 70: Flujo tangencial según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de alimentación, celda cónica orientada de 2d a d. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

La confiabilidad del flujo tangencial es 0,01 y participa en el balance másico y metalúrgico. Su ponderación en el error por confiabilidad también es extremadamente pequeña, por lo tanto, las ecuaciones de balance definen en mayor medida su valor.

Como se mencionó anteriormente, el sistema modifica más el valor de esta variable, sin embargo, no al nivel del flujo axial debido a que la confiabilidad del flujo tangencial es mayor. La desviación estándar es  $8,04 * 10^{-4}$  kg/s.

De acuerdo con los valores mostrados anteriormente, en las Figuras 71, 72 y 73 se muestran los valores obtenidos para la recuperación metalúrgica, recuperación másica y factor de enriquecimiento, respectivamente.

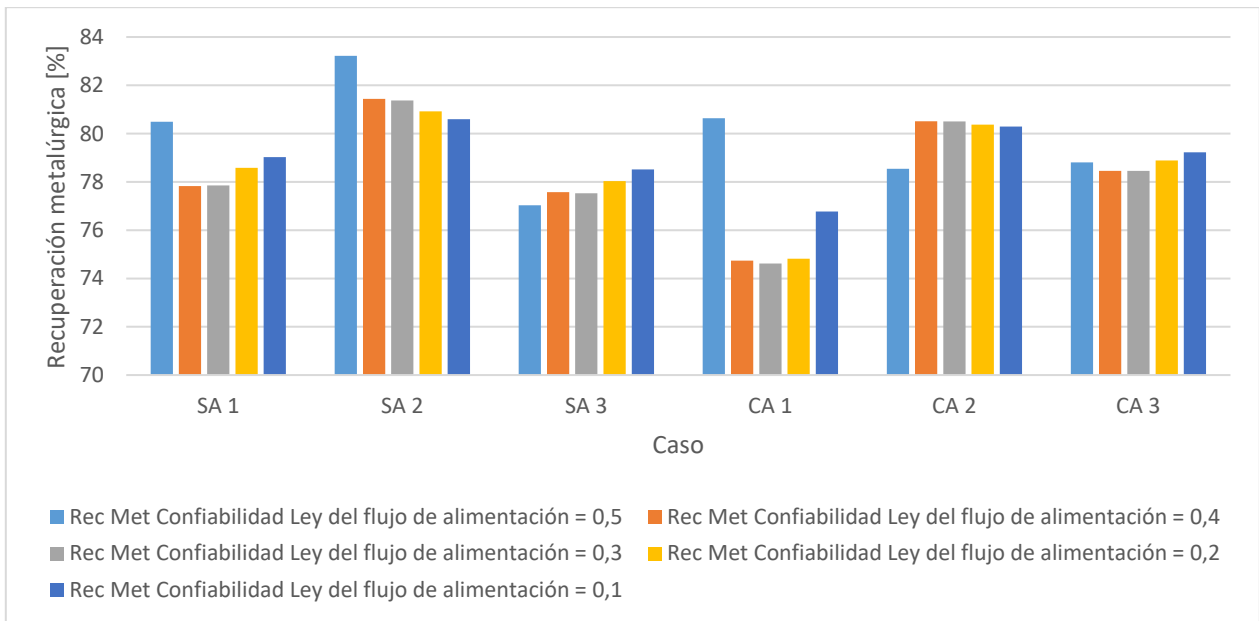


Figura 71: Recuperación metalúrgica según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de alimentación, celda cónica orientada de 2d a d. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

La recuperación metalúrgica es producto de la interacción entre la ley del flujo axial, el flujo axial, la ley del flujo de alimentación y el flujo de alimentación. La única variable que experimenta mayores variaciones dentro de cada caso, al variar la confiabilidad de la ley de alimentación, es el flujo axial.

Luego, las variaciones en esta ley provocan variaciones en la recuperación metalúrgica dentro de cada caso. La desviación estándar promedio es 1,07%.

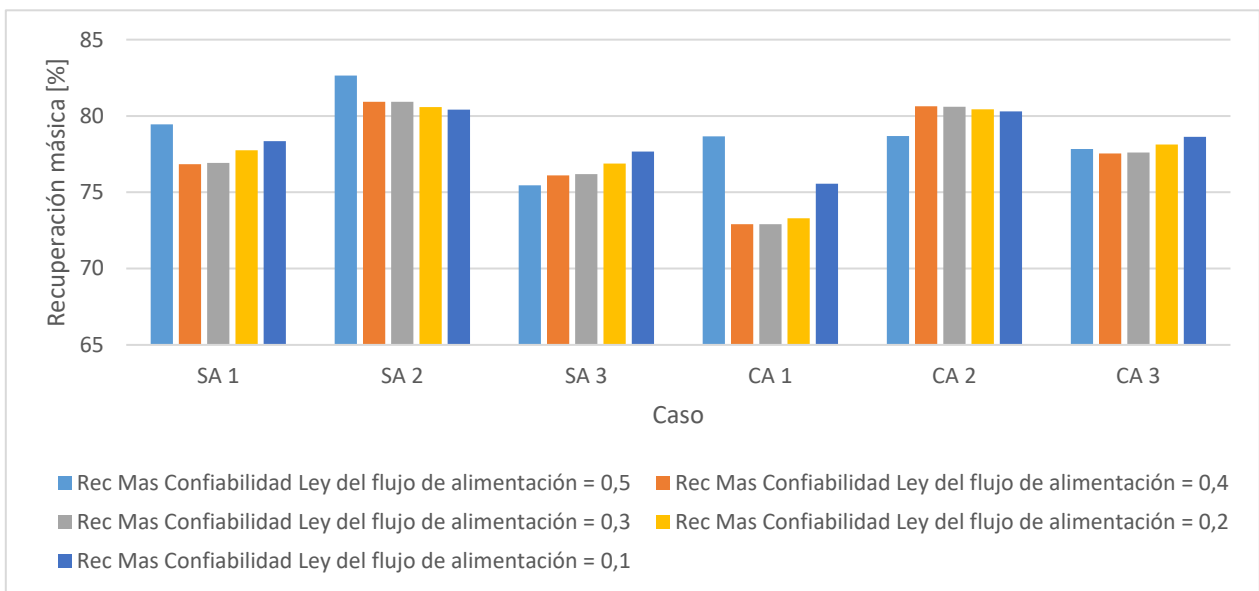


Figura 72: Recuperación másica según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de alimentación, celda cónica de 2d a d. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.



La recuperación másica se calcula utilizando las variables flujo axial y flujo de alimentación. Ambas variables se modifican al cambiar la confiabilidad de la ley de alimentación, aunque el flujo axial se modifica más que el flujo de alimentación. Luego, al calcular esta recuperación, ésta varía dentro de cada caso. La desviación estándar promedio es 1,1%.

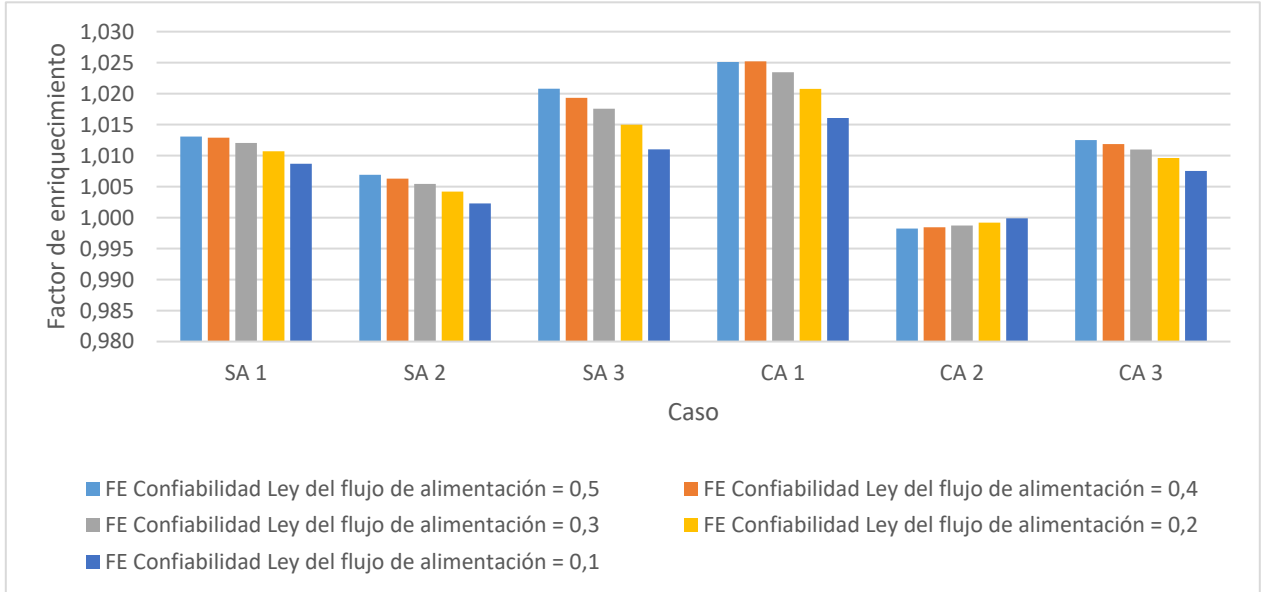


Figura 73: Factor de enriquecimiento según caso, sensibilidad confiabilidad Ley del flujo de alimentación, celda cónica orientada de 2d a d. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

El factor de enriquecimiento se calcula a partir de la ley del flujo axial y la ley de alimentación. La primera variable se modifica poco dentro de cada caso, mientras que la segunda varía más al cambiar su confiabilidad. Luego, el factor de enriquecimiento tiene variaciones muy bajas dentro de cada caso. La desviación estándar promedio es  $2,33 * 10^{-3}$ .

#### iv. Análisis de resultados: Variable vs Condición operacional

De manera similar a como se hizo con la celda cilíndrica y cónica orientada de 2d a d, de acuerdo con los resultados mostrados al principio de esta sección, y ya realizado un análisis de sensibilidad de éstos vs la confiabilidad del valor de la ley de alimentación, lo que ahora corresponde es analizar estos resultados obtenidos post reconciliación.

En seguida, con el objetivo de facilitar este análisis, en las Figuras 74, 75, 76, 77, 78 y 79 se grafica el valor de la variable vs cada condición operacional o caso.

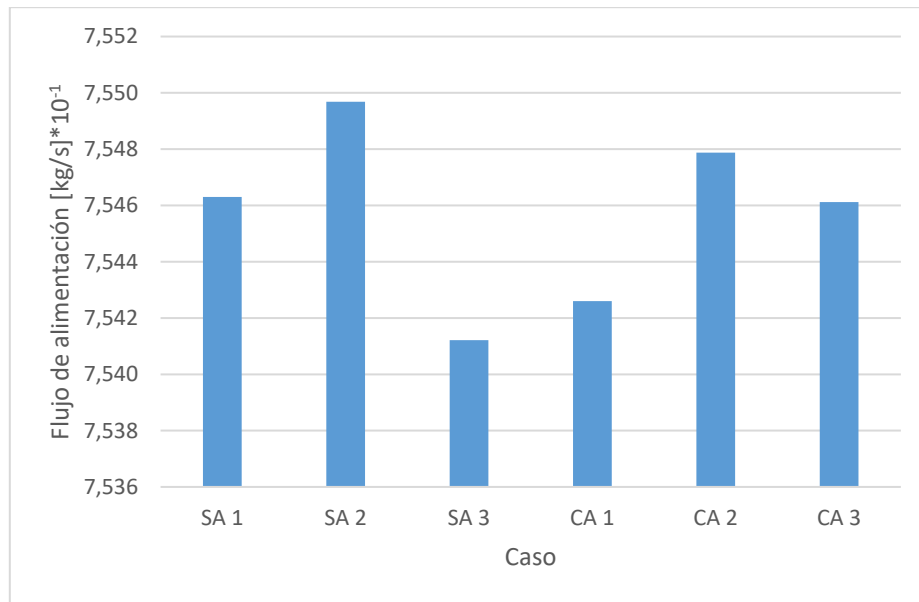


Figura 74: Flujo de alimentación vs cada caso, celda cónica orientada de 2d a d. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

Las variaciones en el flujo de alimentación son pequeñas ya que la bomba ingresa la pulpa a la celda a presión constante. La desviación estándar es  $3,19 * 10^{-4}$  kg/s.

El ingreso de aire tiene un efecto poco relevante en el flujo de alimentación, debido a que la celda se orienta de 2d a d. El aire ingresa por el lado de la celda que tiene mayor área transversal, lo que genera una presión en la entrada que es insuficiente para alterar significativamente los flujos de entrada.

El caso con el mayor flujo de alimentación, de 0,755 kg/s, es el SA2, mientras que el flujo de alimentación promedio es 0,7546 kg/s.

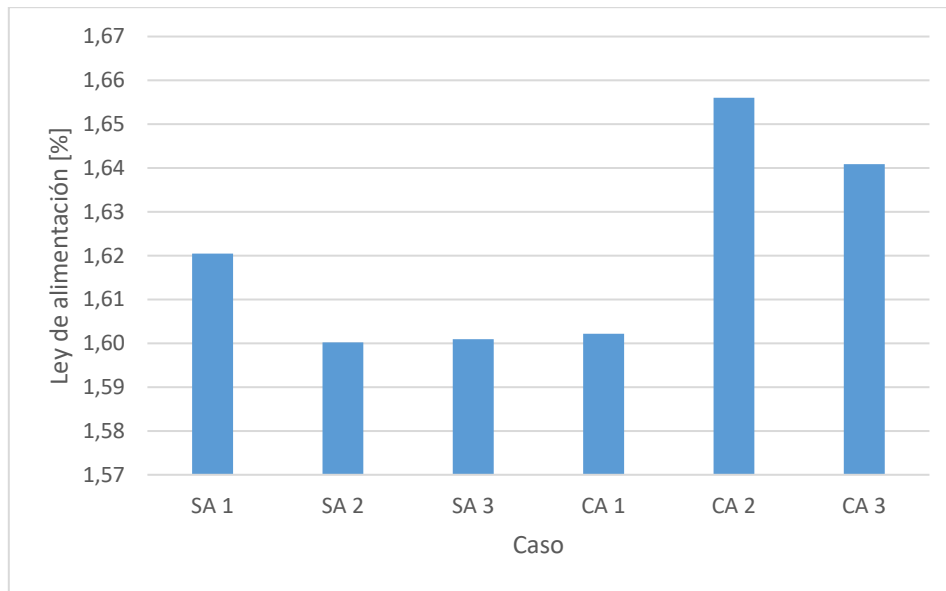


Figura 75: Ley del flujo de alimentación vs cada caso, celda cónica orientada de 2d a d. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

Las variaciones en la ley del flujo de alimentación se deben a la heterogeneidad propia de las muestras. La desviación estándar es 0,024%. La ley del flujo de alimentación se ubica en el rango [1,60 - 1,65]%, manteniéndose su mayoría entre 1,60 y 1,62%. El caso con la mayor ley del flujo de alimentación, de 1,66%, es el CA2. La ley del flujo de alimentación promedio es 1,62%.

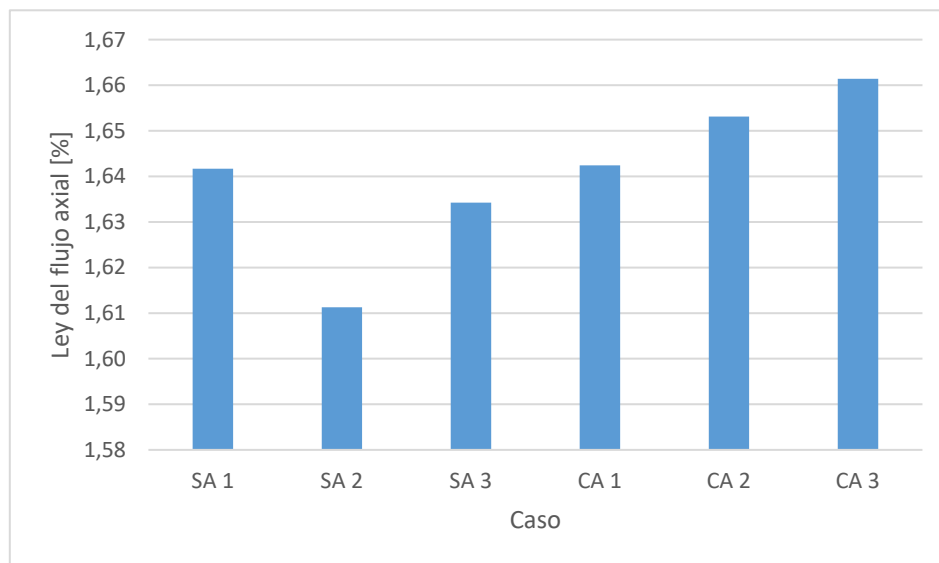


Figura 76: Ley del flujo axial vs cada caso, celda cónica orientada de 2d a d. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

El flujo de esta celda va desde 2d a d, es decir, que el área transversal disminuye a medida que el flujo avanza. Luego, el campo magnético es aplicado en la zona que tiene menor diámetro.

En los casos sin aplicación de campo magnético, al ingresar aire a la celda, la ley del flujo axial aumenta levemente con respecto al caso SA1, debido al efecto del aire en la flotación. Este aumento es de 0,001% en la ley de cobre con respecto al caso SA1.

Para los casos sin incorporación de aire, el efecto centrífugo es inicialmente alto debido a la disminución del área transversal. Luego, si se aplica el campo magnético de baja intensidad del solenoide, éste afecta más al flujo tangencial y, por lo tanto, la ley del flujo axial disminuye, en 0,03% de ley de cobre con respecto al caso SA1. Mientras que cuando se aplica el campo magnético de alta intensidad de los imanes permanentes, éste también afecta al flujo tangencial, aunque en menor medida, debido al alto efecto centrífugo. Esto produce una disminución de la ley del flujo axial, en 0,01% de ley de cobre con respecto al caso SA1.

Para los casos con ingreso de aire se tiene un mayor efecto centrífugo. Sin embargo, debido a la disminución del área transversal, el campo magnético de baja intensidad del solenoide afecta a ambos flujos, de manera que aumenta la ley del flujo axial, en 0,01% de ley de cobre con respecto al caso CA1. Mientras que cuando se aplica el campo magnético de alta intensidad de los imanes permanentes, éste afecta a los dos flujos, pero en mayor grado al flujo axial, luego la ley del flujo axial aumenta, en 0,02% con respecto al caso CA1.

La mayor ley de flujo axial, de 1,66%, se obtiene en el caso CA3. La desviación estándar es 0,017% de ley de cobre. La ley del flujo axial promedio es 1,64%.

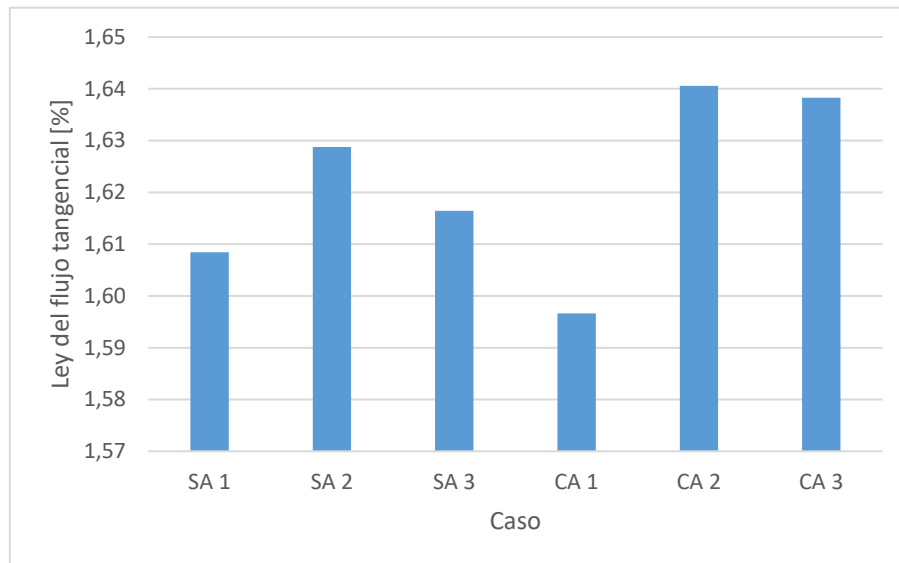


Figura 77: Ley del flujo tangencial vs cada caso, celda cónica orientada de 2d a d. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

En los casos sin aplicación de campo magnético, al ingresar aire la ley del flujo tangencial disminuye porque el efecto centrífugo afecta la recuperación por flotación en el flujo tangencial. Esta disminución es de 0,01% con respecto al caso SA1.

Para los casos sin ingreso de aire, se tiene que la ley del flujo tangencial aumenta al aplicar el campo magnético de baja intensidad del solenoide, debido al mayor contacto entre este flujo y el campo magnético, lo que se debe a la disminución del área transversal. Este aumento es de 0,02% de ley de cobre con respecto al caso SA1. Si se aplica el campo magnético de alta intensidad de los imanes permanentes, éste afecta al flujo tangencial y la ley del flujo tangencial aumenta, en 0,01% de ley de cobre con respecto al caso SA1.

Para los casos con incorporación de aire, se tiene un mayor efecto centrífugo. Sin embargo, debido a la disminución del área transversal, el campo magnético de baja intensidad del solenoide afecta a ambos flujos, de manera que aumenta la ley del flujo tangencial, en 0,044% de ley de cobre con respecto al caso CA1. Cuando se aplica el campo magnético de alta intensidad de los imanes permanentes, éste afecta al flujo tangencial, pero en menor grado que el campo magnético de baja intensidad del solenoide, debido a su distribución en el espacio, lo que genera un aumento en la ley del flujo tangencial, de 0,042% de ley de cobre con respecto al caso CA1.

La mayor ley del flujo tangencial, de 1,64%, se obtiene en el caso CA2. La desviación estándar es 0,017% de ley de cobre. La ley del flujo tangencial promedio es 1,62%.

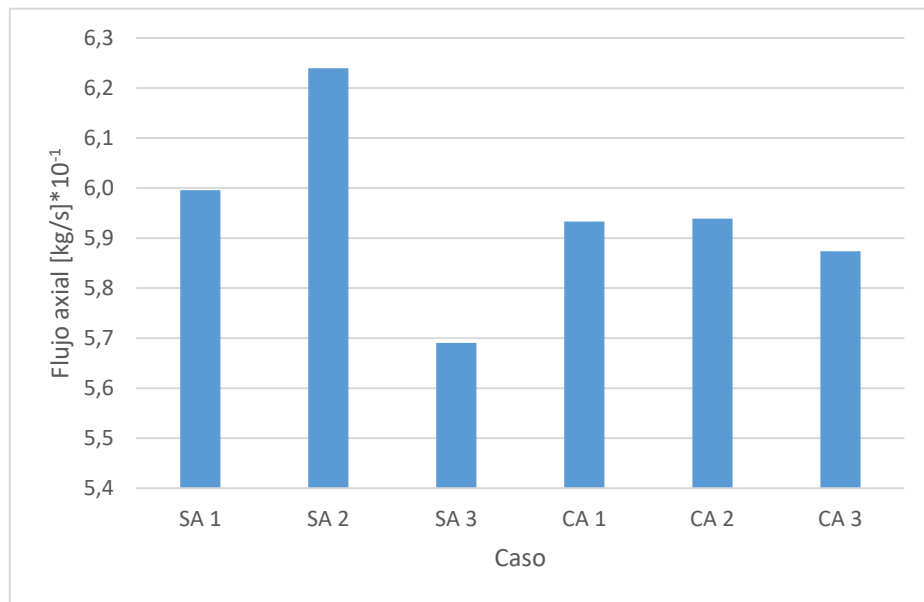


Figura 78: Flujo axial vs cada caso, celda cónica orientada de 2d a d. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

En los casos donde no se aplica campo magnético, el flujo axial disminuye un poco al ingresar aire a la celda, en 0,01 kg/s con respecto al caso SA1. Esto se debe a la disminución

del área transversal, la que genera un mayor efecto centrífugo, aumentando el flujo tangencial.

Para los casos sin incorporación de aire, al aplicar el campo magnético de baja intensidad del solenoide, este campo magnético se alinea con el flujo axial y, por tanto, este flujo se incrementa, en 0,02 kg/s con respecto al caso SA1. Si se aplica el campo magnético de alta intensidad de los imanes permanentes, éste actúa como barrera y el flujo axial disminuye, en 0,03 kg/s con respecto al caso SA1.

Para los casos con ingreso de aire, debido al alto efecto centrífugo, el campo magnético de baja intensidad del solenoide afecta más al flujo tangencial que al flujo axial, de manera que este último se incrementa muy poco, en 0,001 kg/s con respecto al caso CA1. Cuando se aplica el campo magnético de alta intensidad de los imanes permanentes, el efecto centrífugo disminuye la barrera impuesto por este campo magnético, provocando una disminución pequeña, de 0,01 kg/s con respecto al caso CA1.

El mayor flujo axial, de 0,624 kg/s, se obtiene en el caso SA2. La desviación estándar es 0,018 kg/s. El flujo axial promedio es 0,595 kg/s.

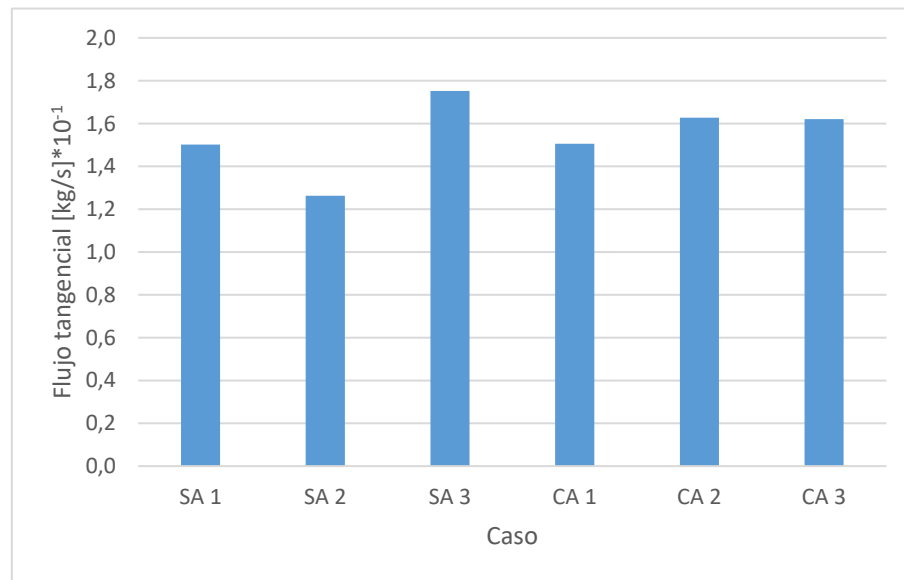


Figura 79: Flujo tangencial vs cada caso, celda cónica orientada de 2d a d. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

En los casos sin aplicación de campo magnético, la incorporación de aire no prácticamente no afecta al flujo tangencial debido al efecto centrífugo potenciado por la disminución del aire transversal. Este flujo aumenta en 0,0003 kg/s con respecto al caso SA1,

Para los casos sin ingreso de aire, al aplicar el campo magnético de baja intensidad del solenoide el flujo tangencial disminuye, en 0,02 kg/s con respecto al caso SA1, debido a un

aumento del flujo axial. Mientras que cuando se aplica el campo magnético de alta intensidad de los imanes permanentes el flujo axial es afectado por la barrera impuesta por este campo magnético y, por tanto, el flujo tangencial aumenta, en 0,03 kg/s con respecto al caso SA1.

Para los casos con incorporación de aire, al aplicar el campo magnético de baja intensidad del solenoide, este campo magnético afecta a flujo tangencial debido al alto efecto centrífugo, por lo que este flujo que aumenta, en 0,01 kg/s con respecto al caso CA1. Mientras que, al aplicar el campo magnético de alta intensidad de los imanes permanentes, este campo afecta al flujo axial, luego este último disminuye y el flujo tangencial aumenta, en 0,01 kg/s con respecto al caso CA1.

El mayor flujo tangencial, de 0,175 kg/s, se obtiene en el caso SA3. La desviación estándar es 0,017 kg/s. El flujo tangencial promedio es 0,155%.

De acuerdo con los valores mostrados anteriormente, en las Figuras 80, 81 y 82 se grafican los valores obtenidos para la recuperación metalúrgica, recuperación másica y factor de enriquecimiento, respectivamente.

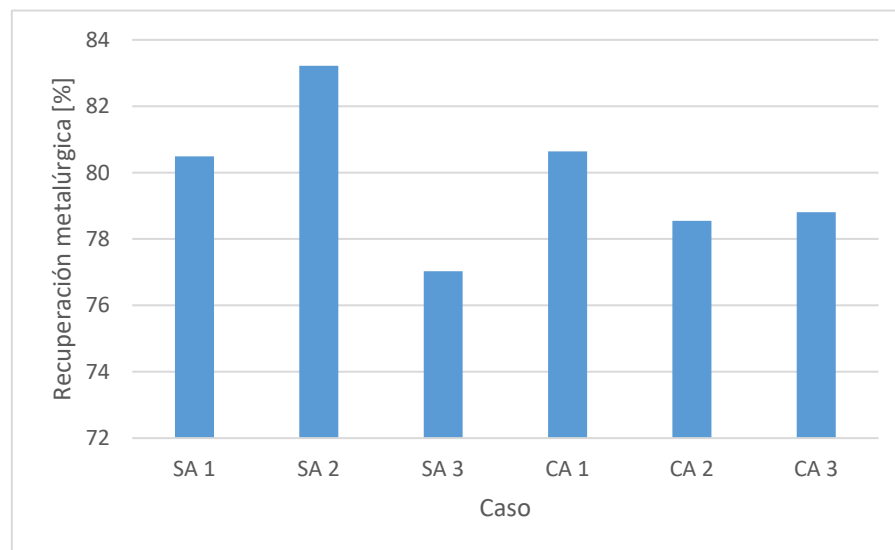


Figura 80: Recuperación metalúrgica vs cada caso, celda cónica orientada de 2d a d. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

La recuperación metalúrgica mayor, de 83,22%, se obtiene en el caso SA2. La recuperación metalúrgica promedio es 79,79%. La desviación estándar es 2,15%.

En los casos sin aplicación de campo magnético, la recuperación metalúrgica aumenta levemente al ingresar aire a la celda, en 0,15% con respecto al caso SA1, producto de un aumento de la ley del flujo axial.

Para los casos sin incorporación de aire, se tiene que cuando se aplica el campo magnético de baja intensidad del solenoide, la ley del flujo axial disminuye, pero el flujo axial aumenta

en mayor medida, luego la recuperación metalúrgica aumenta, en 2,73% con respecto al caso SA1. En el caso cuando se aplica el campo magnético de alta intensidad de los imanes permanentes, disminuye la ley del flujo axial y también el flujo axial, por tanto, disminuye la recuperación metalúrgica, en 3,46% con respecto al caso SA1.

Para los casos con ingreso de aire, al aplicar el campo magnético de baja intensidad del solenoide la ley del flujo axial aumenta y el flujo axial aumenta también, sin embargo, este caso tiene una ley de alimentación alta en comparación con el caso CA1. Luego, la recuperación metalúrgica disminuye, en 2,09%. Cuando se aplica el campo magnético de alta intensidad de los imanes permanentes, la ley del flujo axial aumenta y el flujo axial disminuye. Este caso también tiene una ley de alimentación alta en comparación con el caso CA1. Luego, la recuperación disminuye, en 1,83%.

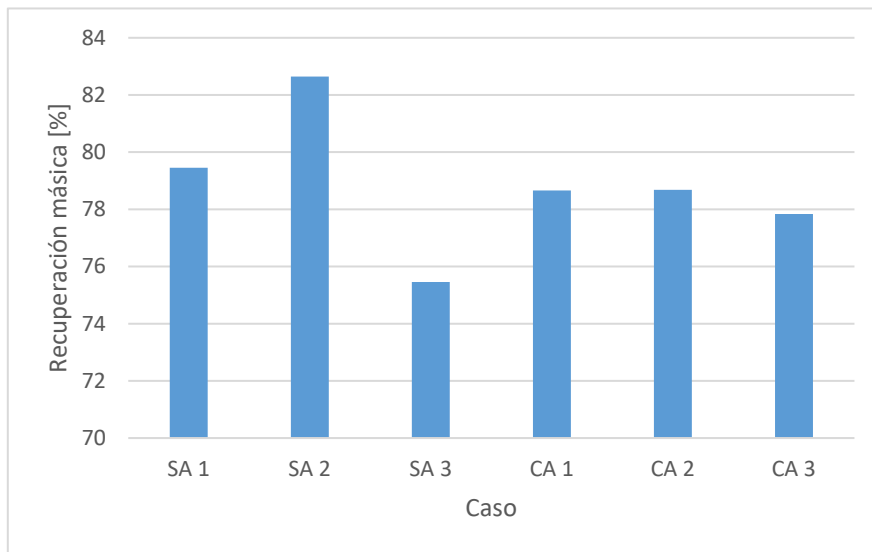


Figura 81: Recuperación másica vs cada caso, celda cónica orientada de 2d a d. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

La máxima recuperación másica, de 82,65%, se obtiene en el caso SA2. La recuperación másica promedio es 78,79%. La desviación estándar es 2,34%.

En los casos sin aplicación de campo magnético, el ingreso de aire potencia el efecto centrífugo y, por tanto, el flujo axial disminuye. Luego la recuperación másica disminuye en 0,79% con respecto al caso SA1.

Para los casos sin ingreso de aire, al aplicar el campo magnético de baja intensidad del solenoide, el flujo axial aumenta, debido a la alineación del campo magnético con el flujo. Luego, la recuperación metalúrgica aumenta en 3,19% con respecto al caso SA1. Cuando se aplica el campo magnético de alta intensidad de los imanes permanentes, el flujo axial disminuye, debido a la barrera impuesta por este campo magnético. Luego la recuperación másica disminuye en 3,99% con respecto al caso SA1,



Para los casos con ingreso de aire, al aplicar el campo magnético de baja intensidad del solenoide, éste prácticamente no afecta al flujo axial debido al alto efecto centrífugo, por tanto, el flujo axial aumenta muy poco. Luego, la recuperación másica aumenta 0,02% con respecto al caso CA1. Cuando se aplica el campo magnético de alta intensidad de los imanes permanentes, este campo magnético afecta en menor medida al flujo axial producto de la centrifugación, y, por ende, el flujo axial disminuye poco. Luego, la recuperación másica disminuye en 0,83% con respecto al caso CA1.

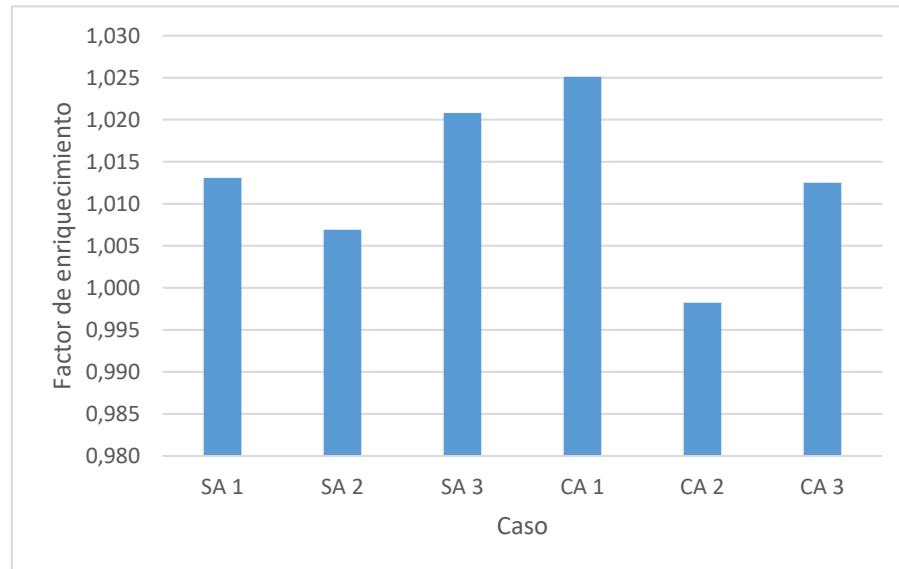


Figura 82: Factor de enriquecimiento vs cada caso, celda cónica orientada de 2d a d. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

El mayor factor de enriquecimiento, de 1,025, se obtiene en el caso CA1. El factor de enriquecimiento promedio es 1,013. La desviación estándar es 0,01.

Para los casos sin aplicación de campo magnético, al ingresar aire a la celda el factor de enriquecimiento aumenta, en 0,012 con respecto al caso SA1, producto de un aumento en la ley axial.

Para los casos sin ingreso de aire, al aplicar el campo magnético de baja intensidad del solenoide la ley del flujo axial disminuye y, en consecuencia, el factor de enriquecimiento también disminuye, en 0,006 con respecto al caso SA1. Mientras que al aplicar el campo magnético de alta intensidad de los imanes permanentes la ley del flujo axial disminuye, sin embargo, en este caso la ley de alimentación es alta en comparación con caso SA1, por tanto, el factor de enriquecimiento aumenta, en 0,008.

Para los casos con incorporación de aire, al aplicar el campo magnético de baja intensidad del solenoide la ley del flujo axial aumenta, sin embargo, en este caso la ley de alimentación también es alta en comparación con el caso CA1 y, en consecuencia, el factor de enriquecimiento disminuye, en 0,027. Cuando se aplica el campo magnético de alta

intensidad de los imanes permanentes, la ley del flujo axial aumenta, pero en este caso la ley de alimentación también es alta en comparación con el caso CA1. Luego, el factor de enriquecimiento disminuye, en 0,013.

#### 4.2.4 Comparación de resultados obtenidos vs celda utilizada

Para comparar los resultados de las distintas operaciones expuestas, para cada variable se analizarán los resultados obtenidos en cada caso, para todas las celdas. Para facilitar este análisis, en las Figuras 83, 84, 85, 86, 87 y 88 se presentan los resultados antes mencionados.

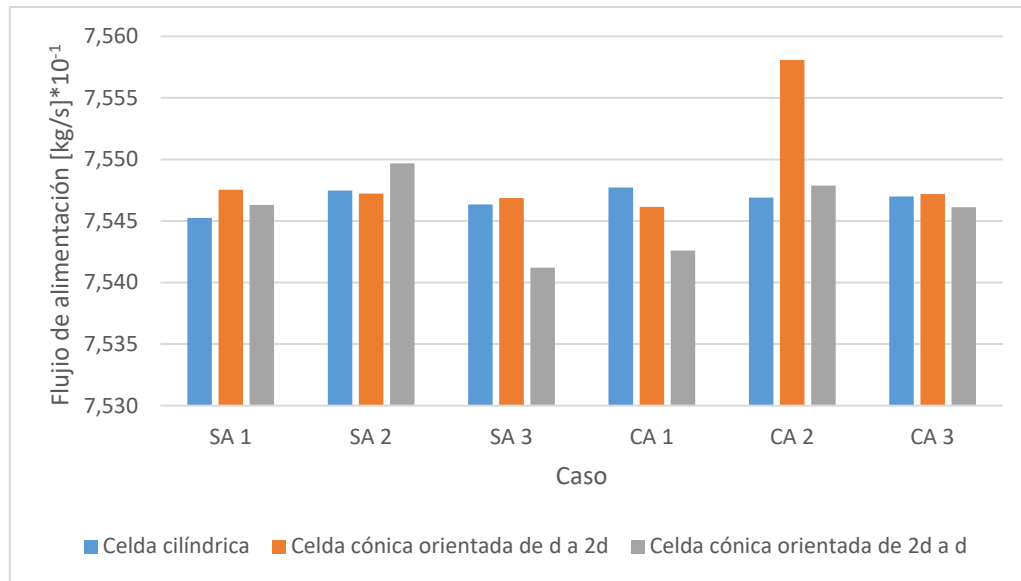


Figura 83: Flujo de alimentación vs celda, seis casos. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

El caudal de alimentación se mantiene constante dentro de todos los casos y para cada celda. La desviación estándar promedio es  $2,5 * 10^{-4}$  kg/s. El único que sobresale es el caso CA2 de la celda cónica orientada de d a 2d, cuyo flujo de alimentación es 0,7558 kg/s, mientras que el flujo de alimentación promedio es 0,7547 kg/s. Luego, la diferencia es mínima. Esta invariabilidad en el flujo de alimentación se debe a la utilización de una bomba que hace ingresar la pulpa en las celdas a presión constante.

El flujo de alimentación promedio en la operación de la celda cilíndrica es 0,7547 kg/s, en la celda cónica orientada de d a 2d es 0,7549 kg/s y en la celda cónica orientada de d a 2d es 0,7546 kg/s.

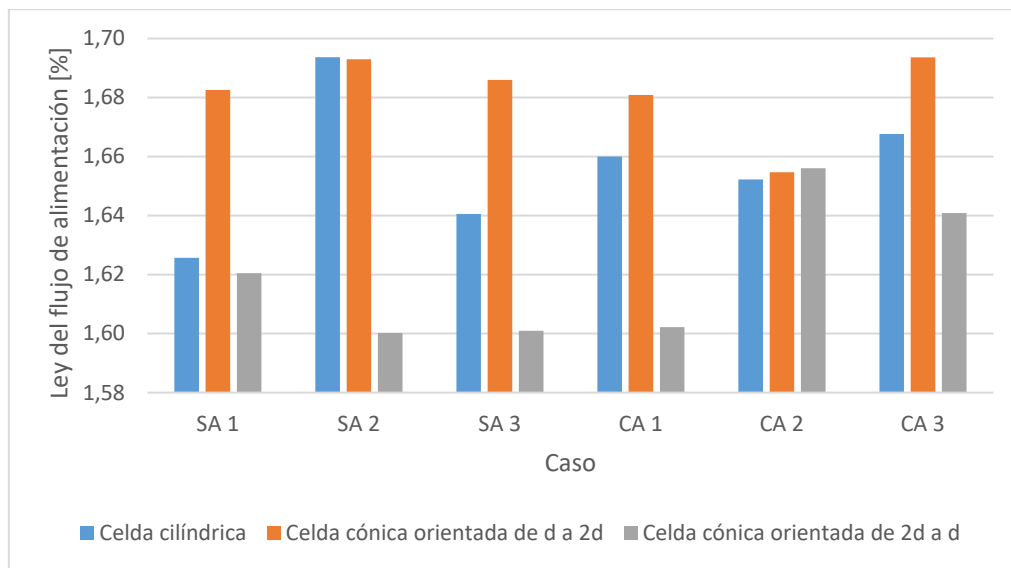


Figura 84: Ley del flujo de alimentación vs celda, seis casos. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

Las mayores leyes de alimentación se tienen cuando se utiliza la celda cónica orientada de d a 2d. La celda cilíndrica tiene leyes de alimentación cercanas a las de la celda cónica de d a 2d. Mientras que la celda cónica 2d a d es la que presenta las menores leyes de alimentación. La ley de alimentación promedio en la operación de la celda cilíndrica es 1,66%, en la celda cónica orientada de d a 2d es 1,68% y en la celda cónica orientada de d a 2d es 1,62%.

La desviación estándar promedio es 0,03% de la ley de cobre. La ley de alimentación promedio es 1,65%. La mayor ley de alimentación, de 1,69%, se tiene en el caso CA3 con la celda cónica de d a 2d.

Esta diferencia entre las leyes se debe principalmente a la heterogeneidad de la muestra, aunque también incide el tiempo de agitación de la pulpa dentro del estanque ya que la pulpa debe ser agitada un tiempo mínimo para acondicionarse y volverse lo más homogénea posible. La velocidad de agitación también afecta porque si esta velocidad es muy alta la fuerza centrífuga será tal que los sólidos se separarán por gravedad específica y entonces la ley de alimentación dependerá del punto desde el cual se extraiga la pulpa desde el estanque.

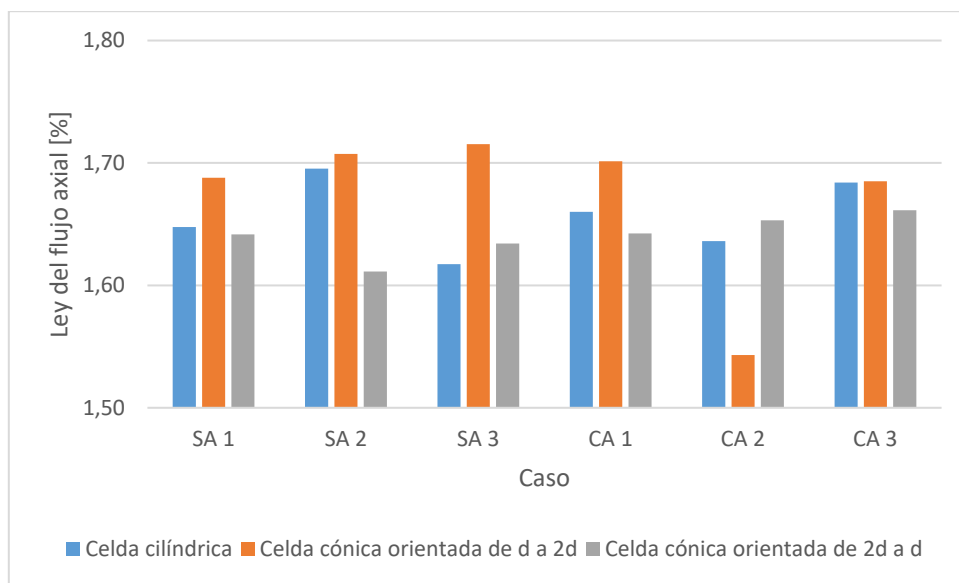


Figura 85: Ley del flujo axial vs celda, seis casos. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

En la operación de la celda cónica orientada de d a 2d se obtiene las mayores leyes del flujo axial. La ley del flujo axial promedio obtenida en la operación de la celda cilíndrica es 1,66%, en la celda cónica orientada de d a 2d es 1,67% y en la celda cónica orientada de 2d a d es 1,64%.

La desviación estándar promedio es 0,039% de la ley de cobre. La ley del flujo axial promedio es 1,66%. La mayor ley del flujo axial, de 1,72%, se obtiene en el caso SA3 con la celda cónica orientada de d a 2d.

En todos los casos, con excepción del caso CA2, la mayor ley del flujo axial se obtiene al operar con la celda cónica de d a 2d. Esto indica la tendencia de esta celda, con esta orientación, a concentrar más en el flujo axial, con respecto a las demás celdas. Esto se debe a la influencia de los campos magnéticos; de baja intensidad del solenoide y alta intensidad de los imanes permanentes, sobre el flujo axial, la cual se potencia debido al aumento de la sección transversal de la celda. El caso CA2 difiere debido a que el campo de baja intensidad del solenoide no incide en el flujo axial debido al alto efecto centrífugo y concentrando partículas en el flujo tangencial, provocando la disminución de la ley del flujo axial.

Cuando no se ingresa aire, en la celda cilíndrica se obtiene mejores leyes del flujo axial que en la celda cónica orientada de 2d a d, con excepción del caso SA3. Esto indica una mayor influencia del campo magnético de alta intensidad de los imanes permanentes sobre el flujo axial dentro de la celda orientada de 2d a d.

Por último, cuando se incorpora aire a la celda cilíndrica también se obtiene mejores leyes del flujo axial que en la celda cónica orientada de 2d a d, con excepción del caso CA2. En este caso, la disminución de área transversal de la celda provoca un mayor contacto entre

el campo magnético de baja intensidad del solenoide y el flujo axial, generando un alza en la ley de este flujo.

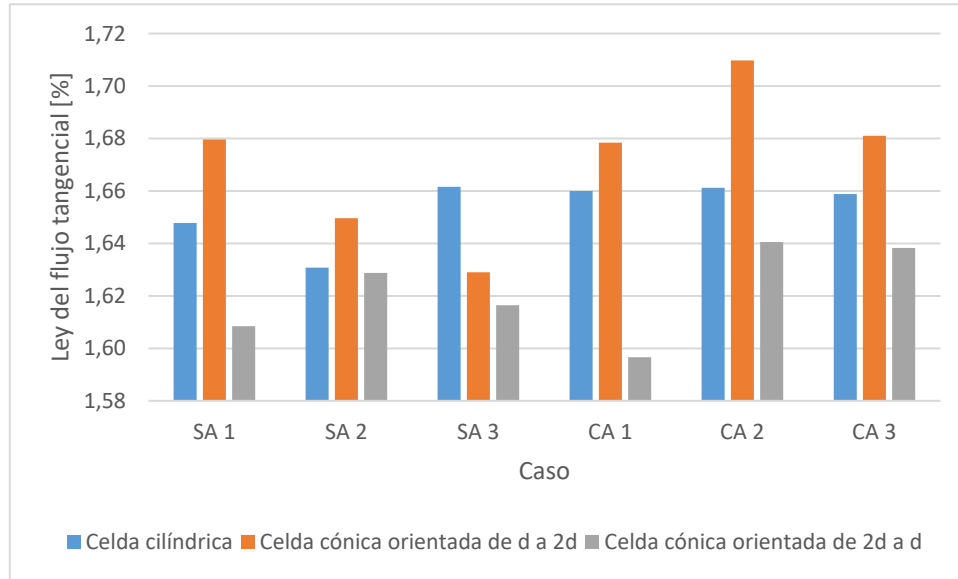


Figura 86: Ley del flujo tangencial vs celda, seis casos. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

En la operación de la celda cónica orienta de d a 2d se obtienen las mejores leyes del flujo tangencial. La ley del flujo tangencial promedio en la operación de la celda cilíndrica es 1,65%, en la celda cónica orientada de d a 2d es 1,67% y en la celda cónica orientada de 2d a d es 1,62%.

La desviación estándar promedio es 0,028% de la ley de cobre. La ley del flujo tangencial promedio es 1,65%. La mayor ley del flujo tangencial, de 1,71%, se obtiene en el caso CA2 con la celda cónica orientada de d a 2d.

En todos los casos, con excepción del SA3, con la celda cónica orientada de d a 2d, se obtiene mejores leyes del flujo tangencial. Esto sugiere que bajo esta configuración esta celda también logra concentrar más partículas en el flujo tangencial que las demás celdas. Lo anterior se debe a la influencia de los campos magnéticos; de baja intensidad del solenoide y de alta intensidad de los imanes permanentes, sobre el flujo tangencial, aunque también se debe al efecto centrífugo potenciado por el aumento de la sección transversal de la celda y por la incorporación de aire.

El caso SA3 difiere de los demás debido a que el campo magnético de alta intensidad de los imanes permanentes afecta en mayor medida al flujo axial que al flujo tangencial, disminuyendo la ley de este último

Cuando no se ingresa aire, con la celda cilíndrica se obtiene mayores leyes del flujo tangencial que con la celda cónica de orientada de 2d a d. Esto se debe a que en la celda

cilíndrica el campo magnético afecta al flujo tangencial, mientras que en la celda cónica orientada de 2d a d, el efecto centrífugo afecta considerablemente al flujo tangencial debido a la disminución del área transversal, por tanto, afecta menos el campo magnético.

Cuando se incorpora aire a la celda, el efecto centrífugo es mayor debido al ingreso de aire, por tanto, la diferencia entre las leyes tangenciales de la celda cilíndrica y cónica de 2d a d aumenta.

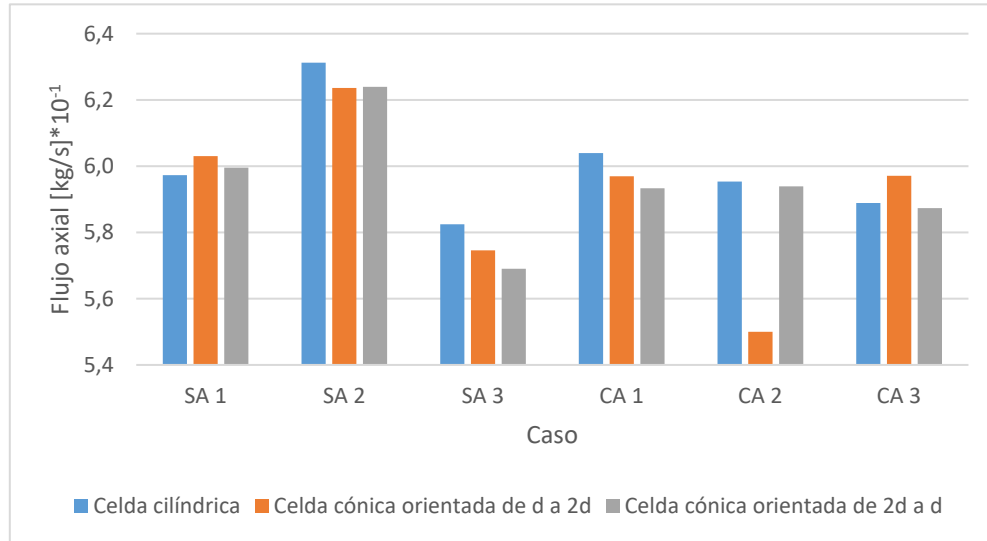


Figura 87: Flujo axial vs celda, seis casos. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

El flujo axial promedio en la operación de la celda cilíndrica es 0,6 kg/s, en la celda cónica orientada de d a 2d es 0,591 kg/s y en la celda cónica orientada de 2d a d es 0,595 kg/s.

Aquí la diferencia entre las distintas celdas es menos notoria. La desviación estándar promedio es  $8,4 * 10^{-3}$  kg/s. El flujo axial promedio es 0,595 kg/s. El mayor flujo axial, de 0,631 kg/s, se obtiene en el caso SA2 con la celda cilíndrica. Esto se debe a la mayor influencia del campo magnético de baja intensidad del solenoide sobre el flujo axial en la celda cilíndrica, en comparación con las otras celdas, debido a que la sección transversal para la celda cilíndrica es constante, lo que también genera que el efecto centrífugo dentro de esta celda sea menor

Al no ingresar aire, el flujo axial disminuye cuando se aplica el campo magnético de alta intensidad de los imanes permanentes, con respecto al caso SA1. Esto se debe a la barrera generada por la orientación espacial de este campo magnético. La disminución promedio es de 0,025 kg/s.

Cuando se ingresa aire, el campo magnético de alta intensidad de los imanes permanentes tiene un efecto menos relevante en el flujo axial que en el caso SA3. La disminución promedio con respecto al caso CA1 es de 0,007 kg/s.

En general, la operación de ninguna celda se destaca por aumentar el flujo axial.

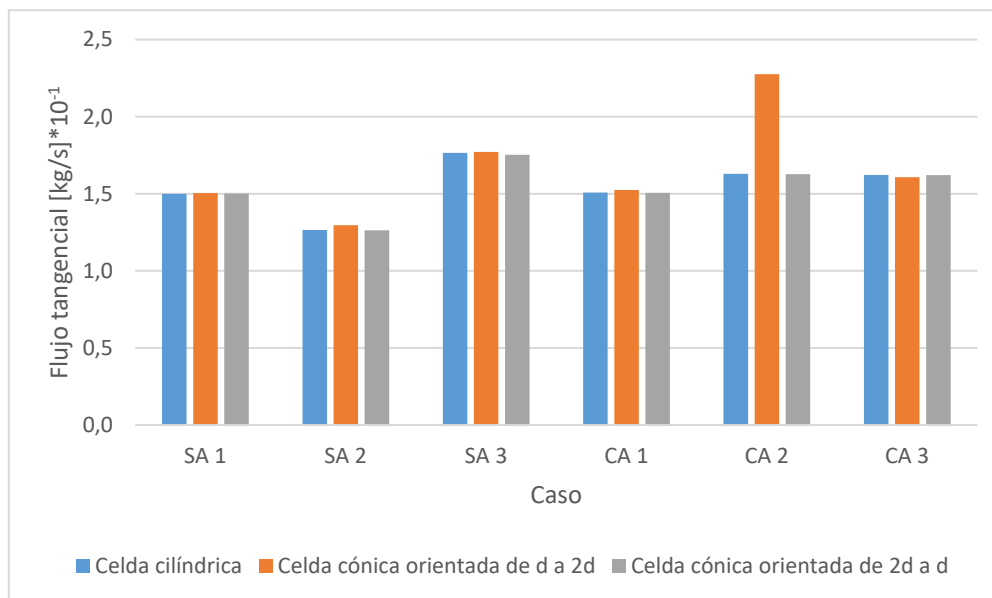


Figura 88: Flujo tangencial vs celda, seis casos. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

El flujo tangencial promedio en la operación de la celda cilíndrica es 0,155 kg/s, en la celda cónica orientada de d a 2d es 0,166 kg/s y en la celda cónica orientada de 2d a d es 0,155 kg/s.

Dentro de casi todos los casos las celdas presentan flujos tangenciales similares. La desviación estándar promedio es  $7 * 10^{-3}$  kg/s. La excepción es el caso CA2 con la operación de la celda cónica orientada de d a 2d, donde el flujo tangencial se incrementa con respecto al caso CA1, lo que se debe a un mayor efecto del campo magnético de baja intensidad del solenoide sobre el flujo tangencial producto del efecto centrífugo dentro de la celda.

Cuando no se ingresa aire a la celda, al aplicar el campo magnético de alta intensidad de los imanes permanentes los flujos tangenciales aumentan debido a la barrera impuesta por este campo magnético sobre el flujo axial. El aumento promedio es 0,026 kg/s.

Cuando se ingresa aire a la celda, el efecto del campo magnético de alta intensidad de los imanes permanentes es menos relevante sobre el flujo axial que en el caso SA3. El aumento promedio con respecto al caso CA1 es 0,01 kg/s.

El flujo tangencial promedio es 0,159 kg/s y el mayor flujo tangencial, de 0,228 kg/s se obtienen en el caso CA2 con la celda cónica orientada de d a 2d.

En general, la operación de ninguna celda se destaca por aumentar el flujo tangencial.

De acuerdo con los resultados mostrados anteriormente, en las Figuras 89, 92 y 95 se presentan los valores obtenidos para la recuperación metalúrgica, recuperación másica y factor de enriquecimiento, respectivamente.

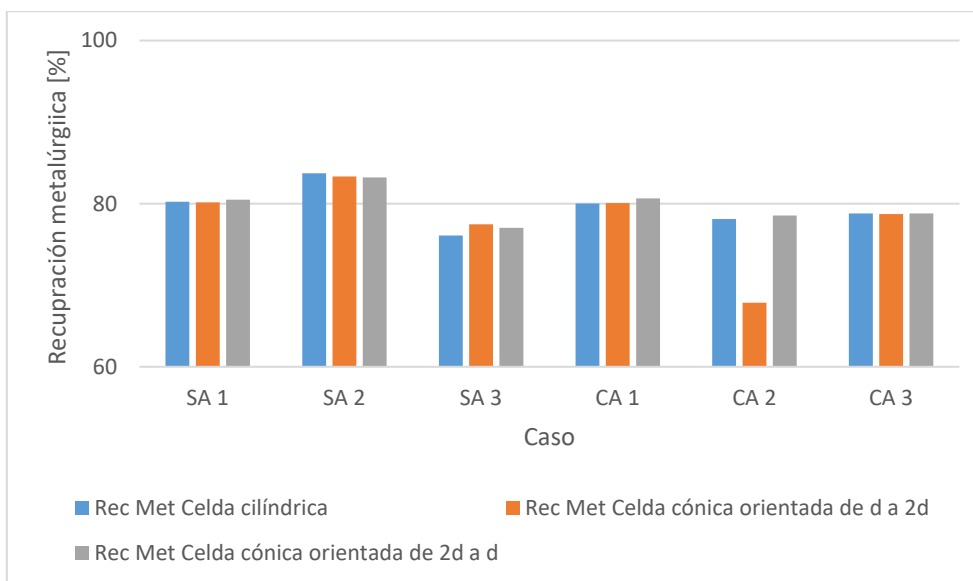


Figura 89: Recuperación metalúrgica vs celda, seis casos. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

Para el caso SA1, la mayor recuperación metalúrgica, de 80,49%, se obtiene con la celda cónica orientada de 2d a d. La recuperación metalúrgica promedio es de 80,29%.

Para el caso SA2, la mayor recuperación metalúrgica, de 83,72%, se obtiene con la celda cilíndrica. La recuperación metalúrgica promedio es de 83,42%.

Para el caso SA3, la mayor recuperación metalúrgica, de 77,46%, se obtiene con la celda cónica orientada de d a 2d. La recuperación metalúrgica promedio es de 76,86%.

Para el caso CA1, la mayor recuperación metalúrgica, de 80,64%, se obtiene con la celda cónica orientada de 2d a d. La recuperación metalúrgica promedio es de 80,24%.

Para el caso CA2, la mayor recuperación metalúrgica, de 78,55%, se obtiene con la celda cónica orientada de 2d a d. La recuperación metalúrgica promedio es de 74,84%.

Para el caso CA3, la mayor recuperación metalúrgica, de 78,81%, se obtiene con la celda cónica orientada de 2d a d. La recuperación metalúrgica promedio es de 78,77%.

En cuatro de los seis casos, con la operación de la celda cónica orientada de 2d a d se obtiene mayores recuperaciones metalúrgicas, lo que debe a un mayor contacto entre el campo magnético y el flujo axial producto de la disminución del área transversal de la celda.

La mayor recuperación metalúrgica, de 83,72%, se obtiene con la operación de la celda cilíndrica en el caso SA2. La recuperación metalúrgica promedio es de 79,07%. La desviación estándar promedio es 1,26%.



El caso SA2 es que el presenta las mayores recuperaciones metalúrgicas para las tres celdas, lo cual sugiere que cuando se aplica el campo magnético de baja intensidad y no se ingresa aire a las celdas, éstas operan con mayor eficiencia.

En los casos SA1, CA1 y CA3 se obtiene recuperaciones metalúrgicas cercanas al 80%, las cuales son aceptables.

Por otra parte, en los casos SA3 y CA2 se obtienen las menores recuperaciones metalúrgicas, del 75,85% en promedio. Los demás casos tienen una recuperación metalúrgica promedio de 80,68%.

La operación con la celda cónica de d a 2d en el caso CA2 obtiene la menor recuperación metalúrgica, de 67,86%. Esto se debe a la baja ley del flujo axial producto del alto efecto centrífugo que impide una correcta concentración por flotación, además de impedir una concentración adicional por la aplicación del campo magnético de baja intensidad del solenoide.

A continuación, se muestra el balance másico y metalúrgico para los casos con mayor y menor recuperación metalúrgica. Para ilustrar estos balances, se presenta un esquema para cada caso. En la Figura 90 se muestra el esquema del caso con mayor recuperación metalúrgica, mientras que el esquema del caso con menor recuperación metalúrgica se muestra en la Figura 91.

### Celda cilíndrica, caso SA2

$$G_{sa} = G_{saxial} + G_{stangencial}$$

$$0,75 \frac{kg}{s} = 0,63 \frac{kg}{s} + 0,13 \frac{kg}{s}$$

$$G_{sa} * L_a = G_{saxial} * L_{axial} + G_{stangencial} * L_{tangencial}$$

$$0,75 \frac{kg}{s} * 1,69\% = 0,63 \frac{kg}{s} * 1,70\% + 0,13 \frac{kg}{s} * 1,63\%$$

$$R_{metalúrgica} = \frac{G_{saxial} * L_{axial}}{G_{sa} * L_a}$$

$$R_{metalúrgica} = \frac{0,63 \frac{kg}{s} * 1,70\%}{0,75 \frac{kg}{s} * 1,69\%} = 83,72\%$$

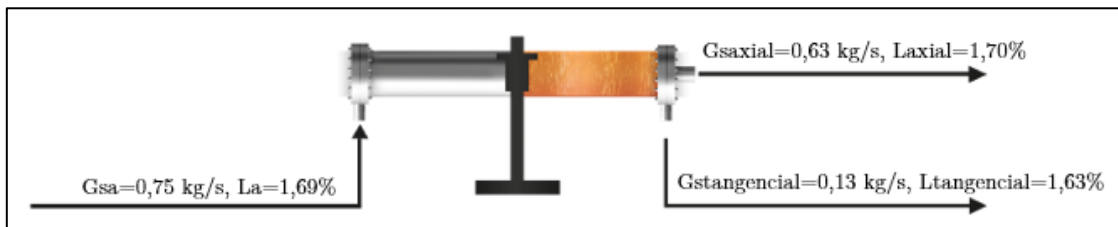


Figura 90: Balances másico y metalúrgico, mejor recuperación metalúrgica, celda cilíndrica, caso SA2.

## Celda cónica orientada de d a 2d, caso CA2

$$G_{sa} = G_{saxial} + G_{stangencial}$$

$$0,76 \frac{kg}{s} = 0,55 \frac{kg}{s} + 0,23 \frac{kg}{s}$$

$$G_{sa} * L_a = G_{saxial} * L_{axial} + G_{stangencial} * L_{tangencial}$$

$$0,76 \frac{kg}{s} * 1,66\% = 0,55 \frac{kg}{s} * 1,54\% + 0,23 \frac{kg}{s} * 1,71\%$$

$$R_{metalúrgica} = \frac{G_{saxial} * L_{axial}}{G_{sa} * L_a}$$

$$R_{metalúrgica} = \frac{0,55 \frac{kg}{s} * 1,54\%}{0,76 \frac{kg}{s} * 1,66\%} = 67,86\%$$

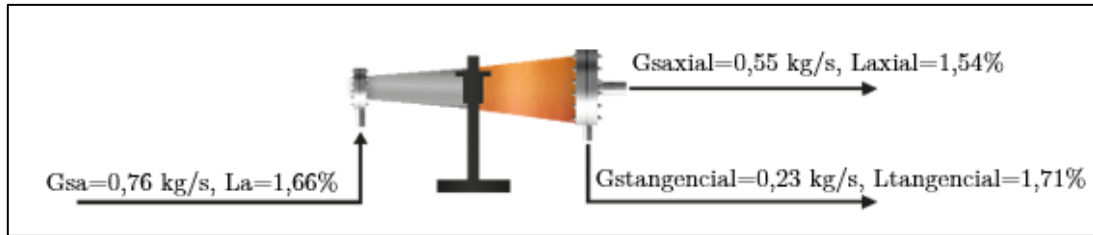


Figura 91: Balances másico y metalúrgico, peor recuperación metalúrgica, celda cónica de d a 2d, caso CA2.

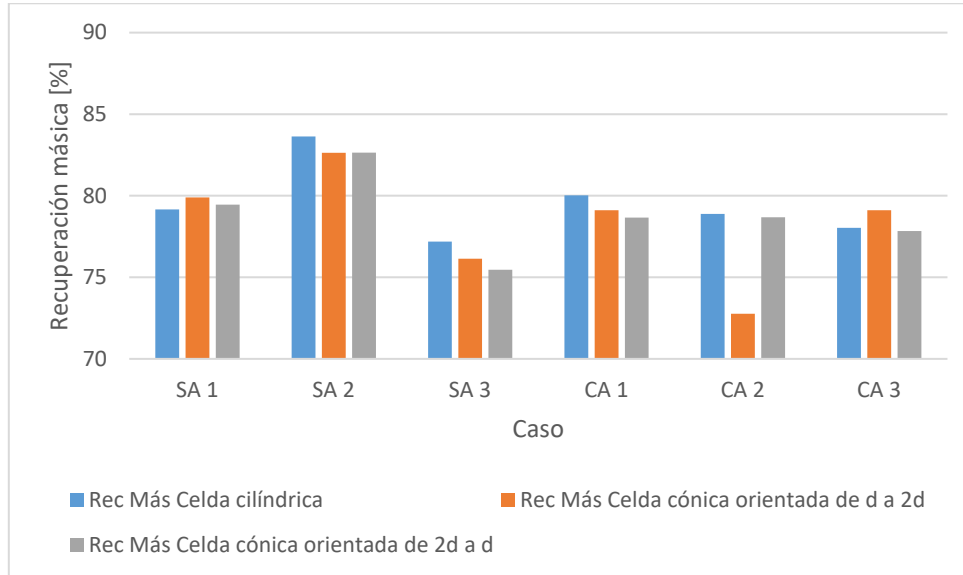


Figura 92: Recuperación másica vs celda, seis casos. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

Para el caso SA1, la mayor recuperación másica, de 879,9%, se obtiene con la celda cónica orientada de d a 2d. La recuperación másica promedio es de 79,5%.

Para el caso SA2, la mayor recuperación metalúrgica, de 83,64%, se obtiene con la celda cilíndrica. La recuperación másica promedio es de 82,97%.

Para el caso SA3, la mayor recuperación másica, de 77,19%, se obtiene con la celda cilíndrica. La recuperación másica promedio es de 76,26%.

Para el caso CA1, la mayor recuperación másica, de 80,02%, se obtiene con la celda cilíndrica. La recuperación másica promedio es de 79,26%.

Para el caso CA2, la mayor recuperación másica, de 79,89%, se obtiene con la celda cilíndrica. La recuperación másica promedio es de 76,78%.

Para el caso CA3, la mayor recuperación másica, de 79,12%, se obtiene con la celda cónica orientada de d a 2d. La recuperación másica promedio es de 78,33%.

La mayor recuperación másica, de 83,64%, se obtiene con la operación de la celda cilíndrica en el caso SA2. La recuperación másica promedio es de 78,85%. La desviación estándar promedio es 1,11%.

El caso SA2 es que el presenta las mayores recuperaciones másicas para las tres celdas, lo cual sugiere que cuando se aplica el campo magnético de baja intensidad y no se ingresa aire a las celdas, el flujo axial obtenido es mayor que en los demás casos, contribuyendo a una mayor recuperación másica.

En cuatro de los seis casos, con la operación de la celda cilíndrica se obtiene mayores recuperaciones másicas, lo que debe a que el área transversal de la celda es constante.

En los casos SA1, CA1 y CA3 se obtiene recuperaciones másicas cercanas al 80%, las cuales son aceptables.

Por otra parte, en los casos SA3 y CA2 se obtienen las menores recuperaciones másicas, del 76,52% en promedio. Los demás casos tienen una recuperación másica promedio de 80,02%.

En el caso SA3 la recuperación másica disminuye con respecto al caso SA1 debido a la barrera que impone el campo magnético de alta intensidad de los imanes permanentes, disminuyendo el flujo axial.

La operación con la celda cónica de d a 2d en el caso CA2 obtiene la menor recuperación másica, de 72,77%. Esto se debe al mayor contacto, con respecto al caso CA1, del campo magnético de baja intensidad del solenoide con el flujo tangencial producto del efecto centrífugo potenciado por el ingreso de aire, lo que provoca la disminución del flujo axial.

Ahora bien, en el caso CA2, las recuperaciones másicas obtenidas con las celdas cilíndrica y cónica orientada de 2d a d rondan el 79%.

A continuación, se muestra el balance másico y metalúrgico para los casos con mayor y menor recuperación másica. Para ilustrar estos balances, se presenta un esquema para cada caso. En la Figura 93 se muestra el esquema del caso con mayor recuperación másica, mientras que el esquema del caso con menor recuperación másica se muestra en la Figura 94.

### Celda cilíndrica, caso SA2

$$G_{sa} = G_{saxial} + G_{stangencial}$$

$$0,75 \frac{kg}{s} = 0,63 \frac{kg}{s} + 0,13 \frac{kg}{s}$$

$$G_{sa} * L_a = G_{saxial} * L_{axial} + G_{stangencial} * L_{tangencial}$$

$$0,75 \frac{kg}{s} * 1,69\% = 0,63 \frac{kg}{s} * 1,70\% + 0,13 \frac{kg}{s} * 1,63\%$$

$$R_{másica} = \frac{G_{saxial}}{G_{sa}}$$

$$R_{másica} = \frac{0,63 \frac{kg}{s}}{0,75 \frac{kg}{s}} = 83,64\%$$

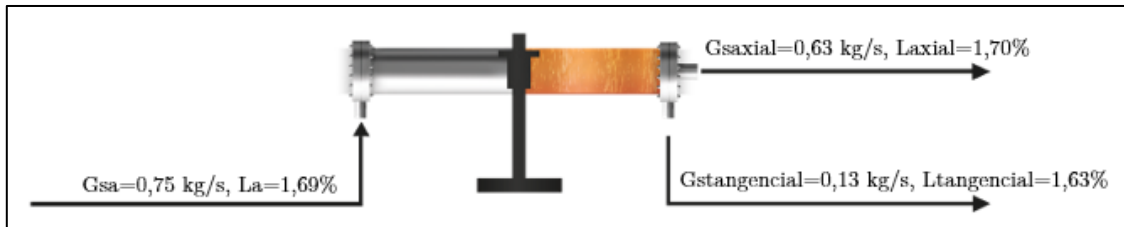


Figura 93: Balances másico y metalúrgico, mejor recuperación másica, celda cilíndrica, caso SA2.

### Celda cónica orientada de d a 2d, caso CA2

$$G_{sa} = G_{saxial} + G_{stangencial}$$

$$0,76 \frac{kg}{s} = 0,55 \frac{kg}{s} + 0,23 \frac{kg}{s}$$

$$G_{sa} * L_a = G_{saxial} * L_{axial} + G_{stangencial} * L_{tangencial}$$

$$0,76 \frac{kg}{s} * 1,66\% = 0,55 \frac{kg}{s} * 1,54\% + 0,23 \frac{kg}{s} * 1,71\%$$

$$R_{másica} = \frac{G_{saxial}}{G_{sa}}$$

$$R_{másica} = \frac{0,55 \frac{kg}{s}}{0,76 \frac{kg}{s}} = 72,77\%$$

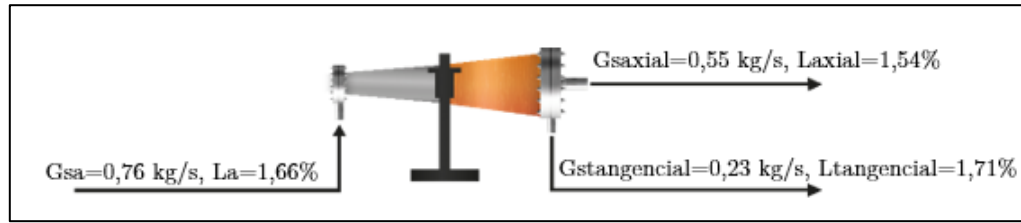


Figura 94: Balances másico y metalúrgico, peor recuperación másica, celda cónica de d a 2d, caso CA2.

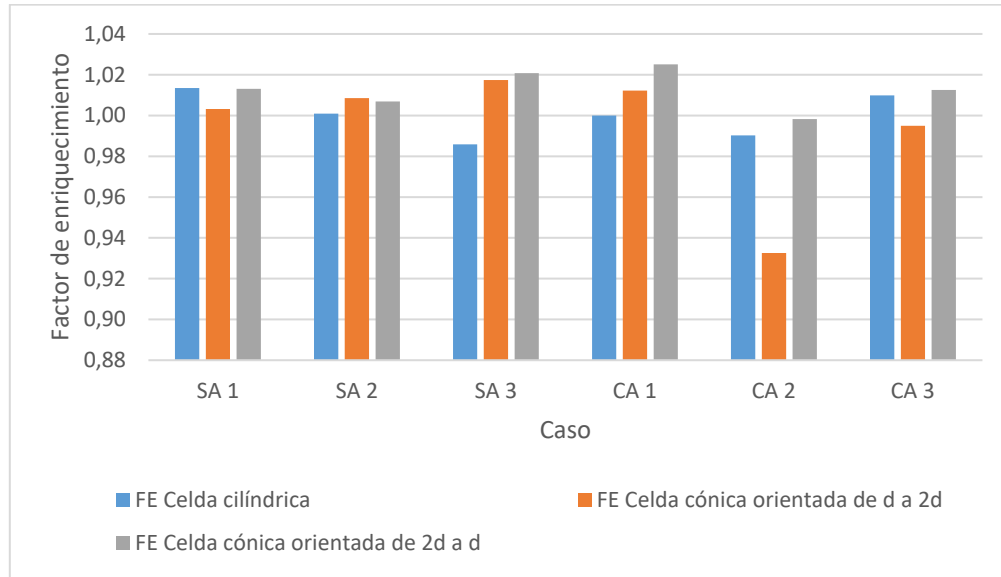


Figura 95: Factor de enriquecimiento vs celda, seis casos. Casos: sin aire y sin campo, SA1; sin aire y con campo bajo, SA2; sin aire y con campo alto, SA3; con aire y sin campo, CA1; con aire y con campo bajo, CA2; con aire y con campo alto, CA3.

Para el caso SA1, el mayor factor de enriquecimiento, de 1,013, se obtiene con la celda cónica de cilíndrica. El factor de enriquecimiento promedio es 1,010.

Para el caso SA2, el mayor factor de enriquecimiento, de 1,009, se obtiene con la celda cónica d a 2d. El factor de enriquecimiento promedio es 1,005.

Para el caso SA3, el mayor factor de enriquecimiento, de 1,021, se obtiene con la celda cónica de 2d a d. El factor de enriquecimiento promedio es 1,008.

Para el caso CA1, el mayor factor de enriquecimiento, de 1,025, se obtiene con la celda cónica de 2d a d. El factor de enriquecimiento promedio es 1,012.

Para el caso CA2, el mayor factor de enriquecimiento, de 0,998, se obtiene con la celda cónica de 2d a d. El factor de enriquecimiento promedio es 0,974

Para el caso CA3, el mayor factor de enriquecimiento, de 1,013, se obtiene con la celda cónica de 2d a d. El factor de enriquecimiento promedio es 1,006.

En cuatro de los seis casos con la celda cónica orientada de 2d a d se obtiene los mayores factores de enriquecimiento.

El mayor factor de enriquecimiento, de 1,025, se obtiene con la operación de la celda cónica orientada de 2d a d en el caso CA1. El factor de enriquecimiento promedio es 1,003. La desviación estándar promedio es 0,359.

En el caso CA2 con la celda cónica orientada de d a 2d se obtiene un factor de enriquecimiento de 0,933. Esto se debe a la baja ley del flujo axial obtenida en este caso.

Ahora bien, en el caso CA2 se obtienen los menores factores de enriquecimiento, cuyo promedio es 0,974. Esto sugiere que, al aplicar el campo magnético de baja intensidad del solenoide e incorporar aire, las celdas no concentran partículas en el flujo axial.

## 4.2.5 Resultados reconciliados alternativos

Los resultados ya ajustados para las pruebas experimentales se presentan en la Figura 96. Se destacan los valores más altos para la recuperación másica, factor de enriquecimiento y recuperación metalúrgica.

No	Flujo de gas [l/min]	Campo magnético [G]	Ley Alim. [%]	Ley Cola [%]	Ley Conc. [%]	Rec. Másica [%]	Razón enriquecimiento	Rec. [%]
1	0	0	1.61	1.60	2.07	13.42	1.25	16.72
2	0	70	1.62	1.60	2.31	8.91	1.39	12.39
3	0	10000	1.64	1.60	2.90	4.86	1.75	8.49
4	150	0	1.63	1.60	2.86	5.05	1.72	8.68
5	150	70	1.72	1.63	4.50	1.17	2.71	3.15
6	150	10000	1.76	1.60	5.30	1.72	3.19	5.46
1	0	0	1.69	1.69	3.00	3.99	1.72	6.88
2	0	70	1.69	1.69	3.80	2.48	2.18	5.41
3	0	10000	1.73	1.72	4.94	0.70	2.84	1.97
4	150	0	1.76	1.71	6.02	0.75	3.45	2.60
5	150	70	1.74	1.51	7.01	4.22	4.02	17.00
6	150	10000	1.84	1.68	9.37	0.81	5.38	4.36
1	0	0	1.68	1.65	2.52	10.31	1.45	14.94
2	0	70	1.69	1.62	3.21	7.53	1.85	13.90
3	0	10000	1.78	1.65	4.27	3.43	2.46	8.41
4	150	0	1.70	1.66	3.00	5.94	1.73	10.26
5	150	70	1.75	1.65	4.31	3.37	2.48	8.36
6	150	10000	1.85	1.67	5.61	1.77	3.23	5.72

Figura 96: Resultados reconciliados alternativos.

Con los resultados obtenidos se procede a generar un modelo matemático multifactorial, en donde las variables consideradas son el caudal de gas, la intensidad de campo magnético y la ley del flujo de alimentación. Con ello se tiene en el modelo como coeficientes la constante (el coeficiente de orden cero), los términos lineales (coeficientes de primer orden) y los términos de segundo orden (valores unitarios y valores cruzados), dando así una matriz de 6x9 elementos para cada una de las seis pruebas y 3 prototipos. Con ello, se obtiene que el término de orden cero es muy pequeño para todos los casos. En el caso de los coeficientes de primer orden, aumentos en la ley del flujo de alimentación implican aumentos en la ley

del concentrado, además se tiene que el término de la ley del flujo de alimentación es mayor en el caso de la celda cilíndrica, seguido de la celda cónica orientada de  $d$  a  $2d$  y el más bajo es en el caso de la celda cónica orientada de  $2d$  a  $d$ .

Se observa que las mejores leyes de concentrado se obtienen en la celda cónica, especialmente cuando ésta se orienta de  $d$  a  $2d$ , con una ley promedio de 5,69%. Si la intensidad del campo magnético aumenta, la ley del concentrado aumenta. Cuando se aplica el campo magnético de baja intensidad del solenoide el aumento promedio es de 0,95% en la ley de cobre. Mientras que, cuando se aplica el campo magnético de alta intensidad de los imanes permanentes el aumento promedio es de 2,15% en la ley de cobre.

Por otra parte, cuando la intensidad del campo magnético aumenta, la recuperación metalúrgica, en general, disminuye. Cuando se aplica el campo magnético de baja intensidad del solenoide la disminución promedio es de 0,15%. Mientras que, cuando se aplica el campo magnético de alta intensidad de los imanes permanentes la disminución promedio es de 4,45%.

Los resultados están dentro de los rangos esperados. Para la primera celda de un banco rougher es normal una recuperación metalúrgica del orden del 15%, la recuperación másica está en el rango [1 - 10]%, mientras que el factor de enriquecimiento se encuentra en el rango [1 - 10]. A pesar de esto, se debe considerar los errores en los resultados obtenidos debido al proceso de minimización.

## 5. Conclusiones

El campo magnético se atenúa en el espacio, lo que tiene un impacto en los resultados obtenidos experimentalmente.

La orientación del campo magnético también influye en los resultados. Si no se ingresa aire, la aplicación del campo magnético de baja intensidad del solenoide genera, en promedio, un aumento en la ley del flujo axial de 0,01% y un aumento del flujo axial de 0,03 kg/s, por la alineación del campo con el flujo. Al aplicar el campo magnético de alta intensidad de los imanes permanentes, en promedio la ley del flujo axial disminuye en 0,003% y el flujo axial disminuye en 0,02 kg/s, debido a que este campo es perpendicular al flujo.

Al ingresar de aire, el efecto centrífugo disminuye la incidencia del campo magnético sobre el flujo axial. La aplicación del campo magnético de baja intensidad genera, en promedio, una disminución de la ley del flujo axial de 0,06% y una disminución de 0,02 kg/s en este flujo. Al aplicar el campo magnético de alta intensidad, en promedio la ley del flujo axial aumenta en 0,01% y el flujo axial disminuye en 0,01 kg/s, debido a que este campo es perpendicular al flujo.

Ahora bien, la forma y orientación de la celda también afecta los resultados obtenidos. Al comparar la celda cónica orientada de  $d$  a  $2d$  con la celda cilíndrica, sin ingresar aire, el aumento del área transversal en la celda cónica provoca una mayor separación entre el flujo axial y el flujo tangencial, incidiendo más el campo magnético. Esto genera, en promedio, un aumento en la ley del flujo axial de 0,05% y una disminución de 0,003 kg/s en el flujo axial.

Cuando se incorpora aire a la celda el efecto centrífugo se potencia y el campo magnético incide más en el flujo tangencial que en flujo axial. Esto genera, en promedio, una disminución de 0,02% en la ley del flujo axial y una disminución de 0,01 kg/s en el flujo axial.

Si se compara la celda cónica orientada de  $2d$  a  $d$  con la celda cilíndrica, sin incorporar aire, la disminución del área transversal genera un mayor efecto centrífugo, lo que produce que el campo magnético incida más en el flujo tangencial. Esto se traduce, en promedio, en una disminución de 0,02% en la ley del flujo axial y una disminución de 0,01 kg/s en el flujo axial.

Cuando se ingresa aire a la celda el efecto centrífugo aumenta, sin embargo, la disminución del área transversal genera un mayor contacto entre el campo magnético y el flujo axial. Luego, en promedio, la ley del flujo axial disminuye en 0,01% y el flujo axial disminuye en 0,005%.



Estas pequeñas variaciones entre los distintos casos indican que en cierto momento la celda se comporta como hidrociclón y no como celda, ya que el mineral se oxida y deja de estar correctamente acondicionado, disminuyendo la recuperación por flotación.

Por otra parte, la reconciliación de datos presenta para la celda cilíndrica, la celda cónica orientada de d a 2d y la celda cónica orientada de 2d a d, los siguientes errores: 1,52%, 3,26% y 2,43%, respectivamente. El caso CA2 con la celda cónica orientada de 2d a d presenta un error de 2,53% en los balances, lo que afecta los resultados obtenidos. Se concluye que se debe elegir cuidadosamente los parámetros y el método de reconciliación para todas las celdas, que aseguren la conservación de masa en el sistema.

Al variar la confiabilidad de la ley del flujo de alimentación para las variables con alta confiabilidad el cambio es irrelevante, con una desviación estándar promedio para el flujo de alimentación, ley del flujo axial y ley del flujo tangencial, de  $5,65 * 10^{-5}$  kg/s,  $1,93 * 10^{-3}\%$  y  $4,26 * 10^{-4}\%$ , respectivamente. Mientras que, para las variables con confiabilidad baja, el sistema opta por la conservación de masa antes que por mantener los valores obtenidos experimentalmente. Luego, la desviación estándar promedio para el flujo axial y el flujo tangencial es  $5,25 * 10^{-3}$  kg/s y  $4,49 * 10^{-3}$  kg/s, respectivamente.

La operación de la celda cónica orientada de 2d a d obtiene mayores recuperaciones metalúrgicas, en promedio, de 79,79%. Con la operación de la celda cilíndrica se obtiene mayores recuperaciones másicas, en promedio, de 79,49%. Mientras que con la operación de la celda cónica orientada de 2d a d se obtiene los mayores factores de enriquecimiento, en promedio, de 1,013.

La mayor recuperación metalúrgica, de 83,72%, se obtiene con la operación de la celda cilíndrica en el caso SA2. La mayor recuperación másica, de 83,64%, se obtiene con la operación de la celda cilíndrica en el caso SA2.

Por otra parte, el mayor factor de enriquecimiento, de 1,025; se obtiene con la operación de la celda cónica orientada de 2d a d en el caso CA1.

Las leyes del flujo axial son semejantes a las leyes del flujo tangencial y el flujo axial es mayor al flujo tangencial, en proporción 4:1. Cuando se elige el flujo axial como concentrado, la recuperación metalúrgica promedio es de 79,07%, la recuperación másica promedio es de 78,85% y el factor de enriquecimiento promedio es de 1,003. Mientras que cuando se elige el flujo tangencial como concentrado, la recuperación metalúrgica promedio es de 20,98%, la recuperación másica promedio es de 21,01% y el factor de enriquecimiento promedio es de 0,998.

Ahora bien, cuando la recuperación metalúrgica es del orden de la recuperación másica, no hay concentración, lo que se evidencia con los factores de enriquecimiento promedios, cercanos a 1.

Por otra parte, normalmente el concentrado rougher es menor en flujo que el relave, sin embargo, se decide tomar el flujo axial como concentrado sólo por el mayor factor de enriquecimiento promedio que se obtiene en comparación al obtenido cuando se considera el flujo tangencial como concentrado.

Estos resultados distan mucho de los obtenidos en flotación convencional e indican que existe un corte del flujo de alimentación y una mínima concentración de partículas en el flujo axial. Esto se debe a que son celdas nuevas, de manera que su operación aún no está optimizada. Por ejemplo, durante la operación se puede oxidar el mineral o éste puede no estar correctamente hidrofobizado. El tiempo de residencia puede ser demasiado bajo y, por tanto, no se logra el contacto partícula-burbuja. La presión de alimentación varía al utilizar una bomba peristáltica afectando el comportamiento del fluido dentro de la celda. El concentrado y relave se recirculan al estanque, luego el concentrado puede ascender debido a las burbujas y, por consiguiente, se puede estar alimentando la celda sólo con ganga. La distribución y tamaño de burbujas no se controlan, sólo el flujo de aire. Por último, la orientación de los imanes tampoco asegura el máximo efecto del campo magnético en el fluido. Todos estos factores inciden en que las concentraciones obtenidas no sean como las esperadas.

Por otra parte, de acuerdo con los resultados reconciliados alternativos, las mejores leyes de concentrado se obtienen en la celda cónica, especialmente cuando ésta se orienta de d a 2d, con una ley promedio de 5,69%. Si la intensidad del campo magnético aumenta, la ley del concentrado aumenta y la recuperación metalúrgica, en general, disminuye. Para la ley del concentrado, cuando se aplica el campo magnético de baja intensidad el aumento promedio es de 0,95% en la ley de cobre. Mientras que, cuando se aplica el campo magnético de alta intensidad el aumento promedio es de 2,15% en la ley de cobre. Para la recuperación metalúrgica, cuando se aplica el campo magnético de baja intensidad la disminución promedio es de 0,15%. Mientras que, cuando se aplica el campo magnético de alta intensidad la disminución promedio es de 4,45%.

La mayor recuperación metalúrgica, de 17,00%, se obtiene con la celda cónica orientada de d a 2d en el caso CA2. La mayor recuperación másica, de 13,42% se obtiene con la celda cilíndrica en el caso SA1. El mayor factor de enriquecimiento, de 5,38; se obtiene con la celda cónica orientada de d a 2d en el caso CA3. Estos resultados están dentro de los esperados para la primera celda un banco rougher. Sin embargo, es importante considerar los errores en los resultados obtenidos debido al proceso de minimización.

Finalmente, se concluye que, independientemente del método de reconciliación, se tiene cierto conocimiento de la influencia del ingreso de aire a la celda y la incorporación de campos magnéticos al sistema. Sin embargo, muchos otros factores inciden en la operación y deben ser incorporados para optimizar el funcionamiento de las celdas, reducir el consumo de agua y obtener resultados competentes.

## 6. Trabajo futuro

De acuerdo con los resultados obtenidos y al análisis de las tareas realizadas, se sugiere corregir el sistema de medición del flujo de alimentación, del flujo axial y del flujo tangencial, por uno más preciso. Esto es relevante en la precisión de los datos obtenidos.

Se recomienda mejorar el sistema de toma de muestras, sobre todo cuando se opera con flujos máxicos altos, como es el caso del flujo axial.

Con respecto a los campos magnéticos, se recomienda disponer de un sistema que varíe la corriente eléctrica suministrada al solenoide para observar los cambios en el campo magnético y su influencia en las recuperaciones. Para el caso de los imanes permanentes se sugiere evaluar qué orientación geométrica deben tener estos imanes para que la magnitud del campo magnético aplicado al flujo sea mayor. Además, se recomienda tener un sistema de medición del campo magnético de los imanes permanentes mientras se operan las celdas.

Por otra parte, es recomendable realizar un análisis tipo QESCAM del mineral a utilizar, con el fin de poder identificar el colector, espumante y modificador más adecuado al mineral. Se sugiere aumentar el tiempo de acondicionamiento, con el fin de asegurar el contacto de los reactivos con la pulpa. También se recomienda aumentar el tiempo de residencia del fluido en la celda, para un mayor contacto entre las burbujas y las partículas. Estas medidas optimizan el proceso de flotación.

Se sugiere estudiar el impacto de las burbujas para lograr una mayor comprensión de su efecto en la operación.

También se recomienda definir cómo debe tratarse un circuito que utiliza este tipo de celdas.

Se sugiere además establecer un sistema de alimentación única, sin recirculación, para no afectar la ley del flujo de alimentación.

Es recomendable medir las presiones de alimentación para poder medir el efecto centrífugo generado dentro de la celda. Este efecto centrífugo incide en la separación de los flujos axial y tangencial, por lo tanto, tener control sobre la presión de entrada permite tener control sobre el efecto centrífugo, con lo cual se puede incidir en la concentración de partículas en el flujo axial como en el tangencial.

Por último, se sugiere caracterizar los flujos de acuerdo con su distribución de tamaños, para poder obtener recuperaciones para cada clase de tamaño de partículas.

## 7. Bibliografía

1. Abramov, A. A., & Forssberg, K. S. E. (2005). Chemistry and optimal conditions for copper minerals flotation: theory and practice, (August 2004), 77–143.
2. Abu-Ali, M. H., & Abdel Sabour, S. A. (2003). Optimizing the design of flotation circuits : an economic approach, 16, 55–58.
3. Ajerch, M. (1997). Mechanisms of pulp loss in flotation deinking.
4. Alexander, D. J., Franzidis, J. P., & Manlapig, E. V. (2003). Froth recovery measurement in plant scale flotation cells, 16, 1197–1203.
5. Allen, N. R. (2000). Low Intensity Rotating Magnetic Field Separation, 11.
6. Atkinson, B., Conway, C., & Jameson, G. J. (1995). High-efficiency flotation of coarse and fine.
7. Barns, K. E., Colbert, P. J., & Munro, P. D. (2009). Designing the Optimal Flotation Circuit – The Prominent Hill Case, (October), 12–14.
8. Breau, Y., DeMontigny, M., Levesque, E., McMullen, J., Pelletier, D., & Pelletier, P. (2001). Flotation and cyanidation process control. Patent US6234318.
9. Bulatovic, S. M. (2007). Handbook of Flotation Reagents: Chemistry, Theory and Practice Flotation of Sulfide Ores.
10. Casali, A., Gonzalez, G., Augusto, H., & Vallebuona, G. (2002). Dynamic simulator of a rougher flotation circuit for a copper sulphide ore, 15, 253–262.
11. Cereceda, J. I. (2018). Memoria de pregrado: Impacto del efecto del campo magnético y del efecto centrífugo en la eficiencia de separación de minerales utilizando la nueva celda de flotación MGFLOAT®. Santiago, Chile: Universidad de Chile.
12. Cilliers, J. J. L. R. (2012). Method and apparatus for froth flotation control.
13. Cochilco. (2019). Proyección de consumo de agua en la minería del cobre 2019-2030.
14. Conejeros, S., Alemany, P., Llanell, M., De P.R. Moreira, I., Sánchez, V., & Llanos, J. (2015). Electronic Structure and Magnetic Properties of CuFeS<sub>2</sub>.
15. Cotnoir, D., Liu, Q., Ourriban, M., Peng, P., & Richard, D. (2005). Some solutions to the problems in fine particle flotation.
16. Cytec Industries Inc. (2002). Hand book: Mining Chemicals, Revised Edition.
17. Dold, B. (2015). Element Cycling and Secondary Mineralogy in Porphyry Copper Tailings as a Function of Climate , Primary Mineralogy , and mineral processing, (August), 2–55.

18. Drzymala, J. (2007). *Mineral Processing: Foundations of theory and practice of mineralurgy*.
19. Elmahdy, A. M., Farahat, M., & Hirajima, T. (2016). Comparison between the effect of microwave irradiation and conventional heat treatments on the magnetic properties of chalcopyrite and pyrite. *Advanced Powder Technology*, 27(6), 2424–
20. Falutsu, M. (1994). Column flotation froth characteristics stability of the bubble-particle system, 40, 225–243.
21. Fan, X., Parker, D. J., Yang, Z., Seville, J. P. K., & Baeyens, J. (2008). The effect of bed materials on the solid / bubble motion in a fluidised bed, 63, 943–950.
22. Fricker A.G. (1984) A magnetic hydrocyclone. Industrial Processing Div., The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, p. 16.
23. FLSmidth. (2015). FLSmidth - Celda de Flotación de 660 metros cúbicos ofrece a la Industria ventajas económicas - APRIMIN \_\_ Asociación de Proveedores Industriales de la Minería.
24. Grace, J. R., & Harrison, D. (1969). The behavior of freely bubbling fluidized beds.
25. Hans, B. J. and Pick, H. (1963). "Apparatus for sampling and analyzing a plurality of continuously flowing streams of material through flexible conduits". Patent, US3259743.
26. Harris, C. C. (1978). Multiphase models of flotation machine behaviour, 5, 107–129.
27. Harris, C. C., & Rimmer, H. W. (1966). *Study of a two-phase model of the flotation process*.
28. Holuszko, M., Wightman, E. M., & Manlapig, E. (2010). Methods for improving the flotation recovery of the coarse fraction of a nickel ore. In *XXV International Mineral Processing Congress - IMPC 2010* (pp. 1971–1979).
29. Hulbert, D. G. (2001). THE OPTIMUM DISTRIBUTION OF CELL CAPACITIES IN FLOTATION CIRCUITS, 14(5), 473–486.
30. Hulbert, D. G. (2007). Flotation test apparatus. Patent WO07082317.
31. Hunt, P., Moskowitz, B. M., & Banerjee, S. K. (1995). Magnetic Properties of Rocks and Minerals, 189–204.
32. Hwang, K., Lyu, S., & Nagase, Y. (2009). Particle separation efficiency in two 10-mm hydrocyclones in series, 40, 313–319.
33. Jameson Cell. (2015). *Celda Jameson*.
34. Jameson, G. J. (2010). Advances in Fine and Coarse Particle Flotation, 49(4), 325–

330.

35. Jameson, G. J., & Lambert, N. W. A. (2001). Improved froth flotation process and apparatus. Patent EP1259329A4.
36. Kerns, K. C., & Pagnotti, J. R. (2006). Method and process for providing a controlled batch of micrometer sized or nanometer sized coal material. Patent US7407121.
37. Kohmuench, J. N., & Luttrell, G. H. (2001). Coarse particle concentration using the HydroFloat Separator, *18*(00), 61–67.
38. Levenspiel, O. (1962). Mixed Models to , Represent Flow of Fluids through Vessels, 135–138.
39. Lynch, A. J., Harbort, G. J., & Nelson, M. G. (2010). *History of flotation*.
40. Metso. (2020). *Celdas de flotacion RCS Manual de usuario*.
41. Montes-atenas, G., Garcia-garcia, F. J., Mermillod-blondin, R., & Montes, S. (2010). Effect of suspension chemistry onto voltage drop : Application to electro- flotation. *Powder Technology*, *204*(1), 1–10.
42. Morris, T. M. (1952). Measurement and evaluation of the rate of flotation as a function of particle size.
43. Moudgil, B. M. (1993). Correlation between froth viscosity and flotation efficiency.
44. Osserov, T., Guseynova, G., & Ketegenov, T. (2017). Mechanochemical Reduction of Chalcopyrite CuFeS<sub>2</sub>: Changes in Composition and Magnetic Properties, *131*(4).
45. Outotec. (2016). Outotec Flotation Tankcell® e-Series.
46. Palosaari, V. (2003). Method of controlling feed variation in a valuable mineral flotation circuit. Patent US0262201A1.
47. Rawlins, C. H., & Watson, J. L. (1993). Treatment of steel industry wastes with magnetic hydrocyclones. In *Extraction and Processing for the Treatment and Minimization of Wastes, 1994* (pp. 595–609).
48. Rojas, V. (2018). *Tesis de Magíster: Diseño de una nueva celda de flotación basada en tecnologías no convencionales del tipo hidrociclón magnético para un uso más eficiente de los recursos hídricos*. Santiago, Chile: Universidad de Chile.
49. Rule, C. M., & Anyimadu, A. K. (2007). Flotation cell technology and circuit design — an Anglo Platinum perspective, (OCTOBER), 615–622.
50. Scheiner, B. J., & Jordan, C. E. (1989). Hydrodynamic Effects in Flotation of Ores, 219–224.

51. Vanegas, C., & Holtham, P. (2008a). Method and apparatus for monitoring a froth phase. Patent WO08061289.
52. Vanegas, C., & Holtham, P. (2008b). On-line froth acoustic emission measurements in industrial sites, *21*, 883–888.
53. Venkatachalam, S. (1992). Electrogenerated Gas Bubbles in Flotation, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 8: 1-4, 47–55.
54. Veolia. (2020). Idraflot™.
55. Vieira, M. D. M., Goedkoop, M. J., Storm, P., & Huijbregts, M. A. J. (2012). Ore Grade Decrease As Life Cycle Impact Indicator for Metal Scarcity: The Case of Copper.
56. Wen-qing, Q. I. N., Liu-yi, R. E. N., Pei-pei, W., Cong-ren, Y., & Yan-sheng, Z. (2012). Electro-flotation and collision-attachment mechanism of fine cassiterite. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, *22*(4), 917–924.
57. Wu, C, Nasset, K., Xu, Z., & Masliyah, J. (2010). Generation and Attachment of Submicron Size Bubbles to Colloidal Solids. In *XXV International Mineral Processing Congress - IMPC 2010* (pp. 2561–2568).
58. Wu, Chendi, Nasset, K., Masliyah, J., & Xu, Z. (2012). Generation and characterization of submicron size bubbles. *Advances in Colloid and Interface Science*, *179–182*, 123–132.
59. Xu, D., Wang, W., Ametov, I., Fornasiero, D., & Grano, S. (2010). The Detachment of Coarse, Composite Particles from Bubbles. In *XXV International Mineral Processing Congress - IMPC 2010* (pp. 2601–2610).
60. Yianatos, J. (2009). *AVANCES EN EL DISEÑO, CARACTERIZACION Y OPERACIÓN DE CELDAS DE FLOTACION*.
61. Yianatos, J. B., & Bergh, L. G. (1992). RTD studies in an industrial flotation column : use of the radioactive tracer technique, *36*, 81–91.
62. Yuexin, H., & Bingchen, C. (1993). Modelling Based on the Similarity Principle and Variables. In *XVIII International Mineral Processing Congress* (pp. 263–266).

# ANEXOS

## A. Actividades en laboratorio

### A.1 Equipos y materiales utilizados

En las Ilustraciones 15 a 22 se muestran los equipos y materiales utilizados para llevar a cabo las actividades en el laboratorio.

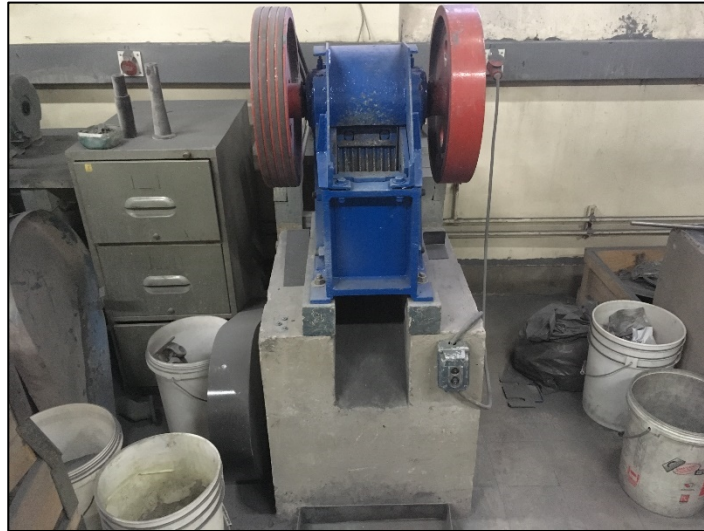


Ilustración 15: Chancador de mandíbulas, laboratorio.



Ilustración 16: Chancador, laboratorio.





Ilustración 17: Molino de bolas, laboratorio.



Ilustración 18: Harnero vibratorio, laboratorio.

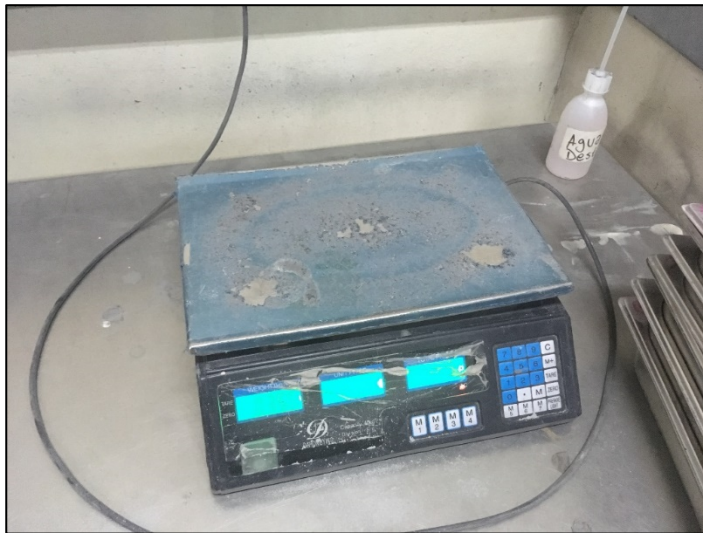


Ilustración 19: Balanza.



Ilustración 20: Balanza de precisión.



Ilustración 21: Celda de flotación, escala laboratorio.



Ilustración 22: Gaussímetro.

## A.2 Pruebas de flotación

En las Tablas 47, 48, 49 y 50 se muestran los requerimientos teóricos de reactivos para las cuatro pruebas de flotación realizadas en laboratorio.  $\mu$

Tabla 47: Requerimientos reactivos, P1 flotación laboratorio.

<b>Prueba 1</b>	
Xantato [g/t]	40
Xantato [g]	0,037
Densidad Xantato [g/mL]	1,522
Xantato [ $\mu$ L]	24,205
Aerofroth 76E [g/t]	30
Aerofroth 76E [g]	0,028
Densidad Aerofroth 76E [g/mL]	1,009
Aerofroth 76E [ $\mu$ L]	27,383
KOH [g]	0,641

Tabla 48: Requerimientos reactivos, P2 flotación laboratorio.

<b>Prueba 2</b>	
Xantato [g/t]	40
Xantato [g]	0,019
Densidad Xantato [g/mL]	1,522
Xantato [ $\mu$ L]	12,447
Aerofroth 76E [g/t]	30
Aerofroth 76E [g]	0,014
Densidad Aerofroth 76E [g/mL]	1,009
Aerofroth 76E [ $\mu$ L]	14,082
KOH [g]	0,641

Tabla 49: Requerimientos reactivos, P3 flotación laboratorio.

<b>Prueba 3</b>	
Xantato [g/t]	40
Xantato [g]	0,037
Densidad Xantato [g/mL]	1,522
Xantato [ $\mu$ L]	24,205
Aerofroth 76E [g/t]	30
Aerofroth 76E [g]	0,028
Densidad Aerofroth 76E [g/mL]	1,009
Aerofroth 76E [ $\mu$ L]	27,383
KOH [g]	0,855

Tabla 50: Requerimientos reactivos, P4 flotación laboratorio.

<b>Prueba 4</b>	
Xantato [g/t]	40
Xantato [g]	0,019
Densidad Xantato [g/mL]	1,522
Xantato [ $\mu$ L]	12,447
Aerofroth 76E [g/t]	30
Aerofroth 76E [g]	0,014
Densidad Aerofroth 76E [g/mL]	1,009
Aerofroth 76E [ $\mu$ L]	14,082
KOH [g]	0,855

## B. Actividades a escala piloto

En seguida, en la Tabla 51 se muestran los datos referentes al cálculo de toma de muestras. Si impuso un error del 5%, el cual es aceptable para pruebas de metalurgia. Así también, se utilizó valores para d, f, g y l que provienen de la teoría y experiencia. El tiempo mínimo de prueba es de 16,974 min y la ley de calcopirita es de 4,913%. El tiempo de toma de muestra para la salida axial es de  $2,329 * 10^{-5}$  s mientras que para la salida axial es  $9,028 * 10^{-5}$  s.

Tabla 51: Cálculo tiempo mínimo de muestreo.

<b>Tiempo mínimo de muestreo</b>	
Sfe2	0,00250
d [cm]	0,02100
MI[g]	768600,00000
Ms [g]	0,01398
Gsa [g/s]	754,67802
GsA[g/s]	599,86798
GsT[g/s]	154,80858
ta[s]	1018,44757
C [g/cm3]	3,77284
f	0,50000
g	0,25000
m [g/cm3]	79,85605
l	0,37796
tA[s]	0,00002
tT[s]	0,00009

## B.1 Operación Celda cilíndrica

A continuación, en las Tablas 52, 53 y 54 se muestran mediciones realizadas a flujos de salida, flujo de aire y presiones de aire realizadas durante la operación de la celda cilíndrica.

Tabla 52: Mediciones de flujos de salida, CA2, celda cilíndrica.

Flujos de salida, CA2	
Salida	Flujo salida [l/s]
Axial	1,12
Tangencial	0,04

Tabla 53: Medición de flujo de aire, celda cilíndrica.

Flujo de aire	
[l/min]	[l/s]
150	2,50

Tabla 54: Mediciones de presiones de aire, celda cilíndrica.

Presiones de aire		
Prueba	Presión de entrada [bar]	Presión de entrada [psi]
SA1	0,13	1,81
SA2	0,13	1,81
SA3	1,3	18,85
CA1	0,32	4,64
CA2	0,32	4,64
CA3	1,3	18,85

## B.2 Operación celda cónica de d a 2d

A continuación, en las Tablas 55 y 56 se muestran mediciones realizadas a flujos de alimentación y de salida durante la operación de la celda cónica, orientada de d a 2d.

Tabla 55: Mediciones de flujos, CA1, celda cónica de d a 2d.

CA 1			
	Vol [l]	Tiempo [s]	Caudal [l/s]
Alim	2,4	2,69	0,89
Axial	2,4	4,39	0,55
Tangencial	0,4	60	0,01

Tabla 56: Mediciones de flujos de salida, SA1, celda cónica de d a 2d.

<b>SA 1</b>			
	Vol [l]	Tiempo [s]	Caudal [l/s]
Axial	2,4	3,93	0,61
Tangencial	0,05	60	0,00

### B.3 Operación celda cónica de 2d a d

A continuación, en las Tablas 57 y 58 se muestran mediciones realizadas a flujos de alimentación y de salida durante la operación de la celda cónica, orientada de 2d a d.

Tabla 57: Mediciones de flujos, CA1, celda cónica de 2d a d.

<b>CA 1</b>			
	Vol [l]	Tiempo [s]	Caudal [l/s]
Alim	2,4	2,49	0,96
Axial	2,4	2,04	1,18
Tangencial	1,95	60	0,03

Tabla 58: Mediciones de flujos de salida, SA1, celda cónica de 2d a d.

<b>SA 1</b>			
	Vol [l]	Tiempo [s]	Caudal [l/s]
Axial	2,4	3,15	0,76
Tangencial	1,4	60	0,02

### B.4 Reconciliación de datos

A continuación, se muestran las tablas que componen la reconciliación de datos, junto con los errores asociados y en seguida se muestran los datos reconciliados obtenidos al variar la confiabilidad en la ley de alimentación.

#### i. Errores obtenidos

En seguida, en las Tablas 59 a 103 se muestran los resultados atinentes a la reconciliación de datos, según celda. Los principales resultados son las sumas de errores por ajuste, por balance metalúrgico y la ponderación de éstos para la suma de errores final, que corresponde al error total de la reconciliación. Este último se buscaba minimizar a cero.

## Celda cilíndrica

Tabla 59: Ajuste de valores experimentales, celda cilíndrica, confiabilidad  $L_a=0,5$ .

Variable		Experimental	Ajustado	Fconfiabilidad	F confiabilidad*(exp-ajust)^2
Gsa	SA 1	0,755	0,7545	0,9	6,32859E-08
	SA 2	0,755	0,7547	0,9	1,62923E-09
	SA 3	0,755	0,7546	0,9	2,18399E-08
	CA 1	0,755	0,7548	0,9	3,00364E-10
	CA 2	0,755	0,7547	0,9	9,08123E-09
	CA 3	0,755	0,7547	0,9	7,36492E-09
La	SA 1	1,610	1,626	0,5	0,000123031
	SA 2	1,700	1,694	0,5	2,00812E-05
	SA 3	1,650	1,641	0,5	4,47925E-05
	CA 1	1,660	1,660	0,5	1,08468E-11
	CA 2	1,660	1,652	0,5	3,00713E-05
	CA 3	1,660	1,668	0,5	2,90528E-05
Laxial	SA 1	1,660	1,648	0,5	7,70733E-05
	SA 2	1,690	1,695	0,5	1,39906E-05
	SA 3	1,610	1,617	0,5	2,66198E-05
	CA 1	1,660	1,660	0,5	1,33572E-12
	CA 2	1,630	1,636	0,5	1,86655E-05
	CA 3	1,690	1,684	0,5	1,7739E-05
Ltangencial	SA 1	1,650	1,648	0,7	3,47296E-06
	SA 2	1,630	1,631	0,7	4,01077E-07
	SA 3	1,660	1,662	0,7	1,74278E-06
	CA 1	1,660	1,660	0,7	1,56348E-12
	CA 2	1,660	1,661	0,7	9,96827E-07
	CA 3	1,660	1,659	0,7	9,61612E-07
Gsaxial	SA 1	0,600	0,597	0,001	7,41349E-09
	SA 2	0,600	0,631	0,001	9,7698E-07
	SA 3	0,600	0,582	0,001	3,06967E-07
	CA 1	0,600	0,604	0,001	1,57023E-08
	CA 2	0,600	0,595	0,001	2,16039E-08
	CA 3	0,600	0,589	0,001	1,23659E-07
Gstangencial	SA 1	0,150	0,150	0,01	8,80471E-11
	SA 2	0,150	0,127	0,01	5,51208E-06
	SA 3	0,150	0,177	0,01	7,02479E-06
	CA 1	0,150	0,151	0,01	6,50126E-09
	CA 2	0,150	0,163	0,01	1,67374E-06
	CA 3	0,150	0,162	0,01	1,48235E-06
				Suma1=	0,000425948



Tabla 60: Balance de masa y metalúrgico, celda cilíndrica, confiabilidad  $L_a=0,5$ .

Balance		Ajustado cuadrático
Bmás	SA 1	5,38986E-05
	SA 2	9,1886E-06
	SA 3	1,89181E-05
	CA 1	8,69057E-12
	CA 2	1,29574E-05
	CA 3	1,32839E-05
Bcu	SA 1	1,98467E-05
	SA 2	3,2324E-06
	SA 3	7,21629E-06
	CA 1	3,79969E-13
	CA 2	4,84184E-06
	CA 3	4,69017E-06
Suma2=		0,000148074

Tabla 61: Resumen de errores, celda cilíndrica, confiabilidad  $L_a=0,5$ .

Resumen errores	
Suma1=	4,259,E-04
Suma2=	1,481,E-04
Fpond=	0,3
Suma3=	2,314,E-04

Tabla 62: Ajuste de valores experimentales, celda cilíndrica, confiabilidad La=0,4.

Variable		Experimental	Ajustado	Fconfiabilidad	F confiabilidad*(exp-ajust)^2
Gsa	SA 1	0,7548	0,7546	0,9	4,5363E-08
	SA 2	0,7548	0,7548	0,9	5,81976E-10
	SA 3	0,7548	0,7547	0,9	1,65809E-08
	CA 1	0,7548	0,7548	0,9	3,05003E-10
	CA 2	0,7548	0,7547	0,9	7,85279E-09
	CA 3	0,7548	0,7547	0,9	6,50225E-09
La	SA 1	1,61	1,63	0,4	0,000131292
	SA 2	1,70	1,69	0,4	2,17748E-05
	SA 3	1,65	1,64	0,4	4,81127E-05
	CA 1	1,66	1,66	0,4	3,46533E-11
	CA 2	1,66	1,65	0,4	3,21994E-05
	CA 3	1,66	1,67	0,4	3,1142E-05
Laxial	SA 1	1,66	1,65	0,5	6,58766E-05
	SA 2	1,69	1,69	0,5	1,21194E-05
	SA 3	1,61	1,62	0,5	2,3053E-05
	CA 1	1,66	1,66	0,5	5,39136E-12
	CA 2	1,63	1,64	0,5	1,59986E-05
	CA 3	1,69	1,68	0,5	1,52529E-05
Ltangencial	SA 1	1,65	1,65	0,7	2,99026E-06
	SA 2	1,63	1,63	0,7	3,55849E-07
	SA 3	1,66	1,66	0,7	1,4596E-06
	CA 1	1,66	1,66	0,7	1,72154E-12
	CA 2	1,66	1,66	0,7	8,43526E-07
	CA 3	1,66	1,66	0,7	8,17737E-07
Gsaxial	SA 1	0,6	0,60	0,001	7,90645E-09
	SA 2	0,6	0,63	0,001	8,88518E-07
	SA 3	0,6	0,58	0,001	2,40221E-07
	CA 1	0,6	0,6040	0,001	1,57864E-08
	CA 2	0,6	0,5960	0,001	1,56778E-08
	CA 3	0,6	0,5900	0,001	9,91564E-08
Gstangencial	SA 1	0,15	0,15	0,01	3,47369E-09
	SA 2	0,15	0,13	0,01	4,93536E-06
	SA 3	0,15	0,17	0,01	5,84896E-06
	CA 1	0,15	0,15	0,01	6,32467E-09
	CA 2	0,15	0,16	0,01	1,43628E-06
	CA 3	0,15	0,16	0,01	1,27401E-06
				Suma1=	0,000418137

Tabla 63: Balance de masa y metalúrgico, celda cilíndrica, confiabilidad  $L_a=0,4$ .

Balance		Ajustado cuadrático
Bmás	SA 1	4,60782E-05
	SA 2	7,99557E-06
	SA 3	1,62502E-05
	CA 1	1,05133E-11
	CA 2	1,10773E-05
	CA 3	1,13952E-05
Bcu	SA 1	1,69546E-05
	SA 2	2,80695E-06
	SA 3	6,19963E-06
	CA 1	3,3291E-13
	CA 2	4,14411E-06
	CA 3	4,02089E-06
Suma2=		0,000126923

Tabla 64: Resumen de errores, celda cilíndrica, confiabilidad  $L_a=0,4$ .

Resumen errores	
Suma1=	4,181,E-04
Suma2=	1,269,E-04
Fpond=	0,3
Suma3=	2,143,E-04

Tabla 65: Ajuste de valores experimentales, celda cilíndrica, confiabilidad La=0,3.

Variable		Experimental	Ajustado	Fconfiabilidad	F confiabilidad*(exp-ajust)^2
Gsa	SA 1	0,7548	0,7546	0,9	2,64346E-08
	SA 2	0,7548	0,7548	0,9	5,90717E-10
	SA 3	0,7548	0,7547	0,9	1,01791E-08
	CA 1	0,7548	0,7548	0,9	3,02315E-10
	CA 2	0,7548	0,7547	0,9	3,48073E-09
	CA 3	0,7548	0,7547	0,9	4,30147E-09
La	SA 1	1,61	1,63	0,3	0,000138096
	SA 2	1,70	1,69	0,3	2,35851E-05
	SA 3	1,65	1,64	0,3	5,08238E-05
	CA 1	1,66	1,66	0,3	3,34505E-11
	CA 2	1,66	1,65	0,3	3,38378E-05
	CA 3	1,66	1,67	0,3	3,28946E-05
Laxial	SA 1	1,66	1,65	0,5	5,18741E-05
	SA 2	1,69	1,69	0,5	9,75798E-06
	SA 3	1,61	1,62	0,5	1,83917E-05
	CA 1	1,66	1,66	0,5	6,98596E-12
	CA 2	1,63	1,64	0,5	1,27006E-05
	CA 3	1,69	1,69	0,5	1,21387E-05
Ltangencial	SA 1	1,65	1,65	0,7	2,38753E-06
	SA 2	1,63	1,63	0,7	3,00227E-07
	SA 3	1,66	1,66	0,7	1,12918E-06
	CA 1	1,66	1,66	0,7	1,92504E-12
	CA 2	1,66	1,66	0,7	6,56526E-07
	CA 3	1,66	1,66	0,7	6,36858E-07
Gsaxial	SA 1	0,6	0,60	0,001	8,47002E-09
	SA 2	0,6	0,63	0,001	7,34832E-07
	SA 3	0,6	0,59	0,001	1,86288E-07
	CA 1	0,6	0,6040	0,001	1,57915E-08
	CA 2	0,6	0,5968	0,001	1,02207E-08
	CA 3	0,6	0,5914	0,001	7,31296E-08
Gstangencial	SA 1	0,15	0,15	0,01	2,25018E-08
	SA 2	0,15	0,13	0,01	3,91942E-06
	SA 3	0,15	0,17	0,01	4,80533E-06
	CA 1	0,15	0,15	0,01	6,31085E-09
	CA 2	0,15	0,16	0,01	1,1851E-06
	CA 3	0,15	0,16	0,01	1,05416E-06
				Suma1=	0,000401278

Tabla 66: Balance de masa y metalúrgico, celda cilíndrica, confiabilidad La=0,3.

Balance		Ajustado cuadrático
Bmás	SA 1	3,63491E-05
	SA 2	6,48082E-06
	SA 3	1,28775E-05
	CA 1	1,2563E-11
	CA 2	8,76932E-06
	CA 3	9,03213E-06
Bcu	SA 1	1,33646E-05
	SA 2	2,279E-06
	SA 3	4,9123E-06
	CA 1	1,77617E-13
	CA 2	3,27304E-06
	CA 3	3,18475E-06
Suma2=		0,000100523

Tabla 67: Resumen de errores, celda cilíndrica, confiabilidad La=0,3.

Resumen errores	
Suma1=	4,013,E-04
Suma2=	1,005,E-04
Fpond=	0,3
Suma3=	1,907,E-04

Tabla 68: Ajuste de valores experimentales, celda cilíndrica, confiabilidad La=0,2.

Variable		Experimental	Ajustado	Fconfiabilidad	F confiabilidad*(exp-ajust)^2
Gsa	SA 1	0,7548	0,7547	0,9	1,21759E-08
	SA 2	0,7548	0,7548	0,9	3,90349E-10
	SA 3	0,7548	0,7547	0,9	5,51338E-09
	CA 1	0,7548	0,7548	0,9	3,02091E-10
	CA 2	0,7548	0,7547	0,9	2,124E-09
	CA 3	0,7548	0,7547	0,9	2,86803E-09
La	SA 1	1,61	1,64	0,2	0,000138189
	SA 2	1,70	1,69	0,2	2,45939E-05
	SA 3	1,65	1,63	0,2	5,13544E-05
	CA 1	1,66	1,66	0,2	3,20402E-11
	CA 2	1,66	1,65	0,2	3,40071E-05
	CA 3	1,66	1,67	0,2	3,3169E-05
Laxial	SA 1	1,66	1,65	0,5	3,46502E-05
	SA 2	1,69	1,69	0,5	6,70548E-06
	SA 3	1,61	1,61	0,5	1,24973E-05
	CA 1	1,66	1,66	0,5	1,03311E-11
	CA 2	1,63	1,63	0,5	8,53516E-06
	CA 3	1,69	1,69	0,5	8,21384E-06
Ltangencial	SA 1	1,65	1,65	0,7	1,6124E-06
	SA 2	1,63	1,63	0,7	2,19626E-07
	SA 3	1,66	1,66	0,7	7,29695E-07
	CA 1	1,66	1,66	0,7	2,26401E-12
	CA 2	1,66	1,66	0,7	4,30202E-07
	CA 3	1,66	1,66	0,7	4,19925E-07
Gsaxial	SA 1	0,6	0,60	0,001	6,78865E-09
	SA 2	0,6	0,62	0,001	5,3638E-07
	SA 3	0,6	0,59	0,001	1,15543E-07
	CA 1	0,6	0,6040	0,001	1,57882E-08
	CA 2	0,6	0,5979	0,001	4,41565E-09
	CA 3	0,6	0,5935	0,001	4,22521E-08
Gstangencial	SA 1	0,15	0,15	0,01	5,52249E-08
	SA 2	0,15	0,13	0,01	2,64675E-06
	SA 3	0,15	0,17	0,01	3,38699E-06
	CA 1	0,15	0,15	0,01	6,3103E-09
	CA 2	0,15	0,16	0,01	8,58266E-07
	CA 3	0,15	0,16	0,01	7,68694E-07
				Suma1=	0,000363794

Tabla 69: Balance de masa y metalúrgico, celda cilíndrica, confiabilidad La=0,2.

Balance		Ajustado cuadrático
Bmás	SA 1	2,42983E-05
	SA 2	4,50179E-06
	SA 3	8,66029E-06
	CA 1	1,59991E-11
	CA 2	5,863E-06
	CA 3	6,08277E-06
Bcu	SA 1	8,91599E-06
	SA 2	1,58529E-06
	SA 3	3,30824E-06
	CA 1	1,0655E-14
	CA 2	2,19246E-06
	CA 3	2,14003E-06
Suma2=		6,75482E-05

Tabla 70: Resumen de errores, celda cilíndrica, confiabilidad La=0,2.

Resumen errores	
Suma1=	3,638,E-04
Suma2=	6,755,E-05
Fpond=	0,3
Suma3=	1,564,E-04

Tabla 71: Ajuste de valores experimentales, celda cilíndrica, confiabilidad La=0,1.

Variable		Experimental	Ajustado	Fconfiabilidad	F confiabilidad*(exp-ajust)^2
Gsa	SA 1	0,7548	0,7547	0,9	2,55305E-09
	SA 2	0,7548	0,7548	0,9	1,30553E-10
	SA 3	0,7548	0,7547	0,9	1,84257E-09
	CA 1	0,7548	0,7548	0,9	3,02132E-10
	CA 2	0,7548	0,7548	0,9	8,77136E-10
	CA 3	0,7548	0,7548	0,9	1,36608E-09
La	SA 1	1,61	1,64	0,1	0,000115172
	SA 2	1,70	1,69	0,1	2,18383E-05
	SA 3	1,65	1,63	0,1	4,35451E-05
	CA 1	1,66	1,66	0,1	2,53023E-11
	CA 2	1,66	1,64	0,1	2,85357E-05
	CA 3	1,66	1,68	0,1	2,79978E-05
Laxial	SA 1	1,66	1,65	0,5	1,45079E-05
	SA 2	1,69	1,69	0,5	2,90877E-06
	SA 3	1,61	1,61	0,5	5,3792E-06
	CA 1	1,66	1,66	0,5	1,68118E-11
	CA 2	1,63	1,63	0,5	3,60256E-06
	CA 3	1,69	1,69	0,5	3,51944E-06
Ltangencial	SA 1	1,65	1,65	0,7	6,76154E-07
	SA 2	1,63	1,63	0,7	1,05789E-07
	SA 3	1,66	1,66	0,7	2,87659E-07
	CA 1	1,66	1,66	0,7	2,84185E-12
	CA 2	1,66	1,66	0,7	1,74343E-07
	CA 3	1,66	1,66	0,7	1,7141E-07
Gsaxial	SA 1	0,6	0,60	0,001	1,53366E-09
	SA 2	0,6	0,62	0,001	2,78193E-07
	SA 3	0,6	0,59	0,001	3,37829E-08
	CA 1	0,6	0,6040	0,001	1,5783E-08
	CA 2	0,6	0,5999	0,001	1,63007E-11
	CA 3	0,6	0,5970	0,001	9,06634E-09
Gstangencial	SA 1	0,15	0,15	0,01	7,76985E-08
	SA 2	0,15	0,14	0,01	1,10042E-06
	SA 3	0,15	0,16	0,01	1,55494E-06
	CA 1	0,15	0,15	0,01	6,30922E-09
	CA 2	0,15	0,16	0,01	4,16297E-07
	CA 3	0,15	0,16	0,01	3,78806E-07
				Suma1=	0,000272302



Tabla 72: Balance de masa y metalúrgico, celda cilíndrica, confiabilidad La=0,1.

Balance		Ajustado cuadrático
Bmás	SA 1	1,01623E-05
	SA 2	1,99076E-06
	SA 3	3,65773E-06
	CA 1	2,23133E-11
	CA 2	2,45085E-06
	CA 3	2,58403E-06
Bcu	SA 1	3,71797E-06
	SA 2	7,02743E-07
	SA 3	1,40296E-06
	CA 1	1,28576E-13
	CA 2	9,20379E-07
	CA 3	9,0474E-07
Suma2=		2,84945E-05

Tabla 73: Resumen de errores, celda cilíndrica, confiabilidad La=0,1.

Resumen errores	
Suma1=	2,723,E-04
Suma2=	2,849,E-05
Fpond=	0,3
Suma3=	1,016,E-04

## Celda cónica de d a 2d

Tabla 74: Ajuste de valores experimentales, celda cónica de d a 2d, confiabilidad La=0,5.

Variable		Experimental	Ajustado	Fconfiabilidad	F confiabilidad*(exp-ajust)^2
Gsa	SA 1	0,755	0,7548	0,900	1,1598E-09
	SA 2	0,755	0,7547	0,900	4,03666E-09
	SA 3	0,755	0,7547	0,900	9,7918E-09
	CA 1	0,755	0,7546	0,900	2,77683E-08
	CA 2	0,755	0,7558	0,900	9,32512E-07
	CA 3	0,755	0,7547	0,900	4,5324E-09
La	SA 1	1,680	1,683	0,500	3,20906E-06
	SA 2	1,690	1,693	0,500	4,41399E-06
	SA 3	1,680	1,686	0,500	1,79375E-05
	CA 1	1,670	1,681	0,500	5,89497E-05
	CA 2	1,700	1,655	0,500	0,001027612
	CA 3	1,700	1,694	0,500	2,05197E-05
Laxial	SA 1	1,690	1,688	0,500	2,26459E-06
	SA 2	1,710	1,707	0,500	3,45832E-06
	SA 3	1,720	1,715	0,500	1,07502E-05
	CA 1	1,710	1,701	0,500	3,70052E-05
	CA 2	1,510	1,543	0,500	0,000547936
	CA 3	1,680	1,685	0,500	1,27973E-05
Ltangencial	SA 1	1,680	1,680	0,700	1,10056E-07
	SA 2	1,650	1,650	0,700	1,00914E-07
	SA 3	1,630	1,629	0,700	7,18323E-07
	CA 1	1,680	1,678	0,700	1,7152E-06
	CA 2	1,700	1,710	0,700	6,6328E-05
	CA 3	1,680	1,681	0,700	7,83787E-07
Gsaxial	SA 1	0,600	0,603	0,001	9,31621E-09
	SA 2	0,600	0,624	0,001	5,58464E-07
	SA 3	0,600	0,575	0,001	6,45587E-07
	CA 1	0,600	0,597	0,001	9,25925E-09
	CA 2	0,600	0,550	0,001	2,5E-06
	CA 3	0,600	0,597	0,001	8,44624E-09
Gstangencial	SA 1	0,150	0,150	0,010	2,3255E-09
	SA 2	0,150	0,130	0,010	4,15526E-06
	SA 3	0,150	0,177	0,010	7,34412E-06
	CA 1	0,150	0,152	0,010	5,83961E-08
	CA 2	0,150	0,228	0,010	6,01164E-05
	CA 3	0,150	0,161	0,010	1,15338E-06
				Suma1=	0,001894151

Tabla 75: Balance de masa y metalúrgico, celda cónica de d a 2d, confiabilidad La=0,5.

Balance		Ajustado cuadrático
Bmás	SA 1	1,48781E-06
	SA 2	2,17795E-06
	SA 3	8,96517E-06
	CA 1	2,74666E-05
	CA 2	0,000472052
	CA 3	9,69775E-06
Bcu	SA 1	5,27308E-07
	SA 2	7,43343E-07
	SA 3	3,0084E-06
	CA 1	9,50085E-06
	CA 2	0,000165849
	CA 3	3,37429E-06
Suma2=		0,00070485

Tabla 76: Resumen de errores, celda cónica de d a 2d, confiabilidad La=0,5.

Resumen errores	
Suma1=	1,894,E-03
Suma2=	7,049,E-04
Fpond=	0,3
Suma3=	1,062,E-03

Tabla 77: Ajuste de valores experimentales, celda cónica de d a 2d, confiabilidad La=0,4.

Variable		Experimental	Ajustado	Fconfiabilidad	F confiabilidad*(exp-ajust)^2
Gsa	SA 1	0,7548	0,75	0,9	9,20238E-10
	SA 2	0,7548	0,75	0,9	1,04221E-09
	SA 3	0,7548	0,75	0,9	9,52259E-09
	CA 1	0,7548	0,75	0,9	1,87403E-08
	CA 2	0,7548	0,76	0,9	9,80332E-07
	CA 3	0,7548	0,75	0,9	2,88876E-09
La	SA 1	1,68	1,68	0,4	3,50265E-06
	SA 2	1,69	1,69	0,4	2,99665E-06
	SA 3	1,68	1,69	0,4	1,92786E-05
	CA 1	1,67	1,68	0,4	6,20265E-05
	CA 2	1,70	1,65	0,4	0,001103559
	CA 3	1,70	1,69	0,4	2,20939E-05
Laxial	SA 1	1,69	1,69	0,5	1,79428E-06
	SA 2	1,71	1,71	0,5	1,50046E-06
	SA 3	1,72	1,72	0,5	8,92641E-06
	CA 1	1,71	1,70	0,5	2,98992E-05
	CA 2	1,51	1,54	0,5	0,000467205
	CA 3	1,68	1,68	0,5	1,14422E-05
Ltangencial	SA 1	1,68	1,68	0,7	8,21843E-08
	SA 2	1,65	1,65	0,7	7,65191E-08
	SA 3	1,63	1,63	0,7	6,26016E-07
	CA 1	1,68	1,68	0,7	1,69686E-06
	CA 2	1,70	1,71	0,7	5,62688E-05
	CA 3	1,68	1,68	0,7	4,94565E-07
Gsaxial	SA 1	0,6	0,60	0,001	2,86272E-09
	SA 2	0,6	0,60	0,001	2,21797E-08
	SA 3	0,6	0,57	0,001	7,45478E-07
	CA 1	0,6	0,5850	0,001	2,24201E-07
	CA 2	0,6	0,5500	0,001	2,5E-06
	CA 3	0,6	0,6080	0,001	6,32652E-08
Gstangencial	SA 1	0,15	0,15	0,01	3,7038E-08
	SA 2	0,15	0,16	0,01	7,05853E-07
	SA 3	0,15	0,18	0,01	8,57956E-06
	CA 1	0,15	0,16	0,01	2,19169E-06
	CA 2	0,15	0,23	0,01	5,7553E-05
	CA 3	0,15	0,15	0,01	1,47743E-09
				Suma1=	0,001867111

Tabla 78: Balance de masa y metalúrgico, celda cónica de d a 2d, confiabilidad La=0,4.

Balance		Ajustado cuadrático
Bmás	SA 1	1,30343E-06
	SA 2	1,13239E-06
	SA 3	7,28905E-06
	CA 1	2,31825E-05
	CA 2	0,000401197
	CA 3	8,04339E-06
Bcu	SA 1	4,53713E-07
	SA 2	3,86786E-07
	SA 3	2,49307E-06
	CA 1	8,01187E-06
	CA 2	0,00014188
	CA 3	2,84526E-06
Suma2=		0,000598218

Tabla 79: Resumen de errores, celda cónica de d a 2d, confiabilidad La=0,4.

Resumen errores	
Suma1=	1,867,E-03
Suma2=	5,982,E-04
Fpond=	0,3
Suma3=	9,789,E-04

Tabla 80: Ajuste de valores experimentales, celda cónica de d a 2d, confiabilidad La=0,3.

Variable		Experimental	Ajustado	Fconfiabilidad	F confiabilidad*(exp-ajust)^2
Gsa	SA 1	0,7548	0,75	0,9	6,41415E-11
	SA 2	0,7548	0,75	0,9	8,62828E-10
	SA 3	0,7548	0,75	0,9	6,25456E-09
	CA 1	0,7548	0,75	0,9	1,31231E-08
	CA 2	0,7548	0,76	0,9	1,08359E-06
	CA 3	0,7548	0,75	0,9	2,02858E-09
La	SA 1	1,68	1,68	0,3	3,71867E-06
	SA 2	1,69	1,69	0,3	3,20492E-06
	SA 3	1,68	1,69	0,3	2,09599E-05
	CA 1	1,67	1,68	0,3	6,55193E-05
	CA 2	1,70	1,64	0,3	0,001161424
	CA 3	1,70	1,69	0,3	2,33441E-05
Laxial	SA 1	1,69	1,69	0,5	1,41801E-06
	SA 2	1,71	1,71	0,5	1,20863E-06
	SA 3	1,72	1,72	0,5	7,34513E-06
	CA 1	1,71	1,70	0,5	2,38069E-05
	CA 2	1,51	1,54	0,5	0,000368762
	CA 3	1,68	1,68	0,5	9,04375E-06
Ltangencial	SA 1	1,68	1,68	0,7	6,31929E-08
	SA 2	1,65	1,65	0,7	6,1219E-08
	SA 3	1,63	1,63	0,7	4,95799E-07
	CA 1	1,68	1,68	0,7	1,32427E-06
	CA 2	1,70	1,71	0,7	4,35398E-05
	CA 3	1,68	1,68	0,7	3,93383E-07
Gsaxial	SA 1	0,6	0,60	0,001	3,72511E-09
	SA 2	0,6	0,60	0,001	1,59029E-08
	SA 3	0,6	0,58	0,001	5,99914E-07
	CA 1	0,6	0,5867	0,001	1,76994E-07
	CA 2	0,6	0,5500	0,001	2,5E-06
	CA 3	0,6	0,6074	0,001	5,52676E-08
Gstangencial	SA 1	0,15	0,15	0,01	3,37893E-08
	SA 2	0,15	0,16	0,01	6,07464E-07
	SA 3	0,15	0,18	0,01	7,16263E-06
	CA 1	0,15	0,16	0,01	1,87308E-06
	CA 2	0,15	0,22	0,01	5,42343E-05
	CA 3	0,15	0,15	0,01	2,81508E-10
				Suma1=	0,001804003

Tabla 81: Balance de masa y metalúrgico, celda cónica de d a 2d, confiabilidad La=0,3.

Balance		Ajustado cuadrático
Bmás	SA 1	1,02709E-06
	SA 2	9,08245E-07
	SA 3	5,93819E-06
	CA 1	1,83805E-05
	CA 2	0,000315294
	CA 3	6,36945E-06
Bcu	SA 1	3,60017E-07
	SA 2	3,1096E-07
	SA 3	2,03168E-06
	CA 1	6,34424E-06
	CA 2	0,000111972
	CA 3	2,25439E-06
Suma2=		0,000471191

Tabla 82: Resumen de errores, celda cónica de d a 2d, confiabilidad La=0,3.

Resumen errores	
Suma1=	1,804,E-03
Suma2=	4,712,E-04
Fpond=	0,3
Suma3=	8,710,E-04

Tabla 83: Ajuste de valores experimentales, celda cónica de d a 2d, confiabilidad La=0,2.

Variable		Experimental	Ajustado	Fconfiabilidad	F confiabilidad*(exp-ajust)^2
Gsa	SA 1	0,7548	0,75	0,9	2,50224E-10
	SA 2	0,7548	0,75	0,9	5,20792E-10
	SA 3	0,7548	0,75	0,9	5,00009E-09
	CA 1	0,7548	0,75	0,9	6,0741E-09
	CA 2	0,7548	0,76	0,9	1,0299E-06
	CA 3	0,7548	0,75	0,9	3,30245E-09
La	SA 1	1,68	1,68	0,2	3,73145E-06
	SA 2	1,69	1,69	0,2	3,2312E-06
	SA 3	1,68	1,69	0,2	2,1084E-05
	CA 1	1,67	1,69	0,2	6,59393E-05
	CA 2	1,70	1,62	0,2	0,001163959
	CA 3	1,70	1,69	0,2	2,35896E-05
Laxial	SA 1	1,69	1,69	0,5	9,58169E-07
	SA 2	1,71	1,71	0,5	8,15301E-07
	SA 3	1,72	1,72	0,5	4,93407E-06
	CA 1	1,71	1,70	0,5	1,59842E-05
	CA 2	1,51	1,53	0,5	0,000246438
	CA 3	1,68	1,68	0,5	6,04821E-06
Ltangencial	SA 1	1,68	1,68	0,7	4,36296E-08
	SA 2	1,65	1,65	0,7	4,11098E-08
	SA 3	1,63	1,63	0,7	3,32519E-07
	CA 1	1,68	1,68	0,7	8,83972E-07
	CA 2	1,70	1,71	0,7	2,82265E-05
	CA 3	1,68	1,68	0,7	2,61102E-07
Gsaxial	SA 1	0,6	0,60	0,001	4,38888E-09
	SA 2	0,6	0,60	0,001	1,44692E-08
	SA 3	0,6	0,58	0,001	5,76484E-07
	CA 1	0,6	0,5875	0,001	1,56725E-07
	CA 2	0,6	0,5500	0,001	2,5E-06
	CA 3	0,6	0,6070	0,001	4,87456E-08
Gstangencial	SA 1	0,15	0,15	0,01	3,40792E-08
	SA 2	0,15	0,16	0,01	6,06465E-07
	SA 3	0,15	0,18	0,01	7,14352E-06
	CA 1	0,15	0,16	0,01	1,88077E-06
	CA 2	0,15	0,22	0,01	4,94467E-05
	CA 3	0,15	0,15	0,01	3,5983E-10
				Suma1=	0,001649959



Tabla 84: Balance de masa y metalúrgico, celda cónica de d a 2d, confiabilidad La=0,2.

Balance		Ajustado cuadrático
Bmás	SA 1	6,92961E-07
	SA 2	6,1205E-07
	SA 3	3,99331E-06
	CA 1	1,23401E-05
	CA 2	0,000209048
	CA 3	4,25412E-06
Bcu	SA 1	2,40959E-07
	SA 2	2,08824E-07
	SA 3	1,35922E-06
	CA 1	4,24629E-06
	CA 2	7,47942E-05
	CA 3	1,51358E-06
Suma2=		0,000313304

Tabla 85: Resumen de errores, celda cónica de d a 2d, confiabilidad La=0,2.

Resumen errores	
Suma1=	1,650,E-03
Suma2=	3,133,E-04
Fpond=	0,3
Suma3=	7,143,E-04

Tabla 86: Ajuste de valores experimentales, celda cónica de d a 2d, confiabilidad La=0,1.

Variable		Experimental	Ajustado	Fconfiabilidad	F confiabilidad*(exp-ajust)^2
Gsa	SA 1	0,7548	0,75	0,9	1,29094E-10
	SA 2	0,7548	0,75	0,9	3,25706E-11
	SA 3	0,7548	0,75	0,9	1,78384E-09
	CA 1	0,7548	0,75	0,9	5,30414E-09
	CA 2	0,7548	0,76	0,9	5,04649E-07
	CA 3	0,7548	0,75	0,9	3,5126E-12
La	SA 1	1,68	1,69	0,1	3,17815E-06
	SA 2	1,69	1,70	0,1	2,89552E-06
	SA 3	1,68	1,69	0,1	2,02787E-05
	CA 1	1,67	1,69	0,1	5,5744E-05
	CA 2	1,70	1,60	0,1	0,000971194
	CA 3	1,70	1,69	0,1	1,97392E-05
Laxial	SA 1	1,69	1,69	0,5	3,98879E-07
	SA 2	1,71	1,71	0,5	3,68157E-07
	SA 3	1,72	1,72	0,5	2,48277E-06
	CA 1	1,71	1,71	0,5	6,95143E-06
	CA 2	1,51	1,52	0,5	0,000102753
	CA 3	1,68	1,68	0,5	2,55551E-06
Ltangencial	SA 1	1,68	1,68	0,7	1,8212E-08
	SA 2	1,65	1,65	0,7	1,78245E-08
	SA 3	1,63	1,63	0,7	1,41836E-07
	CA 1	1,68	1,68	0,7	3,56927E-07
	CA 2	1,70	1,70	0,7	1,11866E-05
	CA 3	1,68	1,68	0,7	1,13169E-07
Gsaxial	SA 1	0,6	0,60	0,001	7,74956E-09
	SA 2	0,6	0,60	0,001	6,27507E-10
	SA 3	0,6	0,59	0,001	1,38193E-07
	CA 1	0,6	0,5935	0,001	4,21661E-08
	CA 2	0,6	0,5500	0,001	2,5E-06
	CA 3	0,6	0,6057	0,001	3,26754E-08
Gstangencial	SA 1	0,15	0,15	0,01	2,21504E-08
	SA 2	0,15	0,16	0,01	2,57261E-07
	SA 3	0,15	0,17	0,01	2,28487E-06
	CA 1	0,15	0,16	0,01	7,93981E-07
	CA 2	0,15	0,21	0,01	4,19637E-05
	CA 3	0,15	0,15	0,01	1,73109E-09
				Suma1=	0,00124893

Tabla 87: Balance de masa y metalúrgico, celda cónica de d a 2d, confiabilidad La=0,1.

Balance		Ajustado cuadrático
Bmás	SA 1	2,80909E-07
	SA 2	2,66478E-07
	SA 3	1,91926E-06
	CA 1	5,27322E-06
	CA 2	8,53859E-05
	CA 3	1,80671E-06
Bcu	SA 1	1,02014E-07
	SA 2	9,51038E-08
	SA 3	6,61923E-07
	CA 1	1,82006E-06
	CA 2	3,12525E-05
	CA 3	6,45233E-07
Suma2=		0,000129509

Tabla 88: Resumen de errores, celda cónica de d a 2d, confiabilidad La=0,1.

Resumen errores	
Suma1=	1,249,E-03
Suma2=	1,295,E-04
Fpond=	0,3
Suma3=	4,653,E-04

## Celda cónica de 2d a d

Tabla 89: Ajuste de valores experimentales, celda cónica de 2d a d, confiabilidad La=0,5.

Variable		Experimental	Ajustado	Fconfiabilidad	F confiabilidad*(exp-ajust)^2
Gsa	SA 1	0,75	0,7546	0,9	2,30113E-08
	SA 2	0,75	0,7550	0,9	2,86388E-08
	SA 3	0,75	0,7541	0,9	4,0272E-07
	CA 1	0,75	0,7543	0,9	2,52723E-07
	CA 2	0,75	0,7548	0,9	6,85139E-12
	CA 3	0,75	0,7546	0,9	2,86557E-08
La	SA 1	1,61	1,620	0,5	5,4958E-05
	SA 2	1,59	1,600	0,5	5,20928E-05
	SA 3	1,58	1,601	0,5	0,000219172
	CA 1	1,58	1,602	0,5	0,000245786
	CA 2	1,66	1,656	0,5	7,88277E-06
	CA 3	1,63	1,641	0,5	5,911E-05
Laxial	SA 1	1,65	1,642	0,5	3,46888E-05
	SA 2	1,62	1,611	0,5	3,80936E-05
	SA 3	1,65	1,634	0,5	0,000124204
	CA 1	1,66	1,642	0,5	0,00015485
	CA 2	1,65	1,653	0,5	4,84122E-06
	CA 3	1,67	1,661	0,5	3,68949E-05
Ltangencial	SA 1	1,61	1,608	0,7	1,71669E-06
	SA 2	1,63	1,629	0,7	1,07364E-06
	SA 3	1,62	1,616	0,7	8,93297E-06
	CA 1	1,60	1,597	0,7	7,89043E-06
	CA 2	1,64	1,641	0,7	2,20748E-07
	CA 3	1,64	1,638	0,7	2,10075E-06
Gsaxial	SA 1	0,6	0,600	0,001	1,83207E-10
	SA 2	0,6	0,624	0,001	5,73962E-07
	SA 3	0,6	0,569	0,001	9,57514E-07
	CA 1	0,6	0,593	0,001	4,46515E-08
	CA 2	0,6	0,594	0,001	3,7283E-08
	CA 3	0,6	0,587	0,001	1,59882E-07
Gstangencial	SA 1	0,15	0,150	0,01	3,14392E-10
	SA 2	0,15	0,126	0,01	5,6222E-06
	SA 3	0,15	0,175	0,01	6,37586E-06
	CA 1	0,15	0,151	0,01	2,76188E-09
	CA 2	0,15	0,163	0,01	1,61876E-06
	CA 3	0,15	0,162	0,01	1,4608E-06
				Suma1=	0,001072099

Tabla 90: Balance de masa y metalúrgico, celda cónica de 2d a d, confiabilidad La=0,5.

Balance		Ajustado cuadrático
Bmás	SA 1	2,38237E-05
	SA 2	2,2299E-05
	SA 3	9,63237E-05
	CA 1	0,000108511
	CA 2	3,34773E-06
	CA 3	2,67266E-05
Bcu	SA 1	8,90267E-06
	SA 2	8,722E-06
	SA 3	3,54428E-05
	CA 1	4,02909E-05
	CA 2	1,48793E-06
	CA 3	9,9685E-06
Suma2=		0,000385847

Tabla 91: Resumen de errores, celda cónica de 2d a d, confiabilidad La=0,5.

Resumen errores	
Suma1=	1,072,E-03
Suma2=	3,858,E-04
Fpond=	0,3
Suma3=	5,917,E-04

Tabla 92: Ajuste de valores experimentales, celda cónica de 2d a d, confiabilidad La=0,4.

Variable		Experimental	Ajustado	Fconfiabilidad	F confiabilidad*(exp-ajust)^2
Gsa	SA 1	0,75	0,75	0,9	1,9562E-08
	SA 2	0,75	0,75	0,9	5,55727E-09
	SA 3	0,75	0,75	0,9	1,76451E-07
	CA 1	0,75	0,75	0,9	1,30387E-07
	CA 2	0,75	0,75	0,9	5,92298E-10
	CA 3	0,75	0,75	0,9	1,88782E-08
La	SA 1	1,61	1,62	0,4	5,59045E-05
	SA 2	1,59	1,60	0,4	5,85904E-05
	SA 3	1,58	1,60	0,4	0,000234993
	CA 1	1,58	1,60	0,4	0,000249643
	CA 2	1,66	1,66	0,4	8,11904E-06
	CA 3	1,63	1,64	0,4	6,39433E-05
Laxial	SA 1	1,65	1,64	0,5	2,64663E-05
	SA 2	1,62	1,61	0,5	3,07323E-05
	SA 3	1,65	1,64	0,5	0,000109044
	CA 1	1,66	1,65	0,5	0,000106196
	CA 2	1,65	1,65	0,5	4,18559E-06
	CA 3	1,67	1,66	0,5	3,08246E-05
Ltangencial	SA 1	1,61	1,61	0,7	1,64122E-06
	SA 2	1,63	1,63	0,7	1,14756E-06
	SA 3	1,62	1,62	0,7	6,92862E-06
	CA 1	1,60	1,60	0,7	9,59059E-06
	CA 2	1,64	1,64	0,7	1,82134E-07
	CA 3	1,64	1,64	0,7	1,74132E-06
Gsaxial	SA 1	0,6	0,58	0,001	4,06002E-07
	SA 2	0,6	0,61	0,001	1,16449E-07
	SA 3	0,6	0,57	0,001	6,70196E-07
	CA 1	0,6	0,5500	0,001	2,5E-06
	CA 2	0,6	0,6086	0,001	7,45812E-08
	CA 3	0,6	0,5851	0,001	2,21146E-07
Gstangencial	SA 1	0,15	0,17	0,01	4,15324E-06
	SA 2	0,15	0,14	0,01	1,10559E-06
	SA 3	0,15	0,17	0,01	4,50776E-06
	CA 1	0,15	0,20	0,01	2,0382E-05
	CA 2	0,15	0,15	0,01	4,81459E-08
	CA 3	0,15	0,16	0,01	2,17295E-06
				Suma1=	0,001036584

Tabla 93: Balance de masa y metalúrgico, celda cónica de 2d a d, confiabilidad La=0,4.

Balance		Ajustado cuadrático
Bmás	SA 1	1,9472E-05
	SA 2	1,96699E-05
	SA 3	8,1072E-05
	CA 1	8,58039E-05
	CA 2	2,81346E-06
	CA 3	2,28042E-05
Bcu	SA 1	7,22825E-06
	SA 2	7,5633E-06
	SA 3	3,03576E-05
	CA 1	3,22931E-05
	CA 2	1,04307E-06
	CA 3	8,25557E-06
Suma2=		0,000318376

Tabla 94: Resumen de errores, celda cónica de 2d a d, confiabilidad La=0,4.

Resumen errores	
Suma1=	1,037,E-03
Suma2=	3,184,E-04
Fpond=	0,3
Suma3=	5,338,E-04

Tabla 95: Ajuste de valores experimentales, celda cónica de 2d a d, confiabilidad La=0,3.

Variable		Experimental	Ajustado	Fconfiabilidad	F confiabilidad*(exp-ajust)^2
Gsa	SA 1	0,75	0,75	0,9	1,13524E-08
	SA 2	0,75	0,75	0,9	6,10934E-09
	SA 3	0,75	0,75	0,9	1,02974E-07
	CA 1	0,75	0,75	0,9	1,83841E-07
	CA 2	0,75	0,75	0,9	8,05333E-11
	CA 3	0,75	0,75	0,9	1,17306E-08
La	SA 1	1,61	1,62	0,3	5,86964E-05
	SA 2	1,59	1,60	0,3	6,14332E-05
	SA 3	1,58	1,61	0,3	0,000246081
	CA 1	1,58	1,61	0,3	0,000259184
	CA 2	1,66	1,65	0,3	8,51871E-06
	CA 3	1,63	1,64	0,3	6,72049E-05
Laxial	SA 1	1,65	1,64	0,5	2,08838E-05
	SA 2	1,62	1,61	0,5	2,42425E-05
	SA 3	1,65	1,64	0,5	8,57705E-05
	CA 1	1,66	1,65	0,5	8,27868E-05
	CA 2	1,65	1,65	0,5	3,3064E-06
	CA 3	1,67	1,66	0,5	2,43693E-05
Ltangencial	SA 1	1,61	1,61	0,7	1,28523E-06
	SA 2	1,63	1,63	0,7	9,11277E-07
	SA 3	1,62	1,62	0,7	5,46854E-06
	CA 1	1,60	1,60	0,7	7,54193E-06
	CA 2	1,64	1,64	0,7	1,38593E-07
	CA 3	1,64	1,64	0,7	1,37557E-06
Gsaxial	SA 1	0,6	0,58	0,001	3,78764E-07
	SA 2	0,6	0,61	0,001	1,16548E-07
	SA 3	0,6	0,57	0,001	6,33449E-07
	CA 1	0,6	0,5500	0,001	2,49991E-06
	CA 2	0,6	0,6084	0,001	7,06375E-08
	CA 3	0,6	0,5857	0,001	2,04885E-07
Gstangencial	SA 1	0,15	0,17	0,01	4,09125E-06
	SA 2	0,15	0,14	0,01	1,00656E-06
	SA 3	0,15	0,17	0,01	4,68207E-06
	CA 1	0,15	0,20	0,01	2,12513E-05
	CA 2	0,15	0,15	0,01	4,51386E-08
	CA 3	0,15	0,16	0,01	2,17578E-06
				Suma1=	0,000996672



Tabla 96: Balance de masa y metalúrgico, celda cónica de 2d a d, confiabilidad La=0,3.

Balance		Ajustado cuadrático
Bmás	SA 1	1,53105E-05
	SA 2	1,55613E-05
	SA 3	6,37158E-05
	CA 1	6,78673E-05
	CA 2	2,24804E-06
	CA 3	1,79712E-05
Bcu	SA 1	5,6791E-06
	SA 2	5,94247E-06
	SA 3	2,37708E-05
	CA 1	2,51268E-05
	CA 2	8,10466E-07
	CA 3	6,50156E-06
Suma2=		0,000250505

Tabla 97: Resumen de errores, celda cónica de 2d a d, confiabilidad La=0,3.

Resumen errores	
Suma1=	9,967,E-04
Suma2=	2,505,E-04
Fpond=	0,3
Suma3=	4,744,E-04

Tabla 98: Ajuste de valores experimentales, celda cónica de 2d a d, confiabilidad La=0,2.

Variable		Experimental	Ajustado	Fconfiabilidad	F confiabilidad*(exp-ajust)^2
Gsa	SA 1	0,75	0,75	0,9	8,12787E-09
	SA 2	0,75	0,75	0,9	4,40012E-09
	SA 3	0,75	0,75	0,9	6,25124E-08
	CA 1	0,75	0,75	0,9	1,06006E-07
	CA 2	0,75	0,75	0,9	2,92294E-10
	CA 3	0,75	0,75	0,9	8,49905E-09
La	SA 1	1,61	1,63	0,2	5,93526E-05
	SA 2	1,59	1,61	0,2	6,16746E-05
	SA 3	1,58	1,62	0,2	0,000245037
	CA 1	1,58	1,62	0,2	0,000257792
	CA 2	1,66	1,65	0,2	8,5872E-06
	CA 3	1,63	1,65	0,2	6,75767E-05
Laxial	SA 1	1,65	1,64	0,5	1,44288E-05
	SA 2	1,62	1,61	0,5	1,61131E-05
	SA 3	1,65	1,64	0,5	5,81554E-05
	CA 1	1,66	1,65	0,5	5,55939E-05
	CA 2	1,65	1,65	0,5	2,2098E-06
	CA 3	1,67	1,66	0,5	1,65681E-05
Ltangencial	SA 1	1,61	1,61	0,7	8,1403E-07
	SA 2	1,63	1,63	0,7	6,40894E-07
	SA 3	1,62	1,62	0,7	3,48617E-06
	CA 1	1,60	1,60	0,7	4,93545E-06
	CA 2	1,64	1,64	0,7	9,45522E-08
	CA 3	1,64	1,64	0,7	8,91452E-07
Gsaxial	SA 1	0,6	0,59	0,001	1,74456E-07
	SA 2	0,6	0,61	0,001	6,69654E-08
	SA 3	0,6	0,58	0,001	3,96173E-07
	CA 1	0,6	0,5530	0,001	2,21017E-06
	CA 2	0,6	0,6071	0,001	5,0418E-08
	CA 3	0,6	0,5897	0,001	1,06781E-07
Gstangencial	SA 1	0,15	0,16	0,01	2,15642E-06
	SA 2	0,15	0,14	0,01	4,48082E-07
	SA 3	0,15	0,17	0,01	3,20791E-06
	CA 1	0,15	0,19	0,01	2,0017E-05
	CA 2	0,15	0,15	0,01	1,22241E-08
	CA 3	0,15	0,16	0,01	1,33452E-06
				Suma1=	0,000904323

Tabla 99: Balance de masa y metalúrgico, celda cónica de 2d a d, confiabilidad La=0,2.

Balance		Ajustado cuadrático
Bmás	SA 1	1,03589E-05
	SA 2	1,04385E-05
	SA 3	4,2511E-05
	CA 1	4,51448E-05
	CA 2	1,49529E-06
	CA 3	1,20706E-05
Bcu	SA 1	3,83792E-06
	SA 2	3,99079E-06
	SA 3	1,58416E-05
	CA 1	1,66748E-05
	CA 2	5,51011E-07
	CA 3	4,36796E-06
Suma2=		0,000167283

Tabla 100: Resumen de errores, celda cónica de 2d a d, confiabilidad La=0,2.

Resumen errores	
Suma1=	9,043,E-04
Suma2=	1,673,E-04
Fpond=	0,3
Suma3=	3,884,E-04

Tabla 101: Ajuste de valores experimentales, celda cónica de 2d a d, confiabilidad La=0,1.

Variable		Experimental	Ajustado	Fconfiabilidad	F confiabilidad*(exp-ajust)^2
Gsa	SA 1	0,75	0,75	0,9	3,91762E-09
	SA 2	0,75	0,75	0,9	7,21439E-10
	SA 3	0,75	0,75	0,9	1,02794E-08
	CA 1	0,75	0,75	0,9	2,6196E-08
	CA 2	0,75	0,75	0,9	1,09513E-09
	CA 3	0,75	0,75	0,9	4,71981E-09
La	SA 1	1,61	1,63	0,1	4,9601E-05
	SA 2	1,59	1,61	0,1	5,13928E-05
	SA 3	1,58	1,63	0,1	0,000203568
	CA 1	1,58	1,63	0,1	0,000218849
	CA 2	1,66	1,65	0,1	7,17929E-06
	CA 3	1,63	1,65	0,1	5,65495E-05
Laxial	SA 1	1,65	1,65	0,5	6,2352E-06
	SA 2	1,62	1,62	0,5	6,65571E-06
	SA 3	1,65	1,64	0,5	2,45522E-05
	CA 1	1,66	1,65	0,5	2,49801E-05
	CA 2	1,65	1,65	0,5	9,01565E-07
	CA 3	1,67	1,67	0,5	7,09567E-06
Ltangencial	SA 1	1,61	1,61	0,7	3,73038E-07
	SA 2	1,63	1,63	0,7	2,90874E-07
	SA 3	1,62	1,62	0,7	1,33664E-06
	CA 1	1,60	1,60	0,7	1,77062E-06
	CA 2	1,64	1,64	0,7	3,53476E-08
	CA 3	1,64	1,64	0,7	3,64336E-07
Gsaxial	SA 1	0,6	0,59	0,001	7,56535E-08
	SA 2	0,6	0,61	0,001	4,82276E-08
	SA 3	0,6	0,59	0,001	1,93021E-07
	CA 1	0,6	0,5702	0,001	8,88061E-07
	CA 2	0,6	0,6061	0,001	3,70574E-08
	CA 3	0,6	0,5935	0,001	4,28371E-08
Gstangencial	SA 1	0,15	0,16	0,01	1,28472E-06
	SA 2	0,15	0,15	0,01	1,82507E-07
	SA 3	0,15	0,16	0,01	2,0659E-06
	CA 1	0,15	0,18	0,01	9,02079E-06
	CA 2	0,15	0,15	0,01	2,8601E-09
	CA 3	0,15	0,16	0,01	8,11555E-07
				Suma1=	0,000676431

Tabla 102: Balance de masa y metalúrgico, celda cónica de 2d a d, confiabilidad  $L_a=0,1$ .

Balance		Ajustado cuadrático
Bmás	SA 1	4,35775E-06
	SA 2	4,36519E-06
	SA 3	1,76672E-05
	CA 1	1,92305E-05
	CA 2	6,35884E-07
	CA 3	5,08093E-06
Bcu	SA 1	1,6298E-06
	SA 2	1,68133E-06
	SA 3	6,64023E-06
	CA 1	7,1249E-06
	CA 2	2,34175E-07
	CA 3	1,84003E-06
Suma2=		7,04878E-05

Tabla 103: Resumen de errores, celda cónica de 2d a d, confiabilidad  $L_a=0,1$ .

Resumen errores	
Suma1=	6,764,E-04
Suma2=	7,049,E-05
Fpond=	0,3
Suma3=	2,523,E-04

## ii. Resultados reconciliados sensibilidad confiabilidad ley de alimentación

A continuación, en las Tablas 104 a 151 se muestran las tablas con los resultados obtenidos al variar la confiabilidad de la ley de alimentación.

## Celda cilíndrica

Tabla 104: Celda cilíndrica, según caso. Valores ajustados para confiabilidad  $La=0,4$ .

<b>Celda cilíndrica, confiabilidad <math>La=0,4</math></b>		
Variable		Ajustado
Gsa [kg/s]	SA 1	0,755
	SA 2	0,755
	SA 3	0,755
	CA 1	0,755
	CA 2	0,755
	CA 3	0,755
La[%]	SA 1	1,628
	SA 2	1,693
	SA 3	1,639
	CA 1	1,660
	CA 2	1,651
	CA 3	1,669
Laxial[%]	SA 1	1,649
	SA 2	1,695
	SA 3	1,617
	CA 1	1,660
	CA 2	1,636
	CA 3	1,684
Ltangencial[%]	SA 1	1,648
	SA 2	1,631
	SA 3	1,661
	CA 1	1,660
	CA 2	1,661
	CA 3	1,659
Gsaxial[kg/s]	SA 1	0,597
	SA 2	0,630
	SA 3	0,585
	CA 1	0,604
	CA 2	0,596
	CA 3	0,590
Gstangencial[kg/s]	SA 1	0,151
	SA 2	0,128
	SA 3	0,174
	CA 1	0,151
	CA 2	0,162
	CA 3	0,161

Tabla 105: Celda cilíndrica, recuperación metalúrgica, confiabilidad  $L_a=0,4$ .

Caso	Rec Met [%]
SA 1	80,135
SA 2	83,558
SA 3	76,402
CA 1	80,021
CA 2	78,242
CA 3	78,915

Tabla 106: Celda cilíndrica, recuperación másica, confiabilidad  $L_a=0,4$ .

Caso	Rec Más[%]
SA 1	79,143
SA 2	83,444
SA 3	77,453
CA 1	80,021
CA 2	78,977
CA 3	78,182

Tabla 107: Celda cilíndrica, factor enriquecimiento, confiabilidad  $L_a=0,4$ .

Caso	FE
SA 1	1,013
SA 2	1,001
SA 3	0,986
CA 1	1,000
CA 2	0,991
CA 3	1,009

Tabla 108: Celda cilíndrica, según caso. Valores ajustados para confiabilidad  $La=0,3$ .

<b>Celda cilíndrica, confiabilidad <math>La=0,3</math></b>		
Variable		Ajustado
Gsa[kg/s]	SA 1	0,755
	SA 2	0,755
	SA 3	0,755
	CA 1	0,755
	CA 2	0,755
	CA 3	0,755
La[%]	SA 1	1,631
	SA 2	1,691
	SA 3	1,637
	CA 1	1,660
	CA 2	1,649
	CA 3	1,670
Laxial[%]	SA 1	1,650
	SA 2	1,694
	SA 3	1,616
	CA 1	1,660
	CA 2	1,635
	CA 3	1,685
Ltangencial[%]	SA 1	1,648
	SA 2	1,631
	SA 3	1,661
	CA 1	1,660
	CA 2	1,661
	CA 3	1,659
Gsaxial[kg/s]	SA 1	0,597
	SA 2	0,627
	SA 3	0,586
	CA 1	0,604
	CA 2	0,597
	CA 3	0,591
Gstangencial[kg/s]	SA 1	0,152
	SA 2	0,130
	SA 3	0,172
	CA 1	0,151
	CA 2	0,161
	CA 3	0,160



Tabla 109: Celda cilíndrica, recuperación metalúrgica, confiabilidad  $L_a=0,3$ .

Caso	Rec Met[%]
SA 1	80,015
SA 2	83,248
SA 3	76,702
CA 1	80,021
CA 2	78,388
CA 3	79,051

Tabla 110: Celda cilíndrica, recuperación másica, confiabilidad  $L_a=0,3$ .

Caso	Rec Más[%]
SA 1	79,125
SA 2	83,087
SA 3	77,695
CA 1	80,021
CA 2	79,075
CA 3	78,366

Tabla 111: Celda cilíndrica, factor de enriquecimiento, confiabilidad  $L_a=0,3$ .

Caso	FE
SA 1	1,011
SA 2	1,002
SA 3	0,987
CA 1	1,000
CA 2	0,991
CA 3	1,009

Tabla 112: Celda cilíndrica, según caso. Valores ajustados para confiabilidad  $La=0,2$ .

<b>Celda cilíndrica, confiabilidad <math>La=0,2</math></b>		
Variable		Ajustado
Gsa[kg/s]	SA 1	0,755
	SA 2	0,755
	SA 3	0,755
	CA 1	0,755
	CA 2	0,755
	CA 3	0,755
La[%]	SA 1	1,636
	SA 2	1,689
	SA 3	1,634
	CA 1	1,660
	CA 2	1,647
	CA 3	1,673
Laxial[%]	SA 1	1,652
	SA 2	1,694
	SA 3	1,615
	CA 1	1,660
	CA 2	1,634
	CA 3	1,686
Ltangencial[%]	SA 1	1,648
	SA 2	1,631
	SA 3	1,661
	CA 1	1,660
	CA 2	1,661
	CA 3	1,659
Gsaxial[kg/s]	SA 1	0,597
	SA 2	0,623
	SA 3	0,589
	CA 1	0,604
	CA 2	0,598
	CA 3	0,593
Gstangencial[kg/s]	SA 1	0,152
	SA 2	0,134
	SA 3	0,168
	CA 1	0,151
	CA 2	0,159
	CA 3	0,159

Tabla 113: Celda cilíndrica, recuperación metalúrgica, confiabilidad  $L_a=0,2$ .

Caso	Rec Met[%]
SA 1	79,904
SA 2	82,795
SA 3	77,170
CA 1	80,021
CA 2	78,602
CA 3	79,251

Tabla 114: Celda cilíndrica, recuperación másica, confiabilidad  $L_a=0,2$ .

Caso	Rec Más[%]
SA 1	79,159
SA 2	82,563
SA 3	78,076
CA 1	80,021
CA 2	79,219
CA 3	78,637

Tabla 115: Celda cilíndrica, factor de enriquecimiento, confiabilidad  $L_a=0,2$ .

Caso	FE
SA 1	1,009
SA 2	1,003
SA 3	0,988
CA 1	1,000
CA 2	0,992
CA 3	1,008

Tabla 116: Celda cilíndrica, según caso. Valores ajustados para confiabilidad  $La=0,1$ .

<b>Celda cilíndrica, confiabilidad <math>La=0,1</math></b>		
Variable		Ajustado
Gsa[kg/s]	SA 1	0,755
	SA 2	0,755
	SA 3	0,755
	CA 1	0,755
	CA 2	0,755
	CA 3	0,755
La[%]	SA 1	1,644
	SA 2	1,685
	SA 3	1,629
	CA 1	1,660
	CA 2	1,643
	CA 3	1,677
Laxial[%]	SA 1	1,655
	SA 2	1,692
	SA 3	1,613
	CA 1	1,660
	CA 2	1,633
	CA 3	1,687
Ltangencial[%]	SA 1	1,649
	SA 2	1,630
	SA 3	1,661
	CA 1	1,660
	CA 2	1,660
	CA 3	1,660
Gsaxial[kg/s]	SA 1	0,599
	SA 2	0,617
	SA 3	0,594
	CA 1	0,604
	CA 2	0,600
	CA 3	0,597
Gstangencial[kg/s]	SA 1	0,153
	SA 2	0,140
	SA 3	0,162
	CA 1	0,151
	CA 2	0,156
	CA 3	0,156

Tabla 117: Celda cilíndrica, recuperación metalúrgica, confiabilidad  $La=0,1$ .

Caso	Rec Met[%]
SA 1	79,849
SA 2	82,052
SA 3	77,961
CA 1	80,021
CA 2	78,974
CA 3	79,598

Tabla 118: Celda cilíndrica, recuperación másica, confiabilidad  $La=0,1$ .

Caso	Rec Más[%]
SA 1	79,334
SA 2	81,703
SA 3	78,727
CA 1	80,021
CA 2	79,479
CA 3	79,097

Tabla 119: Celda cilíndrica, factor de enriquecimiento, confiabilidad  $La=0,1$ .

Caso	FE
SA 1	1,006
SA 2	1,004
SA 3	0,990
CA 1	1,000
CA 2	0,994
CA 3	1,006

## Celda cónica de d a 2d

Tabla 120: Celda cónica de d a 2d, según caso. Valores ajustados para confiabilidad  $La=0,4$ .

<b>Celda cónica de d a 2d, confiabilidad <math>La=0,4</math></b>		
Variable		Ajustado
Gsa[kg/s]	SA 1	0,755
	SA 2	0,755
	SA 3	0,755
	CA 1	0,755
	CA 2	0,756
	CA 3	0,755
La[%]	SA 1	1,683
	SA 2	1,693
	SA 3	1,687
	CA 1	1,682
	CA 2	1,647
	CA 3	1,693
Laxial[%]	SA 1	1,688
	SA 2	1,708
	SA 3	1,716
	CA 1	1,702
	CA 2	1,541
	CA 3	1,685
Ltangencial[%]	SA 1	1,680
	SA 2	1,650
	SA 3	1,629
	CA 1	1,678
	CA 2	1,709
	CA 3	1,681
Gsaxial[kg/s]	SA 1	0,602
	SA 2	0,595
	SA 3	0,573
	CA 1	0,585
	CA 2	0,550
	CA 3	0,608
Gstangencial[kg/s]	SA 1	0,152
	SA 2	0,158
	SA 3	0,179
	CA 1	0,165
	CA 2	0,226
	CA 3	0,150

Tabla 121: Celda cónica de d a 2d, recuperación metalúrgica, confiabilidad La=0,4.

Caso	Rec Met[%]
SA 1	79,964
SA 2	79,596
SA 3	77,182
CA 1	78,436
CA 2	68,045
CA 3	80,182

Tabla 122: Celda cónica de d a 2d, recuperación másica, confiabilidad La=0,4.

Caso	Rec Más[%]
SA 1	79,720
SA 2	78,872
SA 3	75,885
CA 1	77,523
CA 2	72,767
CA 3	80,552

Tabla 123: Celda cónica de d a 2d, factor de enriquecimiento, confiabilidad La=0,4.

Caso	FE
SA 1	1,003
SA 2	1,009
SA 3	1,017
CA 1	1,012
CA 2	0,935
CA 3	0,995

Tabla 124: Celda cónica de d a 2d, según caso. Valores ajustados para confiabilidad  $La=0,3$ .

<b>Celda cónica de d a 2d, confiabilidad <math>La=0,3</math></b>		
Variable		Ajustado
Gsa[kg/s]	SA 1	0,755
	SA 2	0,755
	SA 3	0,755
	CA 1	0,755
	CA 2	0,756
	CA 3	0,755
La[%]	SA 1	1,684
	SA 2	1,693
	SA 3	1,688
	CA 1	1,685
	CA 2	1,638
	CA 3	1,691
Laxial[%]	SA 1	1,688
	SA 2	1,708
	SA 3	1,716
	CA 1	1,703
	CA 2	1,537
	CA 3	1,684
Ltangencial[%]	SA 1	1,680
	SA 2	1,650
	SA 3	1,629
	CA 1	1,679
	CA 2	1,708
	CA 3	1,681
Gsaxial[kg/s]	SA 1	0,602
	SA 2	0,596
	SA 3	0,576
	CA 1	0,587
	CA 2	0,550
	CA 3	0,607
Gstangencial[kg/s]	SA 1	0,152
	SA 2	0,158
	SA 3	0,177
	CA 1	0,164
	CA 2	0,224
	CA 3	0,150



Tabla 125: Celda cónica de d a 2d, recuperación metalúrgica, confiabilidad La=0,3.

Caso	Rec Met[%]
SA 1	79,976
SA 2	79,675
SA 3	77,512
CA 1	78,588
CA 2	68,292
CA 3	80,153

Tabla 126: Celda cónica de d a 2d, recuperación másica, confiabilidad La=0,3.

Caso	Rec Más[%]
SA 1	79,749
SA 2	78,967
SA 3	76,256
CA 1	77,742
CA 2	72,762
CA 3	80,482

Tabla 127: Celda cónica de d a 2d, factor de enriquecimiento, confiabilidad La=0,3.

Caso	FE
SA 1	1,003
SA 2	1,009
SA 3	1,016
CA 1	1,011
CA 2	0,939
CA 3	0,996

Tabla 128: Celda cónica de d a 2d, según caso. Valores ajustados para confiabilidad  $La=0,2$ .

<b>Celda cónica de d a 2d, confiabilidad <math>La=0,2</math></b>		
Variable		Ajustado
Gsa[kg/s]	SA 1	0,755
	SA 2	0,755
	SA 3	0,755
	CA 1	0,755
	CA 2	0,756
	CA 3	0,755
La[%]	SA 1	1,684
	SA 2	1,694
	SA 3	1,690
	CA 1	1,688
	CA 2	1,624
	CA 3	1,689
Laxial[%]	SA 1	1,689
	SA 2	1,709
	SA 3	1,717
	CA 1	1,704
	CA 2	1,532
	CA 3	1,683
Ltangencial[%]	SA 1	1,680
	SA 2	1,650
	SA 3	1,629
	CA 1	1,679
	CA 2	1,706
	CA 3	1,681
Gsaxial[kg/s]	SA 1	0,602
	SA 2	0,596
	SA 3	0,576
	CA 1	0,587
	CA 2	0,550
	CA 3	0,607
Gstangencial[kg/s]	SA 1	0,152
	SA 2	0,158
	SA 3	0,177
	CA 1	0,164
	CA 2	0,220
	CA 3	0,150

Tabla 129: Celda cónica de d a 2d, recuperación metalúrgica, confiabilidad La=0,2.

Caso	Rec Met[%]
SA 1	79,975
SA 2	79,676
SA 3	77,519
CA 1	78,589
CA 2	68,664
CA 3	80,154

Tabla 130: Celda cónica de d a 2d, recuperación másica, confiabilidad La=0,3.

Caso	Rec Más[%]
SA 1	79,772
SA 2	78,991
SA 3	76,319
CA 1	77,842
CA 2	72,765
CA 3	80,424

Tabla 131: Celda cónica de d a 2d, factor de enriquecimiento, confiabilidad La=0,2.

Caso	FE
SA 1	1,003
SA 2	1,009
SA 3	1,016
CA 1	1,010
CA 2	0,944
CA 3	0,997

Tabla 132: Celda cónica de d a 2d, según caso. valores ajustados para confiabilidad  $La=0,1$ .

<b>Celda cónica de d a 2d, confiabilidad <math>La=0,1</math></b>		
Variable		Ajustado
Gsa[kg/s]	SA 1	0,755
	SA 2	0,755
	SA 3	0,755
	CA 1	0,755
	CA 2	0,756
	CA 3	0,755
La[%]	SA 1	1,686
	SA 2	1,695
	SA 3	1,694
	CA 1	1,694
	CA 2	1,601
	CA 3	1,686
Laxial[%]	SA 1	1,689
	SA 2	1,709
	SA 3	1,718
	CA 1	1,706
	CA 2	1,524
	CA 3	1,682
Ltangencial[%]	SA 1	1,680
	SA 2	1,650
	SA 3	1,630
	CA 1	1,679
	CA 2	1,704
	CA 3	1,680
Gsaxial[kg/s]	SA 1	0,603
	SA 2	0,599
	SA 3	0,588
	CA 1	0,594
	CA 2	0,550
	CA 3	0,606
Gstangencial[kg/s]	SA 1	0,151
	SA 2	0,155
	SA 3	0,165
	CA 1	0,159
	CA 2	0,215
	CA 3	0,150

Tabla 133: Celda cónica de d a 2d, recuperación metalúrgica, confiabilidad La=0,1.

Caso	Rec Met[%]
SA 1	80,024
SA 2	80,031
SA 3	79,022
CA 1	79,228
CA 2	69,290
CA 3	80,074

Tabla 134: Celda cónica de d a 2d, recuperación másica, confiabilidad La=0,1.

Caso	Rec Más[%]
SA 1	79,860
SA 2	79,387
SA 3	77,939
CA 1	78,640
CA 2	72,796
CA 3	80,250

Tabla 135: Celda cónica de d a 2d, factor de enriquecimiento, confiabilidad La=0,1.

Caso	FE
SA 1	1,002
SA 2	1,008
SA 3	1,014
CA 1	1,007
CA 2	0,952
CA 3	0,998

## Celda cónica de 2d a d

Tabla 136: Celda cónica de 2d a d, según caso. Valores ajustados para confiabilidad  $La=0,4$ .

<b>Celda cónica de 2d a d, confiabilidad <math>La=0,4</math></b>		
Variable		Ajustado
Gsa[kg/s]	SA 1	0,755
	SA 2	0,755
	SA 3	0,754
	CA 1	0,754
	CA 2	0,755
	CA 3	0,755
La[%]	SA 1	1,622
	SA 2	1,602
	SA 3	1,604
	CA 1	1,605
	CA 2	1,655
	CA 3	1,643
Laxial[%]	SA 1	1,643
	SA 2	1,612
	SA 3	1,635
	CA 1	1,645
	CA 2	1,653
	CA 3	1,662
Ltangencial[%]	SA 1	1,608
	SA 2	1,629
	SA 3	1,617
	CA 1	1,596
	CA 2	1,641
	CA 3	1,638
Gsaxial[kg/s]	SA 1	0,580
	SA 2	0,611
	SA 3	0,574
	CA 1	0,550
	CA 2	0,609
	CA 3	0,585
Gstangencial[kg/s]	SA 1	0,170
	SA 2	0,139
	SA 3	0,171
	CA 1	0,195
	CA 2	0,148
	CA 3	0,165

Tabla 137: Celda cónica de d a 2d, recuperación metalúrgica, confiabilidad La=0,4.

Caso	Rec Met[%]
SA 1	77,828
SA 2	81,438
SA 3	77,577
CA 1	74,742
CA 2	80,512
CA 3	78,458

Tabla 138: Celda cónica de d a 2d, recuperación másica, confiabilidad La=0,4.

Caso	Rec Más[%]
SA 1	76,838
SA 2	80,930
SA 3	76,107
CA 1	72,905
CA 2	80,639
CA 3	77,537

Tabla 139: Celda cónica de d a 2d, factor de enriquecimiento, confiabilidad La=0,4.

Caso	FE
SA 1	1,013
SA 2	1,006
SA 3	1,019
CA 1	1,025
CA 2	0,998
CA 3	1,012

Tabla 140: Celda cónica de d a 2d, según caso. Valores ajustados para confiabilidad  $La=0,3$ .

<b>Celda cónica de 2d a d, confiabilidad <math>La=0,3</math></b>		
Variable		Ajustado
Gsa[kg/s]	SA 1	0,755
	SA 2	0,755
	SA 3	0,754
	CA 1	0,754
	CA 2	0,755
	CA 3	0,755
La[%]	SA 1	1,624
	SA 2	1,604
	SA 3	1,609
	CA 1	1,609
	CA 2	1,655
	CA 3	1,645
Laxial[%]	SA 1	1,644
	SA 2	1,613
	SA 3	1,637
	CA 1	1,647
	CA 2	1,653
	CA 3	1,663
Ltangencial[%]	SA 1	1,609
	SA 2	1,629
	SA 3	1,617
	CA 1	1,597
	CA 2	1,640
	CA 3	1,639
Gsaxial[kg/s]	SA 1	0,581
	SA 2	0,611
	SA 3	0,575
	CA 1	0,550
	CA 2	0,608
	CA 3	0,586
Gstangencial[kg/s]	SA 1	0,170
	SA 2	0,140
	SA 3	0,172
	CA 1	0,196
	CA 2	0,148
	CA 3	0,165



Tabla 141: Celda cónica de d a 2d, recuperación metalúrgica, confiabilidad La=0,3.

Caso	Rec Met[%]
SA 1	77,851
SA 2	81,372
SA 3	77,531
CA 1	74,621
CA 2	80,505
CA 3	78,459

Tabla 142: Celda cónica de d a 2d, recuperación másica, confiabilidad La=0,3.

Caso	Rec Más[%]
SA 1	76,925
SA 2	80,931
SA 3	76,192
CA 1	72,912
CA 2	80,607
CA 3	77,608

Tabla 143: Celda cónica de d a 2d, factor de enriquecimiento, confiabilidad La=0,3.

Caso	FE
SA 1	1,012
SA 2	1,005
SA 3	1,018
CA 1	1,023
CA 2	0,999
CA 3	1,011

Tabla 144: Celda cónica de d a 2d, según caso. Valores ajustados para confiabilidad  $La=0,2$ .

<b>Celda cónica de 2d a d, confiabilidad <math>La=0,2</math></b>		
Variable		Ajustado
Gsa[kg/s]	SA 1	0,755
	SA 2	0,755
	SA 3	0,755
	CA 1	0,754
	CA 2	0,755
	CA 3	0,755
La[%]	SA 1	1,627
	SA 2	1,608
	SA 3	1,615
	CA 1	1,616
	CA 2	1,653
	CA 3	1,648
Laxial[%]	SA 1	1,645
	SA 2	1,614
	SA 3	1,639
	CA 1	1,649
	CA 2	1,652
	CA 3	1,664
Ltangencial[%]	SA 1	1,609
	SA 2	1,629
	SA 3	1,618
	CA 1	1,597
	CA 2	1,640
	CA 3	1,639
Gsaxial[kg/s]	SA 1	0,587
	SA 2	0,608
	SA 3	0,580
	CA 1	0,553
	CA 2	0,607
	CA 3	0,590
Gstangencial[kg/s]	SA 1	0,165
	SA 2	0,143
	SA 3	0,168
	CA 1	0,195
	CA 2	0,149
	CA 3	0,162

Tabla 145: Celda cónica de d a 2d, recuperación metalúrgica, confiabilidad La=0,2.

Caso	Rec Met[%]
SA 1	78,584
SA 2	80,923
SA 3	78,035
CA 1	74,819
CA 2	80,370
CA 3	78,885

Tabla 146: Celda cónica de d a 2d, recuperación másica, confiabilidad La=0,2.

Caso	Rec Más[%]
SA 1	77,752
SA 2	80,584
SA 3	76,882
CA 1	73,297
CA 2	80,435
CA 3	78,133

Tabla 147: Celda cónica de d a 2d, factor de enriquecimiento, confiabilidad La=0,2.

Caso	FE
SA 1	1,011
SA 2	1,004
SA 3	1,015
CA 1	1,021
CA 2	0,999
CA 3	1,010

Tabla 148: Celda cónica de d a 2d, según caso. Valores ajustados para confiabilidad  $La=0,1$ .

<b>Celda cónica de 2d a d, confiabilidad <math>La=0,1</math></b>		
Variable		Ajustado
Gsa[kg/s]	SA 1	0,755
	SA 2	0,755
	SA 3	0,755
	CA 1	0,755
	CA 2	0,755
	CA 3	0,755
La[%]	SA 1	1,632
	SA 2	1,613
	SA 3	1,625
	CA 1	1,627
	CA 2	1,652
	CA 3	1,654
Laxial[%]	SA 1	1,646
	SA 2	1,616
	SA 3	1,643
	CA 1	1,653
	CA 2	1,651
	CA 3	1,666
Ltangencial[%]	SA 1	1,609
	SA 2	1,629
	SA 3	1,619
	CA 1	1,598
	CA 2	1,640
	CA 3	1,639
Gsaxial[kg/s]	SA 1	0,591
	SA 2	0,607
	SA 3	0,586
	CA 1	0,570
	CA 2	0,606
	CA 3	0,593
Gstangencial[kg/s]	SA 1	0,161
	SA 2	0,146
	SA 3	0,164
	CA 1	0,180
	CA 2	0,149
	CA 3	0,159

Tabla 149: Celda cónica de d a 2d, recuperación metalúrgica, confiabilidad La=0,1.

Caso	Rec Met[%]
SA 1	79,028
SA 2	80,599
SA 3	78,517
CA 1	76,776
CA 2	80,294
CA 3	79,225

Tabla 150: Celda cónica de d a 2d, recuperación másica, confiabilidad La=0,1.

Caso	Rec Más[%]
SA 1	78,347
SA 2	80,415
SA 3	77,663
CA 1	75,561
CA 2	80,303
CA 3	78,633

Tabla 151: Celda cónica de d a 2d, factor de enriquecimiento, confiabilidad La=0,1.

Caso	FE
SA 1	1,009
SA 2	1,002
SA 3	1,011
CA 1	1,016
CA 2	1,000
CA 3	1,008