

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA



TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

“OPTIMIZACIÓN DEL AJUSTE DE PARÁMETROS EN LOS LAZOS DE CONTROL DE NIVEL DE CELDAS DE FLOTACIÓN EN PLANTAS CONCENTRADORAS DE MINERALES PARA REDUCIR LA VARIABILIDAD DEL PROCESO, BASADO EN EL MÉTODO PHVA”

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO MECATRÓNICO

ELABORADO POR:

JONATHAN EFRAIN VERA RUIZ

ASESOR:

MG. ING. ALCIDES GUILLERMO JOO AGUAYO

LIMA – PERÚ

2021

A mi madre por el apoyo constante e
incansable. A mi hermana, por ser
motivación para mejorar cada día. A
Ingrid por ser mi compañera de vida.

RESUMEN

En la actualidad, la minería en el Perú representa un sector importante para el desarrollo económico del país. La minería en la sierra central es, principalmente, polimetálica y sus plantas comprenden los procesos de: chancado, molienda, flotación, espesamiento y filtrado. El proceso de flotación es el más importante porque recupera el mineral de valor para la compañía.

La problemática principal es la alta variabilidad en el proceso de flotación, que se produce por efecto de un inadecuado ajuste de parámetros de control de nivel en las celdas, lo que ocasiona un incremento en el costo operativo de mantenimiento por la elevada frecuencia de cambio de los componentes de los actuadores neumáticos. El presente trabajo define como objetivo la reducción de la variabilidad a través de la optimización del ajuste de los parámetros de control de nivel utilizando como base metódica al ciclo PHVA.

Para ello se realiza la recopilación de parámetros desde el sistema de registro histórico del DCS de la planta concentradora, para posteriormente evaluar su variabilidad y tomar los mejores desempeños como valores objetivos y optimizar los ajustes de parámetros de control de las demás celdas.

Finalmente se consigue la reducción de la variabilidad en el proceso de flotación mediante la optimización del control de nivel de las celdas de flotación, donde el ciclo PHVA logra comparar los desempeños de etapas análogas de un proceso para mejorar aquellas deficientes en una evaluación.

Palabras claves: Actuadores neumáticos, ciclo PHVA, DCS, flotación.

ABSTRACT

Currently, mining in Peru represents an important sector for the economic development of the country. Mining in the central highlands is mainly polymetallic and its plants comprise the processes of crushing, grinding, flotation, thickening and filtering. The flotation process is the most important because it recovers the mineral of value to the company.

The main problem is the high variability in the flotation process, which is produced by the effect of an inadequate adjustment of level control parameters in the cells, which causes an increase in the maintenance operating cost due to the high frequency of change of components of pneumatic actuators. The present work defines the objective of reducing variability through the optimization of the adjustment of the level control parameters using the PHVA cycle as a methodical basis.

For this, the parameters are compiled from the DCS historical record system of the concentrator plant, to later evaluate its variability and take the best performances as objective values and optimize the control parameter settings of the other cells.

Finally, the reduction of variability in the flotation process is achieved by optimizing the level control of the flotation cells, where the PHVA cycle manages to compare the performance of similar stages of a process to improve those deficient in an evaluation.

Keywords: Pneumatic actuators, PDCA cycle, DCS, flotation.

PRÓLOGO

El aporte del presente trabajo de investigación comprende el uso del ciclo de mejora continua PHVA o ciclo de Deming como método de búsqueda de las soluciones para optimizar el sistema de control de nivel del proceso de flotación en una planta concentradora de minerales. El informe se divide en seis capítulos, los cuales están sustentados con la recopilación de información del registro histórico de datos del sistema DCS de una planta concentradora de minerales, el análisis estadístico del comportamiento de las variables estudiadas, investigaciones nacionales e internacionales, conocimientos teóricos y conceptuales, así como las referencias bibliográficas citadas.

El primer capítulo comprende la introducción, compuesta por las generalidades que ubican al lector en el contexto de la investigación que en este caso es el proceso de flotación de una planta concentradora de mediana minería, luego se presenta la descripción de la problemática que se sintetiza con la formulación del problema: “¿En qué medida el ajuste de parámetros del lazo de control de nivel, en celdas de flotación, incide en la de variabilidad en el proceso de flotación?”, a continuación plantea el objetivo de la investigación: “Optimizar el ajuste de parámetros de control de nivel de celdas de flotación para reducir la variabilidad del proceso, basado en PHVA” y después los antecedentes investigativos internacionales y nacionales referentes al presente trabajo.

En el segundo capítulo se describe las bases teóricas para el trabajo de investigación y luego el marco conceptual, donde se han recopilado términos que son específicos de la presente investigación.

En el tercer capítulo se plantea la hipótesis de la investigación que es “La optimización del ajuste de parámetros de control de nivel de celdas de flotación, usando el método PHVA (planear, hacer, verificar y actuar), reducirá la variabilidad en el proceso”.

El cuarto capítulo trata de la metodología y se compone por el tipo y diseño de la investigación donde se determina que la presente investigación es principalmente de tipo cuantitativa, luego se menciona a la Unidad de Análisis que es la planta concentradora Alpamarca de la Compañía Minera Chungar SAC, y después se desarrolla la matriz de consistencia.

En el quinto capítulo se realiza el desarrollo de la investigación en sus etapas de recopilación de información; análisis de datos, donde se encuentra las causas raíz y se elabora un plan de acción para la solución del problema; luego se desarrollan las acciones de mejora según lo planificado.

En el sexto capítulo se realiza el análisis de los resultados obtenidos en el capítulo anterior, se analiza estadísticamente las mejoras en la variabilidad de las variables de control y se hace la validación de la hipótesis de la investigación.

Finalmente, se presentan las conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos de la presente investigación.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. GENERALIDADES	1
1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	5
1.3. OBJETIVOS DEL ESTUDIO.....	11
1.3.1. Objetivo General	11
1.4. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS.....	12
1.4.1. Internacionales.....	12
1.4.2. Nacionales	13
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL	15
2.1. MARCO TEÓRICO.....	15
2.1.1. Procesos Productivos Mineros.....	15
2.1.1.1. Extracción.....	15
2.1.1.1.1 Extracción a tajo abierto	16
2.1.1.1.2 Extracción en minería subterránea.....	16
2.1.1.2. Procesamiento.....	17
2.1.1.2.1 Conminución	17
2.1.1.2.2 Concentración	18
2.1.2. Tipos de Celdas de Flotación.....	21
2.1.2.1. Celdas mecánicas	21
2.1.2.2. Celdas neumáticas	22

2.1.2.3.	Celdas de flotación tipo columna	22
2.1.3.	Sistemas de Control Automático	23
2.1.3.1.	Características de un proceso	23
2.1.3.2.	Tipos de Control	24
2.1.3.3.	Controlador PID	26
2.1.4.	Lazo de Control de Nivel de Celdas de Flotación.....	28
2.1.5.	Auto-sintonización de lazos de control	30
2.1.5.1.	Método de autosintonización por relé retroalimentado	31
2.1.6.	Actuadores Neumáticos	33
2.1.6.1.	Sistema de producción y distribución de aire comprimido .	34
2.1.6.2.	Cilindros neumáticos	36
2.1.7.	Ciclo PHVA	37
2.1.8.	Variabilidad de Procesos.....	39
2.2.	MARCO CONCEPTUAL.....	40
2.2.1.	Banco.....	40
2.2.2.	Bulk	40
2.2.3.	Celda.....	40
2.2.4.	Cola.....	40
2.2.5.	Concentrado.....	40
2.2.6.	Espuma	41

2.2.7. Filtro	41
2.2.8. Posicionador	41
2.2.9. Recuperación	41
CAPÍTULO 3. HIPÓTESIS Y OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	42
3.1. HIPÓTESIS	42
3.2. VARIABLES DE LA HIPÓTESIS	42
3.2.1. Variable dependiente	42
3.2.2. Variable independiente.....	42
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA.....	43
4.1. TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	43
4.2. UNIDAD DE ANÁLISIS.....	43
4.3. MATRIZ DE CONSISTENCIA	44
CAPÍTULO 5. DESARROLLO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.....	45
5.1. PLANEAR (P).....	45
5.1.1. Análisis de la Magnitud del Problema	45
5.1.1.1. Celdas de flotación rougher, scavenger y cleaner de bulk	47
5.1.1.1.1 Banco de celdas rougher de bulk 510FC001-004	49
5.1.1.1.2 Banco de celdas scavenger de bulk 510FC008-010	51
5.1.1.1.3 Banco de celdas cleaner I de bulk 510FC011-013.....	54

5.1.1.1.4	Resumen de indicadores de variabilidad celdas 510FC001-010.....	56
5.1.2.	Búsqueda de las causas posibles	57
5.1.3.	Definición de la causa raíz	58
5.1.4.	Consideración de las medidas de solución	58
5.2.	HACER (H)	59
5.2.1.	Ejecución de las medidas de solución.....	59
5.2.1.1.	Controlador UT35A de Yokogawa	59
5.2.1.1.1	Diagrama de conexión del controlador UT35A.....	61
5.2.1.2.	Sintonización de los lazos de control de nivel.....	62
5.2.1.2.1	Banco de Celdas Cleaner I de Bulk 510FC011-013.....	63
5.2.1.3.	Filtro de señal de sensor de nivel de pulpa	65
5.2.1.3.1	Banco de Celdas Cleaner I de Bulk 510FC011-013.....	66
CAPÍTULO 6.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	69
6.1.	VERIFICAR (V).....	69
6.1.1.	Revisión de los resultados	69
6.1.1.1.	Efecto de la aplicación de autosintonización al lazo de control.....	69
6.1.1.2.	Efecto de la aplicación de filtro en la señal de entrada.....	70
6.1.1.3.	Análisis de los efectos de las acciones de solución en el nivel de pulpa	72

6.1.1.4. Análisis de los efectos de las acciones de solución en el desplazamiento del actuador	74
6.2. ACTUAR (A)	76
6.2.1. Discusión de resultados	76
CONCLUSIONES	78
RECOMENDACIONES.....	80
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81
ANEXOS.....	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Demanda de la minería hacia otros sectores productivos	1
Figura 1.2. Principales Proveedores de la Minería en Perú.....	2
Figura 1.3. Minería en la costa-sierra central del Perú	3
Figura 1.4. Área de Flotación de una planta concentradora de polimetales. .	4
Figura 1.5. Circuito típico de flotación rougher, scavenger y cleaner.....	5
Figura 1.6. Banco de celdas rougher de flotación de cobre.....	6
Figura 1.7. Válvula tipo dardo en una celda de flotación.	7
Figura 1.8. Actuador neumático lineal con posicionador interno.....	8
Figura 1.9. Actuador neumático lineal con posicionador externo.....	8
Figura 2.1. Flujo de proceso de extracción a tajo abierto.	16
Figura 2.2. Flujo de proceso de extracción en mina subterránea	17
Figura 2.3. Subproceso de conminución de una planta concentradora de minerales	19
Figura 2.4. Subproceso de concentración de una planta concentradora de minerales	20
Figura 2.5. Celdas de flotación mecánicas	21
Figura 2.6. Celdas de flotación neumáticas	22
Figura 2.7. Celdas de flotación tipo columna	22
Figura 2.8. Representación del control manual de un intercambiador de calor	24
Figura 2.9. Efectos de las acciones de control proporcional, integral y derivativa	27

Figura 2.10. Diagrama de lazo de control de nivel en una celda de flotación	28
Figura 2.11. Sistema de control de nivel de pulpa en celda de flotación	29
Figura 2.12. Diagrama de bloques de una planta con control de lazo cerrado	30
Figura 2.13. Diagrama de bloques del método de relé retroalimentado	31
Figura 2.14. Respuestas de la prueba de relé retroalimentado. a) Respuesta de salida de la planta. b) Respuesta de salida de la señal de control.....	32
Figura 2.15. Diagrama de bloques de un sistema de control.....	33
Figura 2.16. Sistema típico de producción de aire neumático	35
Figura 2.17. Unidad de mantenimiento neumática.....	35
Figura 2.18. Ciclo PHVA	37
Figura 2.19. Distribuciones normales con la misma media $\mu_1 = \mu_2$, y diferentes desviaciones estándar $\sigma_1 < \sigma_2$	39
Figura 5.1. Diagrama de flujo del desarrollo del trabajo de investigación	46
Figura 5.2. Sistema de control de nivel de pulpa en celda de flotación	47
Figura 5.3. Bancos de celdas de flotación rougher y scavenger de bulk	48
Figura 5.4. Bancos de celdas cleaner de bulk	48
Figura 5.5. Gráfica de variable controlada y valor de referencia de banco de celdas rougher de bulk 510FC001-004.....	49
Figura 5.6. Gráfica de densidad de distribución normal de nivel de celdas 510FC001-003.....	50
Figura 5.7. Gráfica de variable manipulada (desplazamiento de actuador) 510-UPC-001	50

Figura 5.8. Gráfica de densidad de distribución normal de variable manipulada (desplazamiento de actuador) 510-UPC-001	51
Figura 5.9. Gráfica de variable controlada y valor de referencia de banco de celdas scavenger de bulk 510FC008-010.....	52
Figura 5.10 Gráfica de densidad de distribución normal de nivel de celdas 510FC008-010.....	52
Figura 5.11. Gráfica de variable manipulada (desplazamiento de actuador) 510-UPC-003.....	53
Figura 5.12. Gráfica de densidad de distribución normal de variable manipulada (desplazamiento de actuador) 510-UPC-003	53
Figura 5.13. Gráfica de variable controlada y valor de referencia de banco de celdas scavenger de bulk 510FC011-013.....	54
Figura 5.14. Gráfica de densidad de distribución normal de nivel de celdas 510FC011-013.....	55
Figura 5.15. Gráfica de variable manipulada (desplazamiento de actuador) 510-UPC-004.....	55
Figura 5.16. Gráfica de densidad de distribución normal de variable manipulada (desplazamiento de actuador) 510-UPC-004	56
Figura 5.17. Diagrama de Ishikawa	57
Figura 5.18. Diagrama de flujo para la solución del problema.	60
Figura 5.19. Diagrama de conexión de controlador UT35A.....	61
Figura 5.20. Función de autoajuste (auto-tuning) del controlador UT35A....	62
Figura 5.21. Gráfica de variable controlada y valor de referencia de banco de celdas cleaner de bulk I 510FC011-013. Después de autosintonización.....	63

Figura 5.22. Gráfica de densidad de distribución normal de nivel de celdas 510FC011-013. Después de autosintonización.	64
Figura 5.23. Gráfica de variable manipulada (desplazamiento de actuador) 510-UPC-004. Después de autosintonización.	64
Figura 5.24. Gráfica de densidad de distribución normal de variable manipulada (desplazamiento de actuador) 510-UPC-004. Después de autosintonización.	65
Figura 5.25. Señal de entrada de retroalimentación del proceso. a) señal original b) señal filtrada con una constante de tiempo baja c) señal filtrada con una constante de tiempo alta	66
Figura 5.26. Gráfica de variable controlada y valor de referencia de banco de celdas cleaner de bulk I 510FC011-013. Después de filtro de señal de entrada.....	67
Figura 5.27. Gráfica de densidad de distribución normal de nivel de celdas 510FC011-013. Después de filtro de señal de entrada.....	67
Figura 5.28. Gráfica de variable manipulada (desplazamiento de actuador) 510-UPC-004. Después de filtro de señal de entrada.....	68
Figura 5.29. Gráfica de densidad de distribución normal de variable manipulada (desplazamiento de actuador) 510-UPC-004. Después de filtro de señal de entrada.	68
Figura 6.1. Efecto de la autosintonización en la variable controlada y valor de referencia de banco de celdas cleaner de bulk I 510FC011-013.....	69
Figura 6.2. Efecto de la autosintonización en la variable manipulada (desplazamiento de actuador) 510-UPC-004.....	70

Figura 6.3. Efecto de la aplicación de filtro de señal de entrada de variable controlada y valor de referencia de banco de celdas scavenger de bulk 510FC011-013.....	71
Figura 6.4. Comparación de variable manipulada (desplazamiento de actuador) 510-UPC-004 por efecto de la aplicación de filtro de señal de entrada.....	71
Figura 6.5. Gráfica de densidad de distribución normal de la variable controlada (nivel de pulpa) en banco de celdas cleaner I bulk 510FC011-013	72
Figura 6.6. Superposición de gráficas del nivel de pulpa del banco de celdas 510FC011-013	73
Figura 6.7. Gráfica de densidad de distribución normal de la variable manipulada (desplazamiento de actuador) en actuador 510-UPC-004	74
Figura 6.8. Superposición de gráficas del desplazamiento del actuador del banco de celdas 510FC011-013.....	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Procesos productivos mineros	15
Tabla 2.2. Características de un proceso	23
Tabla 2.3. Tipos de control	25
Tabla 2.4. Cálculo de parámetros PID propuesto por Ziegler y Nichols.....	32
Tabla 2.5. Cilindros de simple efecto y de doble efecto	36
Tabla 2.6. Ocho pasos para solucionar un problema mediante PHVA	38
Tabla 4.1. Matriz de Consistencia.....	44
Tabla 5.1. Tabla de resumen de datos estadísticos - celdas rougher, scavenger y cleaner de bulk 510FC001-010	56
Tabla 5.2. Plan de acción para la solución del problema.....	58
Tabla 5.3. Características técnicas del controlador UT35A	59
Tabla 6.1. Resumen de parámetros estadísticos de las variables de lazo de control de nivel de celdas cleaner bulk I 510FC011-013	76

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1. Diagrama de Ishikawa.....	86
ANEXO 2. Tabla de recolección de variables de lazo de control (cabecera de 37 registros).....	87
ANEXO 3. Procedimiento de ejecución de autosintonización de controlador según manual de controlador UT35A de Yokogawa.....	88
ANEXO 4. Procedimiento de aplicación de filtro de señal de entrada según manual de controlador UT35A de Yokogawa	89

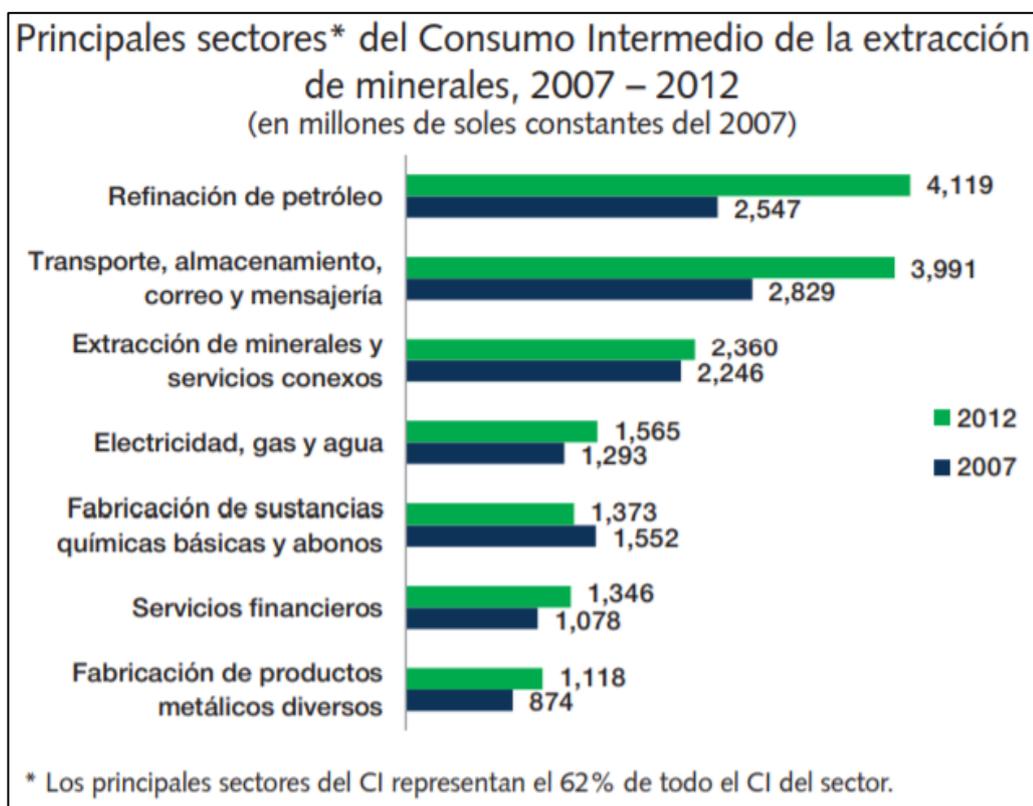
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. GENERALIDADES

El desarrollo económico del Perú se basa, en gran porcentaje, en la minería que ha representado alrededor del 10% del PBI nacional y cerca del 61% del total de exportaciones peruanas (Ministerio de Energía y Minas, 2018).

La extracción de minerales incrementa la demanda bienes y servicios en otros sectores económicos: energía, industria, petróleo, gas, servicios; los que a su vez requieren bienes y servicios de otras actividades productivas, formando un ciclo de consumo económico. (ver Figura 1.1).

Figura 1.1. Demanda de la minería hacia otros sectores productivos

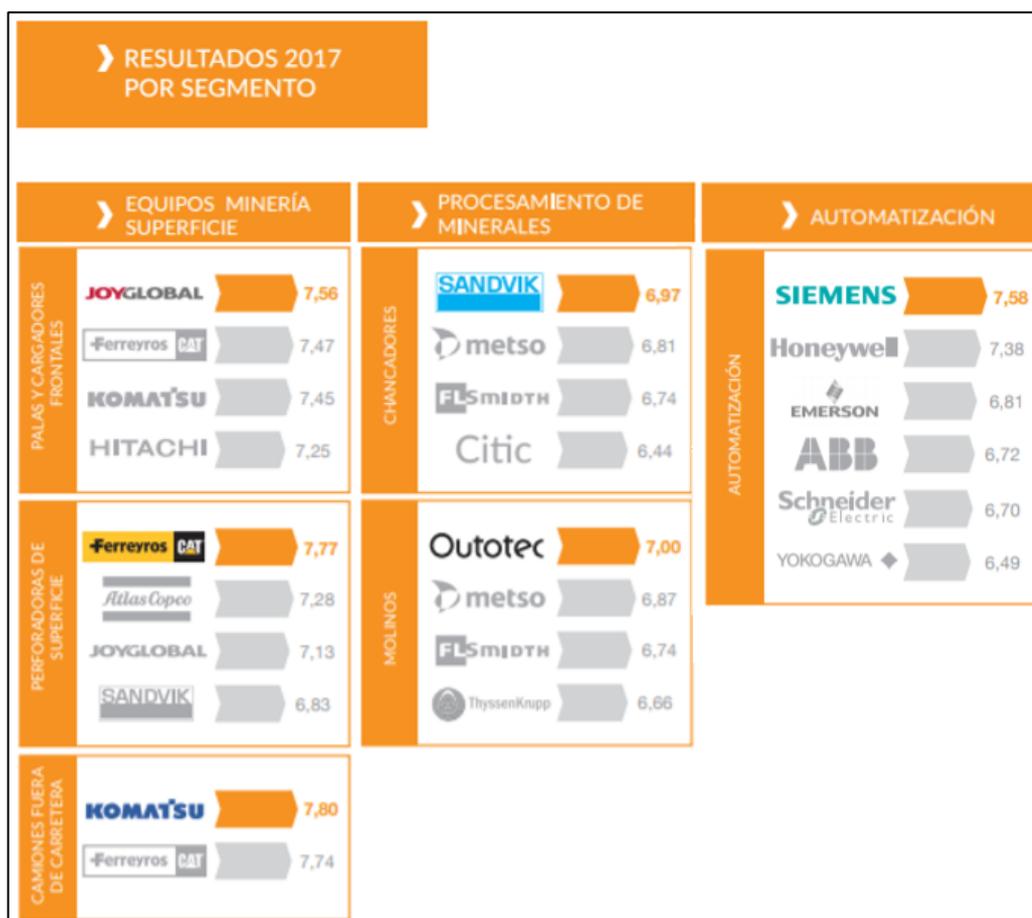


Fuente: "El valor agregado de la minería" (Instituto Peruano de Economía, 2017)

La minería, durante el año 2019 ubica al Perú como segundo productor mundial de cobre, plata y zinc. En Latinoamérica, lidera con el primer lugar en la producción de oro, zinc, plomo y estaño; y en segundo lugar en la producción de cobre, plata y molibdeno (U.S. Geological Survey, 2019).

El crecimiento del sector minero beneficia tanto el desarrollo económico como también el desarrollo tecnológico del país; los más importantes proveedores mundiales de tecnología y servicios para minería operan exitosamente en Perú (ver Figura 1.2). Además, cada vez existen más proveedores nacionales que cuentan con soluciones atractivas para la mediana e incluso gran minería.

Figura 1.2. Principales Proveedores de la Minería en Perú



Fuente: "Ranking de Proveedores de la Minería Perú" (Phibrand S.A., 2017)

La minería en la sierra central presenta, principalmente, yacimientos polimetálicos (cobre, zinc, plomo, plata) como se observa en la Figura 1.3. Los procesos de las plantas concentradoras polimetálicas son: chancado, molienda, flotación, espesamiento y filtrado.

Figura 1.3. Minería en la costa-sierra central del Perú



Fuente: Mapa de Principales Unidades Mineras en Producción (Ministerio de Energía y Minas, 2018)

El proceso de flotación en una planta concentradora polimetálica (ver Figura 1.4) es el más crítico y requiere mayor competencia por parte de la operación metalúrgica. En este proceso, se recupera el mineral de beneficio en las etapas *rougher*, *scavenger* y *cleaner*, mediante la manipulación de diferentes variables que se deben controlar para obtener una recuperación óptima a través de los reboses de espuma y el paso de las colas a la siguiente celda o

la tubería de transporte de relaves, a donde van las colas de las celdas *scavenger* de zinc.

El lazo que controla el nivel de pulpa en las celdas de flotación, lo hace mediante la manipulación de los actuadores neumáticos que están acoplados a las válvulas tipo dardo que dan paso a la pulpa que fluye de una celda a otra.

Figura 1.4. Área de Flotación de una planta concentradora de polimetales.

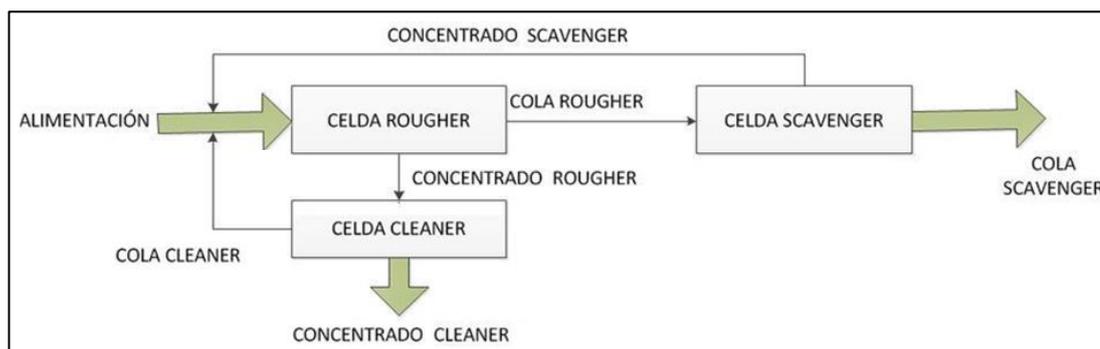


Fuente: "Proyectos ejecutados: Planta Alparamarca" (Cosapi, 2014)

1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

En las plantas concentradoras de mediana minería se realiza el proceso de recuperación de minerales mediante bancos de celdas de flotación de tipos *rougher*, *scavenger* y *cleaner* (ver Figura 1.5). El inadecuado desempeño del lazo de control de nivel de pulpa en las celdas es uno de los factores que incrementan la variabilidad en el proceso. Esto tiene un efecto en el grado de concentrado de calidad uniforme y en las recuperaciones consistentes de mineral producto del proceso de flotación. (Meraz Vinaja, 2018)

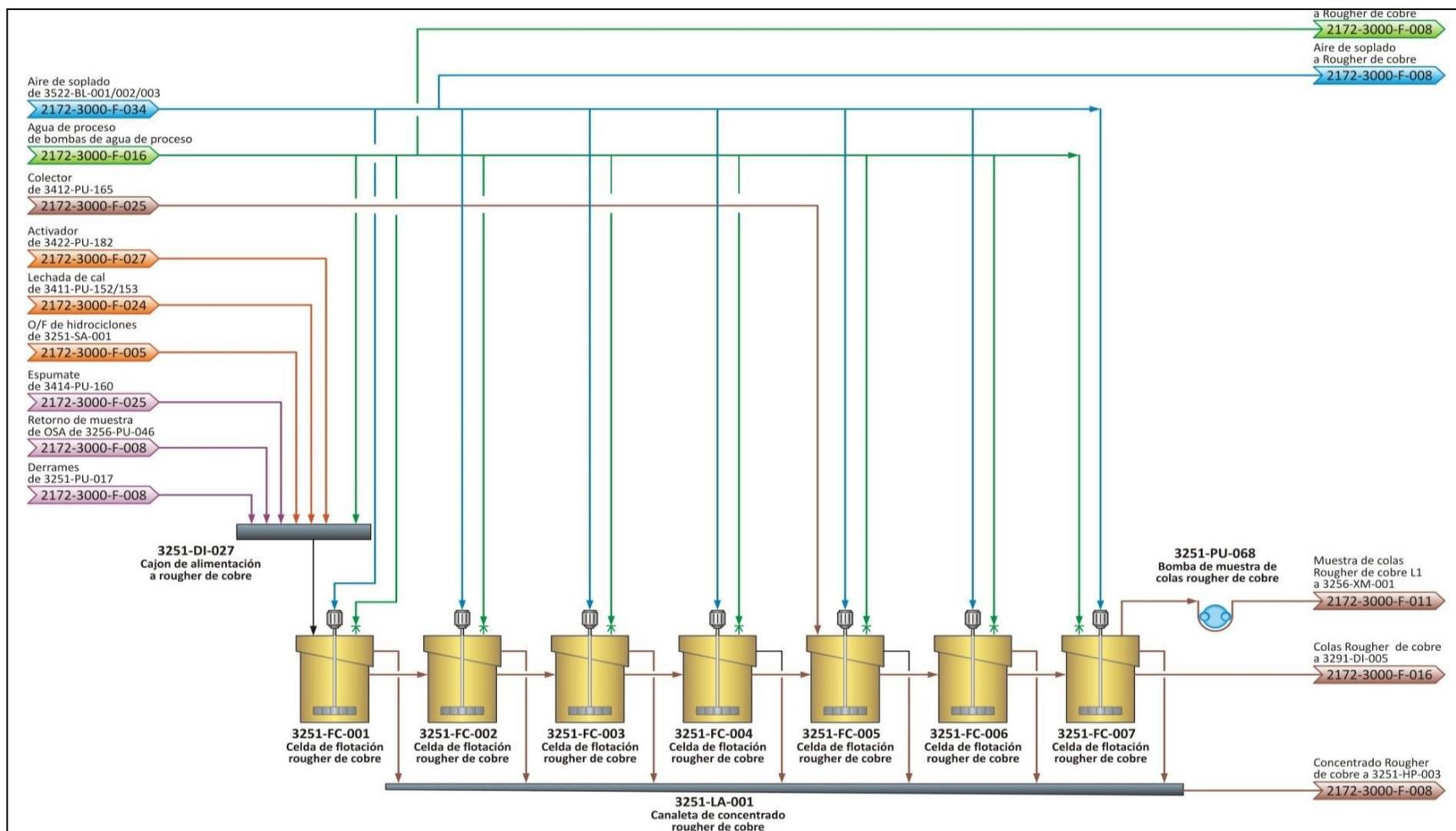
Figura 1.5. Circuito típico de flotación *rougher*, *scavenger* y *cleaner*.



Fuente: "Sistemas de preparación de lechada de cal en Chile" (Morey, 2016)

El control de nivel de las celdas de flotación al no desempeñarse de manera precisa (oscilación alta) produce efectos como el rebose de colas e impide controlar la velocidad de rebose de la espuma, lo cual conduce a un desempeño fuera del rango del punto óptimo. Se resalta que en el proceso de flotación varias celdas se conectan entre sí, haciendo que el material que no se recupera en una celda sirva como entrada para la siguiente celda (ver Figura 1.6), repitiendo luego el proceso de burbujeo y recolección de espuma. (Troncoso Garay, 2016)

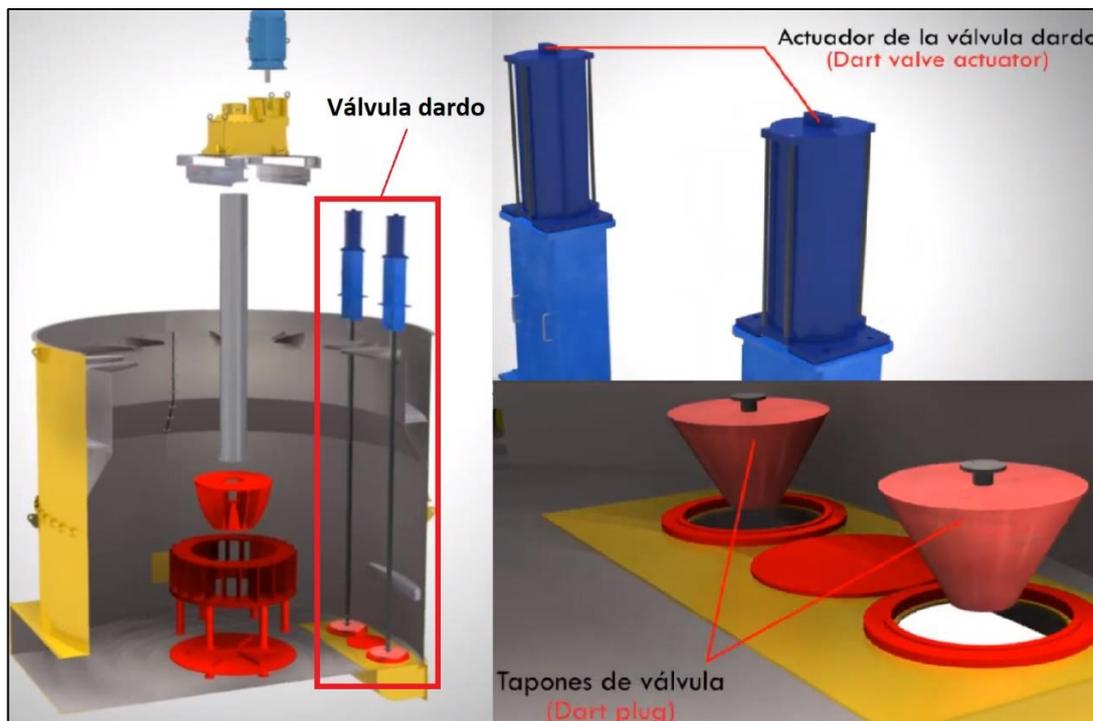
Figura 1.6. Banco de celdas rougher de flotación de cobre.



Fuente: "Manual de operaciones de flotación para HUBBAY" (TECSUP, 2014)

Una de las causas de un control de nivel deficiente es la falla de los actuadores neumáticos que se utilizan para el control de las válvulas tipo dardo, ubicadas a la salida de las celdas de flotación (ver Figura 1.7). Sin embargo, las fallas de estos actuadores son también una consecuencia de un ajuste no óptimo de los parámetros de control, debido a que actúan con mayor frecuencia en comparación a cómo lo harían en un proceso estable. Existen dos tipos de actuadores neumáticos: Los actuadores con posicionador interno y los actuadores con posicionador externo. Los primeros presentan una mayor cantidad de fallas respecto a los del segundo tipo.

Figura 1.7. Válvula tipo dardo en una celda de flotación.



Fuente: “Manual de operaciones de flotación para HUBBAY” (TECSUP, 2014)

Los actuadores con posicionador interno (Figura 1.8) presentan fallas de obstrucción en la carrera del vástago del cilindro, se observa que internamente

presentan obstrucción en electroválvulas internas con partículas de caucho, que se desprenden de las juntas tóricas de los cilindros neumáticos. Por otra parte, para el caso de los actuadores neumáticos con posicionador externo (Figura 1.9), se observan fallas de rotura de componentes del mecanismo de acoplamiento al vástago del cilindro cuyo fin es que el posicionador reciba la señal de retroalimentación de la apertura-cierre de la válvula dardo.

Figura 1.8. Actuador neumático lineal con posicionador interno.



Fuente: "Catálogo de productos 2014" (FESTO, 2014)

Figura 1.9. Actuador neumático lineal con posicionador externo.



Fuente: "Catálogo de productos 2014" (FESTO, 2014)

Las dos causas de fallas descritas previamente se dan por los constantes movimientos de estos cilindros neumáticos para controlar el proceso. En el primer caso, la falla se produce por la generación de partículas de caucho que obstruyen el paso de aire en las electroválvulas internas del actuador, debido al desgaste de las juntas tóricas. En el segundo caso, los componentes del mecanismo de retroalimentación de posición se fatigan hasta superar sus límites de esfuerzo y se quiebran.

Una de las consecuencias frecuentes de las fallas en actuadores neumáticos es la obstrucción de la tubería de relaves por una descarga excesiva de pulpa debido a fallas en el control de salida de las celdas de flotación *scavenger* de zinc, y esto genera una parada de planta, puesto que, al parar la flotación, también se requerirá que el proceso de molienda se detenga. Lo descrito en este párrafo se basa en la tesis de pregrado “Diseño de un sistema de bombeo para transporte de relave desde planta concentradora hasta zona de disposición en Sociedad Minera Austria Duvaz S.A.C” (De La Cruz Morales, 2013)

Además de los problemas operativos que resultan de las fallas mencionadas, se tiene un incremento en el costo operativo de mantenimiento por la elevada frecuencia de cambio de los componentes de los actuadores neumáticos. Se produce también, un incremento del número de horas hombre del personal técnico para la ejecución de mantenimiento correctivo programado y de mantenimiento reactivo, reduciendo el tiempo que se invierte en actividades

de mantenimiento preventivo, incrementando de esta manera el riesgo de que otros equipos fallen por falta de cumplimiento del plan de mantenimiento.

Con lo indicado en párrafos anteriores, se enuncia el siguiente problema de investigación:

¿En qué medida el ajuste de parámetros del lazo de control de nivel, en celdas de flotación, incide en la de variabilidad en el proceso de flotación?

1.3. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

1.3.1. Objetivo General

Optimizar el ajuste de parámetros de control de nivel de celdas de flotación para reducir la variabilidad del proceso, basado en PHVA

1.4. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

1.4.1. Internacionales

En la tesis de maestría “Diseño de una estrategia de reducción de variabilidad en procesos con controladores tipo PID frente a perturbaciones oscilatorias” (Borrero Salazar, 2019), se menciona en la problemática cómo una inadecuada sintonización de los lazos de control en las industrias producen alta varianza en las variables controladas, lo cual tiene como consecuencia un bajo desempeño del proceso y alta variabilidad en la calidad del producto.

En la tesis de maestría “Estudio comparativo de técnicas de control PID difuso aplicadas al mejoramiento de desempeño de lazos de control continuo” (Rodríguez Castellanos, 2018), se realiza la comparación de controladores PID difusos directos, difusos supervisados y difusos paralelos, que realizan tareas de control diferentes, mediante un entorno de simulación de un modelo matemático y un reactor de tanque agitado continuo. Para lo cual se diseñan los controladores ajustando los parámetros necesarios para obtener un buen desempeño y un rechazo aceptable a las perturbaciones.

En la tesis de maestría “Diseño e implementación de estrategia de control predictivo en proceso de flotación de minerales” (Troncoso Garay, 2016), se realiza el diseño de un sistema de control con el uso de algoritmos genéticos, lo cual permite optimizar el desempeño del proceso de flotación mediante el uso de control avanzado.

En el artículo “Diseño e Implementación de Sistemas de Control de Nivel para Cinco Tanques de Bombeo de Hidrocarburos con Sensoramiento tipo Radar

en la Estación Shushufindi – EP Petroecuador” (Montenegro Cueva & Salazar Chacón, 2012), se utiliza el método PHVA para el desarrollo de sistemas de control de nivel *on-off* en tanques de almacenamiento de hidrocarburos y el diseño de un sistema de control PID como propuesta de modernización de la planta.

En la tesis de maestría “Plataforma para evaluar el desempeño energético de controladores PID en motores de corriente directa basada en la norma ISO 50001” (Espinoza Martínez, 2017), se diseña una plataforma para evaluar el desempeño de los controladores PID utilizando la norma ISO 50001 que está basada en la metodología PHVA.

1.4.2. Nacionales

En la tesis “Diseño de un sistema de control difuso para la estabilidad de los niveles de las celdas de flotación en un proceso continuo Cuprífero” (Haro Marchena, 2019), se realiza el diseño de un sistema de control de nivel de celdas mediante la modelación matemática del proceso y la programación de la estrategia de control utilizando un controlador PI (proporcional integral).

En la tesis “Diseño de un controlador predictivo generalizado multivariable para el control de una celda de flotación tipo columna utilizada en el proceso de recuperación de cobre” (Ccarita Cruz, 2017), se diseña un controlador predictivo generalizado (GPC) basado en modelos matemáticos. Se hizo la comparación con un controlador PI en diferentes escenarios de operación y

se determinó que el controlador diseñado (GPC) presenta un mejor desempeño.

En la tesis “Reducción de la variabilidad del pH en el circuito de flotación rougher bajo el enfoque six sigma” (Torres Francia, 2017), se realiza la optimización del control de pH en la flotación mediante el uso de elementos de la calidad bajo el enfoque six sigma.

En la tesis “Control de operaciones aplicado en la concentradora Toquepala” (Molina Guillén, 2015), se resalta la importancia del aporte de control de procesos en las operaciones de la planta concentradora Toquepala, basado en los cambios de tecnología en los campos de la operación, de plantas industriales.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1. MARCO TEÓRICO

2.1.1. Procesos Productivos Mineros

En el curso de minería “Etapas del Proceso Productivo de una Mina” (Canfield, 2012), se describen las etapas de producción en el rubro minero que se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Procesos productivos mineros

Extracción	<ul style="list-style-type: none"> • Extracción de minerales desde la mina hasta la planta de procesos
Procesamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción de tamaño de partículas del mineral por medios físicos. • Incremento de la concentración de los metales por medios físico-químicos.

Fuente: “Etapas del Proceso Productivo de una Mina” (Canfield, 2012)

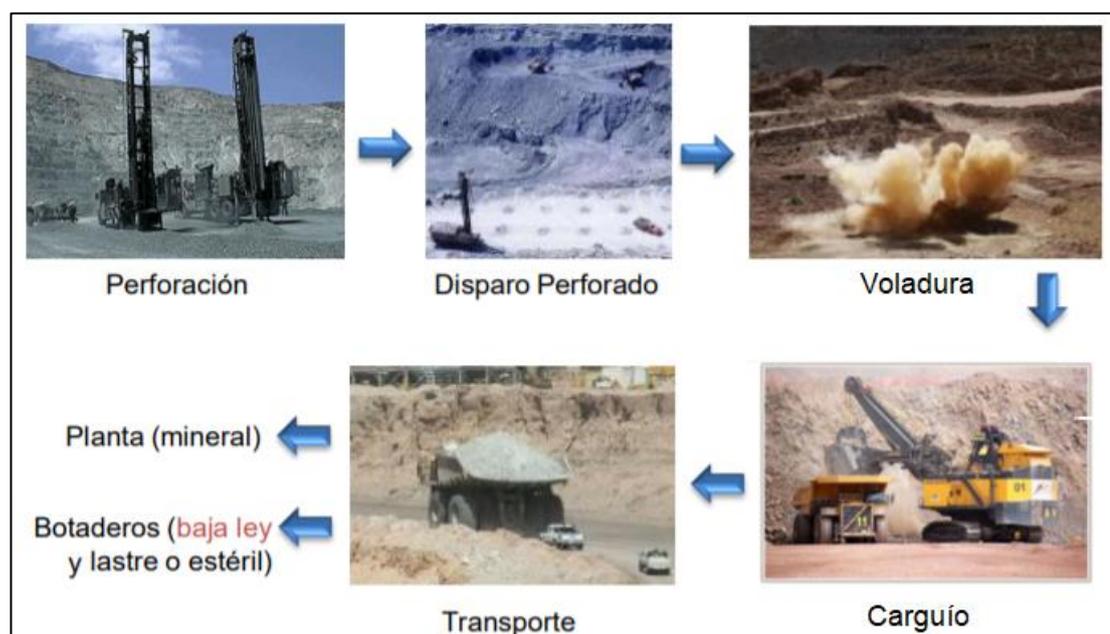
2.1.1.1. Extracción

Este proceso tiene como objetivo extraer la roca desde la mina para luego ser enviada a la planta de procesamiento metalúrgico. Existen dos formas de llevar a cabo este proceso: extracción a tajo abierto y extracción en minería subterránea. (Canfield, 2012)

2.1.1.1.1 Extracción a tajo abierto

Se desarrolla en la superficie del terreno y cuenta con dos subprocesos: 1) perforación y voladura, 2) carguío y transporte de rocas a planta de procesos metalúrgicos. En la Figura 2.1 se muestra el flujo del proceso de extracción a tajo abierto. (Canfield, 2012)

Figura 2.1. Flujo de proceso de extracción a tajo abierto.

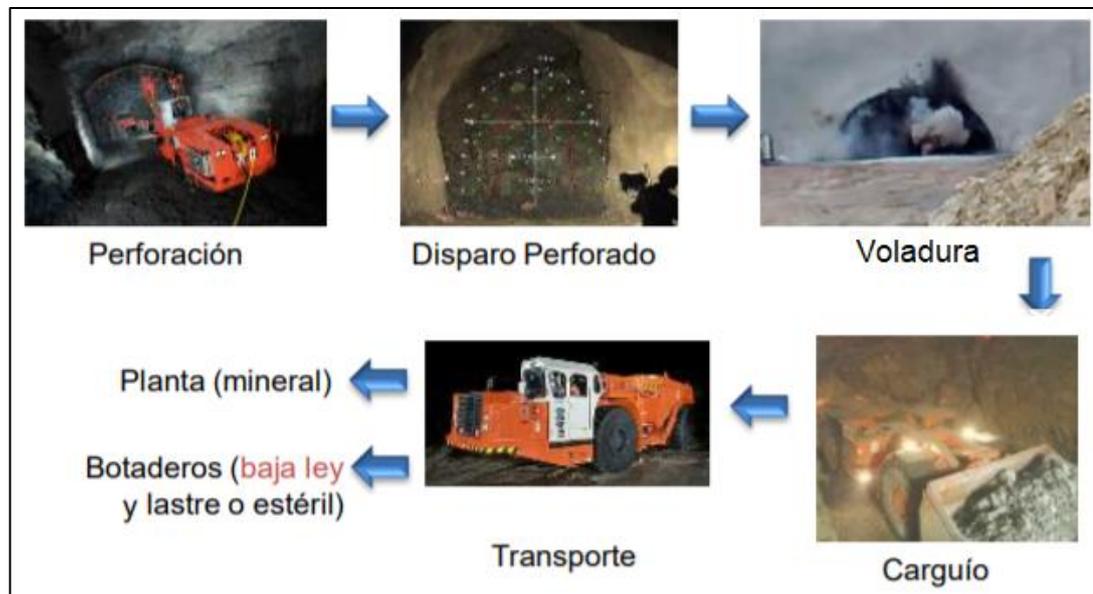


Fuente: "Etapas del Proceso Productivo de una Mina" (Canfield, 2012)

2.1.1.1.2 Extracción en minería subterránea

Se desarrolla en los socavones subterráneos y cuenta con dos subprocesos: 1) perforación y voladura, 2) carguío y transporte de rocas a planta de procesos metalúrgicos. En la Figura 2.2 se muestra el flujo del proceso de extracción subterráneo. (Canfield, 2012)

Figura 2.2. Flujo de proceso de extracción en mina subterránea



Fuente: "Etapas del Proceso Productivo de una Mina" (Canfield, 2012)

2.1.1.2. Procesamiento

En esta etapa, el mineral que proviene de la extracción es sometida a procesos que tienen por finalidad aumentar su concentración (contenido metálico) para obtener un producto apto para su comercialización.

A continuación, se describen los subprocesos de una planta concentradora de minerales por flotación: conminución y concentración. (Canfield, 2012)

2.1.1.2.1 Conminución

Es un proceso que tiene como objetivo reducir el tamaño de partícula del mineral que proviene de la extracción, hasta que la granulometría sea apta para el subproceso de concentración (Ver Figura 2.3). Tiene dos etapas:

- Chancado: En esta etapa se utiliza chancadoras para reducir el tamaño de la roca, luego se clasifica el mineral chancado a través de una

zaranda vibratoria, esta cuenta con una malla que tamiza la roca de menor tamaño hacia la siguiente etapa y recircula la roca de mayor tamaño hacia la chancadora hasta alcanzar el tamaño requerido por el proceso. El producto del chancado son los finos. (Canfield, 2012)

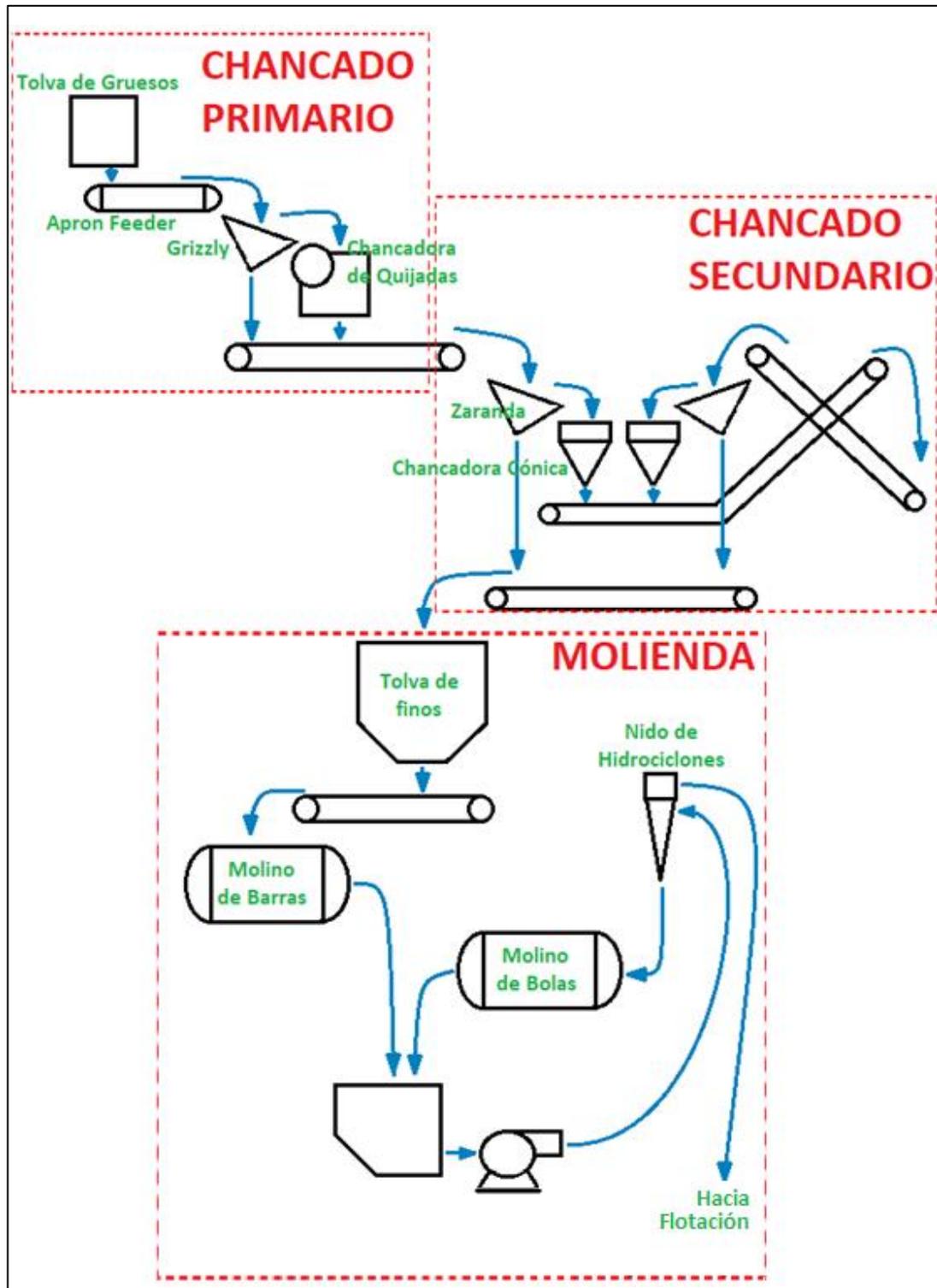
- Molienda: En esta etapa se reduce aún más el tamaño de la partícula mediante el uso de equipos rotatorios de gran tamaño que pueden ser molinos convencionales (barras y bolas) o molinos SAG. En esta etapa se agrega agua al proceso para enviar pulpa con mineral de baja granulometría hacia la etapa de flotación. (Canfield, 2012)

2.1.1.2.2 Concentración

Es el subproceso donde se realizan procesos físico químicos para obtener los concentrados de finos que finalmente son el producto final de la planta (Ver Figura 2.4). Tiene dos etapas:

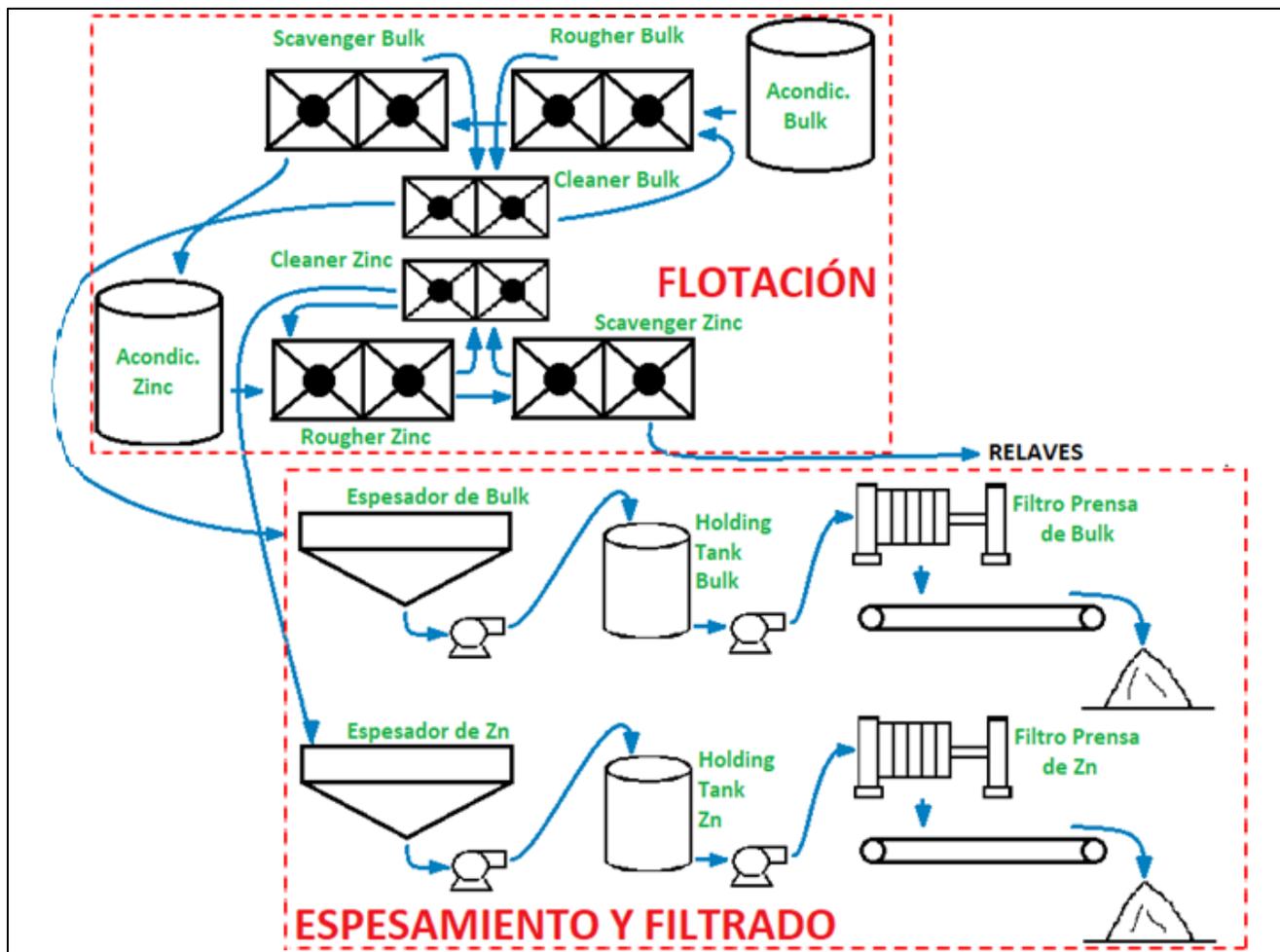
- Flotación: Es un proceso físico-químico de separación de minerales. La separación se consigue mediante la adición de reactivos de tipos colectores, depresores, activadores y modificadores, que tienen la función de inducir o inhibir la hidrofobicidad de las partículas en la pulpa de mineral y proporcionar estabilidad a la espuma. Las partículas minerales hidrofóbicas se adhieren a la burbuja, y la separación se produce al rebasar la espuma de la celda de flotación. (Canfield, 2012)
- Espesamiento y Filtrado: En esta etapa se separa el agua del concentrado de mineral mediante el uso de reactivos floculantes, luego los filtros prensa consiguen el concentrado seco. (Canfield, 2012)

Figura 2.3. Subproceso de conminución de una planta concentradora de minerales



Fuente: "Flotación de Minerales de Bulk-Zinc" (Metallurgy Corp 911, 2016)

Figura 2.4. Subproceso de concentración de una planta concentradora de minerales



Fuente: "Flotación de Minerales de Bulk-Zinc" (Metallurgy Corp 911, 2016)

2.1.2. Tipos de Celdas de Flotación

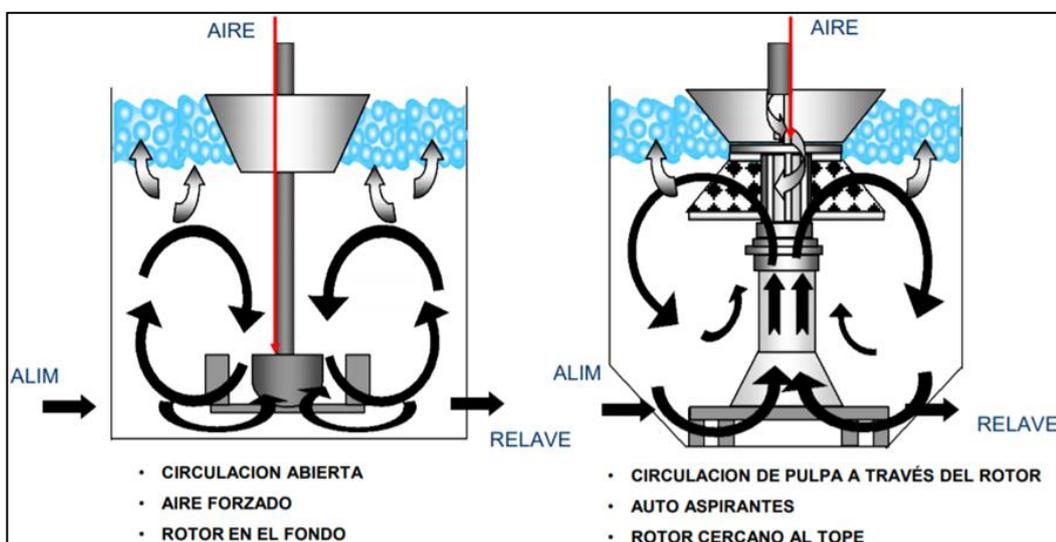
En el programa dirigido estudiantes de la Compañía Nacional del Cobre en Chile “Flotación: Burbujas de cobre” (Codelco Educa, 2018), se describe a las celdas de flotación como equipos que tienen por función mejorar la recuperación del mineral deseado. Para ello existen diversas variables que pueden ser manipuladas: La dosificación de aditivos, de agua, aireación, velocidad de agitación, apertura de válvulas, etc. las cuales influyen en las variables del proceso que están correlativamente relacionadas con la ley del concentrado, recuperación, nivel de la pulpa, pH, etc.

Existen tres tipos de celdas de flotación: mecánicas, neumáticas y columnas.

2.1.2.1. Celdas mecánicas

Son las más comunes, caracterizadas por poseer un sistema rotor-estator que permite la dispersión tanto de las partículas sólidas presentes en la pulpa como del aire que es ingresado (Ver Figura 2.5). (Yianatos, 2014)

Figura 2.5. Celdas de flotación mecánicas



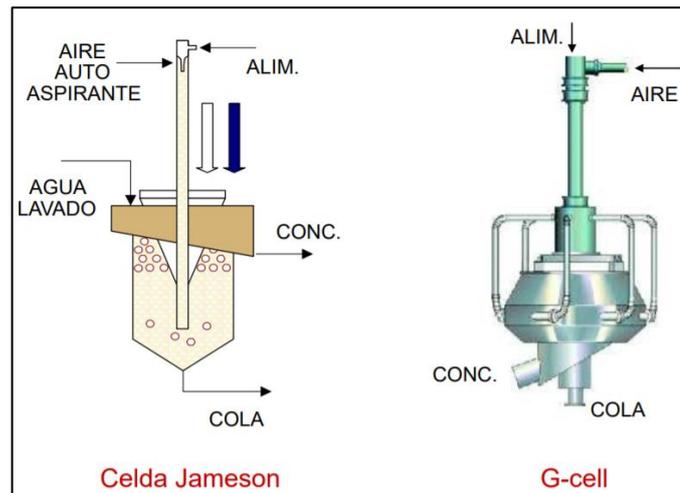
Fuente: “Caracterización de celdas de flotación de gran tamaño” (Yianatos, 2014)

2.1.2.2. Celdas neumáticas

Carecen de impulsor y utilizan aire comprimido para agitar y airear la pulpa.

Ver ejemplos de la Figura 2.6. (Yianatos, 2014)

Figura 2.6. Celdas de flotación neumáticas

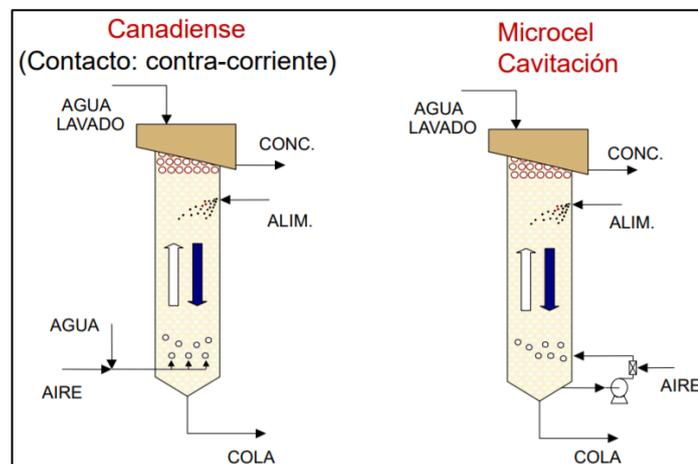


Fuente: "Caracterización de celdas de flotación de gran tamaño" (Yianatos, 2014)

2.1.2.3. Celdas de flotación tipo columna

Tienen un flujo en contracorriente de las burbujas de aire con la pulpa, y de las burbujas mineralizadas con el flujo de agua de lavado. (Yianatos, 2014)

Figura 2.7. Celdas de flotación tipo columna



Fuente: "Caracterización de celdas de flotación de gran tamaño" (Yianatos, 2014)

2.1.3. Sistemas de Control Automático

En el capítulo 9 del libro “Instrumentación Industrial” (Creus Solé, 2010), se describe el control de procesos en el inicio de la era industrial como un conjunto de acciones realizadas por los operarios mediante tanteos en base a su intuición y experiencia acumulada. Entonces, el operario era un “instrumento de control” que juzgaba la marcha del proceso según sus percepciones y decidía realizar cambios para corregir desviaciones. Más tarde, la necesidad de mayor calidad en los productos condujo al desarrollo de teorías que explicaran el funcionamiento de los procesos, que después derivaron en estudios analíticos que, a su vez, permitieron controlar las variables de interés en los procesos.

2.1.3.1. Características de un proceso

El control se realiza según el lazo de control típico que está conformado por el proceso, el transmisor, el controlador y el actuador, según la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Características de un proceso

Proceso	<ul style="list-style-type: none"> • Es un sistema que tiene como objetivo la transformación de un material bajo especificaciones determinadas.
Transmisor	<ul style="list-style-type: none"> • Es un elemento que mide la señal de salida del proceso y la transforma a una señal neumática, eléctrica o digital para enviarla al controlador.
Controlador	<ul style="list-style-type: none"> • Compara la salida del proceso con la referencia para determinar el error. • Estabiliza el proceso para eliminar o reducir el error.
Actuador	<ul style="list-style-type: none"> • Varía el flujo de control según el controlador para eliminar o reducir el error del proceso, a su vez, modifica el valor de la salida.

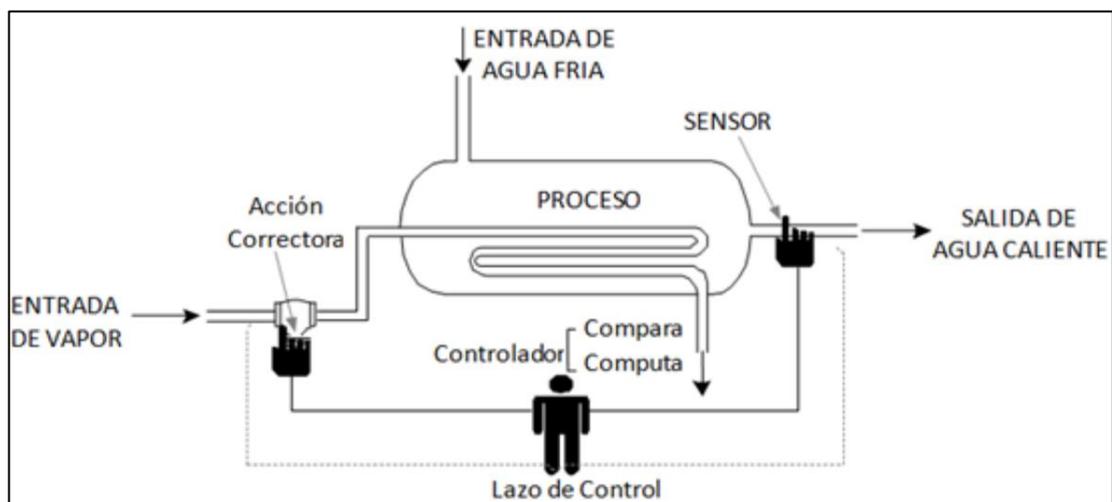
Fuente: “Instrumentación Industrial” (Creus Solé, 2010)

2.1.3.2. Tipos de Control

En la Figura 2.8 se muestra el control manual de un intercambiador de calor, para lo cual el operador puede hacer varias correcciones en la válvula de entrada de vapor para controlar la temperatura:

- Puede abrir o cerrar instantáneamente la válvula.
- Puede abrir o cerrar lentamente la válvula, a una velocidad constante mientras se mantenga una desviación.
- Puede abrir más la válvula cuando la desviación es mayor.
- Puede abrir la válvula a una razón constante por cada unidad de desviación.

Figura 2.8. Representación del control manual de un intercambiador de calor



Fuente: "Instrumentación Industrial" (Creus Solé, 2010)

Asimismo, el operador puede realizar otros métodos o combinaciones de las acciones de control mencionadas. En los sistemas de control industriales, se utiliza una o una combinación de los métodos de control que se mencionan en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Tipos de control

a. De dos posiciones (ON-OFF)	<ul style="list-style-type: none"> •El actuador o válvula de control tiene solamente dos posiciones (totalmente abierto o totalmente cerrado). normalmente existe una zona neutra en la que el actuador no cambia de posición. Se recomienda para procesos con velocidad de reacción lenta.
b. Flotante	<ul style="list-style-type: none"> •El actuador o válvula de control abre o cierra de forma continua con una velocidad constante que no depende del valor de la desviación. También se le puede llamar control proporcional de tiempo constante.
c. Proporcional de tiempo variable	<ul style="list-style-type: none"> •En este tipo de control sí existe una relación proporcional entre la velocidad de apertura o cierre de la válvula y el valor de la variable controlada.
d. Proporcional	<ul style="list-style-type: none"> •Existe una relación lineal entre la variable controlada y el elemento final de control (válvula de control o actuador). Es decir, la posición de la válvula es una copia inversa de la variable controlada.
e. Proporcional + integral	<ul style="list-style-type: none"> •Actúa cuando existe una desviación entre el punto de referencia y la variable controlada, integrando la desviación en el tiempo y sumándola a la acción proporcional.
f. Proporcional + derivativo	<ul style="list-style-type: none"> •Existe una relación lineal entre la velocidad de variación de la variable controlada y la posición del elemento de control (actuador o válvula de control). Es decir, actúa cuando existen cambios en la variable controlada.
g. Proporcional + integral + derivativo	<ul style="list-style-type: none"> •Resulta un controlador con las tres acciones de control: proporcional, integral y derivativo, que se explica más adelante el presente trabajo de investigación.

Fuente: "Instrumentación Industrial" (Creus Solé, 2010)

2.1.3.3. Controlador PID

En la tesis de maestría “Computación Evolutiva para la Búsqueda de Ecuaciones Óptimas para Sintonización de Controladores PID Discretos” (García García, 2011), se define al controlador PID (proporcional integral derivativo) como el algoritmo de control más usado en la industria.

Un controlador PID está compuesto por las tres acciones de control:

- 1) Acción proporcional: actúa como un compensador proporcional sobre la señal de error. En la ecuación (2.1) se muestra el comportamiento en el tiempo de un controlador proporcional:

$$u(t) = Ke(t) + u_b \quad (2.1)$$

- 2) Acción integral: tiene como función que la salida del proceso coincida con el estado estable. En (2.2) se representa la ecuación en el tiempo de un controlador proporcional integral.

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt \right) \quad (2.2)$$

- 3) Acción derivativa: tiene como propósito controlar la estabilidad del proceso en lazo cerrado. En (2.3) se representa la ecuación en el tiempo de un controlador proporcional derivativo.

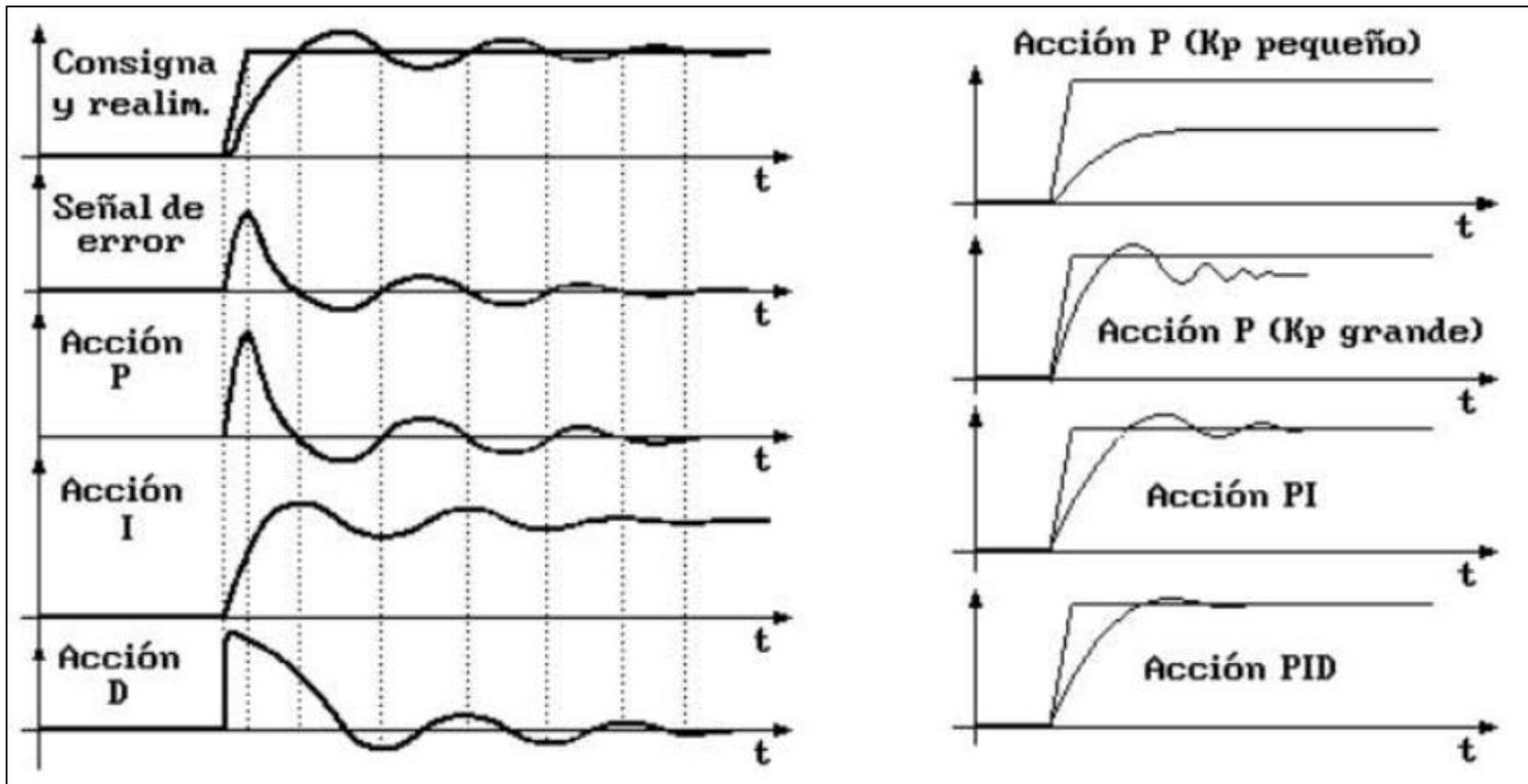
$$u(t) = K_p \left(e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.3)$$

Al combinar las tres acciones, tenemos la ecuación (2.4) del controlador PID.

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.4)$$

En la Figura 2.9 se muestra un resumen gráfico de los efectos de las acciones de control proporcional, integral y derivativa.

Figura 2.9. Efectos de las acciones de control proporcional, integral y derivativa

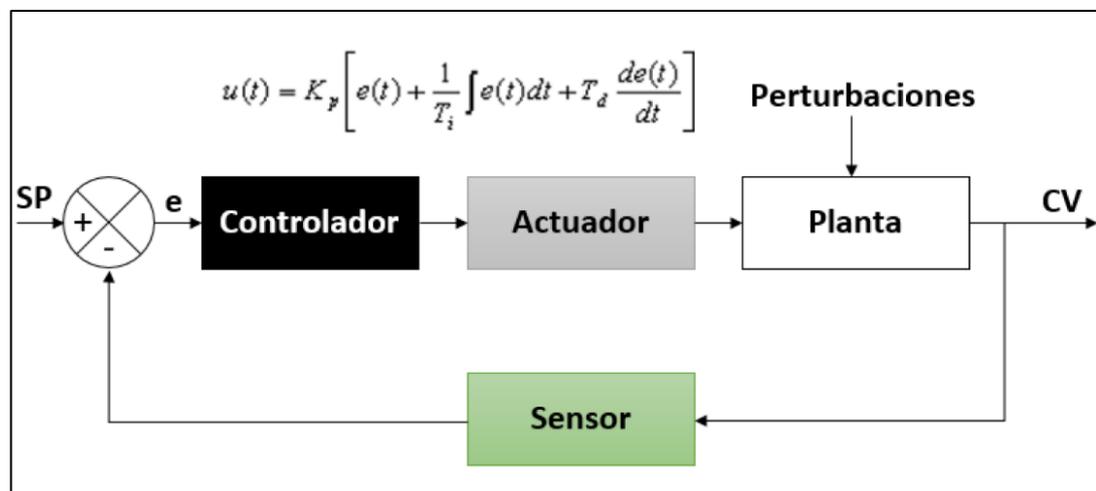


Fuente: "Instrumentación Industrial" (Creus Solé, 2010)

2.1.4. Lazo de Control de Nivel de Celdas de Flotación

En el libro “*Fundamentals of Process Control Theory*” (Murrill, 2012), se define lazo de control al sistema de control en lazo cerrado del nivel de pulpa en las celdas de flotación (ver Figura 2.10), mediante una variable manipulada que para el presente trabajo es la carrera de un actuador neumático lineal que está acoplado a la válvula tipo dardo para la salida de flujo de pulpa de una celda.

Figura 2.10. Diagrama de lazo de control de nivel en una celda de flotación



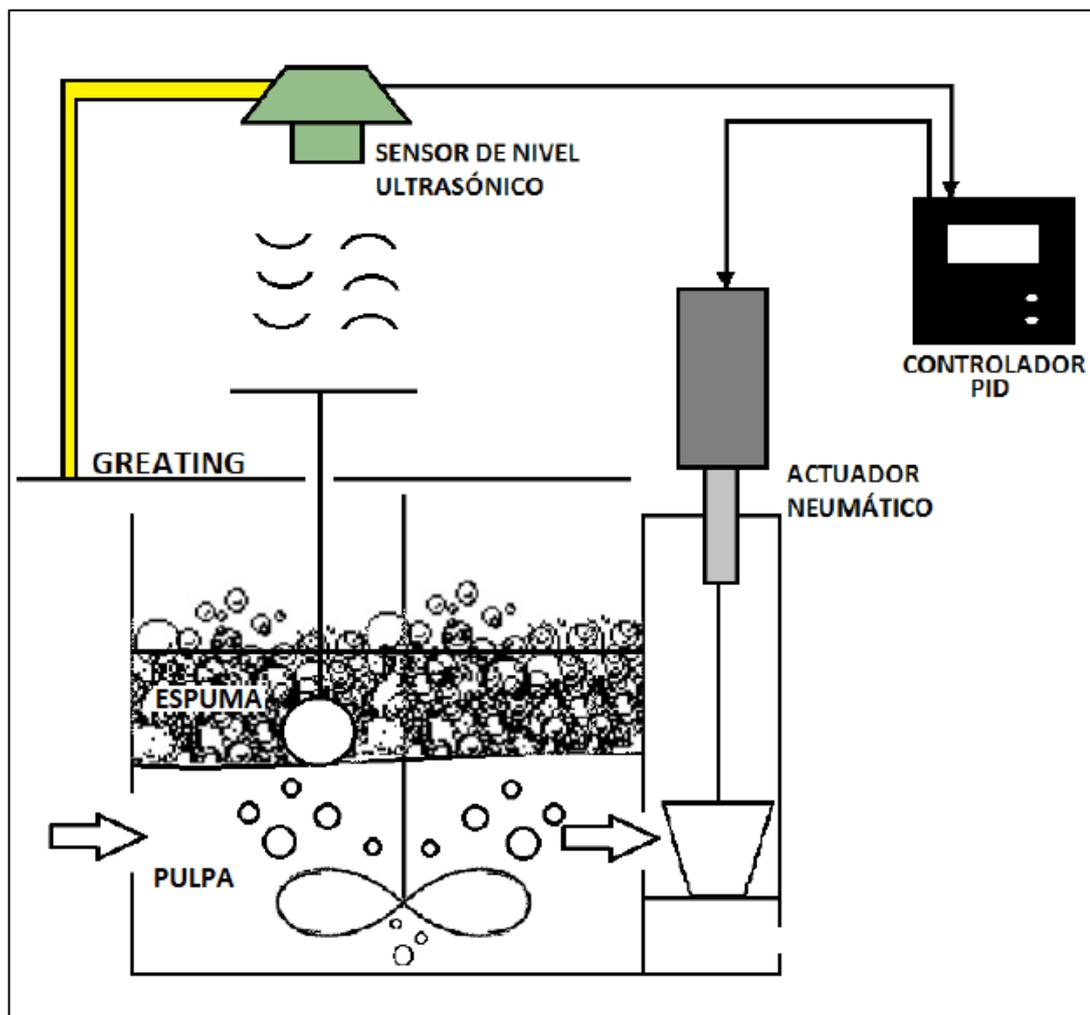
Fuente: “*Fundamentals of Process Control Theory*” (Murrill, 2012)

La variable controlada (nivel de pulpa) es medida a través de un sensor de nivel ultrasónico y esta medición es comparada con el valor deseado (*set point*), la diferencia entre estos dos parámetros (error) es usada como entrada para un controlador por retroalimentación que tiende a ser de tipo PID (proporcional integral derivativo) como en este caso.

Mientras lo descrito previamente se produce forma continua aparecen perturbaciones hacia el proceso que tienden a desviar la variable controlada. El controlador envía una señal a la variable manipulada para compensar todas

las perturbaciones que aparezcan. Además, si hay cambios en el valor deseado en el proceso (*set point*), la variable manipulada es también modificada por el controlador para generar la acción necesaria del actuador de la válvula dando y de esta manera producir los efectos a la variable controlada y esta se acerca con precisión al nuevo valor de nivel de pulpa requerido por la operación metalúrgica. En la Figura 2.11 se muestra un diagrama del sistema de control de nivel en una celda de flotación.

Figura 2.11. Sistema de control de nivel de pulpa en celda de flotación



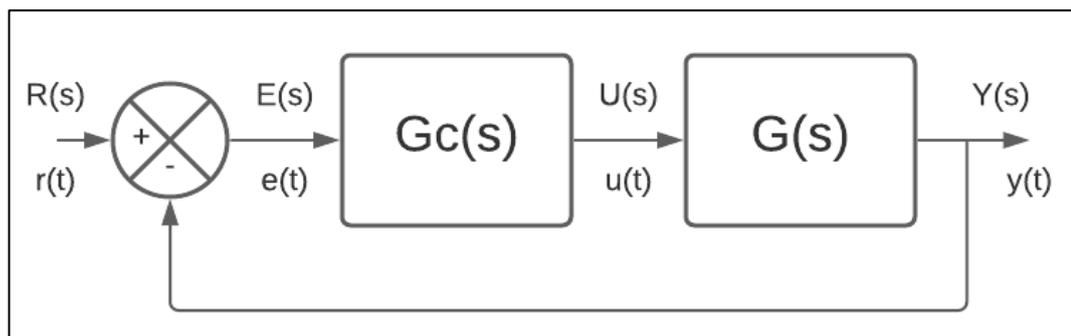
Fuente: "Fundamentals of Process Control Theory" (Murrill, 2012)

2.1.5. Auto-sintonización de lazos de control

En el artículo “Autosintonía de Controladores Basados en la Identificación de la Respuesta del Proceso” (Vargas Tamani, 2010), se explica el método de sintonización automática (autosintonización) para calcular de forma óptima los coeficientes (K_p , T_i y T_d) de un controlador PID.

Sea una planta automatizada con función de transferencia $G(s)$, la cual tiene como entrada a $u(t)$ y salida $y(t)$. En la Figura 2.12 se muestra el diagrama de bloques para el sistema de control de lazo cerrado de dicha planta que tiene a la función de transferencia $G_c(s)$ como representación del controlador.

Figura 2.12. Diagrama de bloques de una planta con control de lazo cerrado



Fuente: “Autosintonía de Controladores Basados en la Identificación de la Respuesta del Proceso” (Vargas Tamani, 2010)

Se tiene a la ecuación temporal (2.5), correspondiente a la acción de un controlador PID, que muestra a la señal de control $u(t)$ en función de la señal del error $e(t)$.

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.5)$$

La estructura paralela que se obtiene de (2.5) es la función de transferencia mostrada en la ecuación (2.6).

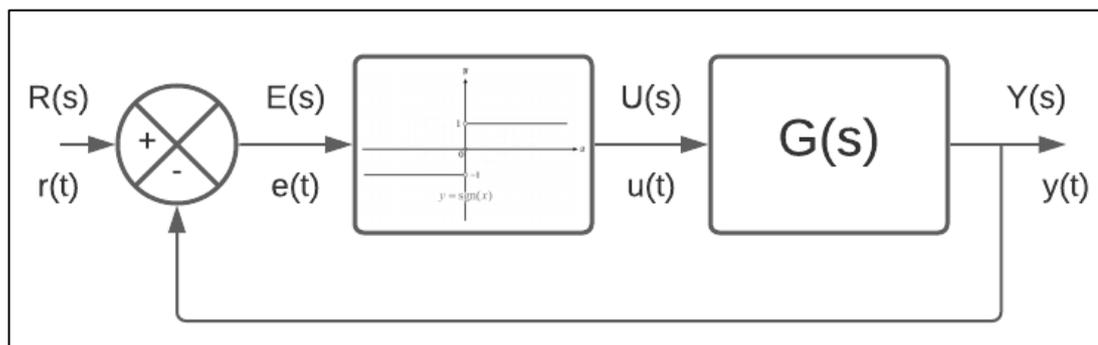
$$G_C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2.6)$$

De (2.6) se observa que la implementación de un PID independiza los términos proporcional, integral y derivativo.

2.1.5.1. Método de autosintonización por relé retroalimentado

Este método de autosintonización utiliza la estructura paralela de (2.6), requiere reemplazar al controlador $G_C(s)$ de la Figura 2.12 por un elemento no lineal con característica de relé como se muestra en la Figura 2.13 que realiza un control ON/OFF. (Vargas Tamani, 2010)

Figura 2.13. Diagrama de bloques del método de relé retroalimentado



Fuente: "Autosintonía de Controladores Basados en la Identificación de la Respuesta del Proceso" (Vargas Tamani, 2010)

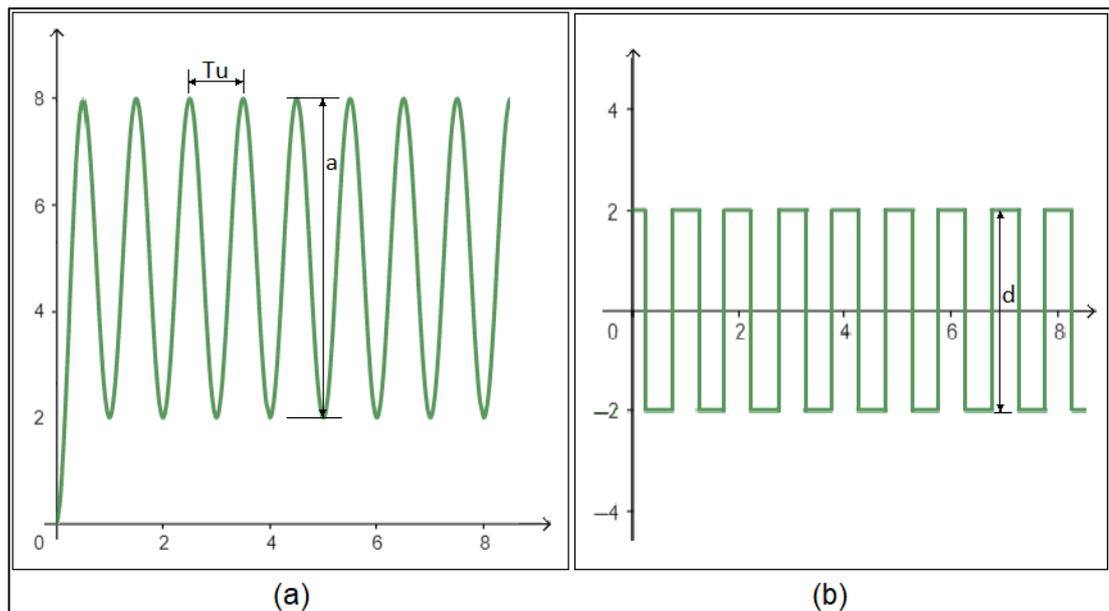
Este procedimiento busca obtener una oscilación con una frecuencia cercana a la crítica. Si se obtiene una oscilación permanente a la salida del sistema y a la salida del controlador, como lo mostrado en la Figura 2.14. Se mide los siguientes parámetros:

T_u : periodo de oscilación crítica

a : amplitud pico a pico de salida de la planta

d : amplitud pico a pico de señal de control

Figura 2.14. Respuestas de la prueba de relé retroalimentado. a) Respuesta de salida de la planta. b) Respuesta de salida de la señal de control.



Fuente: “Autosintonía de Controladores Basados en la Identificación de la Respuesta del Proceso” (Vargas Tamani, 2010)

Para sintonizar manualmente o autosintonizar un controlador PID, se utilizará la Tabla 2.4 que propusieron Ziegler y Nichols originalmente para sintonizar controladores PID mediante la búsqueda de la oscilación crítica.

Tabla 2.4. Cálculo de parámetros PID propuesto por Ziegler y Nichols

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_u$	-	-
PI	$0.4K_u$	$0.8T_u$	-
PID	$0.6K_u$	$0.5T_u$	$0.12T_u$

Fuente: “Ingeniería de control moderna” (Ogata, 2010)

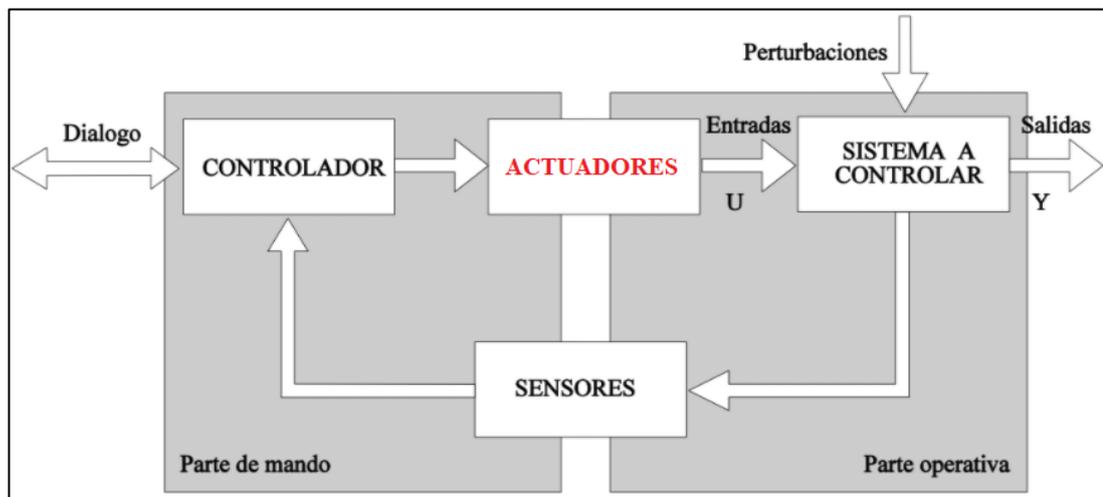
Donde el término K_u (ganancia crítica del sistema) se obtiene mediante la ecuación (2.7), que utiliza los parámetros de la Figura 2.14.

$$K_u = \frac{4d}{\pi a} \quad (2.7)$$

2.1.6. Actuadores Neumáticos

En el libro “Introducción a la Automatización Industrial” (Brunete, Herrero, & San Segundo, 2020), se describe a los actuadores (también llamados accionadores) como la interfaz entre las señales de salida del controlador y el mismo proceso industrial (ver Figura 2.15). Podemos distinguir tres tipos de actuadores según la energía con la que trabajan: eléctricos, neumáticos (aire) e hidráulicos (aceite).

Figura 2.15. Diagrama de bloques de un sistema de control



Fuente: “Introducción a la Automatización Industrial” (Brunete, Herrero, & San Segundo, 2020)

La tecnología neumática está muy extendida en los sistemas industriales por la facilidad y bajo precio que requiere la instalación si existe una línea

de alimentación de aire comprimido. Las características más importantes de los actuadores neumáticos son:

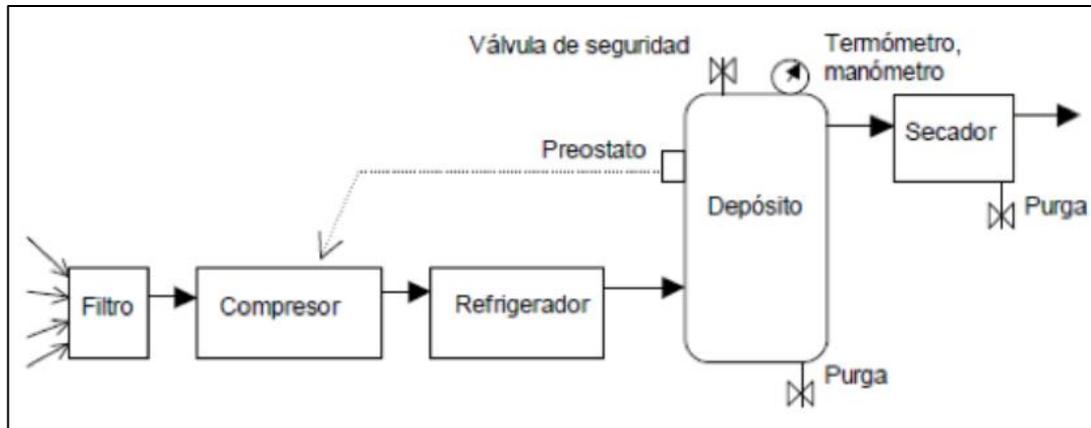
- Permiten transportar y almacenar fácilmente la potencia mecánica.
- No necesitan circuitos de retorno ya que la salida puede expulsarse al aire directamente.
- Son limpios y no contaminan.
- No son muy sensibles a la temperatura y son antideflagrantes.
- La fuerza que son capaces de desarrollar es limitada (depende de la presión y el caudal entre otras cosas).
- El hecho de que el fluido sea comprensible limita la calidad de los movimientos realizables.

2.1.6.1. Sistema de producción y distribución de aire comprimido

El aire de la atmósfera se comprime hasta elevar la presión, típicamente hasta 6 bares, y se distribuye hasta los elementos actuadores donde se expande (disminuye su presión) y genera movimiento. Para evitar que partículas sólidas y vapor de agua dañen la compresora, se somete al aire a tratamientos de filtrado, secado y lubricación. Se muestra un esquema típico de compresión de aire en la Figura 2.16. (Brunete, Herrero, & San Segundo, 2020)

Una vez generado el aire comprimido, se distribuye por las distintas áreas de la planta. Esta distribución se realiza a través de tuberías que pueden ser de plástico, cobre o acero.

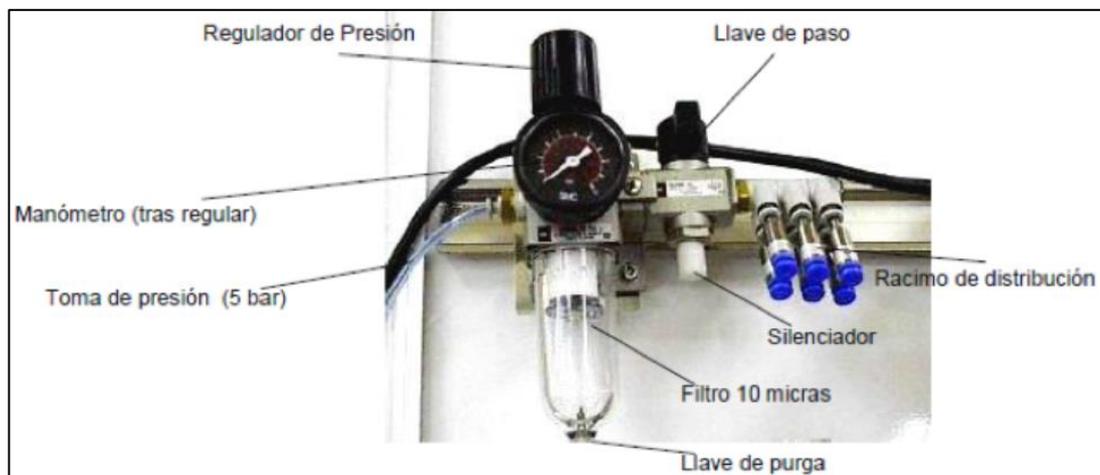
Figura 2.16. Sistema típico de producción de aire neumático



Fuente: "Introducción a la Automatización Industrial" (Brunete, Herrero, & San Segundo, 2020)

Antes de que el aire acceda a cada área de la instalación se instala una unidad de mantenimiento que incluye una serie de dispositivos de manera compacta, cuya misión es mejorar la calidad del aire acondicionándolo a las necesidades del área mediante regulación, filtrado y lubricación. En la Figura 2.17 se muestra una unidad de mantenimiento típica.

Figura 2.17. Unidad de mantenimiento neumática

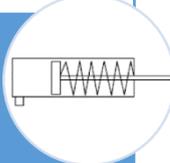
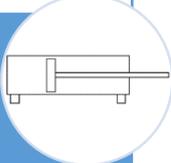


Fuente: "Introducción a la Automatización Industrial" (Brunete, Herrero, & San Segundo, 2020)

2.1.6.2. Cilindros neumáticos

Son unidades que transforman la energía potencial del aire comprimido en energía cinética o en fuerzas prensoras. Consisten en un cuerpo cilíndrico provisto de un émbolo o pistón. Los cilindros neumáticos más comunes son: de simple efecto y de doble efecto. En la Tabla 2.5 se describe a ambos tipos de cilindros. (Brunete, Herrero, & San Segundo, 2020)

Tabla 2.5. Cilindros de simple efecto y de doble efecto

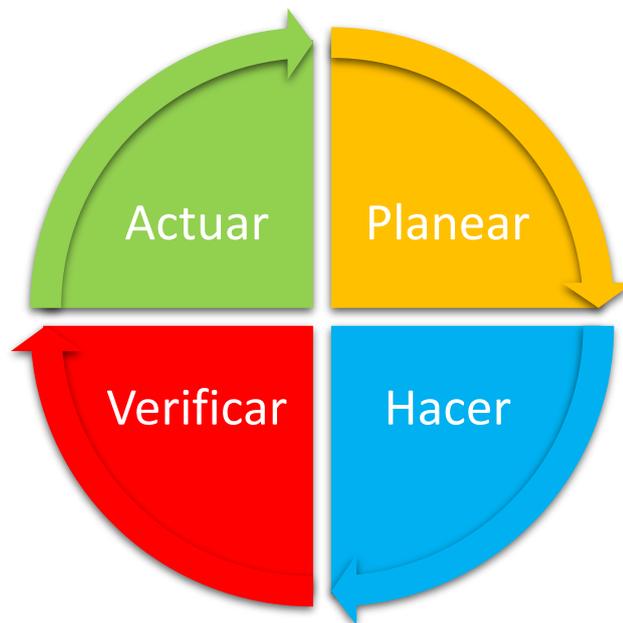
<ul style="list-style-type: none"> • En el cilindro neumático de simple efecto, el avance del émbolo se consigue por la presión del aire sobre el émbolo, mientras que el retroceso se realiza por la acción de un resorte. Este tipo de cilindros sólo desarrollarán esfuerzo en un sentido, puesto que el resorte apenas ejerce la fuerza necesaria para lograr el retorno del émbolo. 	<ul style="list-style-type: none"> • En este cilindro, tanto el avance como el retroceso del émbolo se consigue por efecto de la acción del aire comprimido sobre el mismo, y por tanto puede desarrollar fuerza en ambas direcciones.
<p>Cilindro de simple efecto</p> 	<p>Cilindro de doble efecto</p> 

Fuente: "Introducción a la Automatización Industrial" (Brunete, Herrero, & San Segundo, 2020)

2.1.7. Ciclo PHVA

En el libro “Ciclo de la Calidad PHVA” (Zapata Gómez, 2015), se describe al ciclo PHVA (planear, hacer, verificar y actuar) como un procedimiento de pasos a seguir para la solución de problemas y los proyectos de mejora (ver Figura 2.18).

Figura 2.18. Ciclo PHVA



Fuente: “Ciclo de la Calidad PHVA” (Zapata Gómez, 2015)

El ciclo PHVA, también conocido como ciclo de Deming, es de gran utilidad para estructurar y ejecutar proyectos de mejora en los diferentes niveles de una organización. Se desarrolla un plan (planear) de manera objetiva y profunda, éste se aplica en escala pequeña o sobre una prueba (hacer), se evalúa si los resultados del ensayo son los esperados (verificar) y, finalmente, se actúa en consecuencia dependiendo de los resultados obtenidos ya sea generalizando el plan a mayor escala o reestructurando un nuevo ciclo (actuar).

Cuando se reúne un equipo con el propósito de ejecutar un proyecto para resolver un problema importante y recurrente, antes de proponer soluciones y aventurar acciones es necesario contar con información y seguir un método que incremente la probabilidad de éxito. De esta manera, la planeación, el análisis y la reflexión se harán un hábito y gracias a ello se reducirán las acciones por reacción. En este sentido se propone que los equipos de mejora sigan el ciclo PHVA junto con los ocho pasos para solucionar un problema que a continuación se describen y que se sintetizan en la Tabla 2.6. (Gutierrez Pulido, 2010)

Tabla 2.6. Ocho pasos para solucionar un problema mediante PHVA

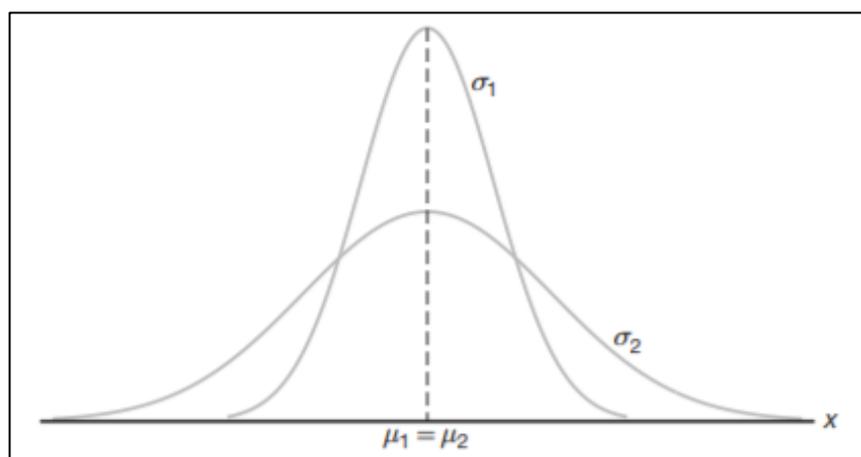
Etapa	Paso núm.	Nombre del paso	Posibles técnicas para usar
Planear	1	Definición y análisis de la magnitud del problema	Pareto, hojas de verificación, histograma, cartas de control
	2	Búsqueda de todas las causas posibles	Observar el problema, lluvia de ideas, diagrama de Ishikawa
	3	Determinación de la causa raíz	Pareto, estratificación, diagrama de Ishikawa, diagrama de dispersión
	4	Consideración de las medidas de solución	Por qué . . . Necesidad Qué . . . Objetivo Dónde . . . Lugar Cuánto . . . tiempo y costo Cómo . . . Plan
Hacer	5	Puesta en práctica las medidas de solución	Seguimiento del plan elaborado en el paso anterior e involucramiento a los afectados
Verificar	6	Revisión de los resultados	Histograma, Pareto, cartas de control, hojas de verificación
Actuar	7	Prevención de la recurrencia del problema	Estandarización, inspección, hoja de verificación
	8	Conclusiones	Revisar y documentar el procedimiento realizado y planificar los pasos futuros

Fuente: "Calidad Total y Productividad" (Gutierrez Pulido, 2010)

2.1.8. Variabilidad de Procesos

En el libro “Calidad Total y Productividad” (Gutierrez Pulido, 2010) Se explica el concepto de variabilidad desde el punto de vista del Control Estadístico de Procesos. Se describe como una característica de los procesos, según la cual, no hay dos resultados iguales ya que para su elaboración participan diversos factores como son las llamadas 6M: materiales, máquinas, medición, mano de obra (personas), métodos y medio ambiente. Si bien dos muestras presentan la misma media en sus resultados, son las medidas de dispersión varianza y desviación estándar las que nos indican el desempeño respecto a la variabilidad del proceso. En la Figura 2.19 se muestra cómo dos distribuciones con una misma media tienen desviaciones estándar diferentes, en este caso se determina que la distribución de mayor desviación estándar (σ_2) tiene una variabilidad más alta.

Figura 2.19. Distribuciones normales con la misma media $\mu_1 = \mu_2$, y diferentes desviaciones estándar $\sigma_1 < \sigma_2$



Fuente: “Probability and Statistics for Engineers and Scientists” (Walpole, Myers, Myers, & Ye, 2012)

2.2. MARCO CONCEPTUAL

2.2.1. Banco

Para el presente trabajo de suficiencia, el banco es un conjunto de celdas de flotación que realizan la misma función dentro del proceso, el traspaso de pulpa de una celda a otra es similar a los vasos comunicantes, por lo cual, trabajan con el mismo lazo de control de nivel.

2.2.2. Bulk

Para el presente trabajo de suficiencia, el bulk es el mineral en bruto que contiene como componente principal en masa al plomo, además contiene cobre en menor medida y plata. Aunque la plata no sea representativa en masa, define el valor comercial del bulk.

2.2.3. Celda

Para el presente trabajo de suficiencia, la celda es el equipo donde se produce el proceso de flotación de minerales con el objetivo de separar el mineral valioso para la compañía del resto que se descarga a los relaves.

2.2.4. Cola

Para el presente trabajo de suficiencia, la cola es la capa inferior de una celda de flotación que se mantiene como pulpa de mineral que no es de provecho económico para la planta y pasa hacia la siguiente celda. Las colas de la última celda se descargan hacia los relaves.

2.2.5. Concentrado

Para el presente trabajo de suficiencia, el concentrado es el producto final de una planta concentradora, que resulta de las etapas de espesamiento y

filtrado. Tiene un alto porcentaje del mineral que lo determina. Ej. El concentrado de zinc contiene Zn en un 60 % en masa.

2.2.6. Espuma

Para el presente trabajo de suficiencia, la espuma es la capa superior de material que ha flotado en una celda, en esta parte se adhiere el mineral que se considera de valor para la planta concentradora y rebosa hacia el proceso de espesamiento.

2.2.7. Filtro

Para el presente trabajo de suficiencia, el filtro es el componente analógico o digital que reduce el nivel de ruido en la lectura desde el controlador de una señal medida del proceso.

2.2.8. Posicionador

Para el presente trabajo de suficiencia, el posicionador es un componente electroneumático que regula la carrera del vástago de un cilindro actuador de acuerdo con la señal de salida que recibe desde el controlador del proceso.

2.2.9. Recuperación

Para el presente trabajo de suficiencia, la recuperación es el término que se utiliza cuando el mineral de beneficio es aprovechado con su extracción desde la pulpa bruta mediante el proceso de flotación. Ej: Los minerales que se *recuperan* en la flotación de la planta polimetálica de nuestra unidad de análisis son plomo y zinc.

CAPÍTULO 3. HIPÓTESIS Y OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

3.1. HIPÓTESIS

H1: La optimización del ajuste de parámetros de control de nivel de celdas de flotación, usando el método PHVA, reducirá la variabilidad en el proceso.

3.2. VARIABLES DE LA HIPÓTESIS

Las variables que intervienen en la aplicación de la investigación son las siguientes:

3.2.1. Variable dependiente

V.D.1: Variabilidad del proceso de flotación.

3.2.2. Variable independiente

V.I.1: Parámetros en los lazos de control de nivel en celdas de flotación en unidades mineras, basado en PHVA.

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA

4.1. TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

El presente trabajo de investigación es de naturaleza cuantitativa porque se contrasta la hipótesis formulada y tiene una finalidad de comprobación, además de que se basa en datos objetivos que se analizan estadísticamente; sin embargo, también es naturaleza cualitativa al utilizar el método PHVA para identificar causas, elaborar un plan de acción y ejecutar los pasos secuenciales del ciclo para analizar una propuesta de reducción de variabilidad en el proceso. El proyecto se desarrolla mediante el método hipotético-deductivo debido a que utiliza registros históricos para conseguir los datos y verificar la hipótesis. El diseño de la investigación es explicativo debido a que se establece la existencia de relaciones entre las variables para comprobar una causalidad y se mide el grado de estas relaciones.

4.2. UNIDAD DE ANÁLISIS

La investigación utiliza como unidad de análisis a los registros de datos históricos del desempeño del lazo de control en celdas de flotación, obtenidos del DCS (*Distributed Control System*) de la planta concentradora Alpamarca de la Compañía Minera Chungar S.A.C. perteneciente al grupo Volcan, que determinan las propiedades de estudio de la presente investigación.

4.3. MATRIZ DE CONSISTENCIA

Título: Optimización de ajuste de parámetros de control de nivel, en celdas de flotación, para reducir la variabilidad del proceso, usando el método PHVA.

En la Tabla 4.1 se muestra el desarrollo de la matriz de consistencia.

Tabla 4.1. Matriz de Consistencia

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLES		INDICADORES	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS
			DEPENDIENTE	INDEPENDIENTE		
<p>Problema General ¿En qué medida el ajuste de parámetros de control de nivel, en celdas de flotación, incide en la variabilidad del proceso?</p>	<p>Objetivo General Optimizar el ajuste de parámetros en los lazos de control de nivel de celdas de flotación en plantas concentradoras de minerales para reducir la variabilidad del proceso, basado en el método PHVA.</p>	<p>Hipótesis General H1: La optimización de parámetros de control de nivel de celdas de flotación, basado en el método PHVA, reducirá la variabilidad en el proceso.</p>	<p>V.D.1: Variabilidad del proceso de flotación.</p>	<p>V.I.1: Parámetros en los lazos de control de nivel en celdas de flotación en unidades mineras, basado en PHVA.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Desviación estándar del nivel de pulpa en la celda menor a 1.5. - Desviación estándar de la carrera del actuador neumático que manipula la válvula tipo dardo menor a 5. 	<ul style="list-style-type: none"> - Diagrama de Ishikawa - Registro de datos históricos del DCS - Tabla de recopilación de parámetros de lazo de control

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 5. DESARROLLO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

El desarrollo del presente trabajo se basa en el ciclo de la calidad PHVA y sigue los pasos para solucionar un problema de la Tabla 2.6, que es el mismo procedimiento que está descrito en el diagrama de flujo de la Figura 5.1.

5.1. PLANEAR (P)

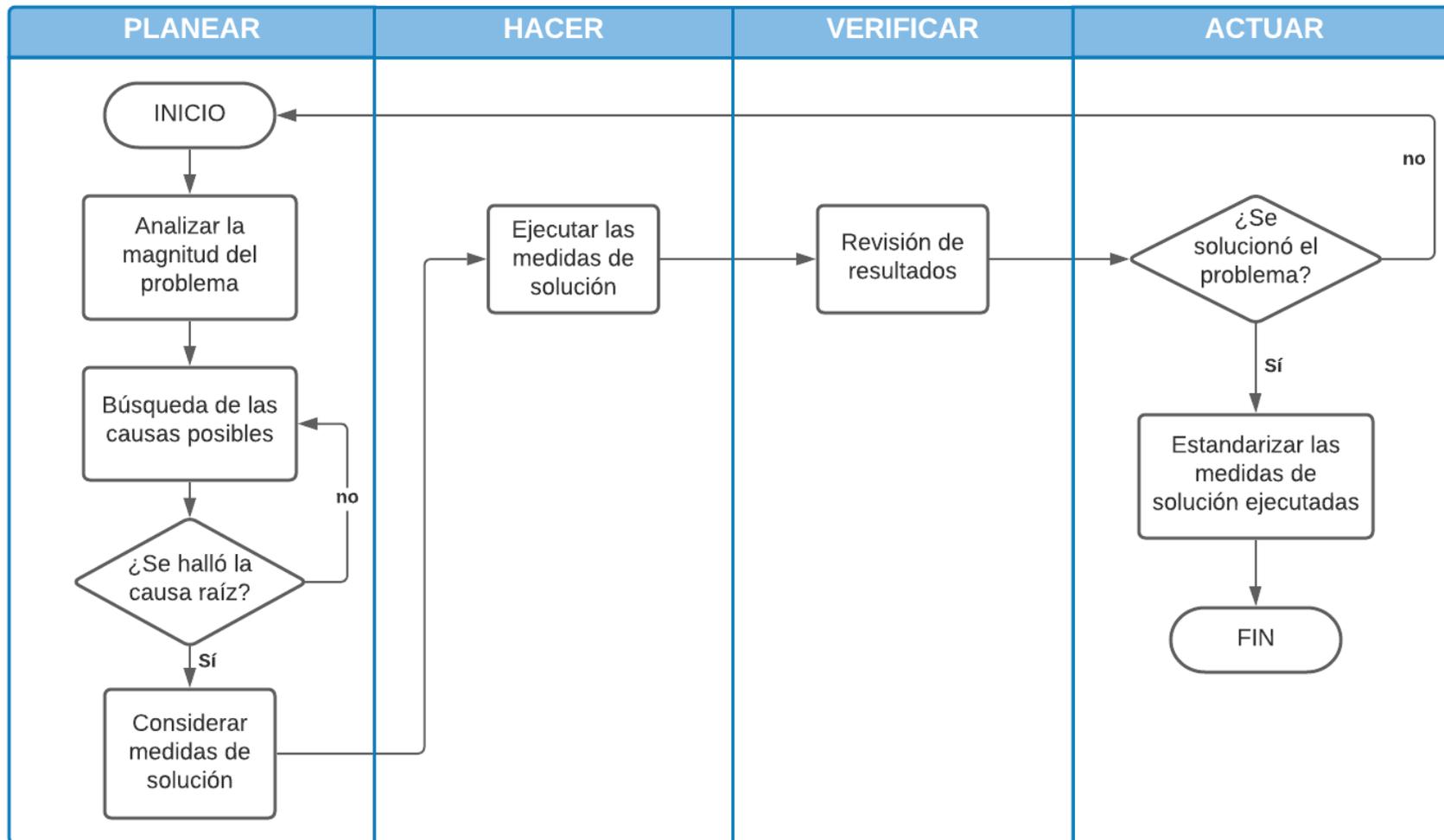
En esta etapa se realiza un diagnóstico del problema, se analiza las causas y se establece acciones que se llevan a cabo en las siguientes etapas del ciclo PHVA con el fin de proponer una solución.

5.1.1. Análisis de la Magnitud del Problema

Se elige las celdas de flotación a analizar. En este caso se estudian a los lazos de control de nivel de los bancos de celdas rougher-scavenger y cleaner bulk. Con el objetivo de caracterizar el funcionamiento del control en los tres tipos de celdas que existe para un tipo de concentrado (en este caso bulk).

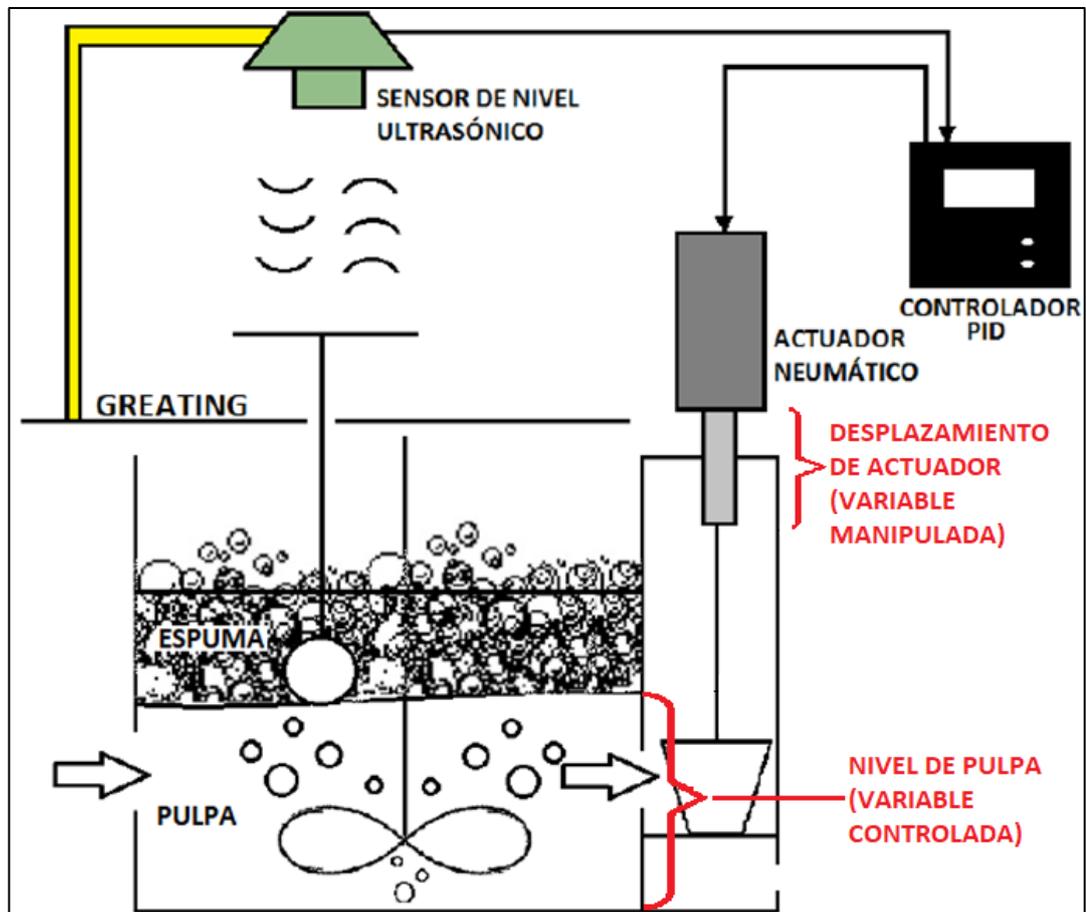
Se recopila la información de las celdas de flotación a analizar, luego de ello se calculan las medidas de dispersión estadísticas (media y desviación estándar) de cada conjunto de datos y se representa gráficamente (línea de tendencia y gráfica de densidad de distribución normal). Esto se hace para cada banco de celdas y se utiliza los datos de la variable controlada (nivel de pulpa de las celdas), el valor de referencia de nivel y también el valor de la variable manipulada (desplazamiento del actuador neumático), según los puntos indicados en la representación que se muestra en la Figura 5.2.

Figura 5.1. Diagrama de flujo del desarrollo del trabajo de investigación



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5.2. Sistema de control de nivel de pulpa en celda de flotación



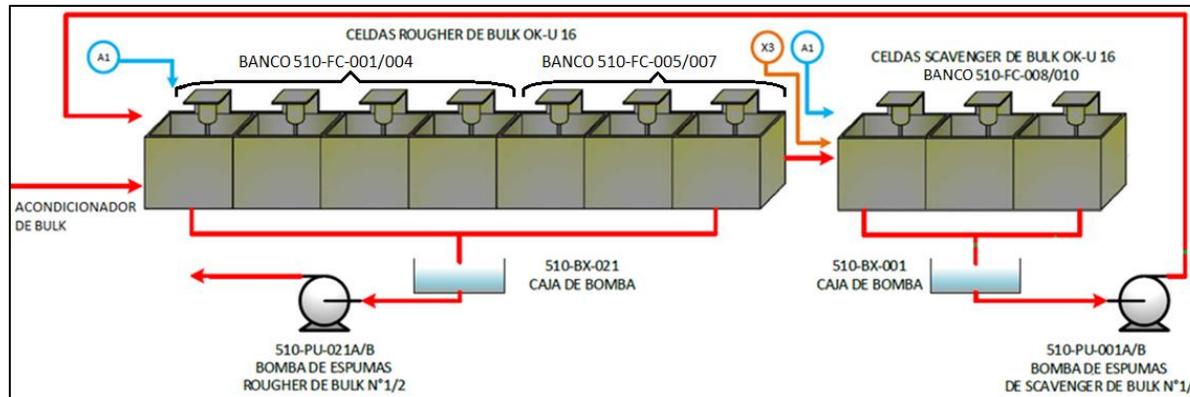
Fuente: "Fundamentals of Process Control Theory" (Murrill, 2012)

5.1.1.1. Celdas de flotación rougher, scavenger y cleaner de bulk

En la Figura 5.3 se muestra el esquema de las celdas de flotación rougher y scavenger de bulk de la unidad de análisis de la presente investigación. Se analizará los bancos rougher 510FC001-004 y scavenger 510FC008-010.

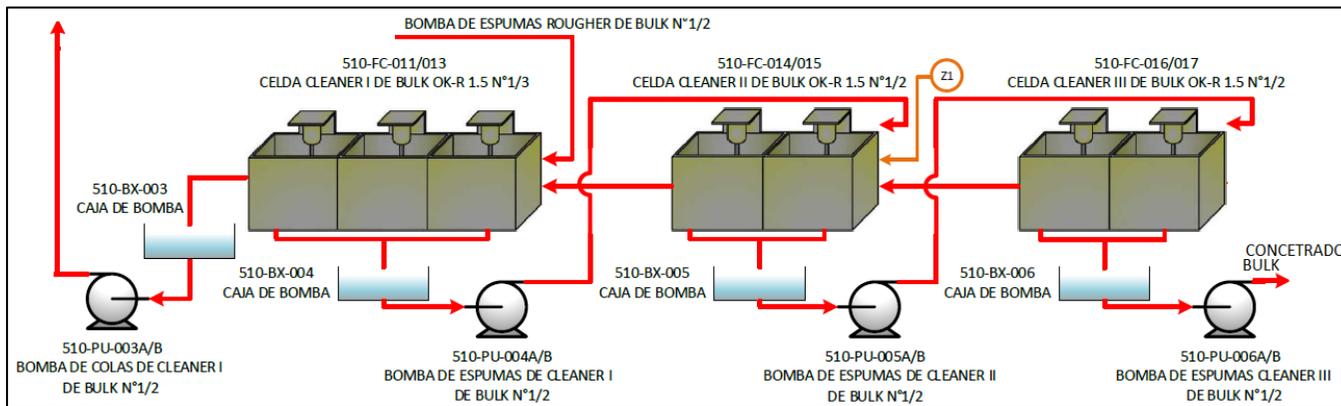
En la Figura 5.4 se muestra el esquema de las celdas de flotación cleaner de bulk de la unidad de análisis del presente trabajo de investigación. Se analizará el banco cleaner 510FC011-013.

Figura 5.3. Bancos de celdas de flotación rougher y scavenger de bulk



Fuente: "Flowsheet de procesos" (Planta Concentradora Alpamarca, 2018)

Figura 5.4. Bancos de celdas cleaner de bulk



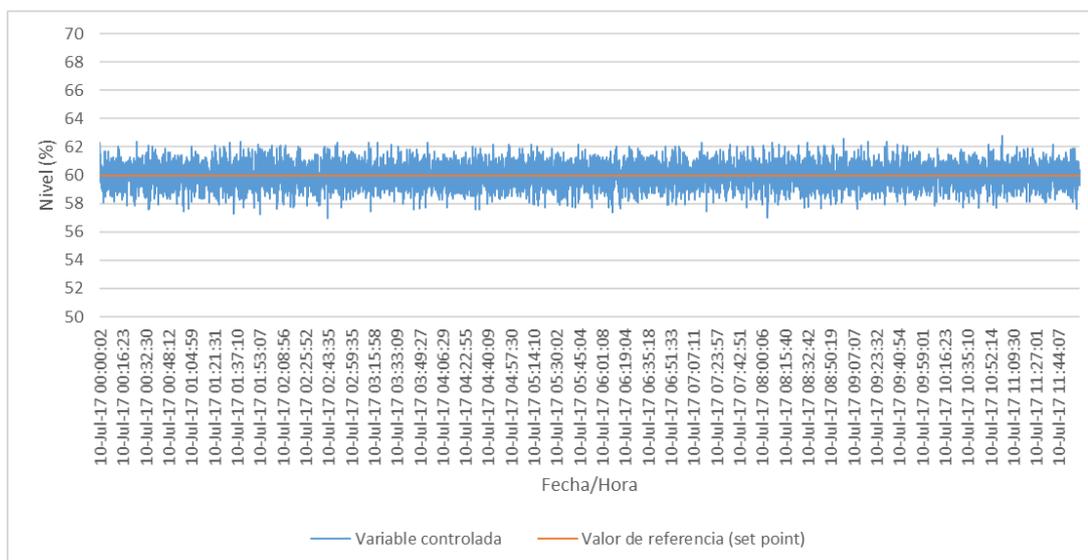
Fuente: "Flowsheet de procesos" (Planta Concentradora Alpamarca, 2018)

5.1.1.1.1 Banco de celdas rougher de bulk 510FC001-004

En la Figura 5.5 se muestra la gráfica del nivel de pulpa del banco de celdas 510FC001-004 antes de ejecutar las acciones de solución al problema, mientras que en la Figura 5.7 se muestra la gráfica del desplazamiento del actuador de la válvula dardo que está a la salida del banco de celdas.

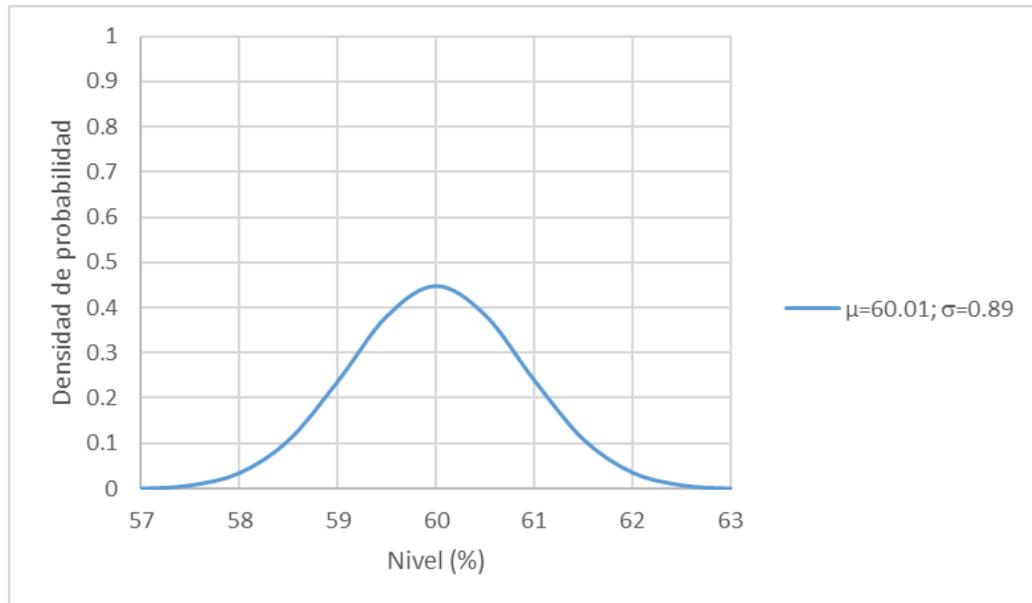
En la Figura 5.6 y en la Figura 5.8 se muestran las gráficas de densidad de distribución normal para visualizar la variabilidad del proceso desde un enfoque estadístico.

Figura 5.5. Gráfica de variable controlada y valor de referencia de banco de celdas rougher de bulk 510FC001-004



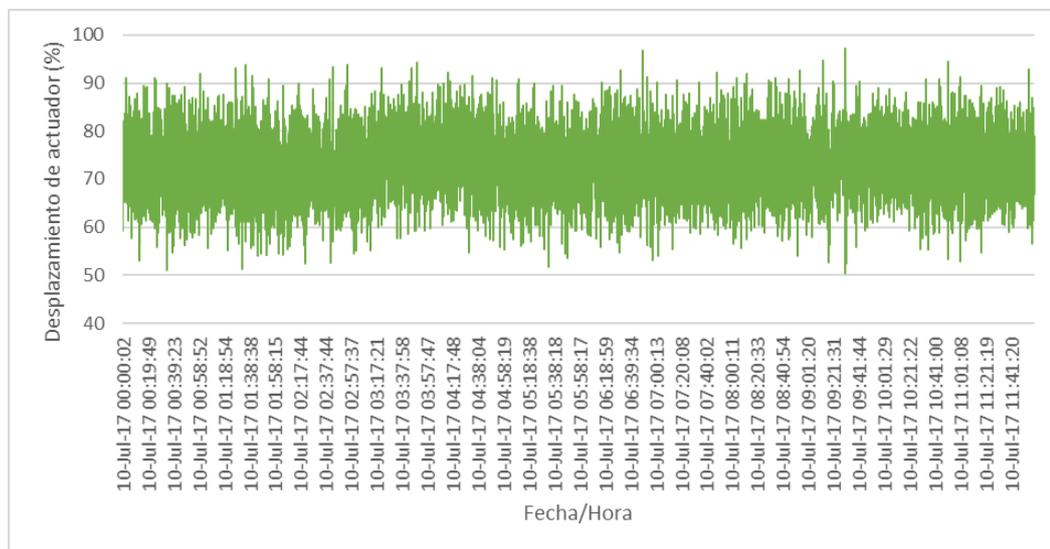
Fuente: Control de nivel de celdas. (Planta Concentradora Alparmarca, 2017)

Figura 5.6. Gráfica de densidad de distribución normal de nivel de celdas 510FC001-003



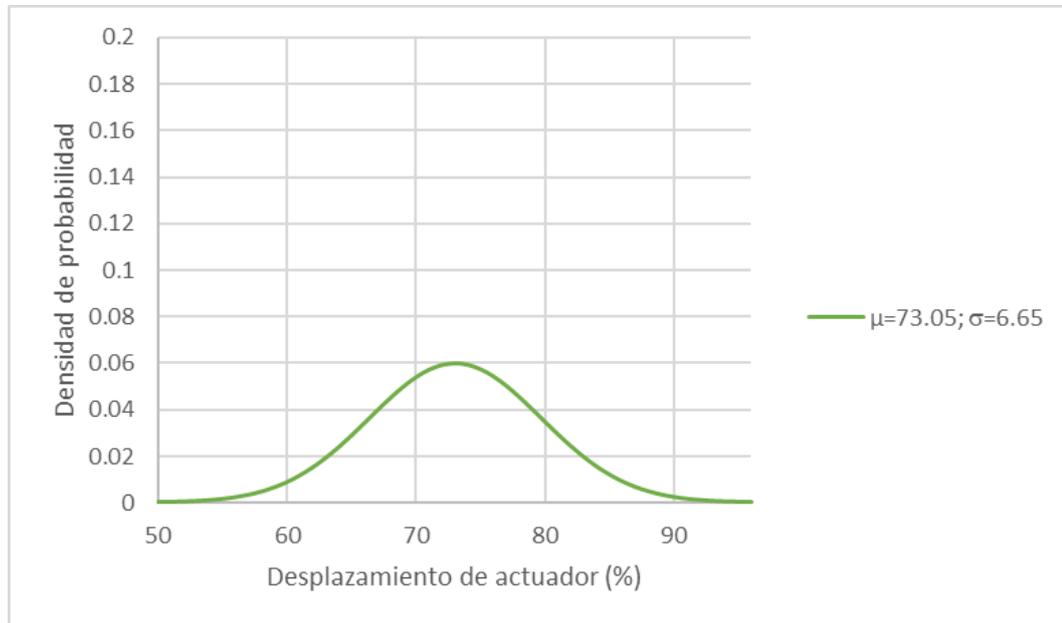
Fuente: Control de nivel de celdas. (Planta Concentradora Alparmarca, 2017)

Figura 5.7. Gráfica de variable manipulada (desplazamiento de actuador) 510-UPC-001



Fuente: Control de nivel de celdas. (Planta Concentradora Alparmarca, 2017)

Figura 5.8. Gráfica de densidad de distribución normal de variable manipulada (desplazamiento de actuador) 510-UPC-001



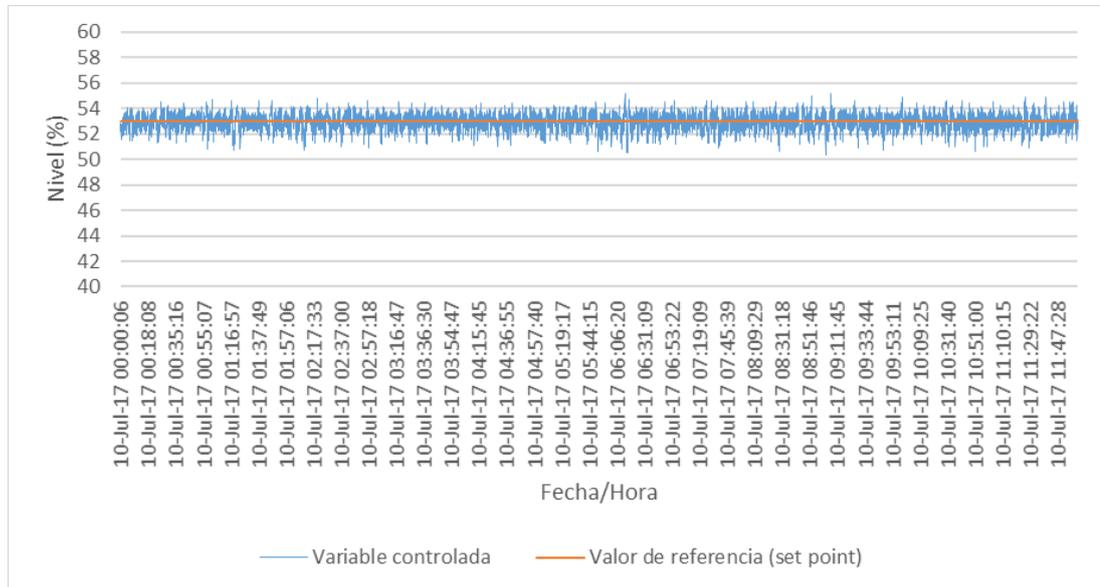
Fuente: Control de nivel de celdas. (Planta Concentradora Alparmarca, 2017)

5.1.1.1.2 Banco de celdas scavenger de bulk 510FC008-010

En la Figura 5.9 se muestra la gráfica del nivel de pulpa del banco de celdas 510FC008-010 antes de ejecutar las acciones de solución al problema, mientras que en la Figura 5.11 se muestra la gráfica del desplazamiento del actuador de la válvula dardo que está a la salida del banco de celdas.

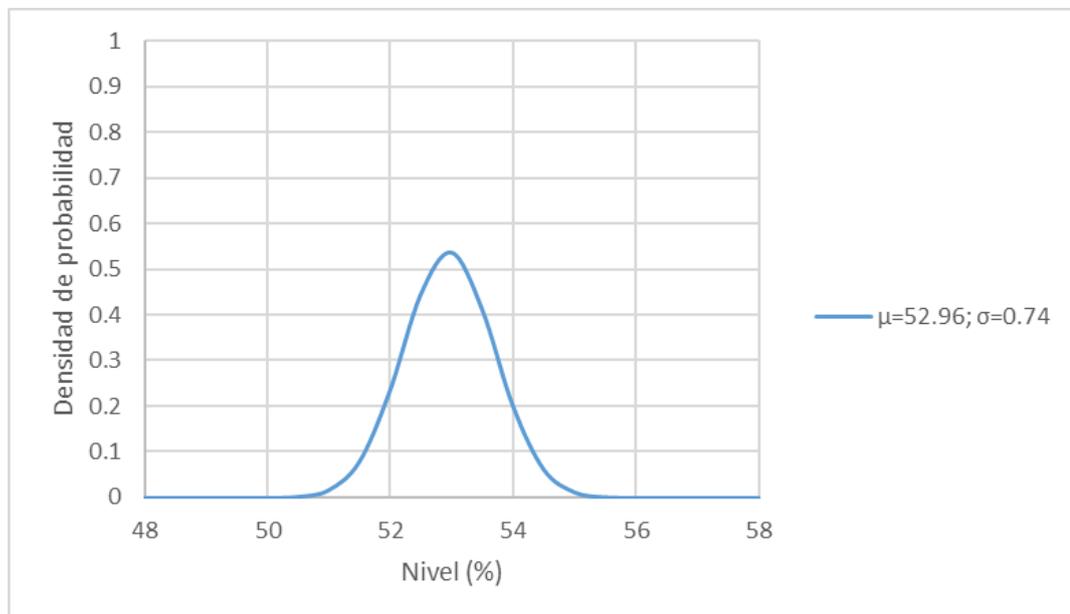
En la Figura 5.10 y en la Figura 5.12 se muestran las gráficas de densidad de distribución normal para visualizar la variabilidad del proceso desde un enfoque estadístico.

Figura 5.9. Gráfica de variable controlada y valor de referencia de banco de celdas scavenger de bulk 510FC008-010



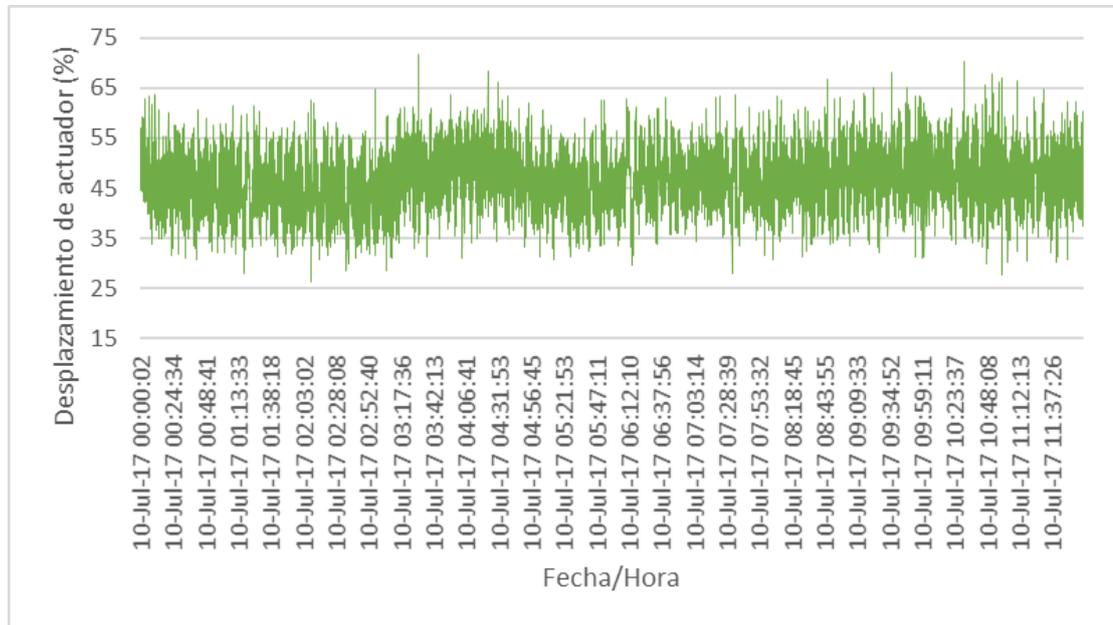
Fuente: Control de nivel de celdas. (Planta Concentradora Alparmarca, 2017)

Figura 5.10 Gráfica de densidad de distribución normal de nivel de celdas 510FC008-010



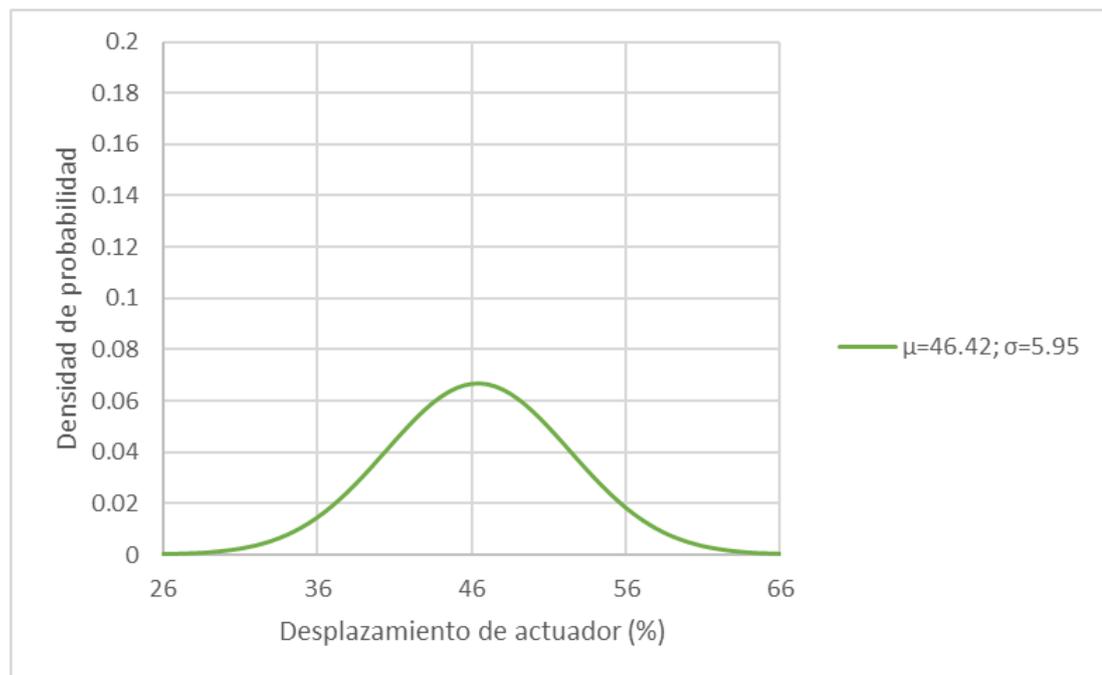
Fuente: Control de nivel de celdas. (Planta Concentradora Alparmarca, 2017)

Figura 5.11. Gráfica de variable manipulada (desplazamiento de actuador) 510-UPC-003



Fuente: Control de nivel de celdas. (Planta Concentradora Alparmarca, 2017)

Figura 5.12. Gráfica de densidad de distribución normal de variable manipulada (desplazamiento de actuador) 510-UPC-003



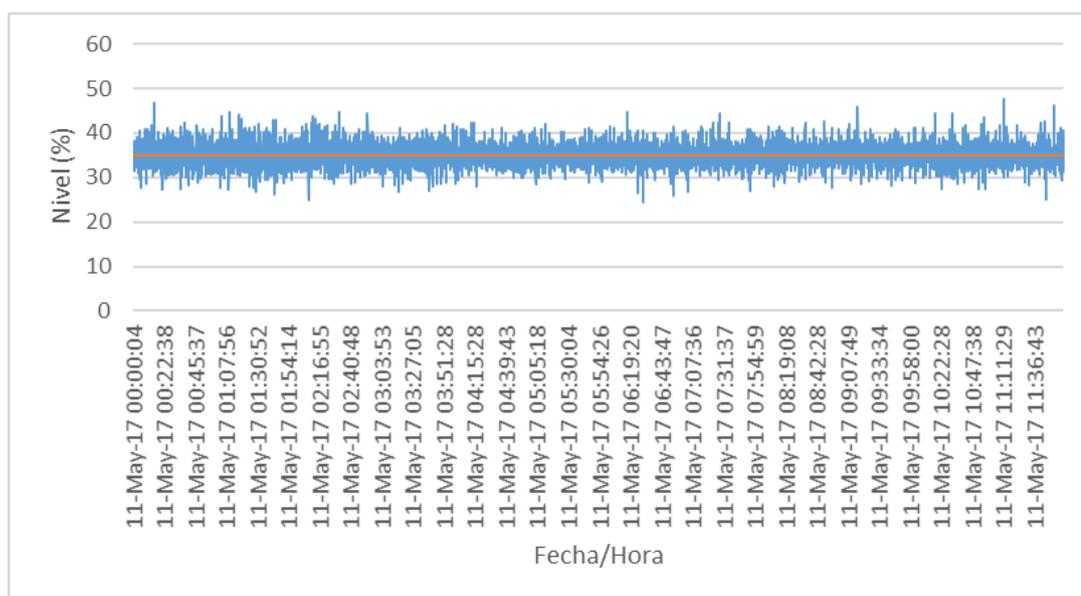
Fuente: Control de nivel de celdas. (Planta Concentradora Alparmarca, 2017)

5.1.1.1.3 Banco de celdas cleaner I de bulk 510FC011-013

En la Figura 5.13 se muestra la gráfica del nivel de pulpa del banco de celdas 510FC0011-013 antes de ejecutar las acciones de solución al problema, mientras que en la Figura 5.15 se muestra la gráfica del desplazamiento del actuador de la válvula dardo que está a la salida del banco de celdas.

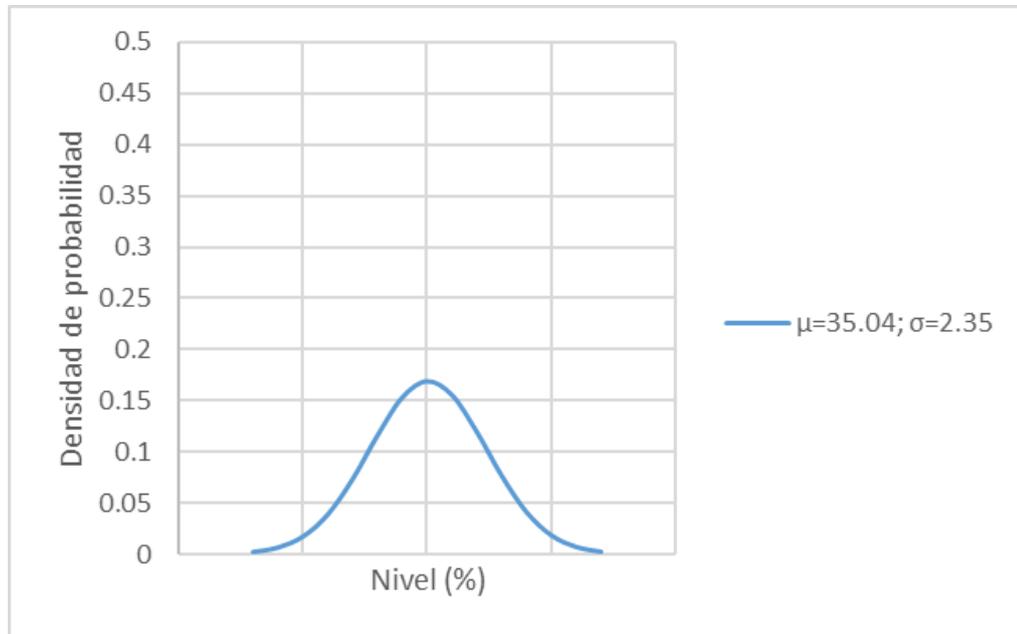
En la Figura 5.14 y en la Figura 5.16 se muestran las gráficas de densidad de distribución normal para visualizar la variabilidad del proceso desde un enfoque estadístico.

Figura 5.13. Gráfica de variable controlada y valor de referencia de banco de celdas scavenger de bulk 510FC011-013



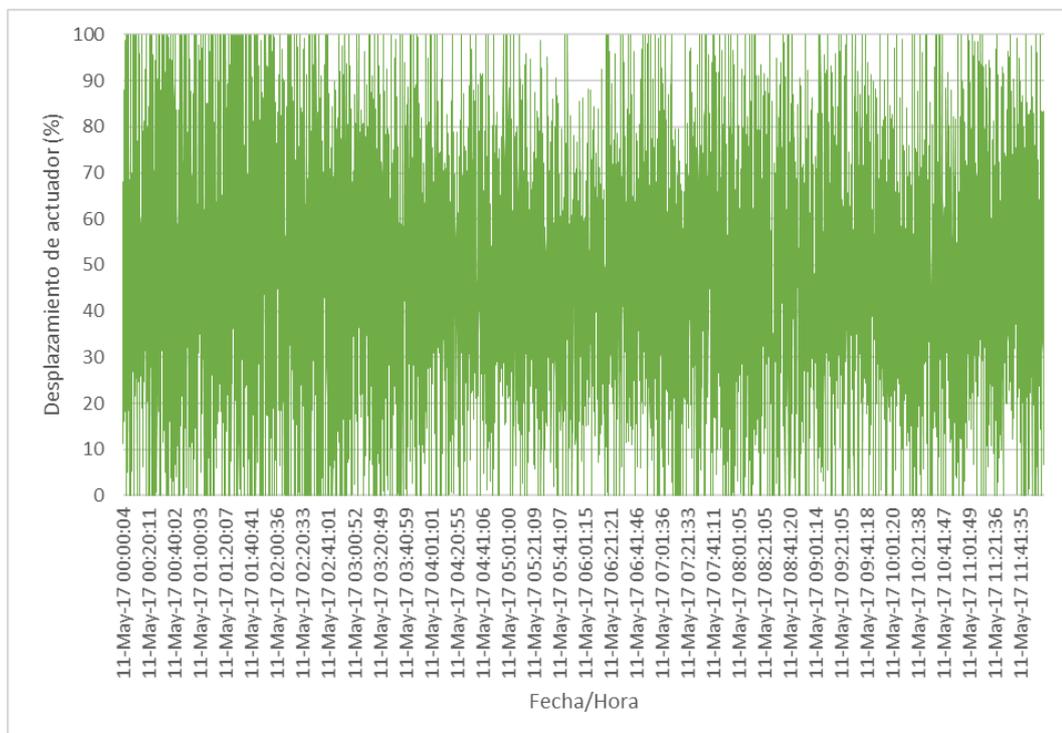
Fuente: Control de nivel de celdas. (Planta Concentradora Alparmarca, 2017)

Figura 5.14. Gráfica de densidad de distribución normal de nivel de celdas 510FC011-013



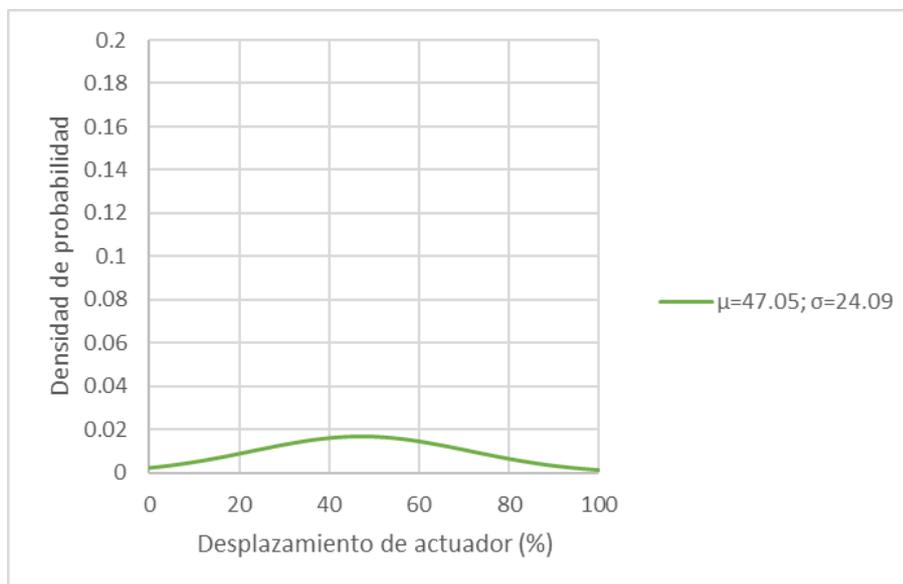
Fuente: Control de nivel de celdas. (Planta Concentradora Alparmarca, 2017)

Figura 5.15. Gráfica de variable manipulada (desplazamiento de actuador) 510-UPC-004



Fuente: Control de nivel de celdas. (Planta Concentradora Alparmarca, 2017)

Figura 5.16. Gráfica de densidad de distribución normal de variable manipulada (desplazamiento de actuador) 510-UPC-004



Fuente: Control de nivel de celdas. (Planta Concentradora Alpamarca, 2017)

5.1.1.1.4 Resumen de indicadores de variabilidad celdas 510FC001-010

En la Tabla 5.1 se muestra el resumen de los indicadores de variabilidad expresados en la desviación estándar (σ) de los datos que se han obtenidos.

Tabla 5.1. Tabla de resumen de datos estadísticos - celdas rougher, scavenger y cleaner de bulk 510FC001-010

Banco de celdas	Indicador de variabilidad - Desviaciones estándar (σ)	
	Variable controlada (nivel de pulpa)	Variable manipulada (desplazamiento de actuador)
510FC001-004	0.89	6.65
510FC008-010	0.74	5.95
510FC011-013	2.35	24.09

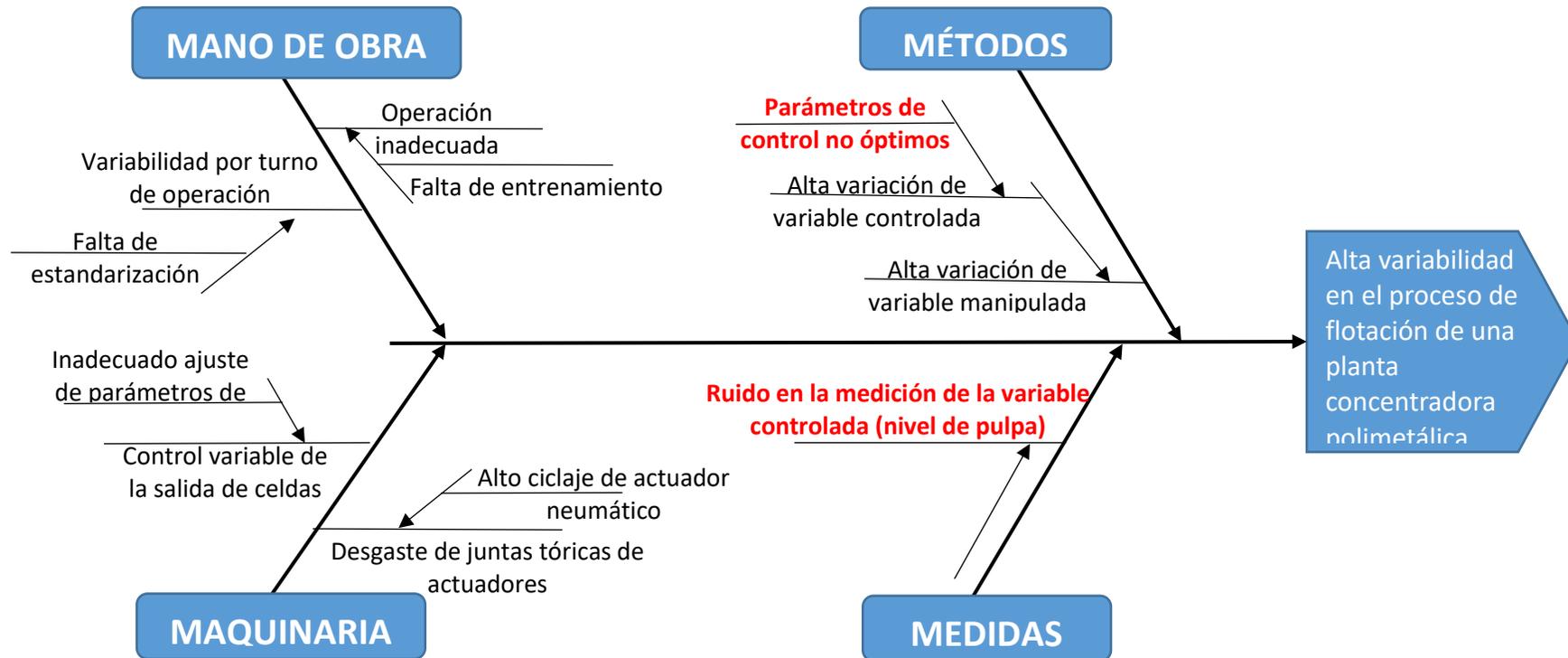
Fuente: Elaboración propia.

Se observa que la variabilidad del nivel de pulpa en las celdas es baja (menor a 1 para los tres casos). Mientras que la variabilidad del desplazamiento del actuador es relativamente alta.

5.1.2. Búsqueda de las causas posibles

Se utiliza el diagrama de Ishikawa (Figura 5.17), se toman en cuenta los siguientes aspectos: mano de obra, métodos, maquinaria y medidas. Para hallar una causa raíz se hace la pregunta “¿por qué?” hasta que la causa tenga solución obvia.

Figura 5.17. Diagrama de Ishikawa



Fuente: Elaboración propia.

5.1.3. Definición de la causa raíz

Se determina las causas raíz del problema planteado en la investigación mediante el diagrama de Ishikawa de la Figura 5.17.

El presente trabajo de investigación aborda las observaciones asociadas a la disciplina de ingeniería de control, dejando las otras causas subyacentes para las otras especialidades que correspondan. Estas causas para evaluar son: “Inadecuado ajuste de los parámetros de control de nivel de las celdas de flotación” y “Ruido en la medición de la variable controlada (nivel de pulpa)”.

5.1.4. Consideración de las medidas de solución

Se considera un plan de acción (Tabla 5.2) para las causas que se han determinado para la solución del problema. Se toma en cuenta a las recomendaciones de la Tabla 2.6. Ocho pasos para solucionar un problema para la descripción de las acciones que se ejecutarán.

Tabla 5.2. Plan de acción para la solución del problema

Causa	Qué acción tomar	Por qué	Cómo
Inadecuado ajuste de parámetros de control de nivel de las celdas de flotación.	Se realizará la sintonización de los lazos de control de nivel.	La sintonización de un lazo de control permite que mejore su desempeño en variabilidad.	Se utiliza la función de autoajuste (auto-tuning) del controlador PID.
Ruido en la medición de la variable controlada (nivel de pulpa).	Se colocará un filtro digital a la señal del sensor de nivel de pulpa.	El filtro digital para la señal del sensor de nivel eliminará la medición de ruido.	Se utiliza la función de filtro de señal de entrada (<i>PV input filter</i>) del controlador PID.

Fuente: Elaboración propia

5.2. HACER (H)

5.2.1. Ejecución de las medidas de solución

En este paso se ejecutan las acciones consideradas en el plan de acción que se elaboró según la Tabla 5.2 según el diagrama de flujo de la Figura 5.18. En ambas acciones se utilizan las funciones del controlador PID que ejecuta el control de nivel de las celdas de flotación, en la unidad de análisis de la presente investigación se tiene al controlador UT35A de Yokogawa.

5.2.1.1. Controlador UT35A de Yokogawa

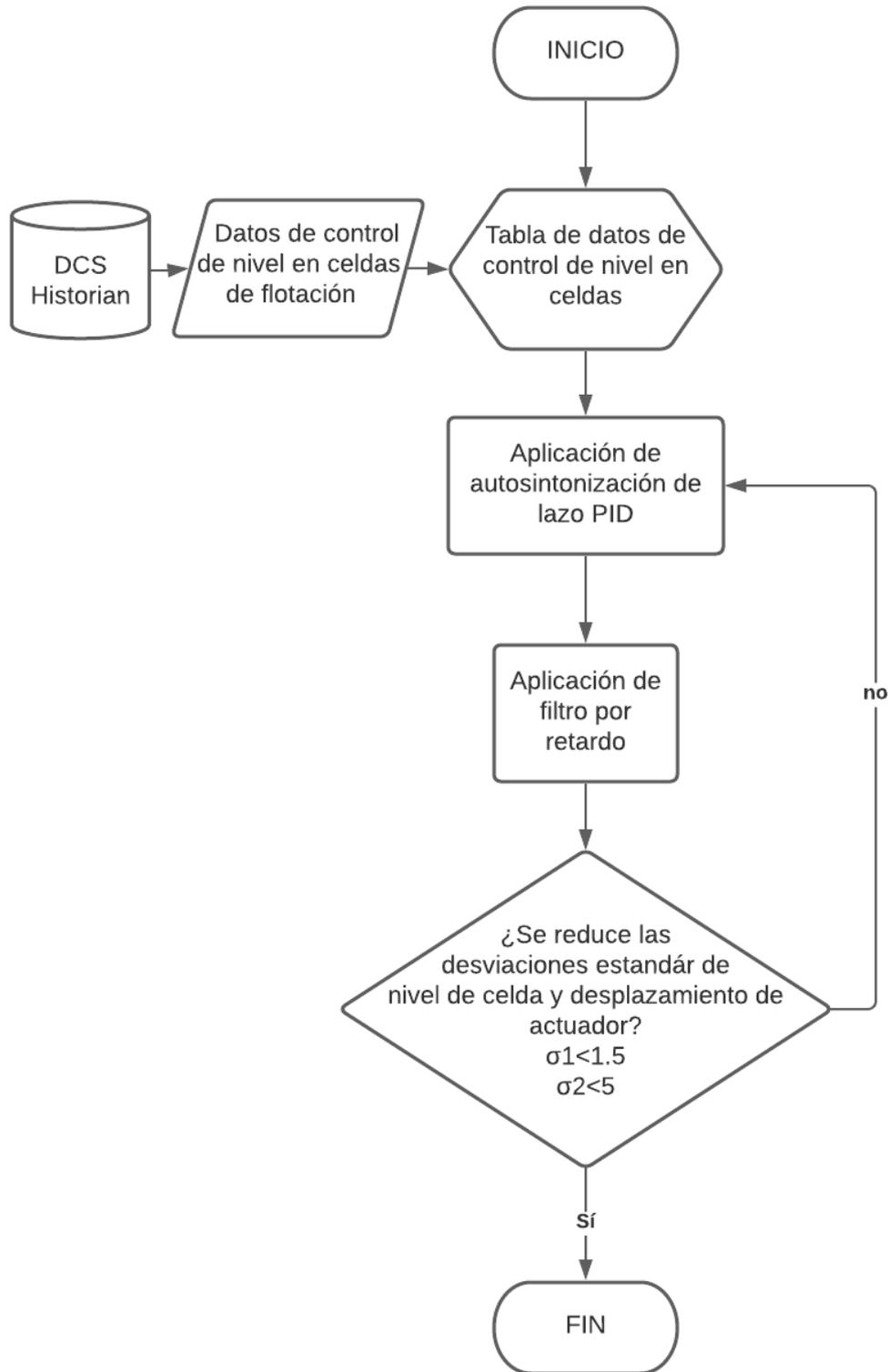
En la Tabla 5.3 se muestra las características técnicas del controlador que se usa para los lazos de control de nivel de las celdas de flotación en el caso del trabajo presente. Este equipo ejecuta el control PID para el nivel de las celdas de flotación y la distribución es de uno para cada banco de celdas. Al utilizar estos controladores dedicados se reduce la carga computacional de los controladores principales del DCS de la planta concentradora, que solo reciben las señales relevantes mediante el protocolo de comunicación Ethernet/IP.

Tabla 5.3. Características técnicas del controlador UT35A

Característica	Descripción
Suministro de energía	100-240 V CA (+10%/-15%), 50/60 Hz
Comunicación	Comunicación Ethernet (con función gateway serial)
Entrada de señal de retroalimentación	Entrada TC, mV, mA y RTD: ± 10 V CC Entrada V: ± 20 V CC Entrada mA: ± 40 mA
Salida de señal de control	Salida de corriente: 4 a 20 mA CC o 0 a 20 mA CC/ resistencia de carga de 600 Ω o menos Precisión: $\pm 0,1\%$ de rango ($\pm 5\%$ de rango para 1 mA o menos)

Fuente: "UT35A Digital Indicating Controller Operation Guide" (Yokogawa, 2016)

Figura 5.18. Diagrama de flujo para la solución del problema.

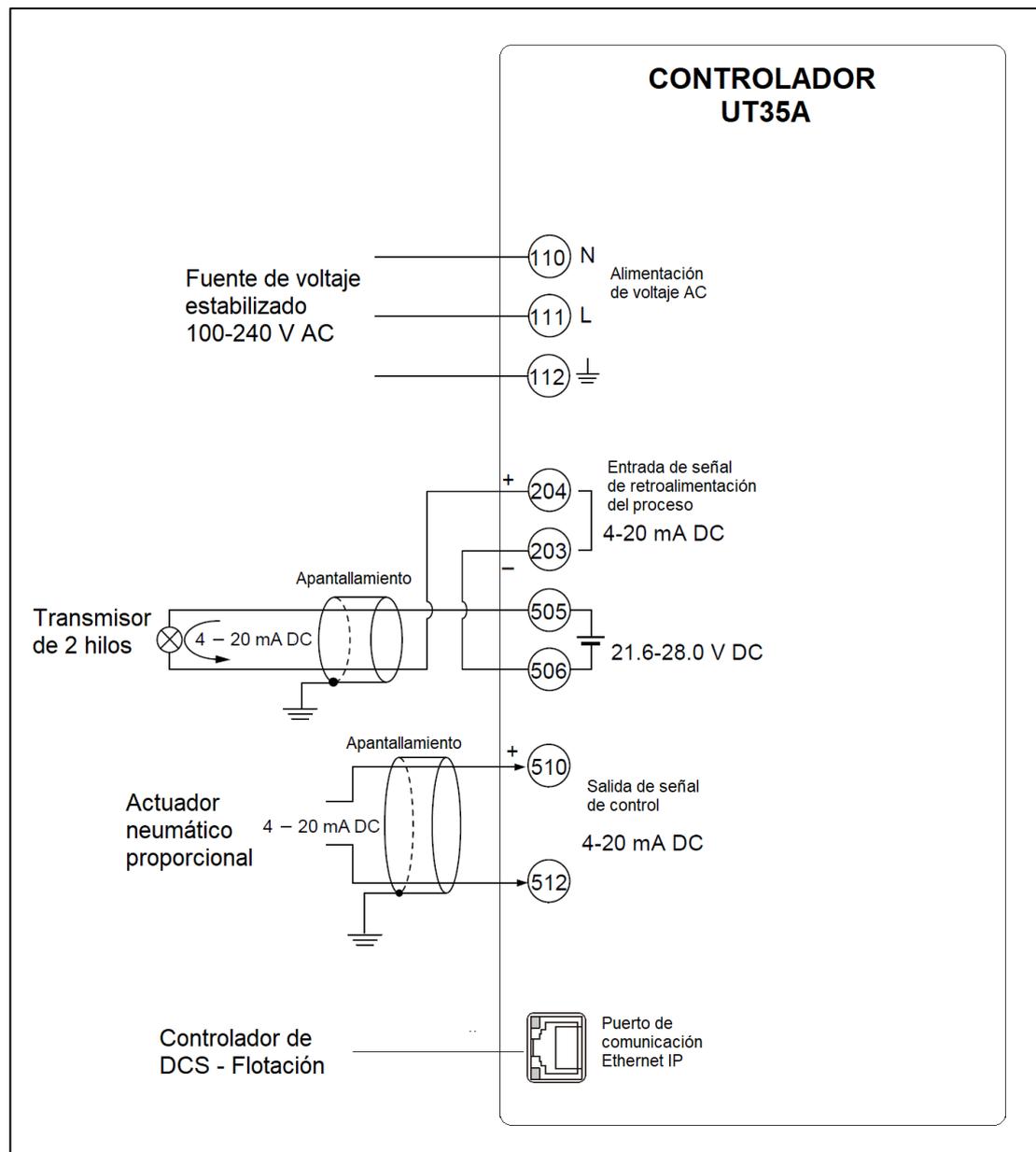


Fuente: Elaboración propia.

5.2.1.1.1 Diagrama de conexión del controlador UT35A

En la Figura 5.19 se grafica el diagrama de conexión del controlador UT35A con los demás componentes del lazo de control de nivel de las celdas de flotación: sensor de nivel y actuador neumático proporcional.

Figura 5.19. Diagrama de conexión de controlador UT35A

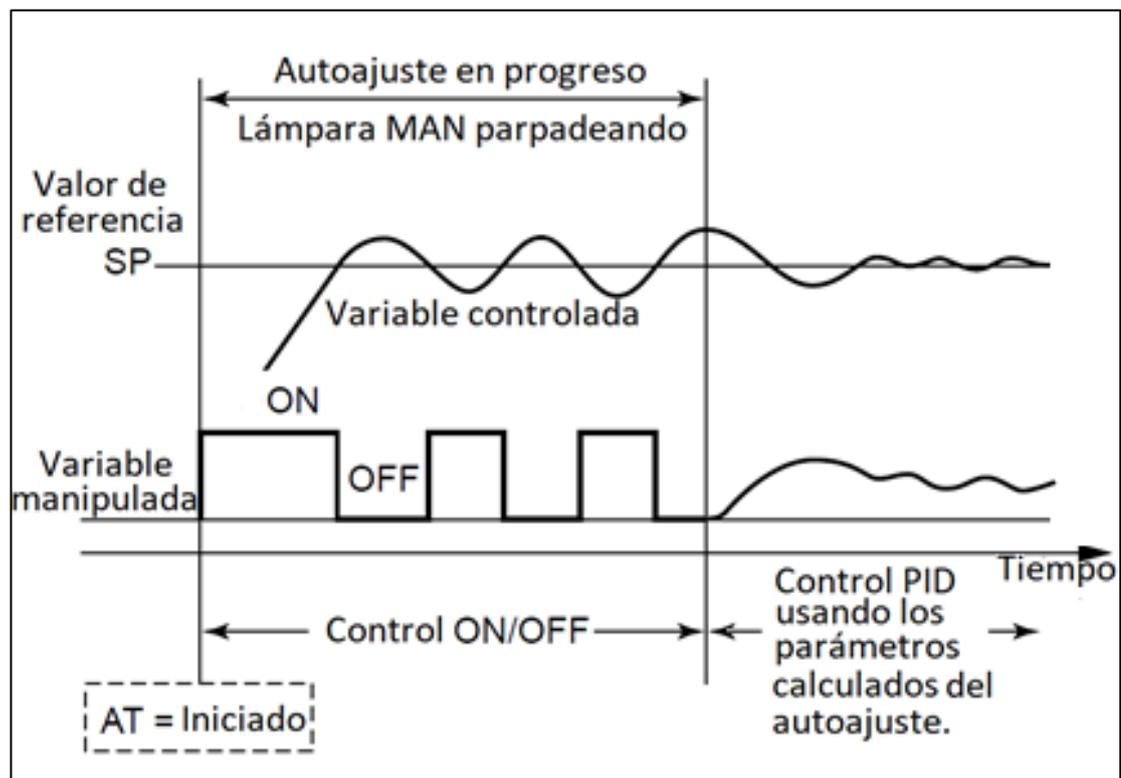


Fuente: "UT35A user's manual" (Yokogawa, 2016)

5.2.1.2. Sintonización de los lazos de control de nivel

Se utiliza la función de autoajuste (*auto-tuning*) del controlador UT35A. En la Figura 5.20 se observa que el autoajuste ejecuta temporalmente un control ON/OFF, calcula los parámetros PID adecuadas a partir de los datos de respuesta obtenidos y establece los parámetros de control PID. En síntesis, el controlador utiliza el método de autosintonización del relé retroalimentado representado por el diagrama de bloques de la Figura 2.13.

Figura 5.20. Función de autoajuste (*auto-tuning*) del controlador UT35A



Fuente: "UT35A user's manual" (Yokogawa, 2016)

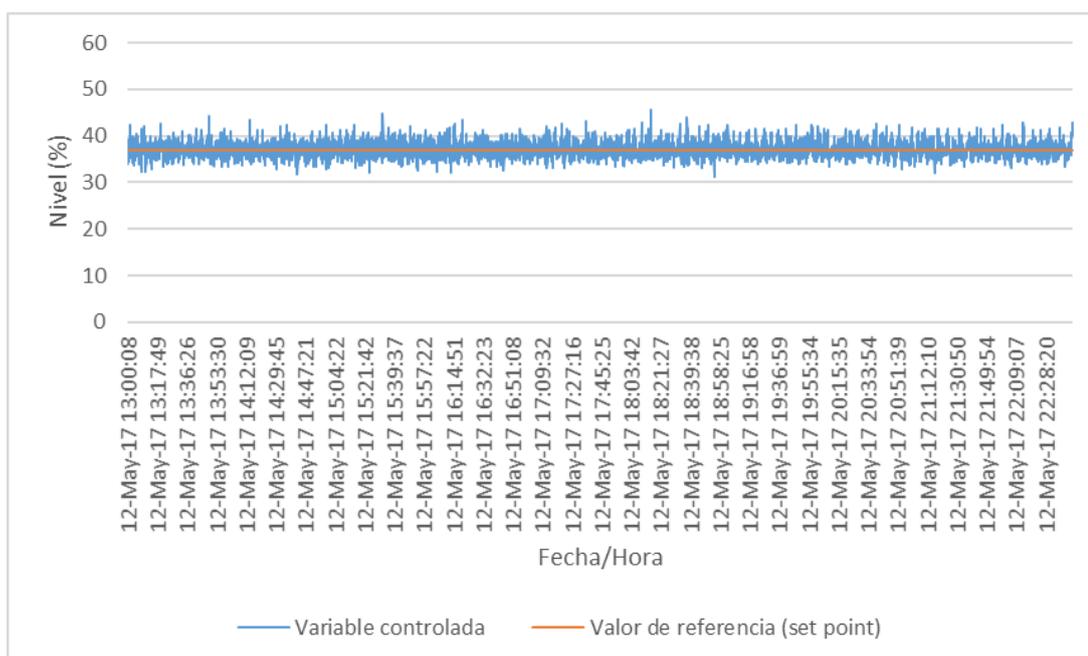
Se ejecuta la autosintonización mediante la función de autoajuste del controlador UT35A para calcular los parámetros PID en los lazos de control de nivel de las celdas que se analiza en el presente trabajo de investigación.

5.2.1.2.1 Banco de Celdas Cleaner I de Bulk 510FC011-013

En la Figura 5.21 se muestra la gráfica del nivel de pulpa del banco de celdas 510FC0011-013 luego de ejecutar la autosintonización del lazo de control, mientras que en la Figura 5.23 se muestra la gráfica del desplazamiento del actuador de la válvula dardo que está a la salida del banco de celdas.

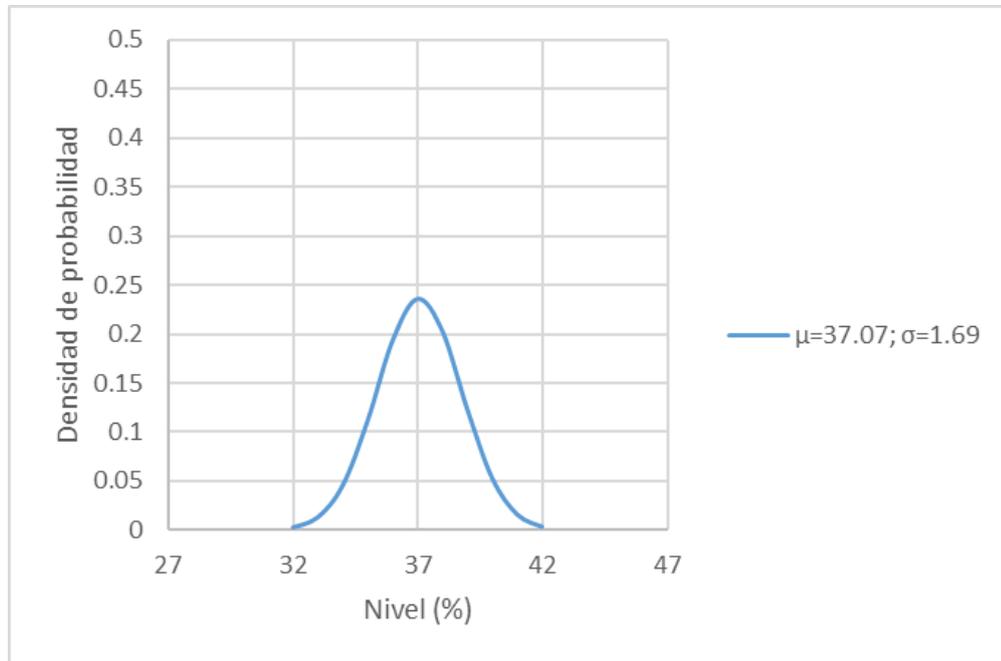
En la Figura 5.22 y en la Figura 5.24 se muestran las gráficas de densidad de distribución normal para visualizar el cambio en la variabilidad del proceso desde un enfoque estadístico.

Figura 5.21. Gráfica de variable controlada y valor de referencia de banco de celdas cleaner de bulk I 510FC011-013. Después de autosintonización.



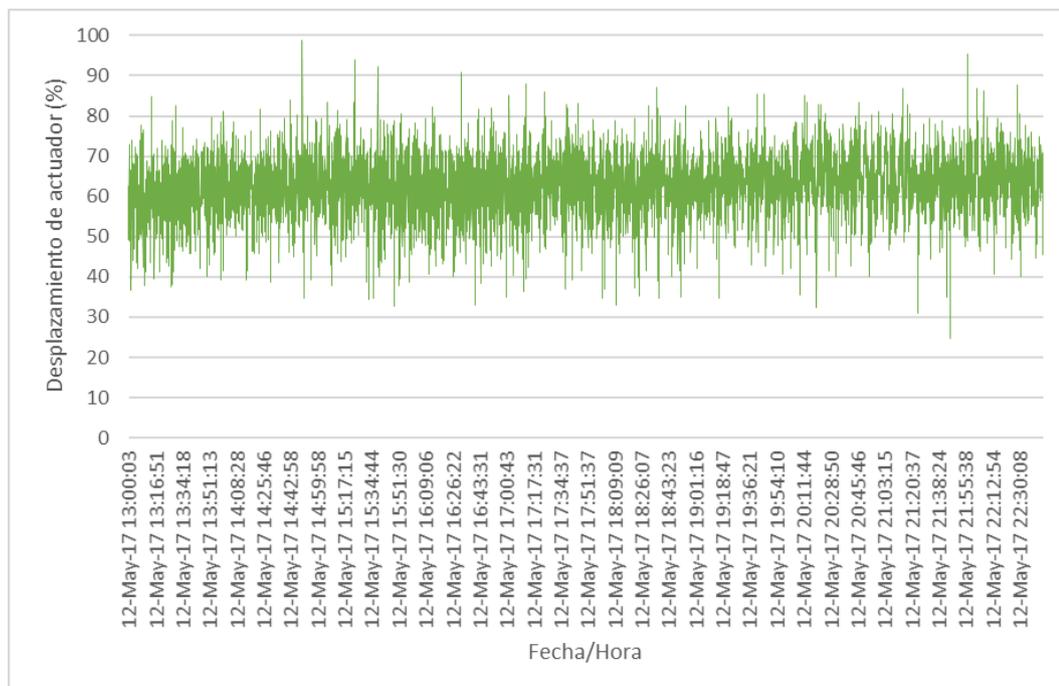
Fuente: Control de nivel de celdas. (Planta Concentradora Alparmarca, 2017)

Figura 5.22. Gráfica de densidad de distribución normal de nivel de celdas 510FC011-013. Después de autosintonización.



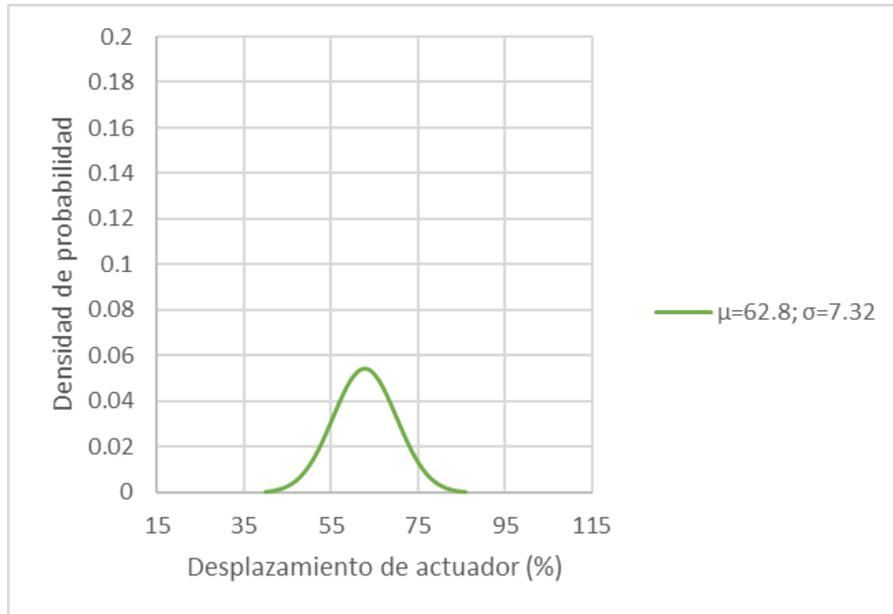
Fuente: Control de nivel de celdas. (Planta Concentradora Alparmarca, 2017)

Figura 5.23. Gráfica de variable manipulada (desplazamiento de actuador) 510-UPC-004. Después de autosintonización.



Fuente: Control de nivel de celdas. (Planta Concentradora Alparmarca, 2017)

Figura 5.24. Gráfica de densidad de distribución normal de variable manipulada (desplazamiento de actuador) 510-UPC-004. Después de autosintonización.



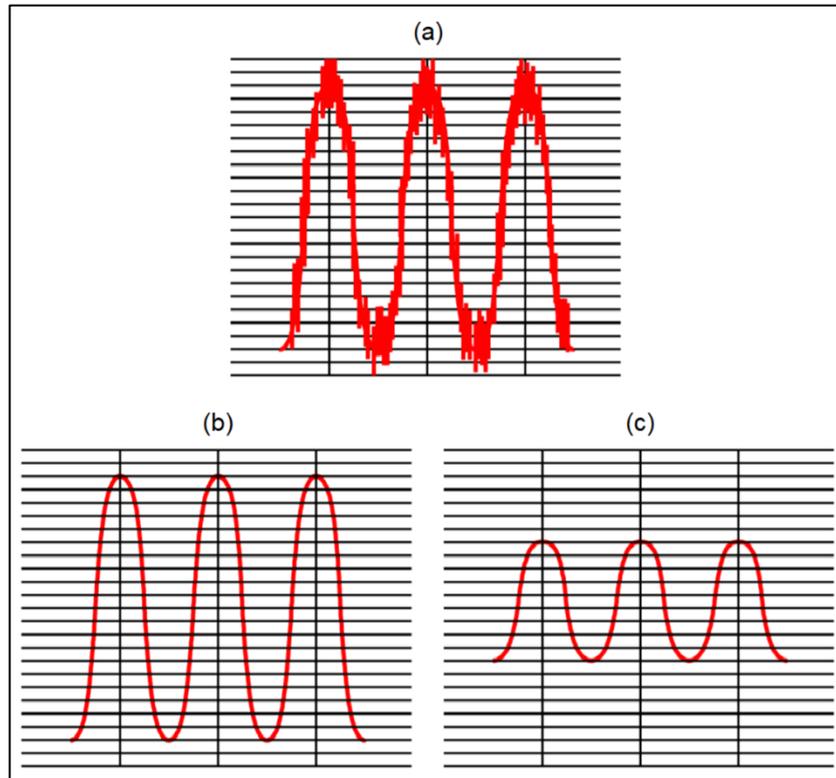
Fuente: Control de nivel de celdas. (Planta Concentradora Alparmarca, 2017)

5.2.1.3. Filtro de señal de sensor de nivel de pulpa

Se utiliza la función de filtro de señal de entrada (*PV input filter*) del controlador UT35A. Este filtro proporciona un cálculo de retraso de primer orden, que elimina más ruido mientras mayor sea la constante de tiempo. Sin embargo, una constante de tiempo excesivamente grande distorsiona la forma de onda como se observa en la Figura 5.25.

Se implementa el filtro de la señal de sensor de nivel de pulpa mediante la función de filtro de señal de entrada del controlador UT35A para reducir el ruido en la señal de nivel de las celdas que se analiza en el presente trabajo de investigación.

Figura 5.25. Señal de entrada de retroalimentación del proceso. a) señal original b) señal filtrada con una constante de tiempo baja c) señal filtrada con una constante de tiempo alta



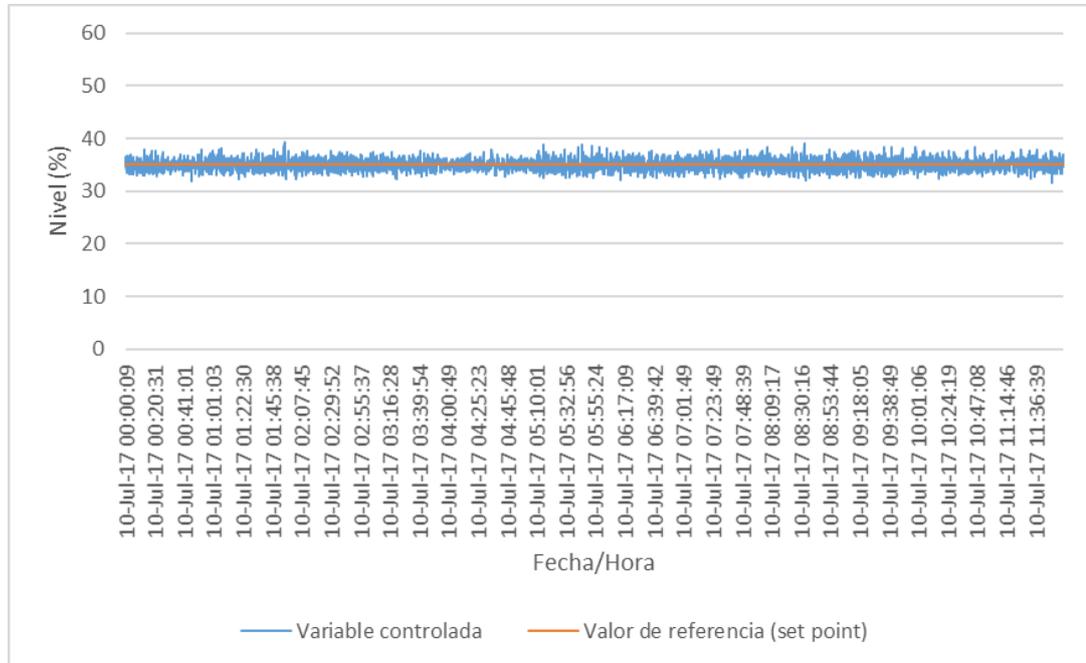
Fuente: "UT35A user's manual" (Yokogawa, 2016)

5.2.1.3.1 Banco de Celdas Cleaner I de Bulk 510FC011-013

En la Figura 5.26 se muestra la gráfica del nivel de pulpa del banco de celdas 510FC0011-013 luego de la aplicación del filtro a la señal del sensor de nivel, mientras que en la Figura 5.28 se muestra la gráfica del desplazamiento del actuador de la válvula dado que está a la salida del banco de celdas.

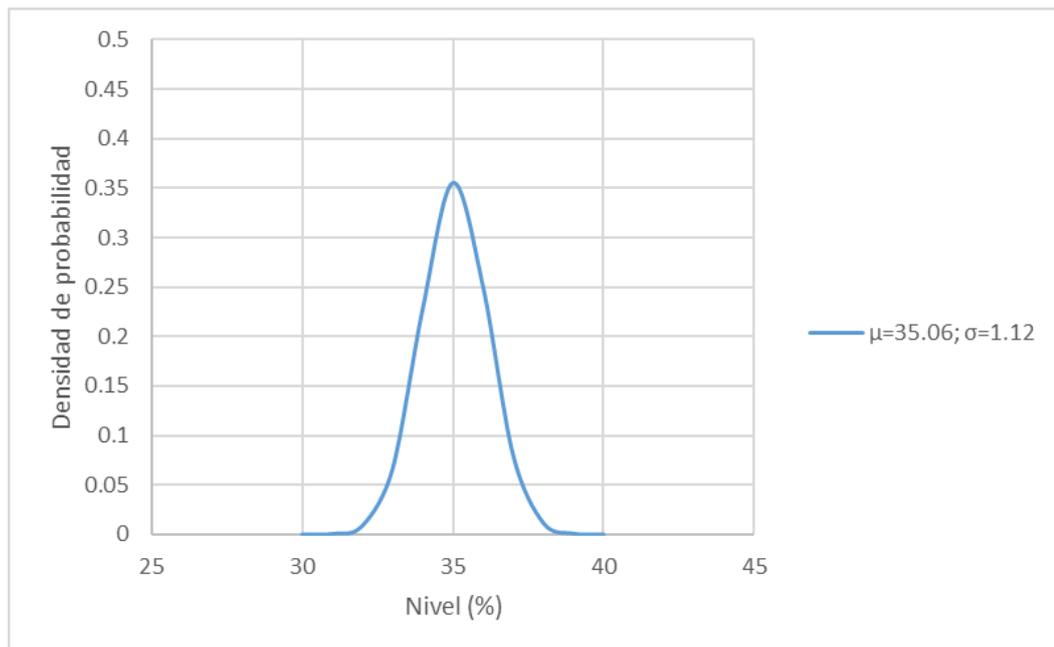
En la Figura 5.27 y en la Figura 5.29 se muestran las gráficas de densidad de distribución normal para visualizar el cambio en la variabilidad del proceso desde un enfoque estadístico.

Figura 5.26. Gráfica de variable controlada y valor de referencia de banco de celdas cleaner de bulk I 510FC011-013. Después de filtro de señal de entrada.



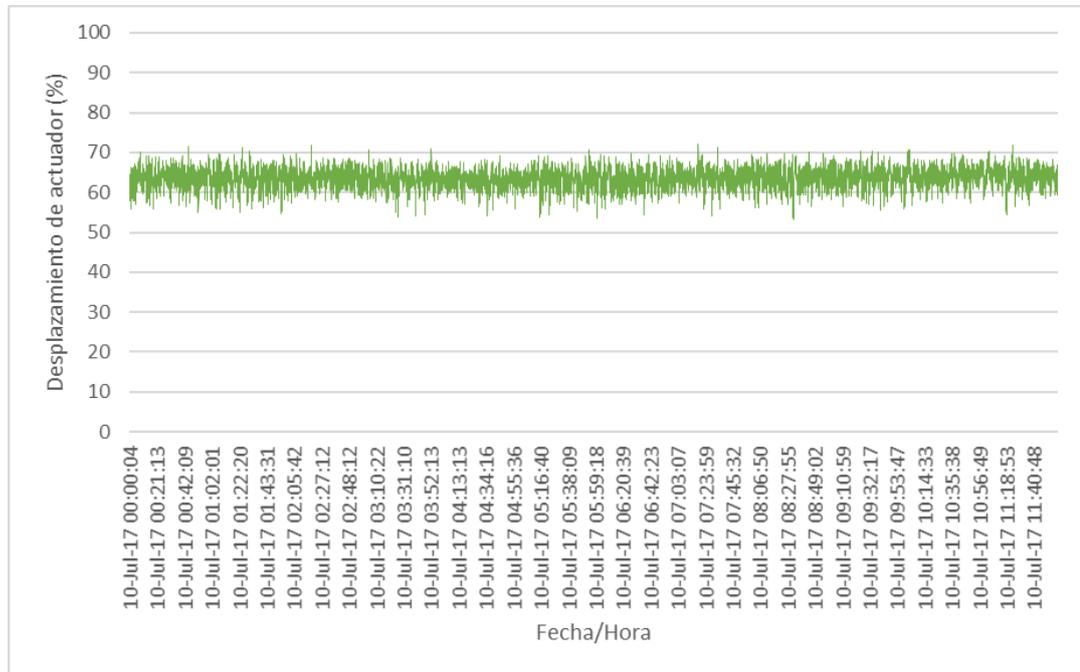
Fuente: Control de nivel de celdas. (Planta Concentradora Alparmarca, 2017)

Figura 5.27. Gráfica de densidad de distribución normal de nivel de celdas 510FC011-013. Después de filtro de señal de entrada.



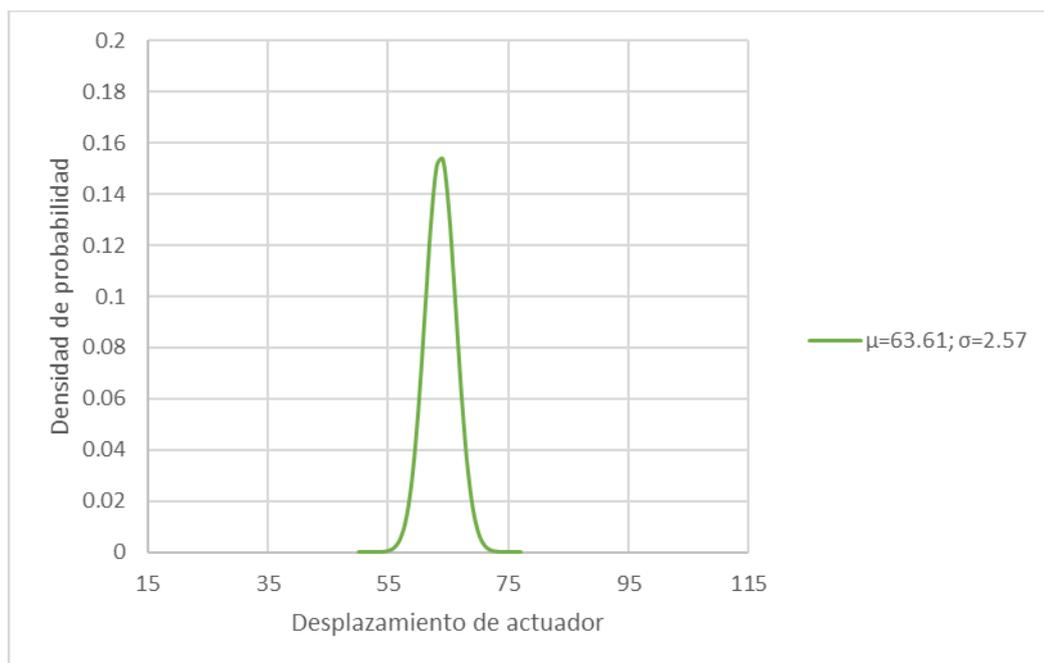
Fuente: Control de nivel de celdas. (Planta Concentradora Alparmarca, 2017)

Figura 5.28. Gráfica de variable manipulada (desplazamiento de actuador) 510-UPC-004. Después de filtro de señal de entrada.



Fuente: Control de nivel de celdas. (Planta Concentradora Alpamarca, 2017)

Figura 5.29. Gráfica de densidad de distribución normal de variable manipulada (desplazamiento de actuador) 510-UPC-004. Después de filtro de señal de entrada.



Fuente: Control de nivel de celdas. (Planta Concentradora Alpamarca, 2017)

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. VERIFICAR (V)

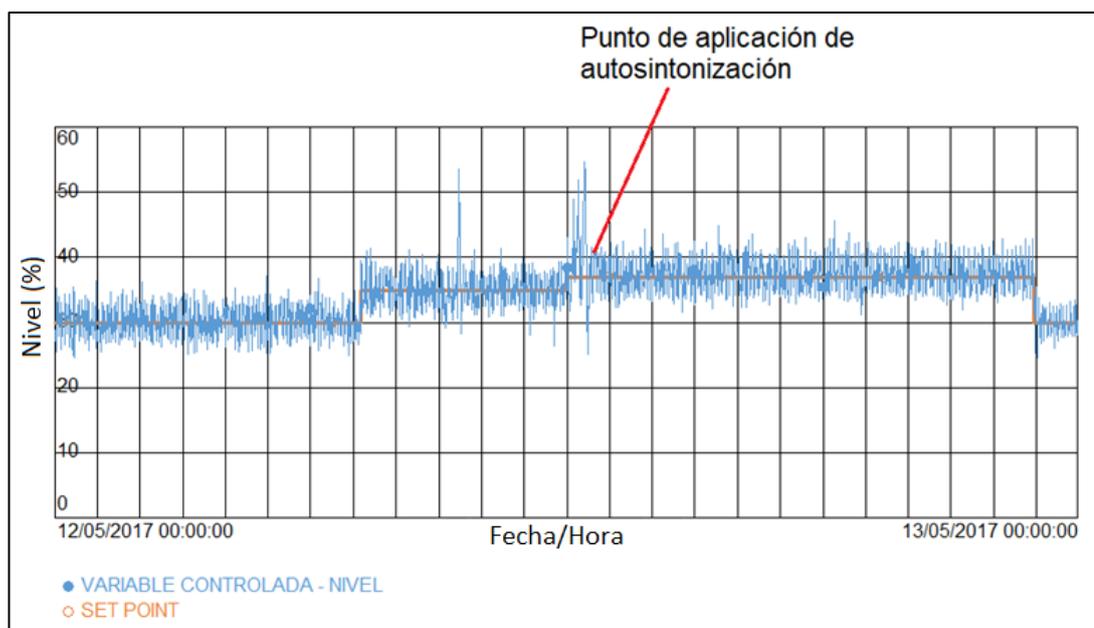
6.1.1. Revisión de los resultados

Se analiza gráficamente las respuestas de las acciones propuestas.

6.1.1.1. Efecto de la aplicación de autosintonización al lazo de control

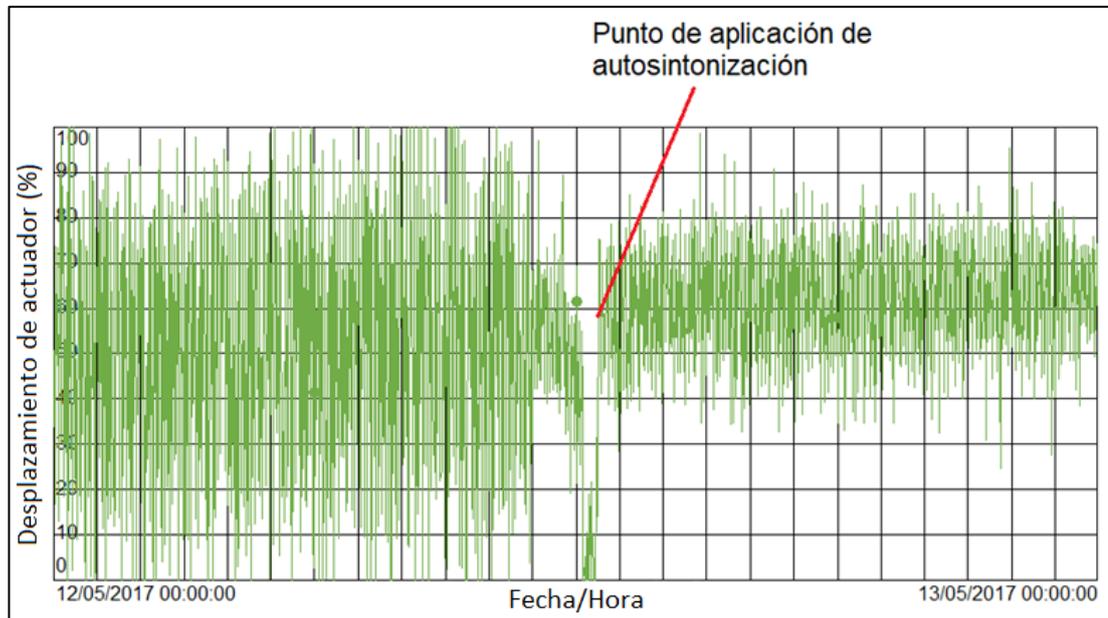
Después de aplicar la autosintonización al lazo de control de nivel, se analiza gráficamente la respuesta. En la Figura 6.1 se observa que no hay un efecto significativo en el nivel de pulpa (variable controlada). Sin embargo, en la Figura 6.2 se muestra que se reduce visiblemente la variabilidad del desplazamiento del actuador (variable manipulada).

Figura 6.1. Efecto de la autosintonización en la variable controlada y valor de referencia de banco de celdas cleaner de bulk I 510FC011-013.



Fuente: Control de nivel de celdas. (Planta Concentradora Alparmarca, 2017)

Figura 6.2. Efecto de la autosintonización en la variable manipulada (desplazamiento de actuador) 510-UPC-004.

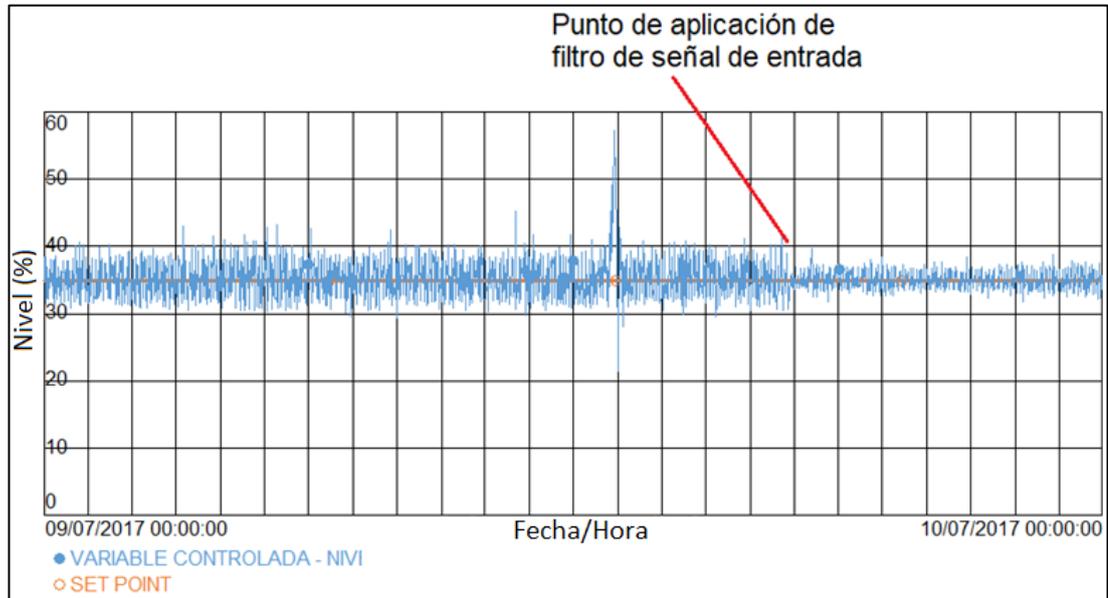


Fuente: Control de nivel de celdas. (Planta Concentradora Alpamarca, 2017)

6.1.1.2. Efecto de la aplicación de filtro en la señal de entrada

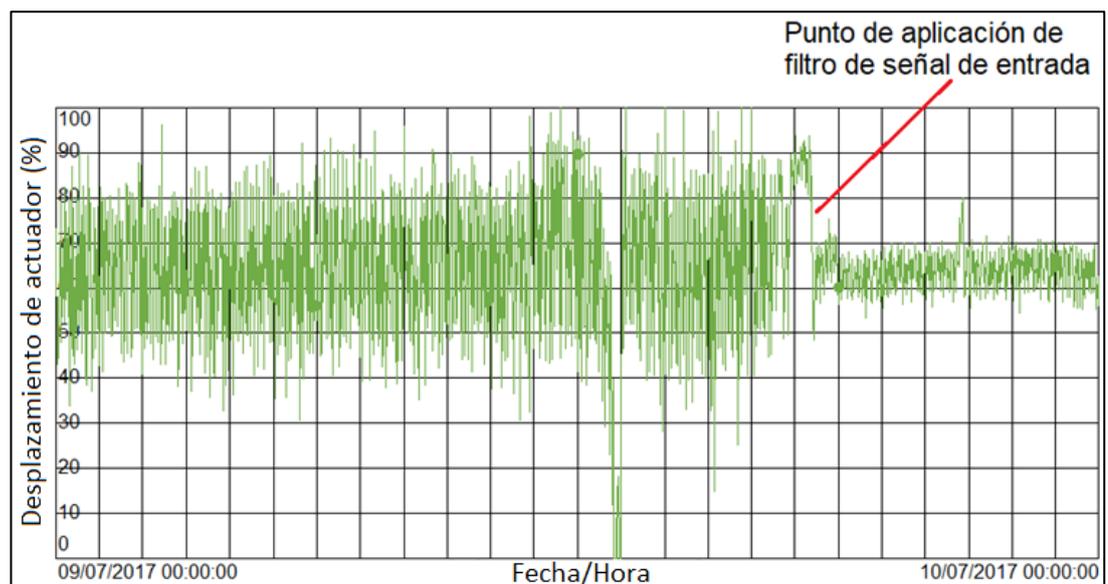
Se hace el análisis luego de aplicar el filtro en la señal de entrada. En la Figura 6.3 se observa que hay un efecto significativo en el nivel de pulpa (variable controlada), y en la Figura 6.4 se muestra que se reduce la variabilidad en el desplazamiento del actuador (variable manipulada).

Figura 6.3. Efecto de la aplicación de filtro de señal de entrada de variable controlada y valor de referencia de banco de celdas scavenger de bulk 510FC011-013.



Fuente: Control de nivel de celdas. (Planta Concentradora Alpamarca, 2017)

Figura 6.4. Comparación de variable manipulada (desplazamiento de actuador) 510-UPC-004 por efecto de la aplicación de filtro de señal de entrada.



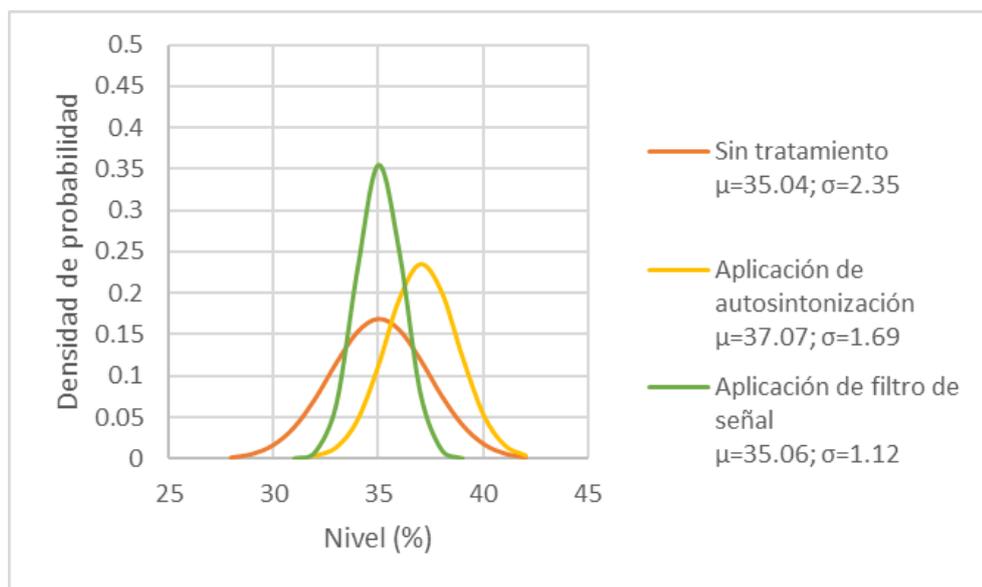
Fuente: Control de nivel de celdas. (Planta Concentradora Alpamarca, 2017)

6.1.1.3. Análisis de los efectos de las acciones de solución en el nivel de pulpa

Se analiza el efecto de las acciones de solución en el nivel de pulpa (variable controlada), para lo cual se muestra en la gráfica de la Figura 6.6 un acercamiento de diez minutos con la superposición de los estados antes y después de las acciones de solución para facilitar la visualización de los cambios en la señal de medición de nivel.

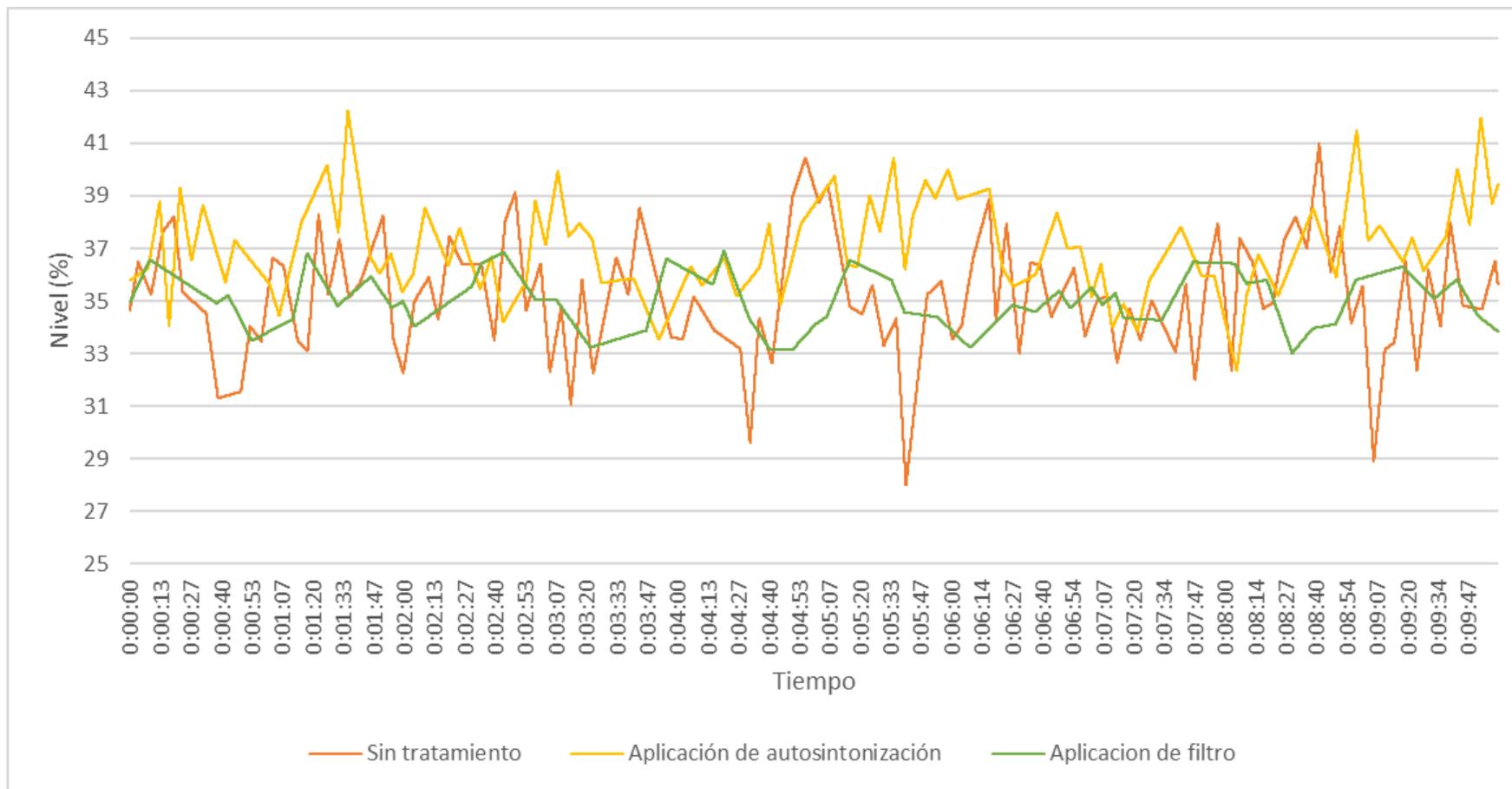
Debido a la dificultad de apreciar la reducción de la variabilidad en las amplitudes de la gráfica de la Figura 6.6 (varían en un rango de 30 a 40 % en los tres casos), en la Figura 6.5 se representa las densidades de distribución normal de la variable controlada (nivel de pulpa), con el objetivo de evidenciar estadísticamente la reducción de la variabilidad con las acciones de solución ejecutadas en el desarrollo de la presente investigación.

Figura 6.5. Gráfica de densidad de distribución normal de la variable controlada (nivel de pulpa) en banco de celdas cleaner I bulk 510FC011-013



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6.6. Superposición de gráficas del nivel de pulpa del banco de celdas 510FC011-013



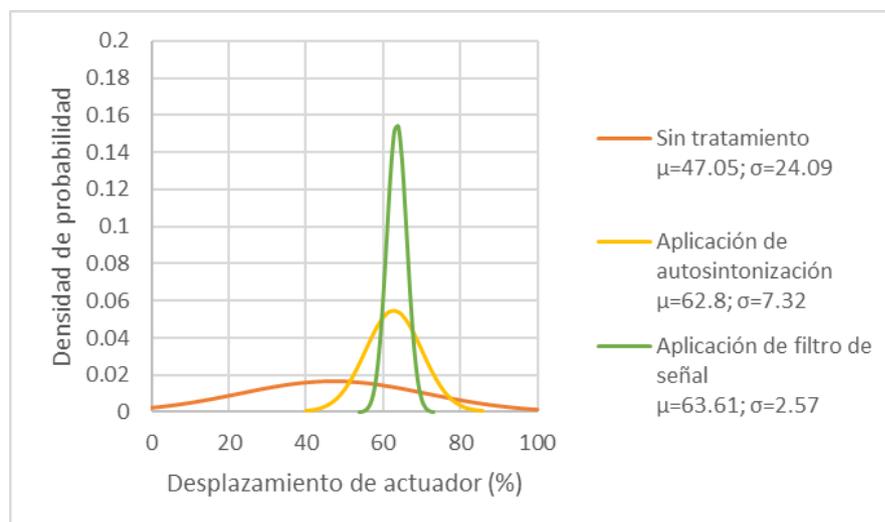
Fuente: Control de nivel de celdas. (Planta Concentradora Alpamarca, 2017)

6.1.1.4. Análisis de los efectos de las acciones de solución en el desplazamiento del actuador

Se analiza el efecto de las acciones de solución en la variable manipulada (desplazamiento de actuador), para lo cual se muestra en la gráfica de la Figura 6.8 un acercamiento de diez minutos con la superposición de los estados antes y después de las acciones de solución para facilitar la visualización de los cambios en la señal de salida hacia el actuador.

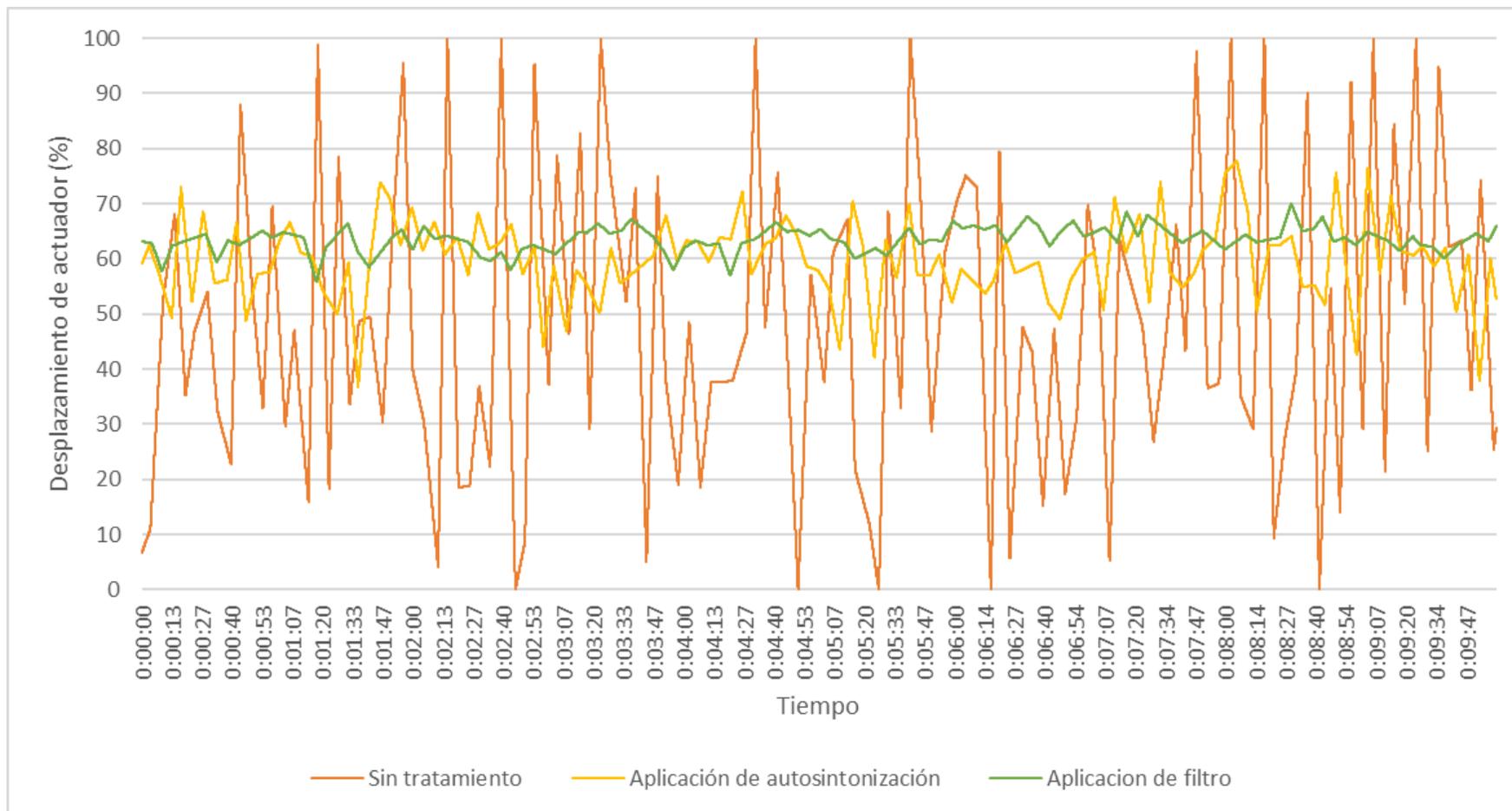
Si bien se logra diferenciar la reducción en las amplitudes de la Figura 6.8 (al inicio varía de 0 a 100 %, luego de la autosintonización de 50 a 70 % y luego de la aplicación del filtro de 55 a 65 %), en la Figura 6.7 se representa las densidades de distribución normal de la variable manipulada (desplazamiento de actuador), con el objetivo de mostrar visualmente el cambio estadístico de la reducción en la variabilidad con las acciones de solución ejecutadas en el desarrollo de la presente investigación.

Figura 6.7. Gráfica de densidad de distribución normal de la variable manipulada (desplazamiento de actuador) en actuador 510-UPC-004



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6.8. Superposición de gráficas del desplazamiento del actuador del banco de celdas 510FC011-013



Fuente: Control de nivel de celdas. (Planta Concentradora Alpamarca, 2017)

6.2. ACTUAR (A)

6.2.1. Discusión de resultados

En la Tabla 6.1 se muestra el resumen donde se observa la reducción de los indicadores de variabilidad (σ = desviación estándar) de los parámetros de control en el banco de celdas 510FC011-013.

Tabla 6.1. Resumen de parámetros estadísticos de las variables de lazo de control de nivel de celdas cleaner bulk I 510FC011-013

Banco de celdas 510FC011-013	Indicador de variabilidad – desviación estándar (σ)		
	Sin tratamiento	Aplicación de autosintonización	Aplicación de filtro de señal de entrada
Nivel de pulpa (variable controlada)	2.35	1.69	1.12
Desplazamiento de actuador (Variable manipulada)	24.09	7.32	2.57

Fuente: Elaboración propia.

De los indicadores declarados en la Matriz de Consistencia (Tabla 4.1) se definió, como primer indicador que para el nivel de pulpa la desviación estándar (σ) debe ser menor que 1.5. Como se aprecia en la Tabla 6.1 dicho indicador de variabilidad sin el tratamiento analizado sobre el sistema equivale a 2.35. Una vez aplicada la autosintonización el valor disminuye a 1.69, que equivale a una reducción de 28.1 %. Y cuando se aplica el filtro de señal de entrada el valor de σ disminuye a 1.12, lo que equivale a una reducción total del 52.3 %. Cumpliendo el objetivo de variabilidad óptima ($1.12 < 1.5$).

El segundo indicador definido en la Matriz de Consistencia (Tabla 4.1) es que el desplazamiento del actuador debe tener una desviación estándar (σ) menor que 5. Como se aprecia en la Tabla 6.1 dicho indicador de variabilidad sin el tratamiento analizado sobre el sistema equivale a 24.09. Una vez aplicada la autosintonización el valor disminuye a 7.32, que equivale a una reducción de 69.6 %. Y cuando se aplica el filtro de señal de entrada el valor de σ disminuye a 2.57, lo que equivale a una reducción total del 89.3%. Cumpliendo el objetivo de variabilidad óptima ($2.57 < 5$).

Se declaró en la matriz de consistencia la siguiente hipótesis: “La optimización de parámetros de control de nivel de celdas de flotación, basado en el método PHVA, reducirá la variabilidad en el proceso”; y, como se expuso en los párrafos anteriores, se observa que la variabilidad del control de nivel de pulpa en el proceso de flotación de minerales se reduce; por lo que la hipótesis es positiva.

CONCLUSIONES

- El procedimiento de optimización del ajuste de parámetros de control, mediante el uso del método de mejora continua PHVA, ha permitido reducir la variabilidad en el proceso de control de nivel de celdas de flotación. Esto se llevó a cabo debido al seguimiento del procedimiento que conduce a encontrar las causas raíz del problema y establecer medidas de solución enfocadas a dichas causas. Se disminuyó la variabilidad en el nivel de pulpa (variable controlada) en el banco de celdas de prueba hasta un valor de desviación estándar de 1.12 (menor que 1.5), que equivale a una reducción del 52.3 %. Además, se disminuyó hasta un valor de desviación estándar de 2.57 (menor que 5) la variabilidad del desplazamiento del actuador, que equivale a una reducción del 89.3 %. Por lo que la hipótesis: “La optimización de parámetros de control de nivel de celdas de flotación, basado en el método PHVA, reducirá la variabilidad en el proceso” es positiva.
- La autosintonización del lazo de control de nivel logró una mayor reducción porcentual de variabilidad en ambos parámetros estudiados. Se redujo la variabilidad del nivel de pulpa en un 28.1 % y en el desplazamiento del actuador en un 69.6 %.
- La acción de activación de filtro de señal de nivel también generó un efecto de reducción de la variabilidad en la señal nivel de pulpa en un

24.2 %. Además, causó una reducción de variabilidad del desplazamiento del actuador en un 19.7 %.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda extender la presente investigación con otras variables del proceso de flotación, de tal forma que se pueda contrastar los resultados obtenidos en este trabajo con el volumen de producción (recuperación de minerales en los concentrados).
- Se sugiere evaluar los resultados de la ejecución de las acciones de mejora propuestos en el presente trabajo de investigación a los otros procesos de la planta concentradora que tengan lazos de control PID.
- Realizar un análisis científico de datos del proceso de flotación (ph, dosificación de reactivos, nivel de pulpa en celda, flujo de aire de flotación) para obtener un modelo que permita predecir la producción de mineral según las variables medidas en los procesos.
- Analizar los beneficios de la implementación de un sistema de control experto que autoajuste los parámetros de control según los cambios operativos como el tipo de mineral, el tonelaje de producción o las condiciones ambientales como la temperatura estacional o la humedad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Borrero Salazar, A. (2019). *Diseño de una estrategia de reducción de variabilidad en procesos con controladores tipo PID frente a perturbaciones oscilatorias*. Barranquilla.
- [2] Brunete, A., Herrero, R., & San Segundo, P. (2020). *Introducción a la Automatización Industrial*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- [3] Canfield, M. (2012). Etapas del proceso Productivo de una Mina. En Sociedad Nacional de Minería, *Curso de Minería para Periodistas*. Santiago.
- [4] Ccarita Cruz, J. C. (2017). *Diseño de un controlador predictivo generalizado multivariable para el control de una celda de flotación tipo columna utilizada en el proceso de recuperación de cobre*. Lima.
- [5] Codelco Educa. (2018). Flotación: Burbujas de cobre. Obtenido de <https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/edic/base/port/flotacion.html>
- [6] Cosapi. (2014). Proyectos ejecutados. *Planta Alpamarca*.
- [7] Creus Solé, A. (2010). *Instrumentación Industrial* (Octava ed.). México: Alfaomega.
- [8] De La Cruz Morales, J. C. (2013). *Diseño de un sistema de bombeo para transporte de relave desde planta concentradora hasta zona de*

disposición en Sociedad Minera Austria Duvaz S.A.C. Huancayo:
Universidad Nacional del Centro del Perú.

- [9] Espinoza Martínez, M. (2017). *Plataforma para evaluar el desempeño energético de controladores PID en motores de corriente directa basada en la norma 50001*. Chihuahua.
- [10] FESTO. (2014). *Catálogo de productos 2014*.
- [11] García García, P. (2011). *Computación Evolutiva para la Búsqueda de Ecuaciones Óptimas para Sintonización de Controladores PID Discretos*. Monterrey.
- [12] Gutierrez Pulido, H. (2010). *Calidad Total y Productividad*. México D.F.: McGraw-Hill.
- [13] Haro Marchena, J. P. (2019). *Diseño de un sistema de control difuso para la estabilidad de los niveles de las celdas de flotación en un proceso continuo Cuprífero*. Lima.
- [14] Instituto Peruano de Economía. (2017). *El Valor Agregado de la Minería en el Perú*. Lima: Instituto de Estudios Energético Minero.
- [15] Khalore, A. G. (2012). Relay Approach for Tuning of PID Controller. *International Journal of Computer Technology and Applications*, III(3), 1237-1242.
- [16] Meraz Vinaja, P. A. (2018). La Optimización de los Procesos de Flotación en la Unidad de Cuidados Intensivos (ICU).

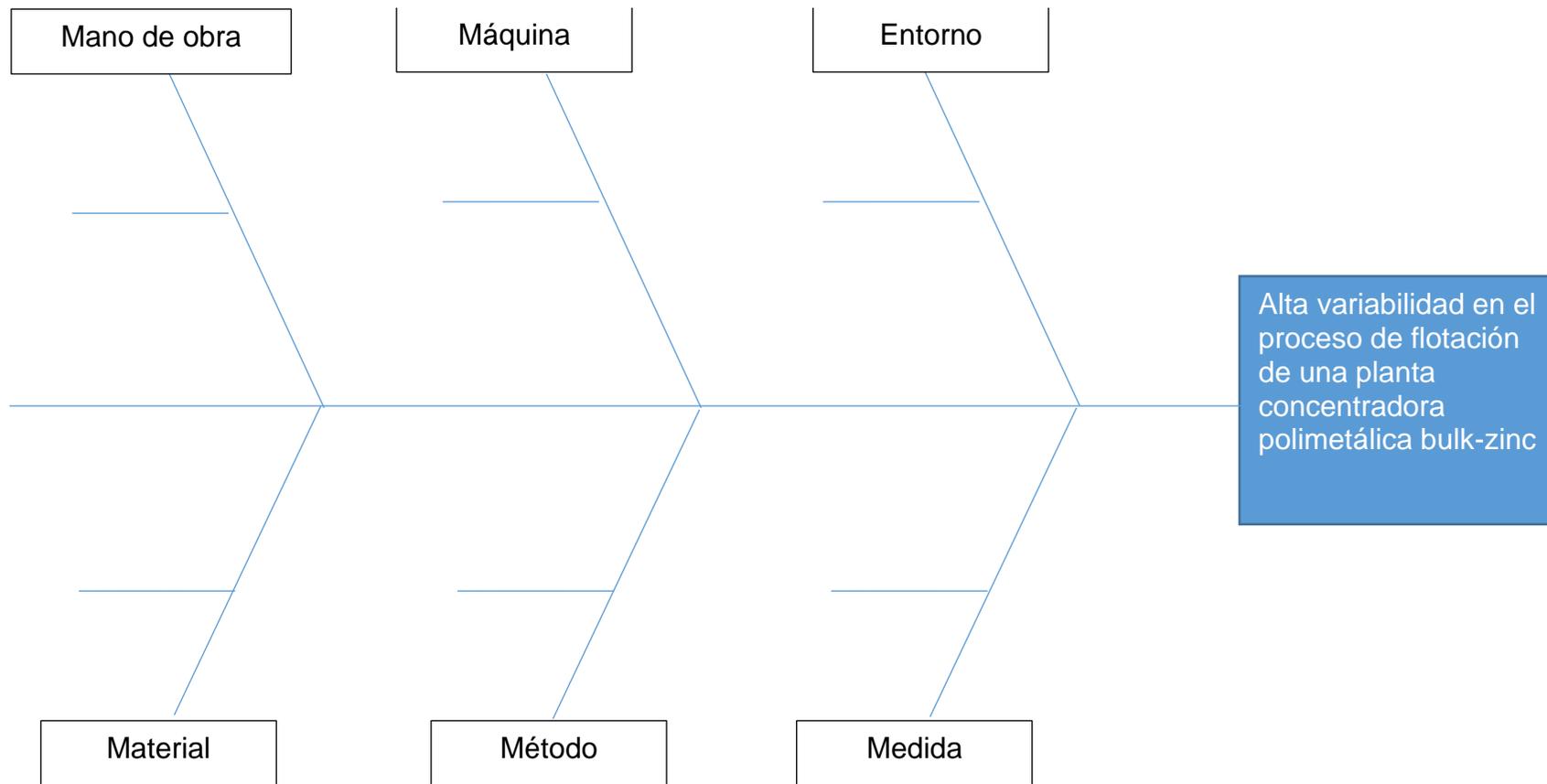
- [17] Metallurgy Corp 911. (2016). Flotación de Minerales Oxidados de Plomo-Zinc.
- [18] Ministerio de Energía y Minas. (2018). *Anuario Minero 2018*.
- [19] Ministerio de Energía y Minas. (2018). *Mapa de Principales Unidades Mineras en Producción*.
- [20] Molina Guillén, M. J. (2015). *Control de operaciones aplicado en la concentradora Toquepala*.
- [21] Montenegro Cueva, H. D., & Salazar Chacón, G. D. (2012). Diseño e Implementación de Sistemas de Control de Nivel para Cinco Tanques de Bombeo de Hidrocarburos con Sensoramiento tipo Radar en la Estación Shushufindi - EP Petroecuador. *MASKAY*, 2(1), 9-17.
- [22] Morey, J. (2016). *Estado del arte: sistemas de preparación de lechada de cal en Chile*. Universidad Técnica Federico Santa María.
- [23] Murrill, P. (2012). *Fundamentals of Process Control Theory* (Tercera ed.). Carolina del Norte: Instrument Society of America.
- [24] Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna* (Quinta ed.). Madrid: Pearson Education S.A.
- [25] Phibrand S.A. (2017). *Ranking de Proveedores de la Minería Perú 2017*.

- [26] Planta Concentradora Alpamarca. (2017). *Control de nivel de celdas de flotación.*
- [27] Planta Concentradora Alpamarca. (2018). *Flowsheet de procesos.*
- [28] Rodriguez Castellanos, J. E. (2018). *Estudio comparativo de técnicas de control PID difuso aplicadas al mejoramiento de desempeño de lazos de control continuo.*
- [29] TECSUP. (2014). *Manual de operaciones de planta concentradora flotación.*
- [30] Torres Francia, D. J. (2017). *Reducción de la variabilidad del pH en el circuito de flotación ROUGHER bajo el enfoque six sigma.*
- [31] Troncoso Garay, C. E. (2016). *Diseño e implementación de estrategia de control predictivo en proceso de flotación de minerales.*
- [32] U.S. Geological Survey. (2019). *Mineral commodity summaries 2019.*
- [33] Vargas Tamani, B. (2010). *Autosintonía de controladores basados en la identificación de la respuesta en frecuencia del proceso.* Lima: Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- [34] Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L., & Ye, K. (2012). *Probability and Statistics for Engineers and Scientists* (Novena ed.). Boston: Pearson.

- [35] Yianatos, J. (2014). Caracterización de celdas de flotación de gran tamaño. *Instituto de Ingenieros de Minas de Perú*.
- [36] Yokogawa. (2016). *UT35A user's manual* (Sexta ed.).
- [37] Yokogawa. (2016). *UT35A, UT32A Digital Indicating Controller Operation Guide* (Quinta ed.).
- [38] Zapata Gómez, A. (2015). *Ciclo de la calidad PHVA* (Primera ed.). Bogotá, D. C.: Universidad Nacional de Colombia.

ANEXOS

ANEXO 1. Diagrama de Ishikawa



ANEXO 2. Tabla de recolección de variables de lazo de control (cabecera de 37 registros)

Fecha/Hora	Variable controlada	Valor de referencia (set point)	Fecha/Hora	Variable manipulada
10-Jul-17 00:00:02	62.30	60	10-Jul-17 00:00:02	59.30
10-Jul-17 00:00:06	60.60	60	10-Jul-17 00:00:06	77.80
10-Jul-17 00:00:16	61.50	60	10-Jul-17 00:00:21	77.10
10-Jul-17 00:00:21	60.20	60	10-Jul-17 00:00:26	71.70
10-Jul-17 00:00:26	60.70	60	10-Jul-17 00:00:32	79.30
10-Jul-17 00:00:37	59.50	60	10-Jul-17 00:00:37	77.50
10-Jul-17 00:00:41	60.40	60	10-Jul-17 00:00:41	72.20
10-Jul-17 00:00:46	59.20	60	10-Jul-17 00:00:46	81.50
10-Jul-17 00:00:51	60.70	60	10-Jul-17 00:00:51	67.20
10-Jul-17 00:00:56	59.10	60	10-Jul-17 00:00:56	82.20
10-Jul-17 00:01:15	59.70	60	10-Jul-17 00:01:01	70.50
10-Jul-17 00:01:35	59.70	60	10-Jul-17 00:01:05	79.80
10-Jul-17 00:01:40	58.90	60	10-Jul-17 00:01:10	74.90
10-Jul-17 00:01:51	60.40	60	10-Jul-17 00:01:15	76.20
10-Jul-17 00:02:00	59.30	60	10-Jul-17 00:01:21	71.50
10-Jul-17 00:02:05	60.10	60	10-Jul-17 00:01:26	76.80
10-Jul-17 00:02:09	59.00	60	10-Jul-17 00:01:31	72.80
10-Jul-17 00:02:14	60.30	60	10-Jul-17 00:01:35	76.00
10-Jul-17 00:02:24	59.30	60	10-Jul-17 00:01:40	83.60
10-Jul-17 00:02:29	60.20	60	10-Jul-17 00:01:44	65.40
10-Jul-17 00:02:38	60.60	60	10-Jul-17 00:01:51	76.80
10-Jul-17 00:02:48	58.10	60	10-Jul-17 00:01:55	79.40
10-Jul-17 00:02:53	60.30	60	10-Jul-17 00:02:00	81.30
10-Jul-17 00:03:03	59.60	60	10-Jul-17 00:02:05	76.90
10-Jul-17 00:03:07	60.50	60	10-Jul-17 00:02:09	86.20
10-Jul-17 00:03:12	60.40	60	10-Jul-17 00:02:14	71.20
10-Jul-17 00:03:17	61.60	60	10-Jul-17 00:02:19	75.20
10-Jul-17 00:03:22	60.70	60	10-Jul-17 00:02:24	81.40
10-Jul-17 00:03:27	61.70	60	10-Jul-17 00:02:29	73.50
10-Jul-17 00:03:32	60.40	60	10-Jul-17 00:02:34	77.30
10-Jul-17 00:03:41	61.70	60	10-Jul-17 00:02:38	70.30
10-Jul-17 00:03:51	60.70	60	10-Jul-17 00:02:43	70.70
10-Jul-17 00:04:00	60.90	60	10-Jul-17 00:02:48	91.10
10-Jul-17 00:04:05	58.50	60	10-Jul-17 00:02:53	70.00
10-Jul-17 00:04:10	61.30	60	10-Jul-17 00:02:57	79.30
10-Jul-17 00:04:16	59.50	60	10-Jul-17 00:03:03	79.40

ANEXO 3. Procedimiento de ejecución de autosintonización de controlador según manual de controlador UT35A de Yokogawa

6.3 Ejecutar y cancelar el autoajuste

Configuración de pantalla

Pantalla de configuración del modo de operación



Pantalla de operación> PARAMETER o tecla PARA durante 3 segundos (a la pantalla del menú [MOD0])> tecla SET/ENTER (La operación se muestra el modo.)> Tecla de flecha abajo (el modo es mostrado.)

El parámetro AT se muestra cuando el modo de operación es AUTO.

Detalles config.

Símbolo de parámetros	Nombre	Nivel pantalla	Rango de ajuste	Símbolo de Menú
AT	Selector de AUTO-tuning	EASY	OFF: Desactivado 1: Ejecución el autoajuste. El resultado se almacena en el PID de grupo 1. 2: Ejecución el autoajuste. El resultado se almacena en el PID de grupo 2. 3: Ejecución el autoajuste. El resultado se almacena en el PID de grupo 3. 4: Ejecución el autoajuste. El resultado se almacena en el PID de grupo 4. R: el resultado del ajuste se almacena en el PID para la desviación de referencia.	MODE Opse

ADVERTENCIA

Configure el modo de operación en AUTO y RUN para ejecutar el autoajuste.

Lámpara de estado

Estado	Lámpara STOP	Lámpara MANUAL
Durante autoajuste	Apagado	Parpadeando

6

Monitoreo y Control de Operaciones Regulares

ANEXO 4. Procedimiento de aplicación de filtro de señal de entrada según manual de controlador UT35A de Yokogawa

7.1 Funciones de Configuración de Señal de Entrada

7.1.4 Corrección de Señal de Entrada

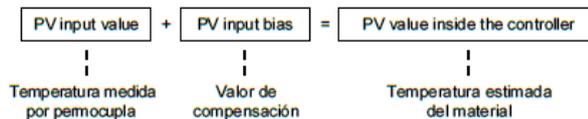
(1) Configuración de BIAS y Filtro

Descripción

BIAS de señal de entrada PV

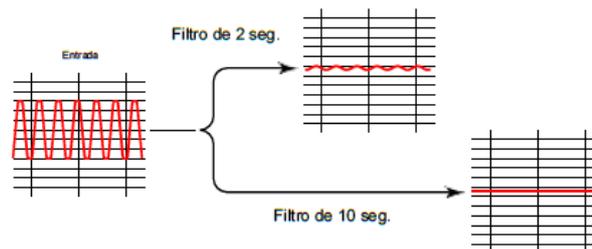
El bias de entrada de PV permite sumar el bias con la entrada para desarrollar un valor medido para uso de visualización y control dentro del controlador. Esta función también se puede utilizar para el ajuste fino para compensar pequeñas diferencias entre instrumentos en la lectura de la medición que pueden ocurrir incluso si todos están dentro de las precisiones especificadas del instrumento.

El bias de la entrada PV es usada para la operación normal.



Filtro de entrada PV

Si el ruido de entrada o las variaciones hacen que los dígitos de la pantalla de orden inferior fluctúen de modo que el valor mostrado sea difícil de leer, se puede insertar un filtro digital para un funcionamiento suave. Este filtro proporciona un cálculo de retraso de primer orden, que puede eliminar más ruido cuanto mayor sea la constante de tiempo. Sin embargo, una constante de tiempo excesivamente grande distorsionará la forma de onda.



Detalles config.

Símbolo de parámetros	Nombre	Nivel pantalla	Rango de ajuste	Símbolo de Menú
BS	PV input bias	EASY	-100 a 100 % de rango de entrada PV (EUS)	PVS
FL	PV input filter	EASY	OFF, 1 a 120 s	

7 Funciones de Entrada (PV)