

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Profesor Patrocinante

Dr. Fernando Betancourt C.

Ingeniero guía

Alonso Pereira

APLICACIÓN Y COMPARACIÓN DE SISTEMAS DE CONTROL PI Y FUZZY EN ESPESADOR PILOTO

The logo of the University of Concepción is centered behind the title. It features a shield with a yellow background, a blue border, and a central emblem. The emblem includes a red crown at the top, a blue and white striped banner, and a blue sword pointing downwards. The shield is surrounded by a laurel wreath and a blue border with white stars.

Carlos David Muñoz Apolonio

Informe de Memoria de Título
para optar al Título de
Ingeniero Civil Metalúrgico

Junio, 2019

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, gracias a mi familia por ese constante apoyo incondicional que me dan día a día, a la comprensión y libertad que se me ha dado desde siempre, sin aquello no hubiese sido nada fácil llegar hasta estas alturas.

A todas las amistades que estuvieron y que están, a las que hacen agradable y llevadera la vida, a las que han ayudado en el constante crecimiento personal, le doy las gracias.

Agradezco el apoyo y guía de las personas presentes mientras desarrolle esta memoria, sobre todo a Alonso Pereira que permitió la factibilidad de este estudio. Además, agradecer al profesor patrocinante, Fernando Betancourt, por la libertad y comodidad presente para realizar esta memoria.

Por último, agradezco a las circunstancias de la vida, por haber vivido una etapa de la vida en la Universidad de Concepción, las personas conocidas, la madurez adquirida, y experiencias vividas son impagables.



RESUMEN

En Chile la escasez hídrica se ha ido agravando durante el transcurso de los años y la industria minera se ha visto en la obligación de adecuarse a la normativa, optimizando los recursos hídricos dispuestos en su operación. Dentro del procesamiento de minerales, la etapa de concentración del mineral valioso es la que emplea un mayor consumo hídrico, por ende, es crucial recuperar y recircular la mayor cantidad de agua posible en dicha etapa.

Inmerso en el proceso convencional que efectúan las mineras se emplea una etapa de espesamiento, dispuesta posteriormente a la etapa de concentración, que tiene el propósito maximizar la recuperación de agua suministrada al proceso. Específicamente, los espesadores de relave son los equipos de mayor envergadura que se encargan de recuperar la mayor cantidad de agua.

El espesamiento de relaves es un proceso continuo en donde constantemente se presentan perturbaciones y, frente a ellas, se deben tomar decisiones rápidas y concisas que permitan mantener en condiciones óptimas las recuperaciones de agua por medio de la manipulación de las variables de control. Dicho control de variables debe ser instantáneo, es decir, que se obtenga una reacción inmediata frente a las perturbaciones del sistema. Para este estudio se presenta la aplicación de un sistema de control PI y un sistema de control Fuzzy y la comparación entre ellas, las cuales tienen como objetivo controlar la densidad en el flujo de descarga.

Las pruebas realizadas duraron aproximadamente 35 minutos, en donde se utilizó aproximadamente 35 [kg] de material particulado en cada prueba. Para poner a prueba cada controlador se varió 4 veces el valor objetivo deseado en la descarga, manteniendo constante las ganancias de los controladores. En el controlador PI se empleó una ganancia proporcional de valor 2 y una ganancia integrativa de valor 30. El controlador Fuzzy empleó una ganancia para el error de 3 y una ganancia para la derivada del error de 20. Para comparar los resultados de ambas pruebas se calculó la varianza producida en cada una. La varianza del controlador PI fue de 0.0097, en tanto para el controlador Fuzzy fue de 0.0034, solo un 35% de la varianza presentada en el controlador PI. Con esto se cuantifica la mayor eficacia del controlador Fuzzy frente a la toma correcta de decisiones. Las ganancias de los controladores fueron obtenidas a partir de simulaciones.

ABSTRACT

In Chile, water scarcity has been aggravated over the years and the industry has had to adapt regulations, optimizing water resources in its operation. Within the processing of minerals, the stage of the concentration of valuable mineral is water use, for example, it is crucial to recover and recirculate as much water as possible at that stage.

In the process, the objective of maximizing the recovery of water supplied to the process has not been used. Specifically, tailings thickeners are the largest equipment that is responsible for recovering the most water.

The tailings thickening is a continuous process where disturbances are constantly present and, in front of them, quick and concise decisions must be made that should be maintained in optimum conditions, the water recoveries in the middle of the manipulation of the control variables. Said control of variables must be instantaneous, that is to say, that has been an immediate reaction in front of the disturbances of the system. For this study we present the application of a PI control system and a Fuzzy control system and the comparison between them.

The tests carried out lasted approximately 35 minutes, with approximately 35 [kg] of particulate material in each test. To put a test, each of the controllers has multiplied 4 times. For the PI controller, a proportional gain of value 2 and an integrative gain of value 30 were used. For the Fuzzy controller, a error gain of value 3 and a derivative gain of value 20 were used. To compare the results of both tests, the variance produced in each one was calculated. The variance of the PI controller was 0.0097, while for the Fuzzy controller it was 0.0034, just a 35% of the PI controller variance. This quantifies the greater effectiveness of the controller against the correct decision making. The gains of the controller were obtained from simulations.

NOMENCLATURA Y ABREVIATURAS

φ	: Fracción volumétrica de sólido.
φ_c	: Fracción volumétrica de sólido crítica.
$\varphi_f(t)$: Fracción volumétrica de sólido en el flujo de alimentación del espesador.
$\varphi_D(t)$: Fracción volumétrica de sólido en el flujo de descarga del espesador.
φ_D^{sp}	: Valor objetivo en la fracción volumétrica de sólido en el flujo de descarga.
$\Delta\rho$: Diferencia de densidades ente el mineral y el agua $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$.
ρ_s	: Densidad del mineral $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$.
ρ_l	: Densidad del agua $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$.
g	: Aceleración de gravedad $\left[\frac{m}{s^2}\right]$.
$q(t)$: Flujo medio volumétrico $\left[\frac{m^3}{s \cdot m^2}\right]$.
$fbk(\varphi)$: Función de densidad de flujo de sólido batch de Kynch.
$v_s(\varphi)$: Función de velocidad de sedimentación $\left[\frac{m}{s}\right]$.
q_l	: Flujo medio volumétrico de la zona de clarificación $\left[\frac{m^3}{s \cdot m^2}\right]$.
q_r	: Flujo medio volumétrico de la zona de descarga del espesador $\left[\frac{m^3}{s \cdot m^2}\right]$.
Q_D^{sp}	: Valor objetivo del flujo volumétrico en la descarga del espesador $\left[\frac{m^3}{s}\right]$.
$Q_f(t)$: Flujo de alimentación del espesador $\left[\frac{m^3}{s}\right]$.
$Q_D(t)$: Flujo de descarga del espesador $\left[\frac{m^3}{s}\right]$.

$Q_l(t)$: Flujo de rebalse del espesador $\left[\frac{m^3}{s}\right]$.
$\sigma_e(\varphi)$: Función de esfuerzo efectivo de sólido.
$v_\infty(c)$: Velocidad terminal de sedimentación de una partícula.
m_{sp}	: Valor objetivo del inventario al interior del espesador [kg].
$m(t)$: Inventario al interior del espesador [kg].
C	: Dosificación de floculante expresado en gramos de floculante por tonelada de mineral.
$\dot{m}_{fl}(t)$: Masa de floculante agregada por unidad de tiempo.
$P\&ID$: Diagrama de cañerías e instrumentación.
CT	: Etapa de espesamiento continuo.
PI	: Controlador proporcional integrativo.
PLC	: Controlador lógico programable.
Z	: Variable espacial. Representa el alto del espesador [m].

INDICE DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS	i
RESUMEN	ii
ABSTRACT.....	iii
NOMENCLATURA Y ABREVIATURAS	iv
INDICE DE CONTENIDOS	vi
INDICE DE TABLAS	viii
INDICE DE FIGURAS	ix
CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Introducción General	1
1.2 Objetivo General.....	2
1.3 Objetivos Específicos	2
CAPITULO 2. ANTECEDENTES TEÓRICOS.....	3
2.1 Espesamiento	3
2.1.1 Espesador.....	4
2.1.2 Sedimentación	5
2.1.3 Consolidación.....	5
2.2 Sedimentación batch	6
2.3 Floculación.....	7
2.4 Ultra-floculación	9
2.5 Interacción de coloides	10
2.6 Medición de parámetros de sedimentación.	11
2.7 Modelo matemático.	11
2.7.1 Modelo matemático sin variaciones de propiedades en la alimentación.....	12
2.7.2 Modelo matemático con variaciones de propiedades en la alimentación.	13
2.8 Variables de proceso en espesamiento continuo.....	16
2.8.1 Variables de entrada.....	16
2.8.2 Variables de salida.	16
2.8.3 Variables de control de proceso.....	17

2.9 Sistemas de control automático	17
2.9.1 Controlador PID	18
2.9.2 Controlador difuso	21
2.10 Controladores desarrollados.....	24
2.10.1 Control de espesadores con dependencia en el tiempo	24
2.10.2 Control predictivo por modelo.....	24
2.10.3 Control por balance de masa simple	25
2.11 Descripción del equipo	27
2.12 Interfaz de operación.....	32
CAPITULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	34
3.1 Caracterización del mineral	34
3.1.1 Distribución granulométrica	34
3.1.2 Medición de densidad.....	36
3.2 Determinación de las condiciones fisicoquímicas de operación.....	36
3.2.1 Determinación de pH óptimo de operación	36
3.2.2 Determinación de la óptima dosificación de floculante	37
3.3 Controladores Propuestos.....	40
3.3.1 Controlador PI.....	40
3.3.2 Controlador Fuzzy	41
CAPITULO 4. RESULTADOS FINALES Y DISCUSIONES.....	44
4.1 Pruebas iniciales	44
4.2 Condiciones fisicoquímicas de operación.....	46
4.3 Prueba con controlador Fuzzy.....	46
4.4 Prueba con controlador PI	49
4.5 Ganancia de controladores	52
4.6 Cuantificación del error.	52
4.7 Discusiones	53
CAPITULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	56
BIBLIOGRAFÍA.....	57
ANEXOS.....	59

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores de densidad medidos en prueba de picnometría.	36
Tabla 2. Parámetros de la ecuación de Richard y Zaki a distintas concentraciones de floculante.	39
Tabla 3. Reglas de inferencia en función de los parámetros de entrada.....	42
Tabla 4. Condiciones fisicoquímicas de las pruebas de control PI y fuzzy.	46
Tabla 5. Ganancias del controlador PI	52
Tabla 6. Ganancias del controlador fuzzy.	52
Tabla 7. Varianza calculada de pruebas con controladores.	52
Tabla 8. Medición de distribución de tamaños. Prueba 1.....	59
Tabla 9. Medición de distribución de tamaños. Prueba 2.....	60
Tabla 10. Cálculo de velocidad inicial de sedimentación a distintas dosificaciones.	61



INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Modelo físico de la sedimentación y consolidación. (a) sedimentación. (b) consolidación.....	3
Figura 2. Modelo de espesador convencional en estado estacionario.....	4
Figura 3. Sedimentación batch y curva de sedimentación.....	6
Figura 4. Esquema de los diferentes pasos de la adsorción de poliméricos en partículas y posterior floculación.....	9
Figura 5. Modelo de Stern-Gouy-Chapman. La doble capa eléctrica adyacente a la superficie cargada negativamente (Partículas en agua, propiedades y procesos, Capítulo 3).....	10
Figura 6. Esquematación de un sistema de control.....	18
figura 7. Esquema básico de lazo de control de controlador Fuzzy.....	23
Figura 8. Diagrama de bloque para sistema de control.....	26
Figura 9. Diagrama de bloque para sistema de control con perturbación en la prealimentación.....	26
Figura 10. Diagrama de bloque para sistema de control prealimentado.....	26
Figura 11. P&ID del espesador piloto.....	27
Figura 12. Etapa de espesamiento.....	28
Figura 13. Etapa de preparación de pulpa.....	29
Figura 14. Bombas y flujómetro de alimentación.....	30
Figura 15. Bomba y flujómetro de descarga.....	31
Figura 16. Pantalla de registro de porcentaje de sólido, flujo de entrada y de salida.....	32
Figura 17. Pantalla de preparación de pulpa.....	32
Figura 18. Pantalla de dosificación de floculante.....	33
Figura 19. Distribución de tamaño de sólido y densidad. Prueba 1.....	35
Figura 20. Distribución de tamaño de sólido y densidad. Prueba 2.....	35
Figura 21. Gráfico de valores medidos de potencial Zeta a distintos valores de pH.....	37
Figura 22. Prueba de sedimentación batch en equipo SediRack. Dosificación de floculante: 30 [g/ton].	38
Figura 23. Densidad de flujo de sólido a distintas concentraciones de floculante.....	39
Figura 24. Función de pertenencia del error.....	41
Figura 25. Función de pertenencia de la derivada del error.....	42
Figura 26. Gráfico 3D de la variación de flujo, en función de las entradas error y derivada del error....	43
Figura 27. Esquema de lazo de controlador Fuzzy.....	43
Figura 28. Comportamiento del porcentaje de sólido en peso en la alimentación. Pruebas iniciales....	44
Figura 29. Comportamiento del caudal de alimentación. Pruebas iniciales.....	45
Figura 30. Comportamiento del caudal de descarga. Pruebas iniciales.....	45
Figura 31. Comportamiento del porcentaje de sólido en peso en la descarga. Pruebas iniciales.....	45
Figura 32. Comportamiento del porcentaje de sólido en peso en la alimentación. Prueba con controlador Fuzzy.....	47
Figura 33. Comportamiento del caudal de alimentación. Prueba con controlador Fuzzy.....	47
Figura 34. Comportamiento de la densidad en la descarga en el tiempo, frente a variaciones en el objetivo deseado. Prueba con controlador Fuzzy.....	48

Figura 35. Comportamiento del caudal de descarga. Prueba con controlador Fuzzy.....	48
Figura 36. Comportamiento del contenido de sólido en el flujo de alimentación a través del tiempo. Prueba con controlador PI.....	50
Figura 37. Comportamiento del flujo de alimentación al espesador piloto. Prueba con controlador PI.....	50
Figura 38. Comportamiento de la densidad de la descarga en el tiempo, frente a variaciones en el objetivo deseado. Prueba con controlador PI.	51



CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción General

Los recursos hídricos utilizados en la minería representan un 3% de la demanda a nivel nacional [1]. El sector minero se desarrolla fuertemente desde la región metropolitana al norte, parte del país que precisamente está presentando situaciones de estrés hídrico, pues las extracciones igualan o superan al caudal disponible. En los siguientes años la situación se volverá más agravante, se prevén aumentos de la demanda de agua del orden de un 200% para los próximos 25 años debido al incremento de las temperaturas por la acción del cambio climático. Bajo estas circunstancias, la minería tiene como desafío optimizar los recursos hídricos y, al mismo tiempo, minimizar los riesgos de contaminación generados por los procesos productivos [2-3].

Un 67% del agua en la minería es usada en la etapa de concentración, específicamente en las etapas de molienda y flotación. La recuperación y reutilización de este recurso ha mejorado con los años producto de los avances tecnológicos en las etapas de separación de fases, tales como espesamiento y filtración. Los relaves generados en la etapa de flotación representan casi la totalidad del agua utilizada en la etapa de concentración y, el gran volumen de relaves opaca la consideración de filtrar estos residuos debido al considerable aumento en los costos de capex y opex. De lo mencionado anteriormente, se desprende la importancia del espesamiento de relaves [4-5].

Las técnicas convencionales de espesamiento han mejorado considerablemente a lo largo de los años y, bajo la misma línea, se han mantenido y enfocado los estudios en torno a los fenómenos fisicoquímicos de las superficies de las partículas en suspensión, con tal de producir su sedimentación y con ello la separación de fases sólido-líquido. Esta situación implica que las mejoras en la recuperación de agua estén ligadas a un uso óptimo de los espesadores.

Enfocado en la etapa de separación sólido-líquido y, desde el punto de vista ingenieril, una forma viable de mantener el buen manejo de un equipo corresponde a la tenencia de información adecuada y control de las variables del proceso, con el fin de adecuar su funcionamiento para óptimos resultados.

1.2 Objetivo General

Emplear y desarrollar estrategias de control para la optimización de variables en pruebas de espesamiento de partículas finas de cuarzo, con el fin de aumentar las recuperaciones de agua.

1.3 Objetivos Específicos

1. Caracterización fisicoquímica del mineral.
2. Determinación de parámetros de sedimentación mediante pruebas batch.
3. Estudiar estrategias de control propuestas anteriormente.
4. Diseñar, desarrollar y aplicar 2 estrategias de control para espesador piloto.
5. Analizar, comparar y discutir resultados obtenidos en base a las 2 estrategias de control diseñadas.



CAPITULO 2. ANTECEDENTES TEÓRICOS

2.1 Espesamiento

Una de las etapas dentro del circuito de concentración de mineral(es) es la etapa de espesamiento. Esta consiste en la recuperación de agua y el espesamiento de la pulpa, llevadas a cabo en grandes tanques cilíndricos cónicos denominados espesadores. El principio bajo el cual se rige el funcionamiento del espesador corresponde a la decantación de las partículas por acción de la gravedad. Las partículas pueden sedimentarse como partículas libres o un agregado de ellas conocidas como flóculos.

Por medio de la separación de fases mediante la superposición de los mecanismos de sedimentación y consolidación y, potenciando el proceso mediante el uso de coagulantes y floculantes, se obtiene como producto una pulpa de mayor concentración de sólidos respecto a la pulpa de alimentación. En la Figura 1 se representa el modelo físico de la sedimentación y consolidación [6].

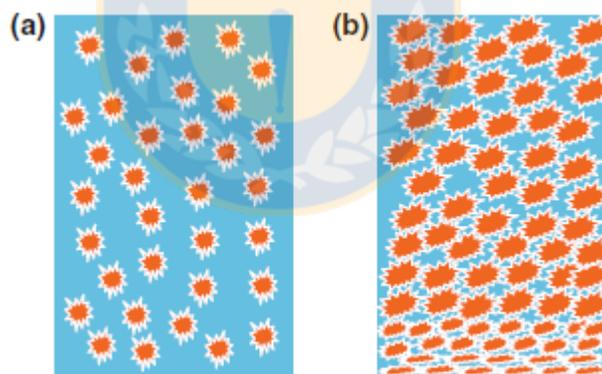


Figura 1. Modelo físico de la sedimentación y consolidación. (a) sedimentación. (b) consolidación.

2.1.1 Espesador

En la parte superior de este equipo se realiza la recuperación de agua, la cual idealmente no presenta partículas en suspensión, siendo el flujo recuperado recirculado a otras etapas del proceso de concentración. Por la zona media del espesador ingresa la pulpa, la cual previamente fue acondicionada mediante la adición de floculantes y coagulantes. En la zona inferior del espesador se descarga el sedimento espesado y, para el caso de espesamiento de relaves, es enviado al tranques de relaves.

Para efectos de estudios se suele considerar un modelo ideal de espesador de forma cilíndrica. En la Figura 2 se muestra el modelo, con sus respectivas zonas y flujos [6].

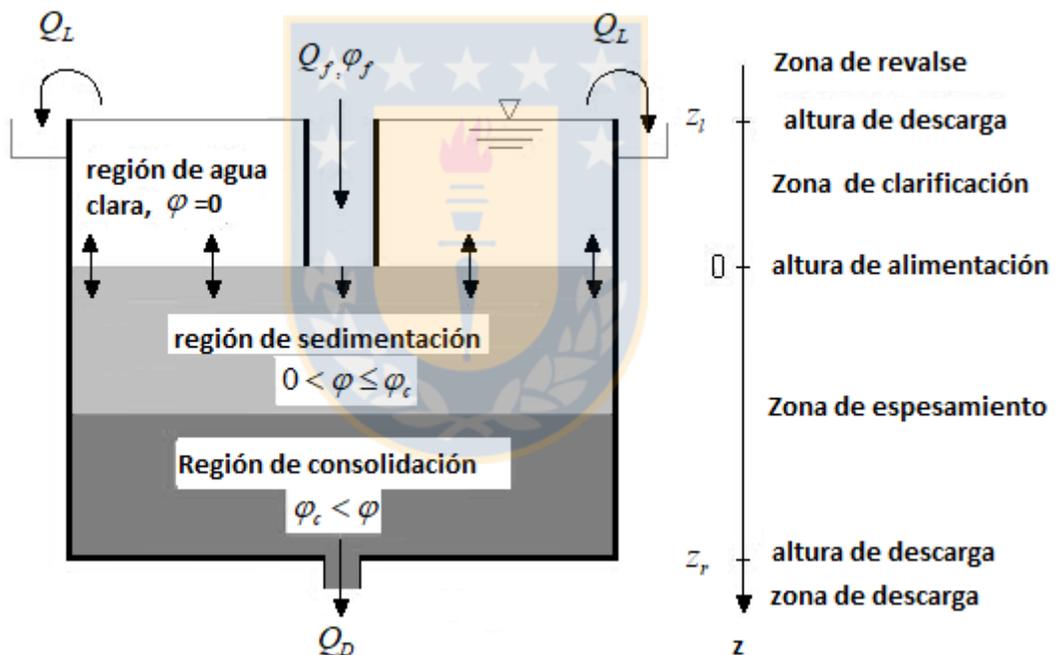


Figura 2. Modelo de espesador convencional en estado estacionario.

2.1.2 Sedimentación

Es el proceso que define el asentamiento de una partícula o una suspensión de estas en un fluido, debido al efecto de fuerzas tales como la fuerza de gravedad, fuerza centrípeta, o cualquier fuerza externa que afecte a la partícula. Factores como el tamaño de partícula, viscosidad del líquido, concentración de sólidos, entre otros, afectan al proceso de sedimentación.

Durante el proceso de asentamiento, las partículas en suspensión interactúan entre sí a medida que van descendiendo, ya sea obstaculizando la trayectoria de una con otras, o en ciertos casos, por repulsión electrostática entre ellas. Esto provoca una menor velocidad de asentamiento, en comparación a la velocidad que tendría una partícula de manera individual [6].

2.1.3 Consolidación

A medida que las partículas van descendiendo hacia el fondo del espesador, estas se comienzan a aglomerar unas sobre otras. Si la aglomeración de partículas es incompresible, el proceso de espesamiento se da por terminado. Por otra parte, en el caso de que la aglomeración de partículas sea compresible, tal como la consolidación de relaves de cobre flocculados, el peso que ejercen los flóculos superiores a los inferiores provoca una compresión de estos, permitiendo extraer el agua alojada en sus poros y provocar su ascenso hasta la zona superior del espesador.

Las propiedades principales del sedimento son su permeabilidad y compresibilidad. La primera se refiere a la facilidad con la que un fluido puede moverse a través de él, mientras que la segunda se refiere a la facilidad con la que el sedimento puede disminuir su volumen cuando es sometido a una fuerza. Las variables asociadas a estas propiedades son la presión de poros y el esfuerzo efectivo de sólido.

La concentración de la suspensión que separa la zona de sedimentación y consolidación se denomina concentración crítica y el tiempo en el que esto ocurre se denomina tiempo crítico [6].

2.2 Sedimentación batch

La sedimentación batch o sedimentación discontinua corresponden a ensayos realizados a escala de laboratorio que, a través de mediciones, permiten obtener parámetros asociados al proceso. Dichos parámetros son de gran utilidad al momento de operar un sistema de sedimentación continua.

Para realizar un ensayo se debe preparar una pulpa de porcentaje de sólido conocido, la cual se vierte en una probeta graduada, de esta forma es posible medir la altura de la interfaz entre el agua clara y la pulpa que se está sedimentando al transcurrir el tiempo. Considerando estos datos, se puede crear un gráfico a través de una curva de sedimentación, a partir de la cual es posible determinar la velocidad de sedimentación. En la Figura 3 se muestra el ensayo descrito.

Para el cálculo de la velocidad de sedimentación, se traza una recta tangente a la curva en cada uno de los puntos graficados en el rango inferior al tiempo crítico, es decir, en la etapa donde las partículas están descendiendo. La pendiente de esta recta indica la velocidad de sedimentación [6].

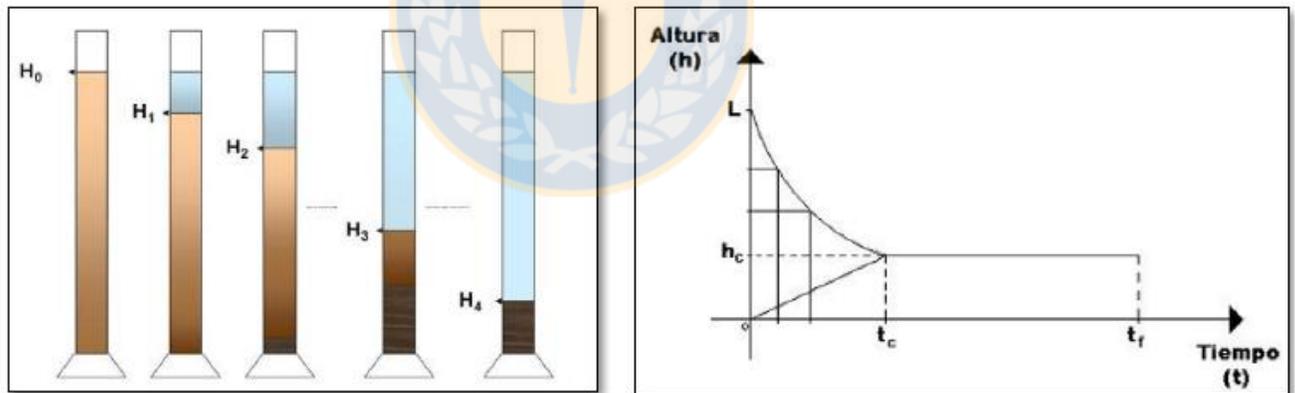


Figura 3. Sedimentación batch y curva de sedimentación.

2.3 Floculación.

Uno de los principales problemas del proceso de sedimentación es el tiempo que demoran las partículas en asentarse y consolidarse, esto debido a que usualmente hay gran cantidad de partículas finas, las cuales no suelen verse afectadas mayormente por la fuerza de gravedad que actúa sobre ellas. Por otro lado, para tamaño de partículas muy pequeños las fuerzas electroestáticas son predominantes producto de los iones presentes en el agua y en las superficies de las partículas, esto implica una repulsión entre las partículas y, por ende, una lenta aglomeración. Ante este tipo de problemas se han propuesto la utilización de polímeros tales como coagulantes y floculantes.

Los floculantes son polímeros de cadena larga de alto peso molecular que tienen como función unir las partículas presentes en la suspensión acuosa y formar agregados densos que sean afectados notoriamente por la fuerza de gravedad y, de esta manera se reducen los tiempos de separación de fases en los procesos de sedimentación.

La adsorción de las partículas en los floculantes puede ocurrir a través de distintos mecanismos [7]:

Interacción electroestática: Este caso ocurre simplemente cuando un polielectrolito es adsorbido en una superficie de carga opuesta. Esta adsorción suele ser fuerte, sobre todo con polielectrolitos altamente cargados, sin embargo, una alta concentración de sal en solución puede afectar la interacción eléctrica entre el polímero y la superficie de la partícula, generando una adsorción más débil.

Enlaces de hidrógeno: En ciertos casos, los conocidos “puentes de hidrógeno” se pueden originar debido a la interacción entre un grupo amida perteneciente al polímero y algún hidróxido en la superficie de la partícula.

Interacción hidrofóbica: Esta interacción es responsable de la adsorción de los segmentos no polares de la cadena polimérica con las regiones hidrofóbicas de las superficies de las partículas.

Enlaces iónicos: Es posible que electrolitos sean adsorbidos en superficies con igual carga, contrariamente a lo que implica el fenómeno de repulsión electroestática. En los casos donde exista una partícula cuya superficie está cargada negativamente y, en presencia de polielectrolitos aniónicos,

la repulsión eléctrica podría evitar la adhesión. Sin embargo, si hay presencia de ciertos iones metálicos especialmente iones divalentes tales como el calcio, es posible generar una fuerte adhesión, pues estos iones divalentes suelen enlazarse fuertemente con los grupos carboxílicos del polímero y servir como unión con las regiones negativas de las superficies de las partículas.

La cinética que se lleva a cabo para la formación de flóculos se puede resumir en los siguientes pasos, e ilustrar en la Figura 4.

- a) Mezcla: La mezcla del polímero con la suspensión de partículas es un importante paso para lograr una floculación eficiente. Una mezcla ineficiente ocasiona una sobredosificación local, en otras palabras, la falta de homogenización del polímero en la pulpa provoca un exceso de adsorción de partículas en algunas zonas, mientras que en otras zonas la adsorción es ineficiente.
- b) Adsorción: La adsorción del polímero en las partículas es estudiada como un proceso de colisión pues, a mayor número de colisiones existirá una mayor cantidad de polímeros adsorbidos en la superficie de la partícula.
- c) Reconformación de las cadenas poliméricas adsorbidas: Cuando la cadena polimérica es adsorbida en la superficie de la partícula, la estructura del polímero se modifica producto del equilibrio energético, por ende, el polímero se adsorbe en distintas zonas de la superficie de la partícula.
- d) Colisión para formar flóculos: Corresponde a la colisión entre partículas que tienen polímeros adsorbidos superficialmente, este suceso permite formar agregados conocidos como flóculos.
- e) Rompimiento de flóculos: Existe la posibilidad que los flóculos se rompan frente a ciertas condiciones, por ejemplo, aplicar elevadas velocidades de cizalle.

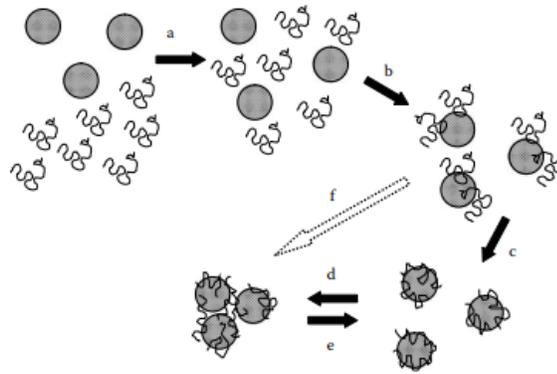


Figura 4. Esquema de los diferentes pasos de la adsorción de poliméricos en partículas y posterior floculación.

2.4 Ultra-floculación

En cualquier proceso de floculación se desea obtener una mezcla de floculante con la suspensión lo más rápido posible, y que su distribución sea lo más uniforme posible. El proceso emplea una velocidad de cizalle menor a 64 [1/s] y gradientes de velocidades menores a 10 [1/s]. Usualmente se utilizan valores significativamente menores a los mencionados con el propósito de evitar el rompimiento de los flóculos.

La incorporación de la ultra-floculación, demuestra que es posible aplicar valores de velocidad de cizalle mayores a los empleados comúnmente, con el fin de incrementar la frecuencia de las colisiones, siempre y cuando se disminuya considerablemente el tiempo de residencia en el reactor donde ocurre dicha floculación, de varios minutos a menos de 10 segundos.

2.5 Interacción de coloides

Una partícula en una solución acuosa es propensa a adquirir una carga superficial debido a varias razones, la más común es que su superficie presenta compuestos o elementos químicos que se ionizan en presencia de agua.

Una superficie cargada en contacto con una solución iónica producirá una distribución de cargas característica, es decir, si existe una superficie con carga, habrá un exceso de iones que rodean la partícula y que poseerán una carga opuesta, para mantener la electronegatividad del sistema. La combinación del sistema de la carga superficial y el exceso de carga en la solución adyacente a la partícula, es conocida como fenómeno de doble capa eléctrica. Dentro del estudio del fenómeno de doble capa se distingue la capa Stern y la capa Difusiva. La capa Stern representa los iones que se ordenan próximos a la superficie de la partícula, por otra parte, la capa difusiva corresponde a los iones que se presentan después de la capa de Stern [7]. La carga en la capa difusiva es directamente proporcional al potencial Stern, véase a modo de ilustración la Figura 5.

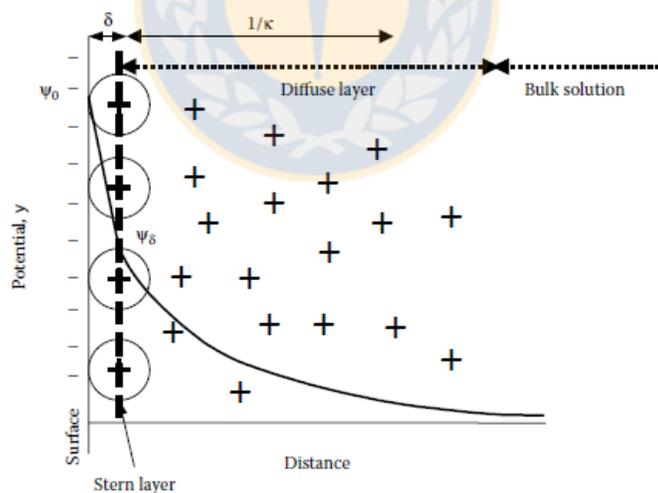


Figura 5. Modelo de Stern-Gouy-Chapman. La doble capa eléctrica adyacente a la superficie cargada negativamente (Partículas en agua, propiedades y procesos, Capítulo 3).

Cuando se aproximan dos partículas cargadas en solución, las componentes difusivas de sus segundas capas eléctricas se superponen causando una interacción. Si las partículas son de carga

similar, se generará repulsión entre ellas, lo que en muchos casos se conoce como estabilidad de coloides.

2.6 Medición de parámetros de sedimentación.

La sedimentación es expresada en términos de concentración de sólidos, la cual se mide en fracción volumétrica de sólido y densidad de flujo de sólido. Este último concepto se define como el producto entre la fracción volumétrica de sólido y la velocidad de sedimentación.

Entre los modelos utilizados se encuentra el de Richardson y Zaki creado en el año 1954 y el de Michels y Bolger creado en 1962. Para efectos de este estudio se utiliza el primer modelo.

Para obtener los parámetros requeridos se realizan pruebas de sedimentación batch a distintas concentraciones de sólido, posteriormente se grafican las velocidades de sedimentación obtenidas en función de la fracción volumétrica de sólido y se obtienen los parámetros de la pendiente lineal de la curva de sedimentación. Las ecuaciones que modelan la velocidad de sedimentación y la densidad de flujo de sólido según lo propuesto por Richardson y Zaki, quedan descritas en las ecuaciones (1) y (2) respectivamente.

$$v_s(\varphi) = v_{\infty}(1 - \varphi)^c \quad (1)$$

$$fbk(\varphi) = \varphi v_s(\varphi) \quad (2)$$

2.7 Modelo matemático.

Los controladores propuestos en la sección 2.10 han sido desarrollados en base a modelos matemáticos, los cuales permiten describir el comportamiento al interior de un espesador. A continuación, se describen los modelos matemáticos más relevantes para el desarrollo de controladores.

2.7.1 Modelo matemático sin variaciones de propiedades en la alimentación.

En conjunto con modelos que permiten describir la teoría de sedimentación y consolidación, se desarrolló en 2005, un modelo matemático de proceso continuo para el estudio de los fenómenos de sedimentación-consolidación, utilizando suspensiones floculadas en un espesador clarificador [9,17,18]. Este modelo simplifica el análisis al interior del espesador considerando que las variables, tales como concentración de sólidos, serán iguales a lo largo de la sección transversal del equipo, por lo tanto, dependerán solo del tiempo [t] y de la altura [z]. De igual manera, se considera que en la zona de clarificación se genera un flujo sin presencia de sólidos y, además, el flujo en la descarga de sólido se mueve a la misma velocidad que el líquido.

Tal como describe Raimund Bürguer, el componente principal que explica los fenómenos corresponde a la ecuación parabólica fuertemente degenerada (3).

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial(q(t)\varphi + fbk(\varphi))}{\partial t} = \frac{\partial^2 D(\varphi)}{\partial z^2} \quad (3)$$

La función $D(\varphi)$ de la ecuación anterior se describe mediante la siguiente expresión (4).

$$D(\varphi) = \int_0^\varphi d(\varphi) d\varphi \quad (4)$$

En donde la función a integrar $d(\varphi)$ corresponde a (5)

$$d(\varphi) = \frac{v_s(\varphi)\sigma'_e(\varphi)}{(\rho_s - \rho_l)g} \quad (5)$$

Y $\sigma'_e(\varphi)$ se describe por (6)

$$\sigma'_e(\varphi) = \frac{\Delta\rho\varphi g}{\frac{\partial \varphi}{\partial z}} \quad (6)$$

Para que esta ecuación permita modelar las distintas zonas en el proceso de espesamiento, se introducen a la ecuación un mecanismo de alimentación representado a través de parámetros de discontinuidad que permiten diferenciar las zonas de descargas, con las zonas de sedimentación y clarificación. La ecuación queda finalmente descrita en (7).

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial g(z, \varphi)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} (\gamma_1(z) \left(\frac{\partial D(\varphi)}{\partial z} \right)) \quad (7)$$

Con la función “g” descrita en (8) y los parámetros de discontinuidad en (9) y (10).

$$g(z, \varphi) = \gamma_1(z) f b k(\varphi) + \gamma_2(z) (\varphi - \varphi_f) \quad (8)$$

$$\gamma_1(z) = \begin{cases} 1 & z \in (z_l, z_r) \\ 0 & z \notin (z_l, z_r) \end{cases} \quad (9)$$

$$\gamma_2(z) = \begin{cases} q_r & z < 0 \\ q_l & z \geq 0 \end{cases} \quad (10)$$



2.7.2 Modelo matemático con variaciones de propiedades en la alimentación.

A continuación, se propone un nuevo modelo [10] en el que alguna propiedad del flujo de alimentación al espesador continuo va cambiando a través del tiempo. En este caso, la propiedad a estudiar es la velocidad de sedimentación de las partículas, la cual dependerá de la dosificación de floculante.

Se introduce un nuevo término adimensional “k”, el cual permite describir la velocidad de sedimentación en función de la altura del espesador, mientras transcurre el tiempo. El valor de “k” está comprendido entre 0 y 1, es decir, cuando el valor de k es 0, la velocidad de sedimentación de la partícula es 0, por otra parte, si el valor es 1 la velocidad de sedimentación es máxima, es decir, cuando la floculación ocurre en óptimas condiciones.

La nueva ecuación que describe la velocidad de sedimentación de la partícula queda expresada por (11). Por otra parte, se introduce un nuevo término que permite describir la concentración local de partículas (12), en función de la información adicional “k”.

$$\bar{v}_s(\varphi, k) = k v_s(\varphi) \quad (11)$$

$$w(z, t) = k(z, t)\varphi(z, t) \quad (12)$$

Al reemplazar la ecuación (1) por (11), en las ecuaciones donde esté presente la velocidad de sedimentación, se obtiene la siguiente expresión representada por la ecuación de conservación (13) [10].

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{F}(\varphi, k, z, t)) = \frac{\partial}{\partial z} (\gamma_1(z)k \frac{\partial D(\varphi)}{\partial z}) + \frac{Q_f(t)\varphi_f(t)\delta(z)}{A} \quad (13)$$

En donde “ \bar{F} ” queda descrita por (14).

$$\bar{F}(\varphi, k, z, t) = \begin{cases} -Q_l(t)\varphi/A & \text{para } z < z_l \\ -Q_l(t)\varphi/A + \bar{v}_s(\varphi, k)\varphi & \text{para } z_l \leq z < 0 \\ Q_D(t)\varphi/A + \bar{v}_s(\varphi, k)\varphi & \text{para } 0 \leq z \leq z_r \\ Q_D(t)\varphi/A & \text{para } z_r < z \end{cases} \quad (14)$$

A partir de la ecuación del flujo total de partículas por unidad de área (15) obtenida a partir de (13) y, la utilización del teorema de transporte de Reynolds, se obtiene una segunda ecuación de conservación la cual en conjunto con la ecuación (13) constituyen un sistema de ecuaciones que representan el modelo a emplear en el sistema de control. El término “w” reemplaza al termino “k” resultando en las 2 ecuaciones representadas en (16) y (17).

$$\varphi(\varphi, \frac{d\varphi}{dz}, k, z, t) = \bar{F}(\varphi, w/\varphi, z, t) - \gamma_1(z)k \frac{\partial D(\varphi)}{\partial z} \quad (15)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{F}(\varphi, w/\varphi, z, t)) = \frac{\partial}{\partial z} (\frac{\gamma_1(z)w}{\varphi} \frac{\partial D(\varphi)}{\partial z}) + \frac{Q_f(t)\varphi_f(t)\delta(z)}{A} \quad (16)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{w}{\varphi} \bar{F}(\varphi, w/\varphi, z, t) \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\gamma_1(z) w^2}{\varphi^2} \frac{\partial D(\varphi)}{\partial z} \right) + \frac{Q_f(t) \varphi_f(t) \delta(z)}{A} \quad (17)$$

La ventaja de este modelo es el empleo de las propiedades descritas por “k” en función del grado de floculación de la pulpa cuando esta ingresa al espesador y, se expresa en términos de la velocidad de sedimentación. Debido a que la velocidad de sedimentación será función de la dosificación de floculante, es posible dejar descrito “k” en función de la velocidad terminal y del parámetro v_0 que indica la velocidad máxima de una partícula. La ecuación (18) deja en manifiesto lo explicado.

$$\bar{k}(c) = v_\infty(c) / v_0 \quad (18)$$

La dosificación de floculante varía a través del tiempo queda descrita por la ecuación (19). Esto implica que la variable “k” queda expresada en función del tiempo.

$$c(t) = \frac{\dot{m}_{fl}(t)}{\rho_s \varphi_f(t) Q_f(t)} \quad (19)$$

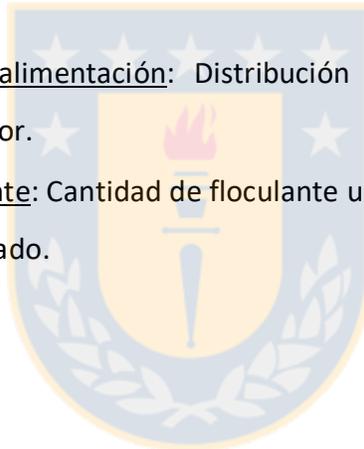


2.8 Variables de proceso en espesamiento continuo

Las variables más importantes presentes en la etapa de espesamiento continuo se pueden resumir a continuación:

2.8.1 Variables de entrada.

- Flujo de pulpa en la alimentación: Flujo volumétrico de pulpa que ingresa al espesador.
- Concentración de sólido en la alimentación: Cantidad de sólido presente en el flujo de alimentación, representada en fracción volumétrica o fracción en peso, respecto al flujo de alimentación.
- Granulometría de la alimentación: Distribución de tamaño de partículas que son alimentadas al espesador.
- Dosificación de floculante: Cantidad de floculante usado por cada cierta cantidad de flujo de alimentación empleado.



2.8.2 Variables de salida.

- Flujo de pulpa en la descarga: Flujo volumétrico de pulpa espesada que sale en la descarga del espesador.
- Concentración de sólido en la descarga: Cantidad de sólido presente en el flujo de descarga, representada en fracción volumétrica o fracción en peso, respecto al flujo de descarga.
- Altura del sedimento: Cantidad de sedimento que se acumula en el fondo del espesador. A mayor altura se obtendrá una mayor concentración de sólido en la descarga.
- Torque de las rastras: Fuerza por unidad de distancia que deben tener las rastras para lograr que el sedimento espesado pueda llegar a la zona de descarga.

2.8.3 Variables de control de proceso.

- Flujo de floculante: Permite controlar la velocidad de sedimentación de las partículas.
- Flujo de descarga: Permite controlar la altura del sedimento espesado y con ello, controlar la concentración de sólido en la descarga.

2.9 Sistemas de control automático

Un sistema dinámico se puede definir como un ente que recibe acciones externas denominadas variables de entradas y que, en respuesta a ello, entrega variables de salida. Dichas variables suelen ser manipulables o también, pueden corresponder a perturbaciones.

En un sistema dinámico tal como un espesador piloto, las perturbaciones están presentes en el flujo de alimentación del espesador y su respectiva concentración de sólido y, la variable de control suele corresponder al flujo de descarga del espesador permitiendo controlar la variable de salida, es decir, la concentración de sólido en la descarga. Un sistema de control automático constituye un conjunto de componentes físicos conectados entre sí, de manera que regulen su actuar sin intervención de agentes externos [11].

La retroalimentación es la base sobre la cual se han construido los esquemas de control y sus respectivos sistemas. La idea consiste en la modificación de las variables manipulables en función del valor que adquiere la variable de concentración de sólido en la descarga. En otras palabras, la retroalimentación es empleada porque a pesar de las perturbaciones, variaciones y características del proceso [12], permite que la variable en estudio se acerque a un valor objetivo.

La esquematización del concepto básico del controlador se representa en la Figura 6. Se destaca que la forma de retroalimentación de información depende del tipo de controlador a usar, en este estudio, se emplea un controlador PID y un controlador Difuso.

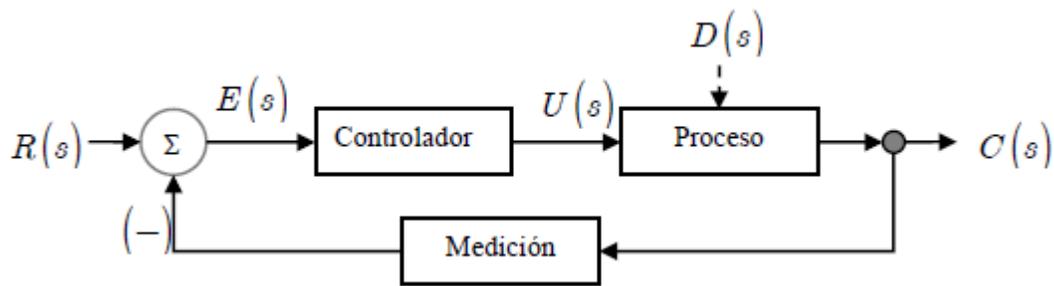


Figura 6. Esquematización de un sistema de control.

Error: $E(s) = R(s) - C(s)$

Perturbación: $D(s)$

Entrada a proceso: $U(s)$

Valor objetivo: $R(s)$

Respuesta del sistema: $C(s)$



2.9.1 Controlador PID

La base del controlador PID consiste en el procesamiento del error obtenido al comparar la variable de proceso con su respectivo valor objetivo o set point. El controlador PID discreto calcula la acción de control, la cual se compone de 3 partes:

1. Acción proporcional: $u_p(t) = K_p e(t)$ (20)

2. Acción integrativa: $u_i(t) = \frac{K_p}{T_i} \sum_{i=0}^t e(i) \Delta t$ (21)

3. Acción derivativa: $u_d(t) = \frac{K_d T_d}{\Delta t} (e(t) - e(t-1))$ (22)

En donde t es el instante de muestreo y Δt el tiempo de muestreo. La acción total queda expresada como:

$$u(t) = u_p(t) + u_i(t) + u_d(t) \quad (23)$$

La forma en que ira variando la acción total se conoce como forma incremental. Conociendo de antemano la ecuación (24) se puede calcular la variación que tendrá la acción (25), y con ello obtener el nuevo valor de la variable de control.

$$u(t-1) = K_p e(t-1) + \frac{K_p}{T_i} \sum_{i=0}^{t-1} e(i) \Delta t + \frac{K_d T_d}{\Delta t} (e(t-1) - e(t-2)) \quad (24)$$

$$u(t) - u(t-1) = K_p (e(t) - e(t-1)) + \frac{K_p}{T_i} e(t) \Delta t + \frac{K_d T_d}{\Delta t} (e(t) - 2e(t-1) - e(t-2)) \quad (25)$$

La variable de control suele operar dentro de un rango acotado fijado por el operador con el fin de que el equipo y el proceso funcionen en óptimas condiciones. Para el caso del control del flujo de descarga de un espesador piloto las condiciones que acotan el rango de operación son las siguientes:

$$\text{si } u(t) \geq Q_D \text{max} \rightarrow u(t) = Q_D \text{max} \quad (26)$$

$$\text{si } u(t) \leq Q_D \text{min} \rightarrow u(t) = Q_D \text{min} \quad (27)$$

Las acciones de control son regidas por parámetros conocidos como ganancia proporcional, tiempo integrativo y tiempo derivativo. Es necesario ajustar debidamente los parámetros con el objetivo de controlar la concentración en la salida ante un cambio de tipo escalón de la referencia lo más rápido posible. Respecto a los parámetros del controlador se pueden hacer las siguientes generalidades [12]:

- Ganancia proporcional: Al incrementar la ganancia proporcional el sistema puede aumentar su velocidad y, por otro lado, disminuye la razón de amortiguamiento por lo cual el sistema puede volverse oscilatorio.
- Tiempo integrativo: Al aumentar el tiempo integrativo el sistema puede tardar más en alcanzar la referencia ante un cambio de tipo escalón. Se considera que a valores pequeños de tiempo integrativo la respuesta se acerca rápidamente al valor deseado, sin embargo, resulta ser más oscilatoria. El tiempo integrativo asegura error nulo en estado estacionario para referencias con paso escalón.
- Tiempo derivativo: No es fácil establecer generalidades respecto a este parámetro pues, está ligado fuertemente a la naturaleza y comportamiento del proceso a controlar. No obstante, dentro de un rango de valores, el tiempo derivativo permite disminuir las

oscilaciones y mejorar la velocidad de respuesta del proceso. La acción derivativa no es recomendable para procesos ruidosos o con retardo dominante, por lo que debe ser anulada.

Existen diversos métodos para sintonizar un controlador PID [19]. Si se tiene una idea aproximada de los valores de las constantes, se puede emplear el método de prueba y error tal como se detalla a continuación [13]:

1. Las constantes derivativas e integrativas son acotadas. Esto indica que la constante integrativa adquiere un valor máximo y la constante derivativa un valor mínimo.
2. La constante proporcional se aumenta gradualmente hasta obtener oscilaciones permanentes y, posteriormente, es multiplicada por $1/2$.
3. La constante integrativa es reducida gradualmente hasta que se presenten oscilaciones permanentes, posteriormente dicha constante es multiplicada por 3.
4. La constante derivativa es reducida gradualmente hasta que se presenten oscilaciones permanentes y, posteriormente, es multiplicada por $1/3$.

Los números usados para multiplicar, es decir, $1/2$, $1/3$ y 3 son obtenidos de la observación de controladores industriales. Los valores pueden cambiar en la medida que se ocurra un mejor ajuste del controlador.

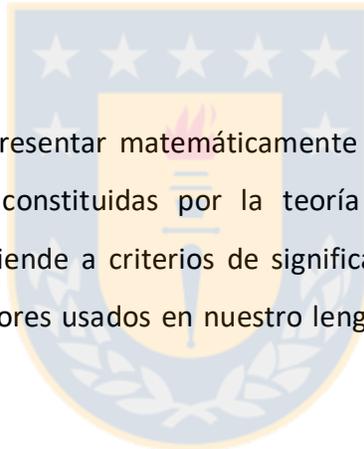
El objetivo de esto es poder obtener una respuesta rápida y poco oscilatoria cuando la referencia presenta un cambio de tipo escalón. Para realizar esto es necesario un tiempo de experimentación que permita lograr una correcta sintonización.

2.9.2 Controlador difuso

Desde mediados de los años 60 hasta principio de los años 80, Lotfi Asker Zadeh desarrolló y perfeccionó un método para manejar y procesar información del mismo modo que lo efectúa un ser humano, permitiendo así, manejar información imprecisa y la incertidumbre por medio de lo que el denominó lógica difusiva. La gran ventaja de esta nueva metodología corresponde al uso del conocimiento experto, permitiendo la automatización de las tareas a desarrollar. Es decir, al existir conocimientos del proceso permite modelarlo mediante una lógica difusa [14].

2.9.2.1 Lógica difusiva

La lógica difusiva permite representar matemáticamente la incertidumbre y la ambigüedad a través de herramientas que son constituidas por la teoría de conjuntos difusos y funciones características asociadas a ellos. Atiende a criterios de significado y no de precisión, por lo tanto, permite comprender los cuantificadores usados en nuestro lenguaje, por ejemplo, demasiado, poco, alto, bajo, frío, caliente, etc.



2.9.2.2 Teoría de conjuntos difusos

La teoría de conjuntos difusos corresponde a un intento de desarrollar una serie de contextos para procesar de manera correcta las imprecisiones, cuando los límites en las clases de objetos no están bien definidos. Por ejemplo, definir los límites para clasificar la estatura de un ser humano en las categorías alto, mediano y pequeño.

Como lógica multivaluada, se considera que un elemento dado tiene un grado de pertenencia a un conjunto, con valores entre 0 y 1, los que representan si un hecho es totalmente falso o absolutamente verdadero respectivamente. A diferencia de la teoría clásica de conjuntos, en donde se considera que un elemento o individuo pertenece o no pertenece a un conjunto, esta teoría considera

que el elemento forma parte del conjunto con un determinado grado de pertenencia. Cada conjunto difuso presenta una función de pertenencia que indica la medida en la cual el elemento forma parte de dicho conjunto y, permite representar un conjunto difuso continuo en un computador.

2.9.2.3 Razonamiento aproximado

Zadech introduce este concepto a principio de los años 80, el cual acabó correspondiendo al cuerpo de la lógica difusa, proponiendo así, la utilización de los conjuntos difusos para manejar cuantitativamente conceptos cualitativos.

Para representar el conocimiento en razonamiento aproximado, es necesario emplear variables lingüísticas. Dichas variables son palabras o sentencias en un lenguaje dado y permiten representar cualquier elemento pese a la complejidad, es decir, que no pueda ser descrito en términos numéricos. Las variables lingüísticas permiten crear proposiciones atómicas difusas y corresponden a la transformación de expresiones en lenguaje natural, a partir de las variables mencionadas. Las proposiciones son usadas para describir lo que se conoce como reglas difusas y, a través de las condicionales If- Then, permiten modelar el problema a resolver. El consecuente de cada regla se considerará verdadero en cierto grado y dependerá del grado de pertenencia del antecedente. Para obtener un valor de salida, se realiza un proceso denominado inferencia difusa.

2.9.2.4 Controlador Fuzzy

Las etapas que definen el proceso llevado a cabo por el controlador Fuzzy son las siguientes:

1. Fuzzificación: Etapa en el que a las variables de entrada se les asigna de manera individual un grado de pertenencia a cada uno de los grupos difusos asignados, mediante las funciones que están asociadas a dichos grupos difusos.

2. Inferencia: Mediante las reglas que definen al sistema, se utiliza el denominado mecanismo de inferencia el cual permite relacionar los conjuntos difusos de las entradas con los de la salida. En otras palabras, a partir de los grados de pertenencia de los conjuntos difusos de entrada, es posible obtener el grado de pertenencia de los conjuntos difusos de salida.
3. Defuzzificación: A partir del conjunto difuso obtenido en la etapa de inferencia, y mediante los métodos matemáticos de defuzzificación, se obtiene un valor concreto de la variable de salida.

El error y la variación de este en el tiempo suelen considerarse como entradas al controlador Fuzzy. Estas quedan expresadas en (28) y (29). En donde SP y PV representan el valor de referencia y el valor de la señal de la salida respectivamente. K_e y K_{de} Son los parámetros que permiten sintonizar el controlador, mediante técnicas de sintonización [20].

$$E = K_e(SP - PV) \quad (28)$$

$$\Delta E = K_{de}[(SP_t - PV_t) - (SP_{t-1} - PV_{t-1})] \quad (29)$$

De manera similar al controlador PID, el controlador Fuzzy emplea un método incremental para modificar la variable de control (30), en donde $\mathcal{F}(E, \Delta E)$ es una función no lineal que representa la variable de salida obtenida en la etapa de defuzzificación.

$$u(t) = u(t - 1) + \mathcal{F}(E, \Delta E) \quad (30)$$

En la figura 7 se presenta el esquema del proceso llevado a cabo por el controlador Fuzzy.

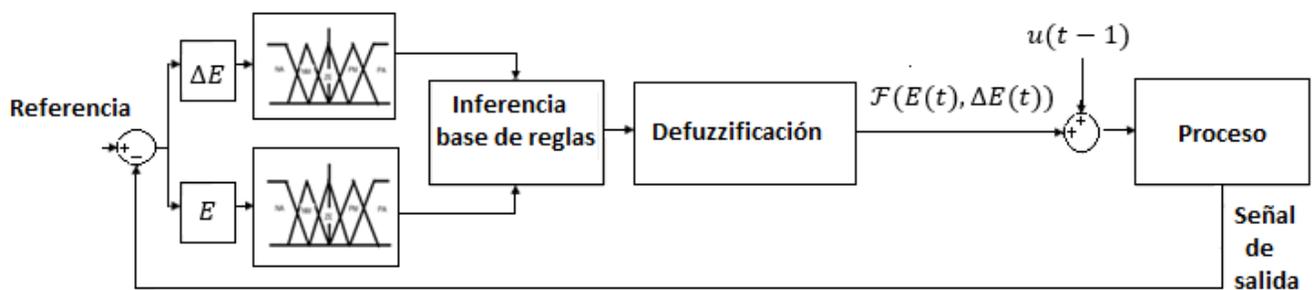


figura 7. Esquema básico de lazo de control de controlador Fuzzy

2.10 Controladores desarrollados

2.10.1 Control de espesadores con dependencia en el tiempo.

Este controlador esta propuesto en [10]. En este caso, el enfoque está en el estudio de la velocidad de sedimentación de las partículas y se define según la dosificación de floculante. Esto permite obtener la velocidad máxima de sedimentación cuando la dosificación de floculante es la óptima y, con ello, se posibilita modelar el comportamiento de un espesamiento continuo cuando hay variaciones en la floculación.

Para controlar el espesador se decide manejar las variables de flujo volumétrico de salida y dosificación de floculante, con el fin de controlar la concentración de sólido en la descargar del espesador y, además, la altura del sedimento al interior del equipo, por medio de un controlador proporcional. Las acciones del controlador quedan definidas por las ecuaciones (31) y (32)

$$Q_D(t) = \frac{Q_f(t)\varphi_f(t)}{\varphi_D^{sp}} + K_{p1}(\varphi_D(t) - \varphi_D^{sp}) \quad (31)$$

$$Q_D(t) = k_f^{sp}(t) + K_{p2}(Z_c^{sp} - Z_c(t)) \quad (32)$$

2.10.2 Control predictivo por modelo

En condiciones donde se requiera una alta concentración de sólido en la descarga del espesador, se pueden generar problemas asociados al fuerte torque experimentado por las rastras y, por ende, se plantea la resolución de este problema mediante un control predictivo [15]. Las bases del estudio son las manejables propiedades reológicas del flujo de descarga y, por lo tanto, se plantea controlar la concentración de sólido de la descarga en función de restricciones operacionales, en este caso, al torque de la pala. Lo novedoso de este modelo es que regula el torque empleado por la pala de arrastre.

El modelo matemático empleado que describe el espesamiento continuo es análogo al mencionado en la sección 2.5.1, con la única diferencia que en este caso la ecuación se discretiza para poder ser empleada en el algoritmo de “filtro de Kalman”. Dicho algoritmo permite calcular las variables de estado sólo con la información del estado anterior y las entradas actuales, por lo tanto, es un modelo que permite predecir y al mismo tiempo corregir.

El torque que puede emplear la rastra está directamente relacionado con la concentración de sólido al interior del espesador. A través de la concentración de sólido en la descarga es posible modelar un perfil de concentración al interior del espesador utilizando el algoritmo de Kalman. Con dicho modelamiento y, en conjunto con otras herramientas matemáticas, es posible regular el torque de la rastra en función de la concentración de descarga y, al mismo tiempo, controlar la concentración misma de descarga teniendo como variable controlable el flujo de descarga [15].

2.10.3 Control por balance de masa simple

El control por balance de masa desarrollado en [16] se basa en el modelo matemático creado por Burger [9]. La consideración de las simplificaciones señaladas en 2.7.1 en conjunto con el desentendimiento de los efectos de la dosificación de floculación en la velocidad de sedimentación, reduce considerablemente el esfuerzo computacional para este sistema de control.

Para este estudio se considera que la única variable operacional manipulable es el flujo de descarga, por lo que, al regular este flujo se obtiene la concentración deseada de sólido en la descarga. Para ello, se diseña una estrategia de control en la que se considera el inventario de sólido dentro del espesador como variable de control. En términos simples, el objetivo es mantener bajo control el inventario de sólido asumiendo que la concentración de descarga es conocida.

Bajo estas premisas se propone un sistema de control proporcional e integrativo, el cual regula el flujo de descarga mediante la retroalimentación de la información del inventario de sólido al controlador PI. A continuación, a modo de ejemplo, se presenta uno de los controladores propuestos y los diagramas de bloque asociados.

$$Q_D(t) = K_P \left(\frac{m(t) - m^{sp}}{\rho_s \varphi_D(t)} \right) + K_i \left(\frac{\int_0^t (m(t) - m^{sp}) dt}{\rho_s \varphi_D(t)} \right) \quad (33)$$

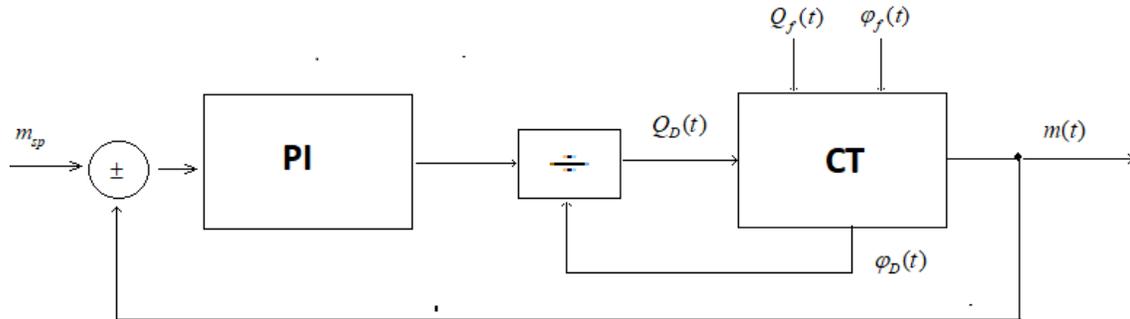


Figura 8. Diagrama de bloque para sistema de control.

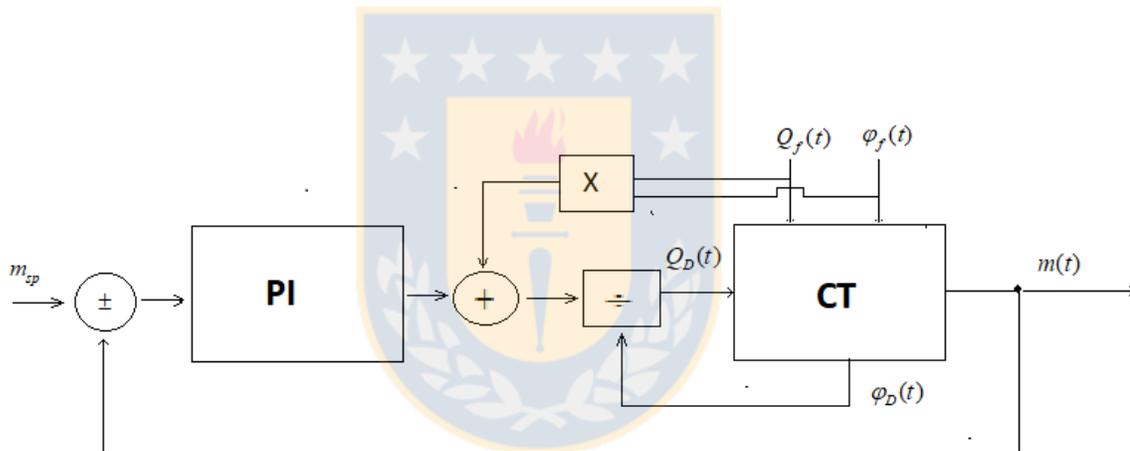


Figura 9. Diagrama de bloque para sistema de control con perturbación en la prealimentación.

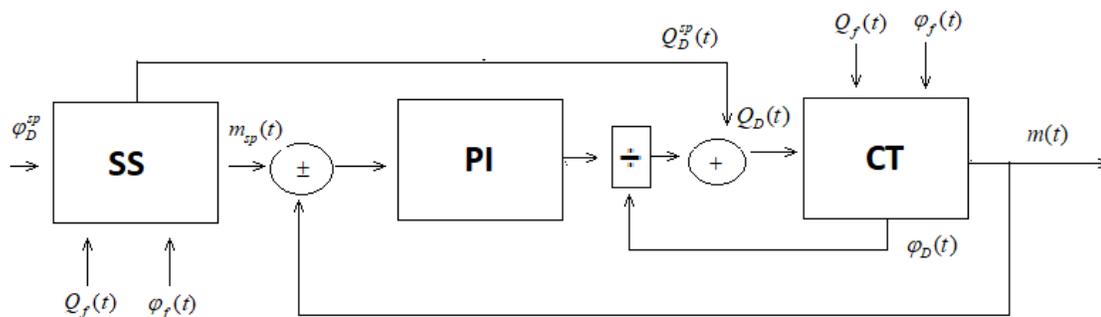


Figura 10. Diagrama de bloque para sistema de control prealimentado.

2.11 Descripción del equipo

El equipo empleado para las pruebas realizadas consiste en un espesador piloto que se puede segmentar principalmente en una etapa de preparación de pulpa y una etapa de espesamiento, ambas conectadas entre sí, con la adecuada instrumentación para su funcionamiento. En la Figura 11 se muestra el P&ID del equipo utilizado, y en las Figuras 12,13,14 y 15 se muestran las partes del equipo y sus descripciones.

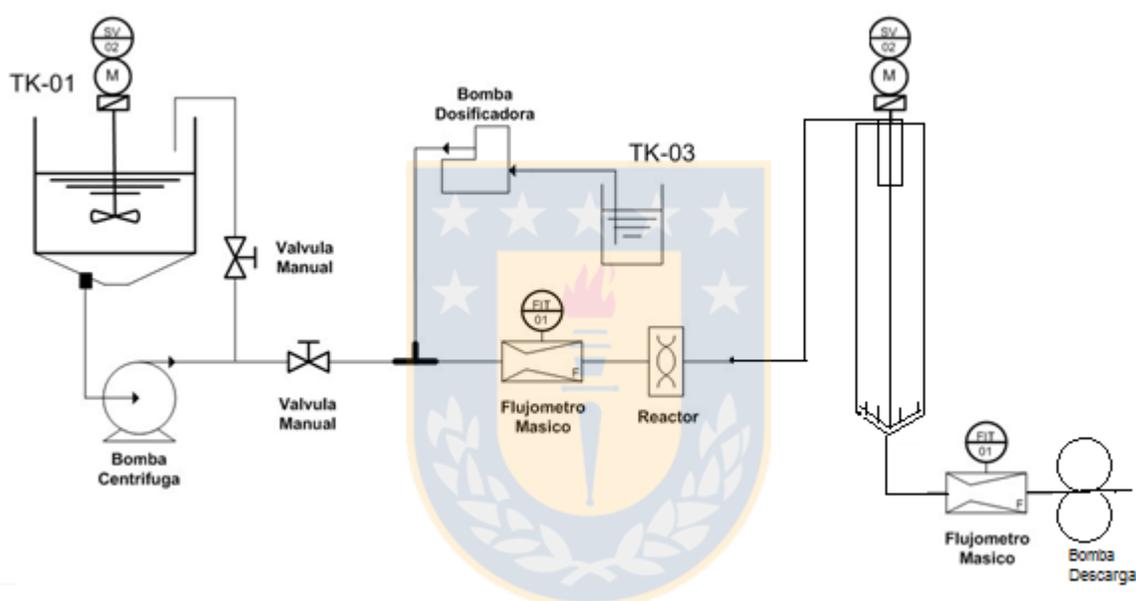


Figura 11. P&ID del espesador piloto.



Figura 12. Etapa de espesamiento.

1. Columna de sedimentación: Consiste en una columna de 2 [m] de altura y 0.35 [m] de diámetro con una rastra de velocidad variable, entre 0.5 a 5 RPM.
2. Reactor de ultra floculación: Reactor donde se genera la floculación a altas velocidades de cizalle.
3. Motor de la rastra: Motor que genera la rotación de la rastra.
4. Cajas reductoras: Cajas que reducen las RPM del motor para que la rastras giren a las RPM deseadas.
5. Transmisor diferencial de presión: Mide la diferencia de presión entre entrada y salida del reactor de ultra floculación. Con ello, se puede determinar la velocidad de cizalle con la que se está floculando.
6. Equipo de floculación: Consiste en un recipiente de 3 litros con una concentración de floculante de 0.5 [g/L]. La bomba se controla remotamente y permite impulsar el floculante al contacto con la pulpa de alimentación.



Figura 13. Etapa de preparación de pulpa

7. Tablero eléctrico del espesador: Se presenta el set de botones que permite encender y apagar el equipo.
8. Estanque de preparación: Estanque donde se prepara la pulpa que alimentará a la columna de alimentación, bajo las condiciones deseadas de pH y concentración de sólido.
9. Alimentador de pulpa: Equipo que permite alimentar con mineral, de forma continua, al estanque de preparación.
10. Medidor de pH: Equipo que mide de forma manual el pH de la pulpa al interior del estanque de preparación, por medio de un sensor que se contacta con la pulpa.
11. Equipo de cal: Consta de un recipiente que contiene una solución de concentración 50 [g/L] de cal, bajo una constante homogenización por medio de un agitador.

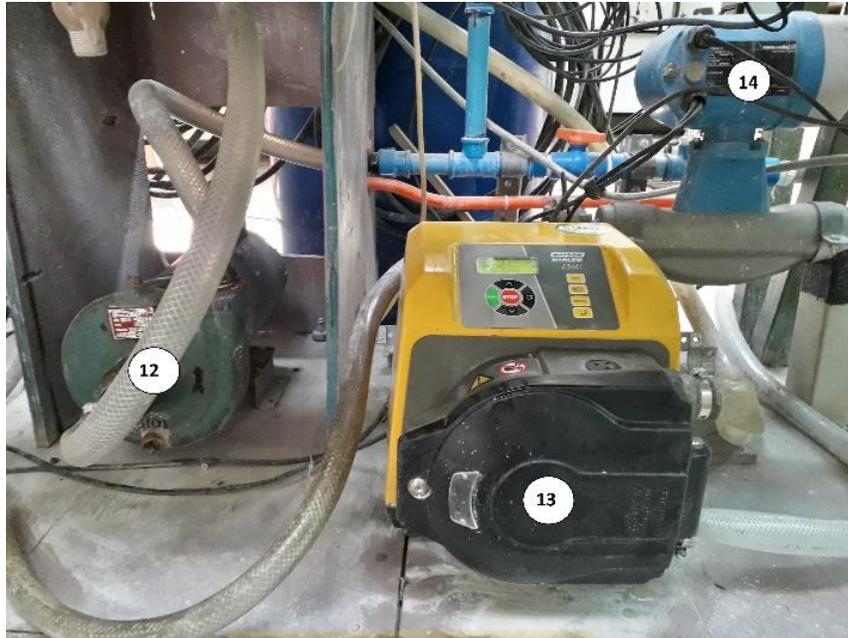


Figura 14. Bombas y flujómetro de alimentación.

12. Bomba de alimentación: Esta bomba impulsa la pulpa proveniente del estanque de preparación a la columna de sedimentación.
13. Bomba de dosificación de agua: Esta bomba impulsa agua clara contenida en un estanque, al estanque de preparación.



Figura 15. Bomba y flujómetro de descarga.

14. Flujómetro de la alimentación: Este equipo medir el flujo y densidad de la pulpa de alimentación.
15. Bomba peristáltica trifásica: Esta bomba permite controlar el flujo en la descarga del espesador.
16. Sensor de flujo másico: Este equipo permite medir la densidad en la descarga del espesador. El equipo tiene un transmisor que recibe las señales registradas por el sensor y las envía al controlador lógico programable.

2.12 Interfaz de operación

Mediante el programa Labview se ha diseñado una interfaz de operación para la operación del espesador piloto, permitiendo registrar las variables de proceso y perturbaciones tales como densidades, flujos de salida y flujos de entrada. Por otra parte, permite monitorear y controlar la etapa de preparación de pulpa y dosificación de floculante. En las Figuras 16,17 y 18 se muestran algunas de las pantallas principales de la interfaz de operación.

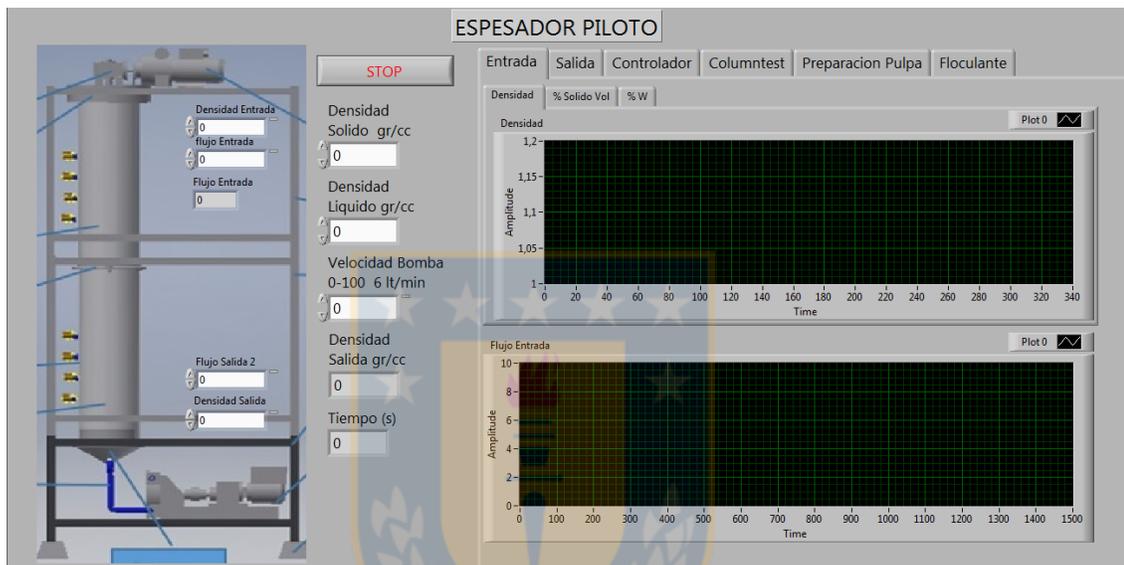


Figura 16. Pantalla de registro de porcentaje de sólido, flujo de entrada y de salida.

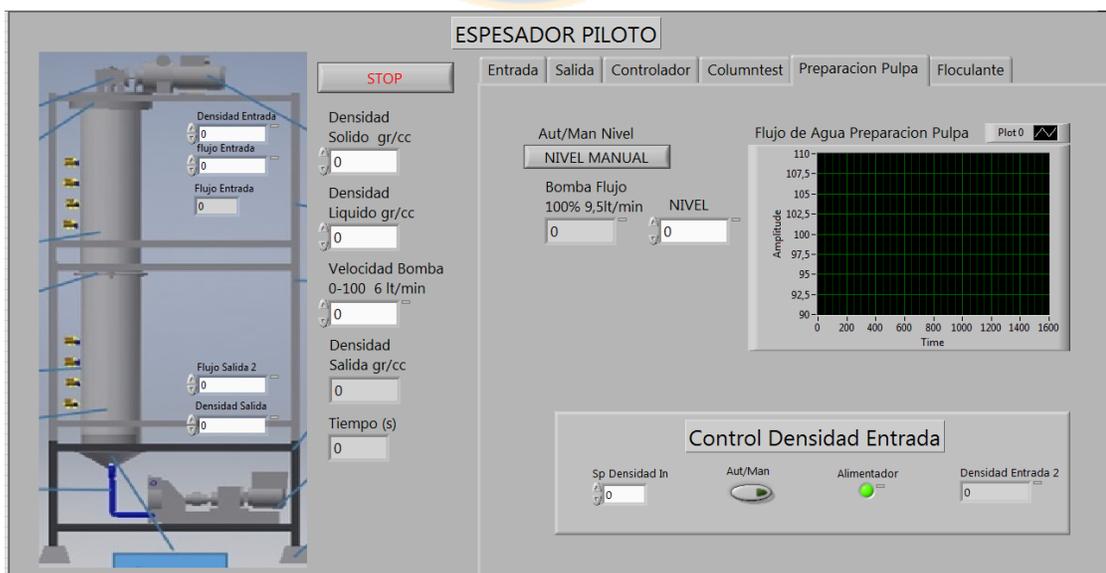


Figura 17. Pantalla de preparación de pulpa.



Figura 18. Pantalla de dosificación de floculante.



CAPITULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1 Caracterización del mineral

Para el funcionamiento óptimo del espesador piloto, mediante la utilización de la interfaz de operación, se requiere información de las características físico-químicas del mineral a utilizar. A continuación, se muestran los datos obtenidos de distintas pruebas que permitieron su caracterización.

3.1.1 Distribución granulométrica

Se rolea y se cuartea 25 [kg] de cuarzo fino hasta obtener una muestra de aproximadamente 750 [g]. Dicha muestra se introduce al equipo RETSCH, un separador de muestra PT 100, con el fin de obtener una muestra representativa cercana a 30 [g] e ideal para el análisis. Esta muestra se envía a un equipo SYMPATEC permitiendo analizar el tamaño de partícula mediante difracción laser.

Las muestras se destinan a un análisis de granulometría en seco en la que se observa que el 80% bajo malla pasante del mineral, en la primera muestra posee un diámetro de 21,2 micrones y, en la segunda muestra tiene un diámetro de 27.2 micrones. Por otra parte, el 50% pasante posee un tamaño inferior a 6,1 y 7,6 micrones, respectivamente. En las Figuras 19 y 20 se grafican los resultados del experimento y los datos medidos están registrados en las Tablas 7 y 8.

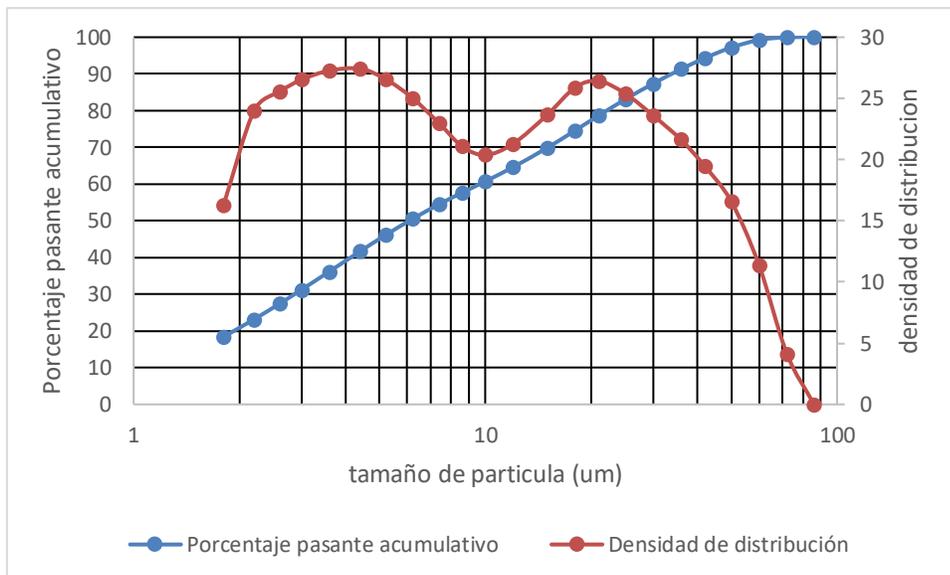


Figura 19. Distribución de tamaño de sólido y densidad. Prueba 1.

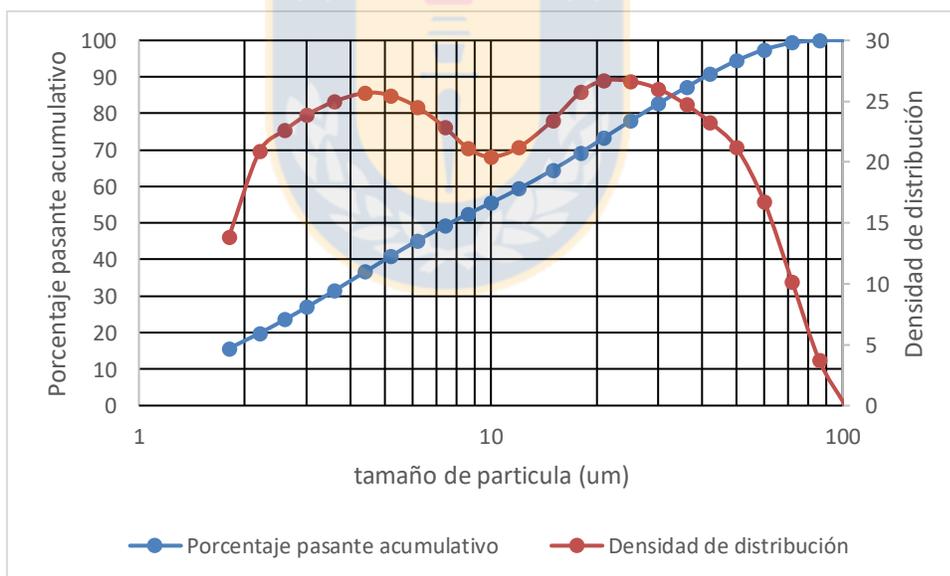


Figura 20. Distribución de tamaño de sólido y densidad. Prueba 2.

3.1.2 Medición de densidad

La medición de densidad del material se realiza utilizando la técnica de picnometría. La prueba se efectúa por triplicado, determinado el valor definitivo a través del promedio de las 3 mediciones. Los resultados se exponen en la tabla 1.

Tabla 1. Valores de densidad medidos en prueba de picnometría.

Número de prueba	Densidad [g/cm ³]
Prueba 1	2.632
Prueba 2	2.640
Prueba 3	2.638
Densidad promedio	2.637

3.2 Determinación de las condiciones fisicoquímicas de operación del sistema

3.2.1 Determinación de pH óptimo de operación

Uno de los factores a controlar para tener una óptima sedimentación corresponde a la carga superficial de la partícula, idealmente el sistema debe permanecer eléctricamente neutro, con ello la dispersión de partículas será menor y el proceso de sedimentación será más rápido. Es por ello que se varía el pH para disminuir la carga superficial de las partículas.

Para determinar el pH al que la carga superficial del mineral se encuentra cercana a 0 se realizan pruebas de potencial Z a distintos pH, utilizando lechada de cal. El equipo que se ha utilizado es el ZetaCompact Z9000. Para su puesta en marcha, se realiza lo siguiente:

- Se prepara una pulpa de 300 ml utilizando agua convencional, con un volumen de sólido al 1%.
- Se prepara lechada de cal empleando 5 gramos de cal por cada 100 ml de solución.

- Se limpia y calibra debidamente el equipo ZetaCompact Z9000, según lo estipulado en el manual de instrucciones.
- Se realizan 6 mediciones de potencial Z a distintos valores de pH, comprendidos entre 7 y 12.

Las mediciones de carga superficial se pueden ver en la Figura 21.

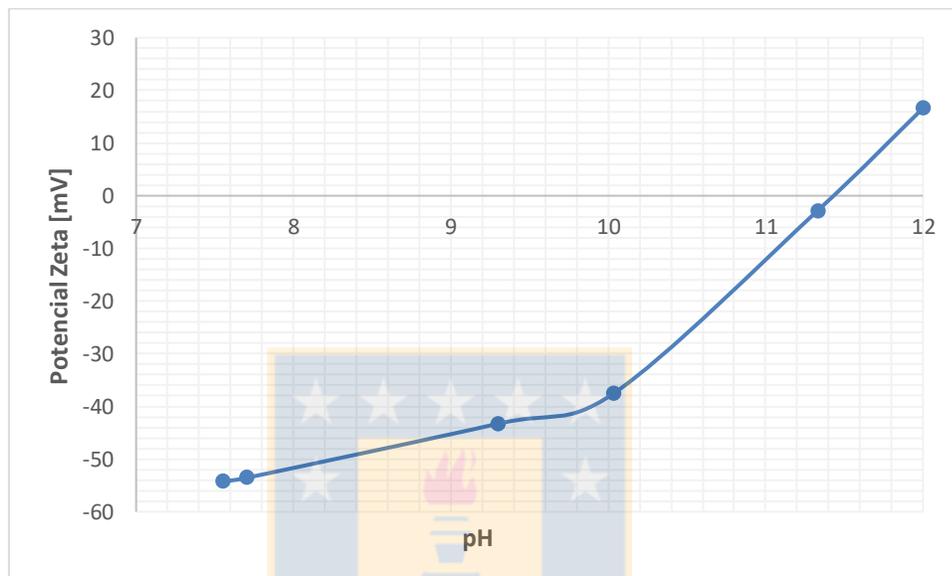


Figura 21. Gráfico de valores medidos de potencial Zeta a distintos valores de pH.

El aumento de pH hasta un valor de 10 no produce una variación significativa en el potencial Zeta de las partículas, sin embargo, a un valor de pH 11 el signo de la carga superficial de las partículas decrece considerablemente y, cercano a un pH 11.5 se alcanza el punto isoeléctrico. Debido al alto consumo de cal que implica alcanzar dicho punto, se opta por trabajar a un pH entre el rango de 11.1 y 11.4. Las mediciones quedaron registradas en la tabla 9.

3.2.2 Determinación de la óptima dosificación de floculante

El método empleado para determinar la óptima dosificación de floculante consiste en comparar la densidad de flujo de sólido de la pulpa utilizando distintas dosificaciones de floculante. Para determinar la densidad de flujo de sólido se realizaron los siguientes pasos:

- Paso 1: Por medio de una cámara de video se graban 5 pruebas simultáneas de sedimentación batch, las pulpas preparadas contienen un 2, 5, 10, 12 y 15% de sólido y se efectúan durante 15 minutos a pH 11. Este paso se realiza a 6 dosificaciones de floculantes distintas de 2,5,8, 10, 20 y 30 gramos de floculante por tonelada de mineral. Las imágenes captadas son como la que se observa en la Figura 22.



Figura 22. Prueba de sedimentación batch en equipo SediRack. Dosificación de floculante: 30 [g/ton].

- Paso 2: Se utiliza un programa desarrollado en Matlab por el ingeniero guía, el cual tiene como función analizar las imágenes grabadas del video bajo un intervalo de tiempo fijado por el experimentador. Este análisis consiste en el contraste de píxeles que se produce entre el tubo donde ocurre la prueba y la luz generada por el SediRack, tal como se muestra en la Figura 22. Los datos obtenidos, medidos en píxeles, son transformados mediante una correlación simple a valores de altura de sedimento bajo distintos tiempos.
- Paso 3: Con la información obtenida es posible obtener las velocidades de sedimentación para cada caso, por medio de una linealización. Para una dosificación fija de floculante y mediante

una interpolación de las velocidades de sedimentación, se obtienen los parámetros de velocidad terminal y “C” para cada dosificación de floculante, esto se observa en la Tabla 2. Los valores obtenidos permiten definir la función de densidad de flujo (2). En la Figura 23 se describe la densidad de flujo de sólido para las distintas dosificaciones de floculante utilizando dichos parámetros.

Tabla 2. Parámetros de la ecuación de Richard y Zaki a distintas concentraciones de floculante.

Dosificación de floculante	2 [g/ton]	5 [g/ton]	8 [g/ton]	10 [g/ton]	20 [g/ton]	30 [g/ton]
Velocidad terminal	0.00904	0.00561	0.01646	0.0209	0.00842	0.00587
C	31.314	24.708	34.579	35.906	26.299	22.691

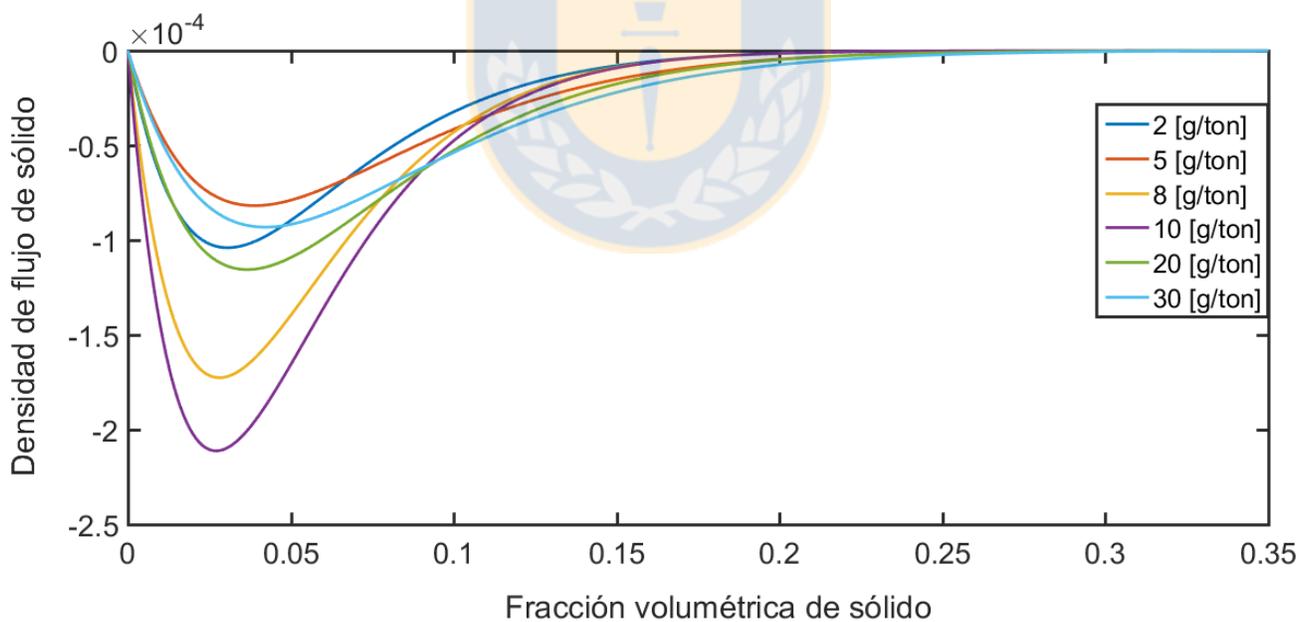


Figura 23. Densidad de flujo de sólido a distintas concentraciones de floculante.

En la Figura 23 se observa que la densidad de flujo de sólido aumenta a medida que la dosificación de floculante aumenta, sin embargo, esta alcanza un máximo cuando se alcanza un valor de 10 [g/ton], por ende, se concluye que la dosificación óptima para obtener una mayor densidad de flujo de sólido es utilizando 10 [g/ton].

Inicialmente se realizaron pruebas utilizando 10, 20 y 30 [g/ton] de floculante y se observó que a 10 [g/ton] la velocidad de sedimentación es óptima, por lo tanto, se efectuaron pruebas utilizando una menor dosificación de floculante con el fin de analizar si la sedimentación continúa mejorando. Sin embargo, tal como se observa en la figura anterior, la velocidad de sedimentación no continúa mejorando, por ende, se decreta que la dosificación óptima para este estudio es de 10 [g/ton]. Para confirmar la aseveración, posteriormente se realiza una prueba a 12 [g/ton], los datos de esta prueba están adjuntos en la tabla 10 de los anexos.

3.3 Controladores Propuestos.

3.3.1 Controlador PI

El algoritmo de control empleado es el de un modelo incremental basado en la ecuación (25) con un tiempo derivativo de valor nulo. El error y el modelo que representa la variación de caudal quedan expresados a continuación.

$$e(t) = \rho_{sp}(t) - \rho_D(t) \quad (34)$$

$$\Delta Q_D = Q_D(t) - Q_D(t-1) = K_p(e(t) - e(t-1)) + K_i e(t); \quad K_i = \frac{K_p}{T_i} \Delta t \quad (35)$$

En donde K_i incluye el tiempo de muestreo, la constante proporcional y el tiempo integrativo.

Por lo descrito anteriormente el nuevo flujo de descarga será el siguiente.

$$Q_D(t) = Q_D(t-1) + K_p(e(t) - e(t-1)) + K_i e(t) \quad (36)$$

3.3.2 Controlador Fuzzy

Para el desarrollo del controlador Fuzzy, se decidió que la acción de control fuera función del error entre el valor objetivo de la densidad de la pulpa en la descarga y el valor medido en la descarga, y de la variación de esta en el tiempo. Las ecuaciones que expresan lo mencionado se observan en (37) y (38).

$$E = K_e[\rho_{sp}(t) - \rho_D(t)] \quad (37)$$

$$\Delta E = K_{de}[(\rho_{sp}(t) - \rho_D(t)) - (\rho_{sp}(t-1) - \rho_D(t-1))] \quad (38)$$

K_e y K_{de} corresponden a parámetros de sintonización del controlador.

Por otra parte, los conjuntos difusos utilizados quedan representados en el conjunto U de la ecuación (39). En donde los nombres de los conjuntos significan negativo alto, negativo medio, cero, positivo medio y positivo alto, respectivamente.

$$U = \{NA, NM, ZE, PM, PA\} \quad (39)$$

La función de pertenencia del error y la derivada del error, permiten cuantificar el grado de pertenencia que tiene un elemento dado hacia un conjunto. Su representación se observa en la figura 24 y 25.

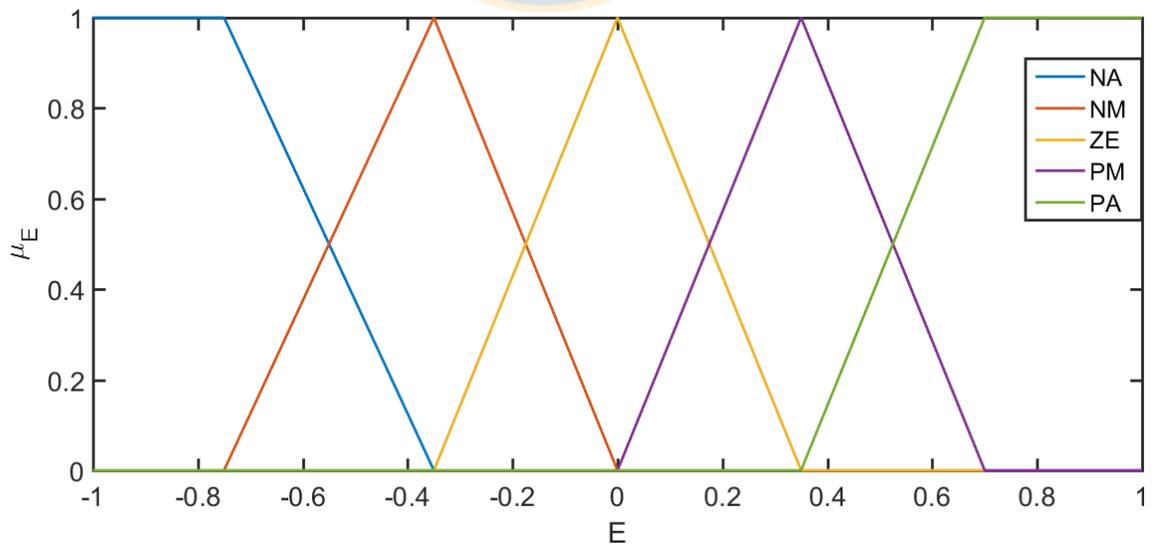


Figura 24. Función de pertenencia del error.

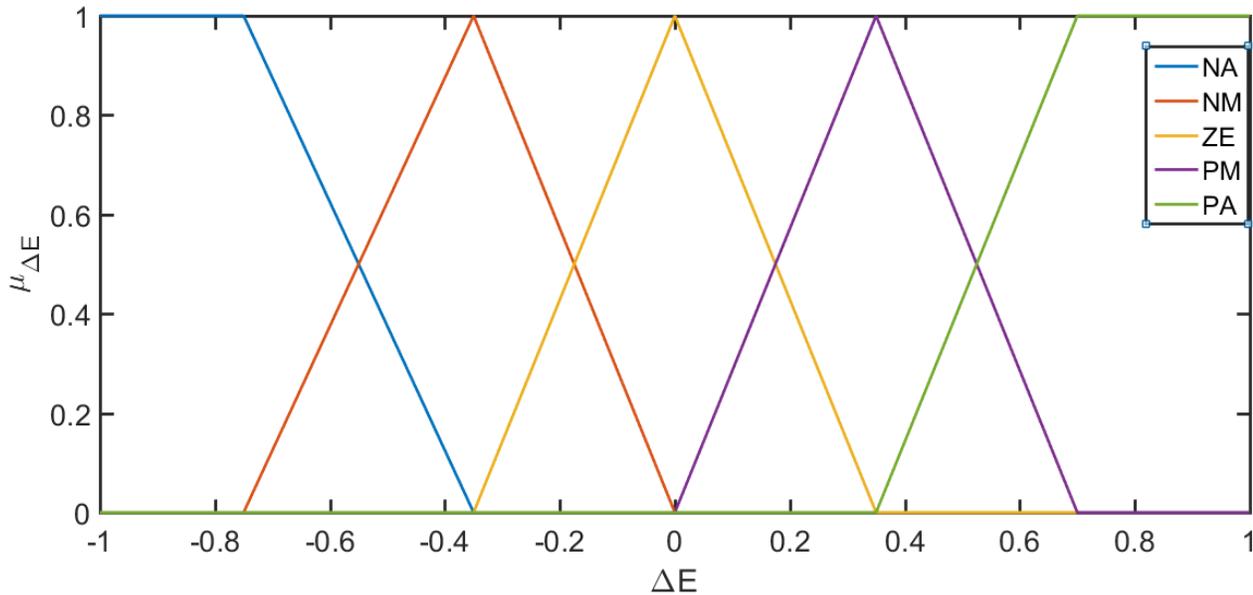


Figura 25. Función de pertenencia de la derivada del error.

A fin de poder generar una inferencia difusa, es decir, el proceso de obtener un valor de salida para un valor de entrada es necesario crear una base de reglas difusas en función de los parámetros de entradas. En la Tabla 3 se expresa la base de las reglas.

Tabla 3. Reglas de inferencia en función de los parámetros de entrada.

		ERROR				
		NA	NM	ZE	PM	PA
DERIVADA DEL ERROR	NA	PA	PA	PM	PM	ZE
	NM	PA	PM	PM	ZE	NM
	ZE	PM	PM	ZE	NM	NM
	PM	PM	ZE	NM	NM	NA
	PA	ZE	NM	NM	NA	NA

Dadas las funciones de pertenencia, los conjuntos difusos y una base de reglas creada en función del funcionamiento del espesor piloto, se modela la variable de salida en función de los parámetros de entrada. La Figura 26 muestra de forma gráfica la dependencia de la salida en función del error y su derivada.

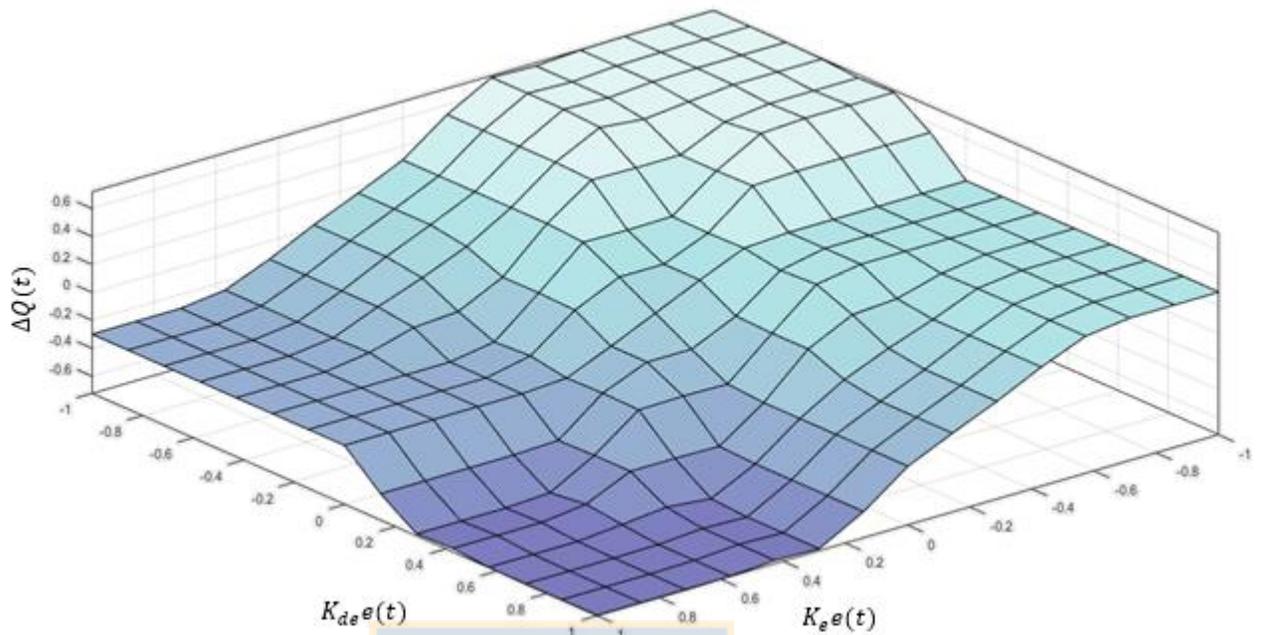


Figura 26. Gráfico 3D de la variación de flujo, en función de las entradas error y derivada del error.

El sistema de control generado en este apartado se puede representar según el lazo de control de la Figura 27.

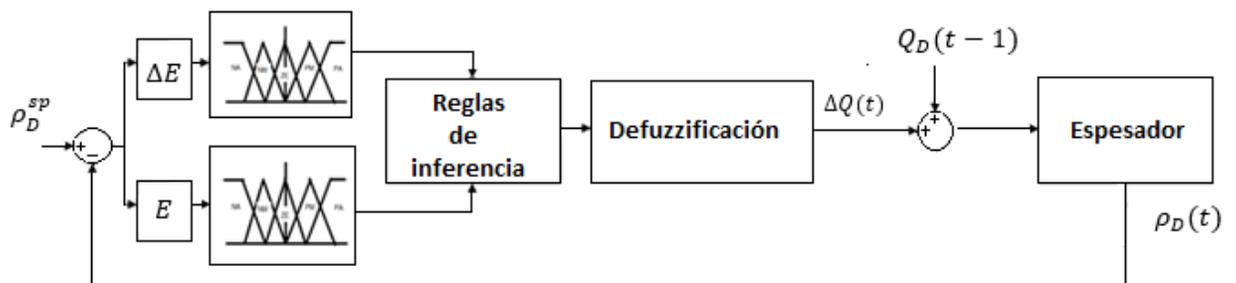


Figura 27. Esquema de lazo de controlador Fuzzy.

CAPITULO 4. RESULTADOS FINALES Y DISCUSIONES

4.1 Pruebas iniciales

Las pruebas iniciales realizadas en el espesador piloto tienen como propósito obtener información respecto al comportamiento de las distintas variables del proceso. Mediante estas pruebas se logró medir durante un intervalo de tiempo las fluctuaciones que presentaban el flujo volumétrico de alimentación y su respectiva concentración de sólido (perturbaciones del sistema). Se observa en la figura 28 las leves fluctuaciones que presentó el porcentaje de sólido en peso en la alimentación, y en la figura 29 el comportamiento que tiene el flujo de alimentación, este se mantiene estable en el tiempo, presentando mínimas variaciones notorias producto del equipo empleado. En las figuras 30 y 31 se puede observar la relación que existe entre la variable de proceso, concentración de sólido en la descarga, y la variable de control, flujo de descarga. Al aumentar el flujo de descarga, la concentración de sólido en la descarga empieza a disminuir paulatinamente, y de manera contraria ocurre si el flujo de descarga se disminuye.

El conocimiento recolectado verifica la manera óptima de utilizar el espesador piloto y el comportamiento esperado del porcentaje de sólido en la descarga, frente a variaciones del flujo en la descarga.

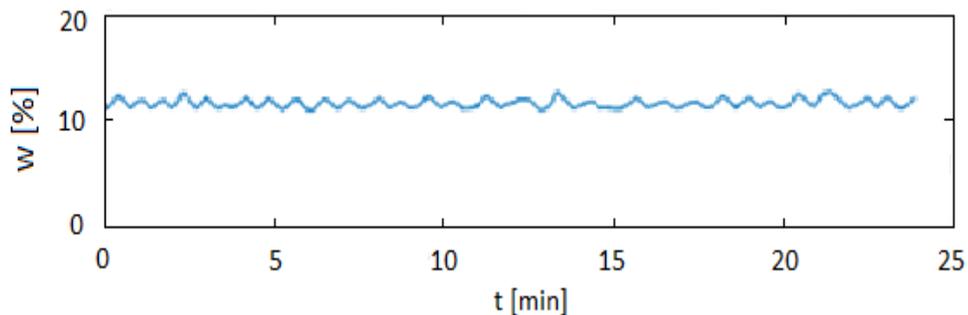


Figura 28. Comportamiento del porcentaje de sólido en peso en la alimentación. Pruebas iniciales.

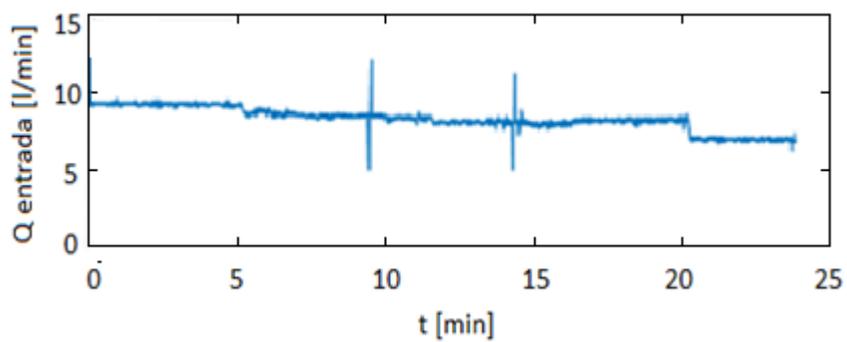


Figura 29. Comportamiento del caudal de alimentación. Pruebas iniciales.

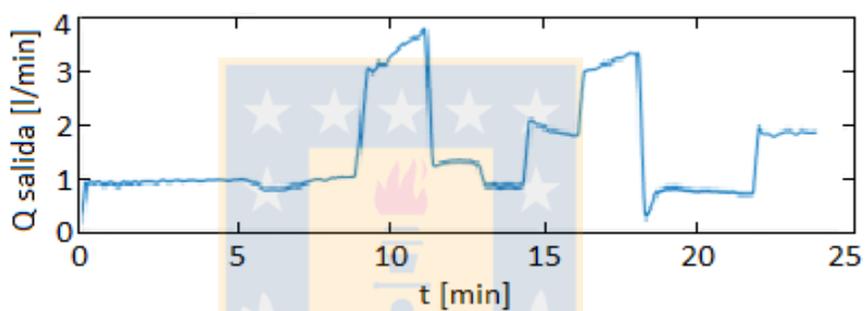


Figura 30. Comportamiento del caudal de descarga. Pruebas iniciales.

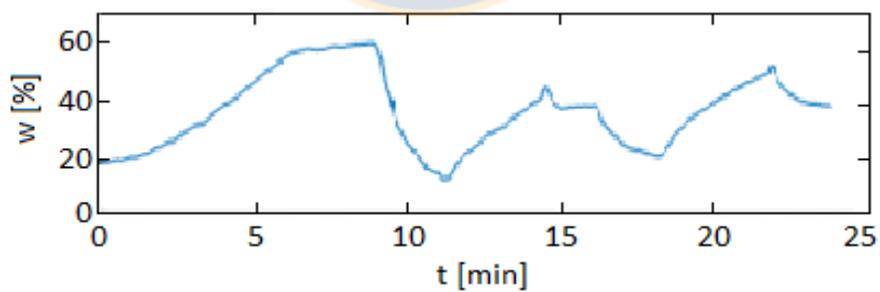


Figura 31. Comportamiento del porcentaje de sólido en peso en la descarga. Pruebas iniciales.

4.2 Condiciones fisicoquímicas de operación

En la tabla 4 se presentan las condiciones fisicoquímicas bajo las que se realizaron las pruebas con controlador Fuzzy y PI.

Tabla 4. Condiciones fisicoquímicas de las pruebas de control PI y Fuzzy.

Dosificación de floculante	10 [g/ton]
pH de pulpa de alimentación	11.1-11.4

4.3 Prueba con controlador Fuzzy

Para poner a prueba el controlador Fuzzy se decidió variar el valor objetivo de la densidad en la descarga a lo largo del tiempo. La forma de estudiar esta prueba consistió en analizar el comportamiento del flujo de descarga frente a las variaciones del valor objetivo y, el comportamiento que adquiere dicha densidad. En la figura 32 se aprecia el comportamiento del porcentaje de sólido en peso en la alimentación, se observa como oscila a través del tiempo, sin embargo, la media se acerca al 14%, el cual es el valor deseado. En la figura 33 se observa el comportamiento del caudal de alimentación el cual se mantiene, en promedio, cercano a los 8 [l/min], esta presenta pocas, pero notorias variaciones cercano a los 700 segundos, lo cual se debe principalmente a la bomba empleada para impulsar el caudal de alimentación. En la figura 34 se observa el comportamiento que tiene la densidad en la descarga frente a los 4 cambios de tipo escalón del valor objetivo, esta varía gradualmente acercándose al valor de referencia, presentando a través del tiempo un comportamiento oscilatorio. Para los primeros 200 segundos la densidad de descarga no logra alcanzar el valor de referencia, por lo que se cataloga como un caso particular, pues no se tiene certeza de lo ocurrido, para indagar más en lo ocurrido se deben realizar más pruebas. En la figura 35 se observa que frente a cambios de tipo escalón de la referencia, el caudal logra alcanzar un valor mínimo, cuando la densidad de descarga es considerablemente inferior al valor de referencia.

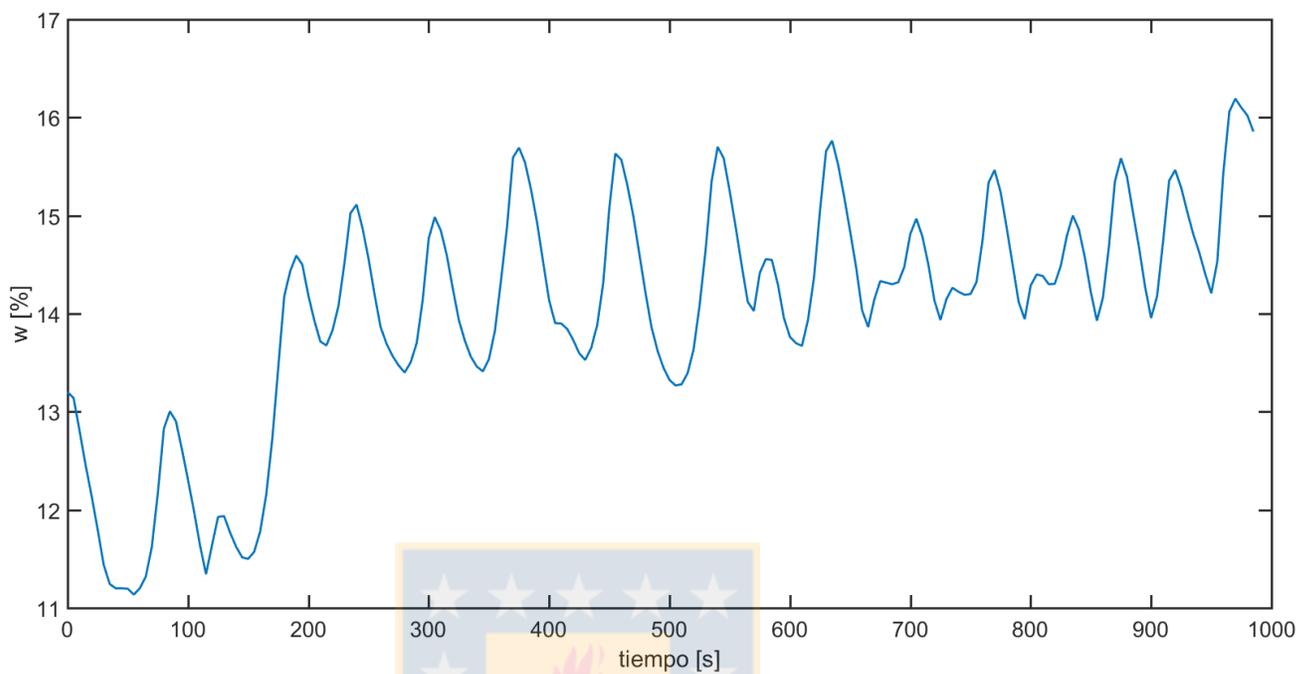


Figura 32. Comportamiento del porcentaje de solido en peso en la alimentación. Prueba con controlador Fuzzy.

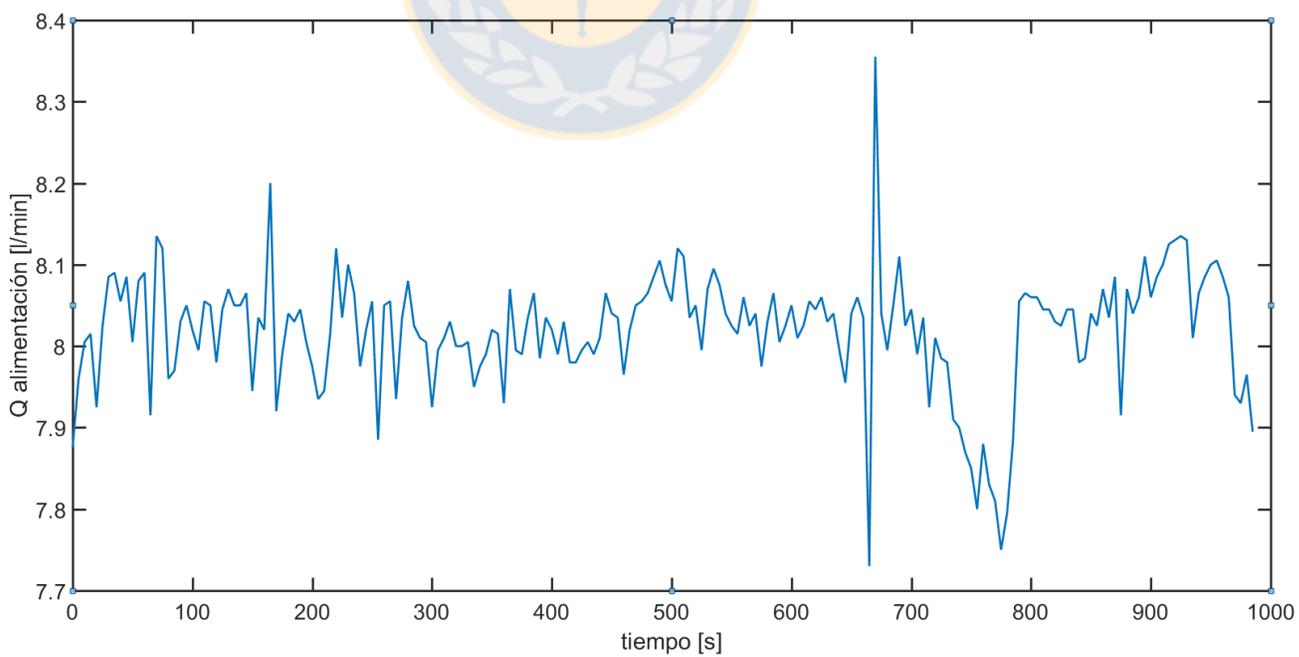


Figura 33. Comportamiento del caudal de alimentación. Prueba con controlador Fuzzy.

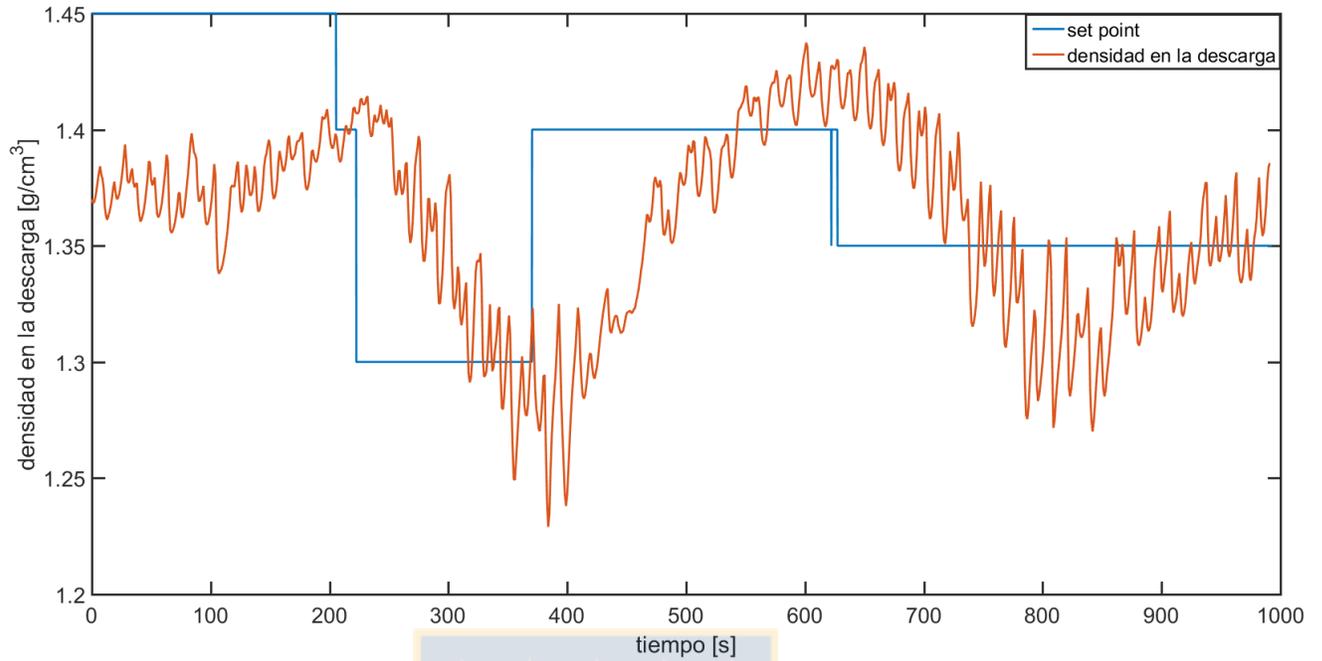


Figura 34. Comportamiento de la densidad en la descarga en el tiempo, frente a variaciones en el objetivo deseado. Prueba con controlador Fuzzy.

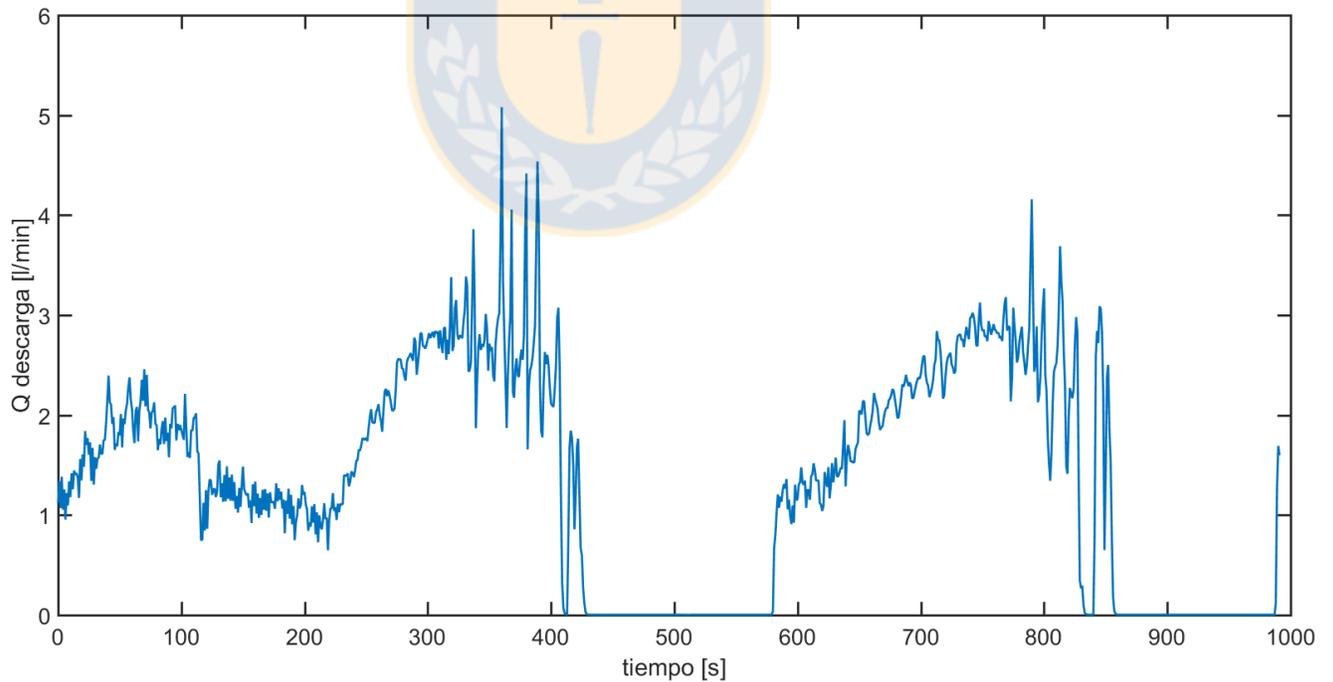


Figura 35. Comportamiento del caudal de descarga. Prueba con controlador Fuzzy.

4.4 Prueba con controlador PI

De manera similar a la prueba anterior, se varió el valor objetivo de la densidad en la descarga a través del tiempo. En esta prueba los resultados incluyen un tiempo de acondicionamiento del sistema, por lo que a partir de los 600 segundos comienza la puesta en marcha del controlador PI. En la figura 36 se observa el comportamiento del porcentaje de sólido en peso en la alimentación, este presenta oscilaciones a través del tiempo, sin embargo, la media se acerca al 12%, el cual es el valor deseado para esta prueba. En la figura 37 se observa el comportamiento del caudal de alimentación, los primeros 600 segundos dio un caudal elevado para generar las condiciones de operación, tales como visualizar una zona de consolidación, posteriormente se disminuyó considerablemente el caudal, con el propósito de acondicionar un volumen considerable de pulpa de alimentación en el estanque de preparación de pulpa, finalmente el flujo de alimentación se dejó estable en 10 [l/min] presentando mínimas variaciones en su flujo. En la figura 38 se observa el comportamiento de la densidad de descarga frente a variaciones de tipo escalón del valor objetivo, la cual presenta un comportamiento oscilatorio, con considerable sobrepaso, y además pese a que se acerca gradualmente al valor de referencia, no logra mantenerse en el valor deseado, esto se puede observar alrededor de los 1000 segundos y también cercano a los 1600 segundos. En la figura 39 se observa el comportamiento que tiene el caudal de descarga frente a las variaciones de tipo escalón de la referencia, en donde se aprecian algunos comportamientos poco adecuados, tales como el notorio aumento cercano a los 600 segundos, en donde debiese ocurrir lo contrario, un aumento considerable y continuo cercano a los 1200 segundos, en donde debiese haber disminuido el caudal, hecho que ocurre pasado los 1300 segundos.

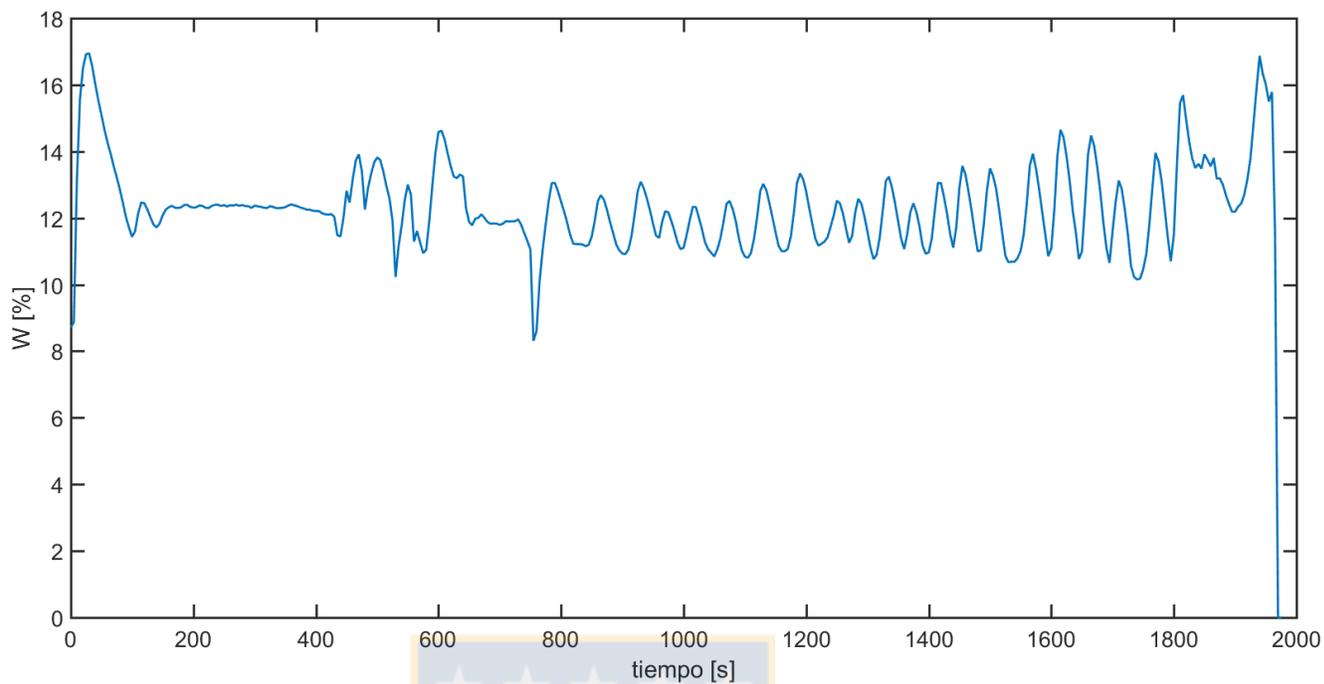


Figura 36. Comportamiento del contenido de sólido en el flujo de alimentación a través del tiempo. Prueba con controlador PI.

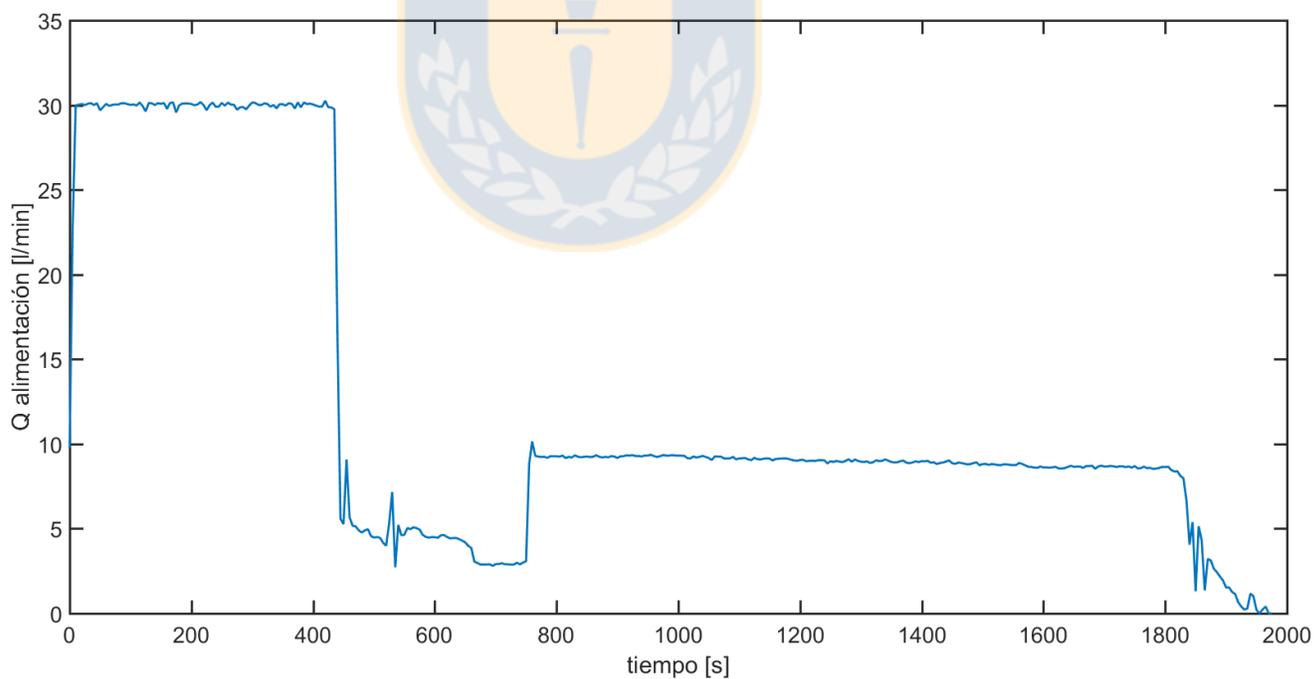


Figura 37. Comportamiento del flujo de alimentación al espesador piloto. Prueba con controlador PI.

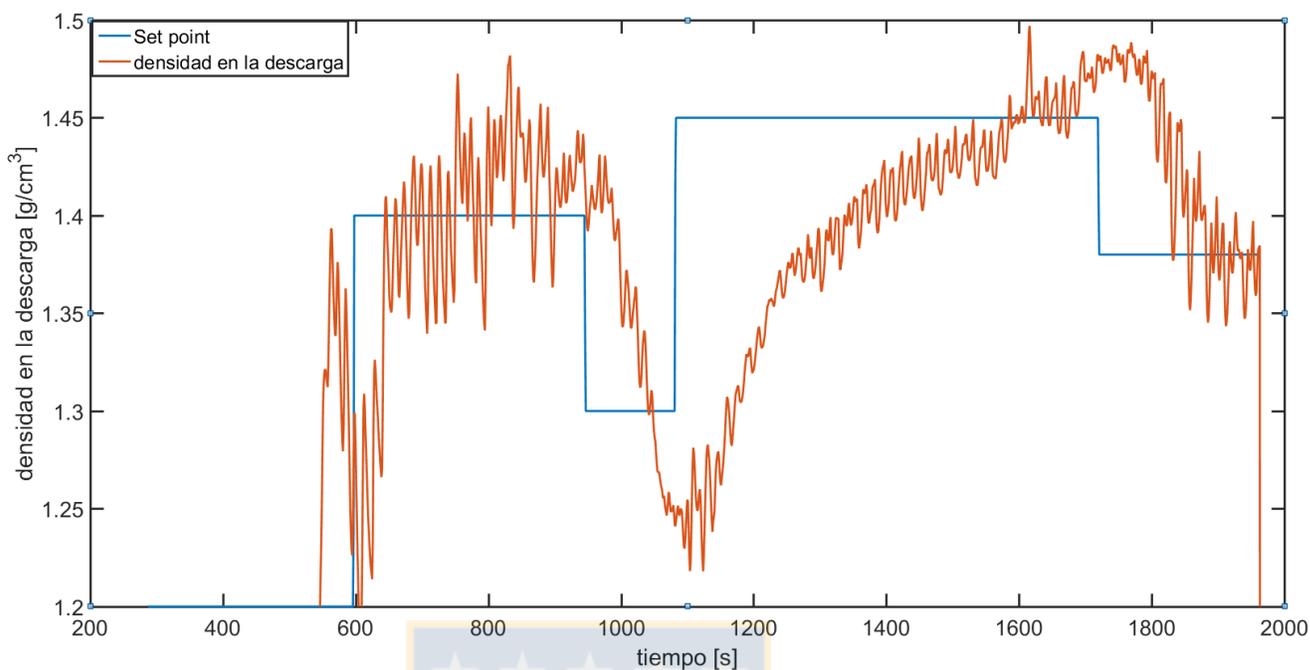


Figura 38. Comportamiento de la densidad de la descarga en el tiempo, frente a variaciones en el objetivo deseado. Prueba con controlador PI.

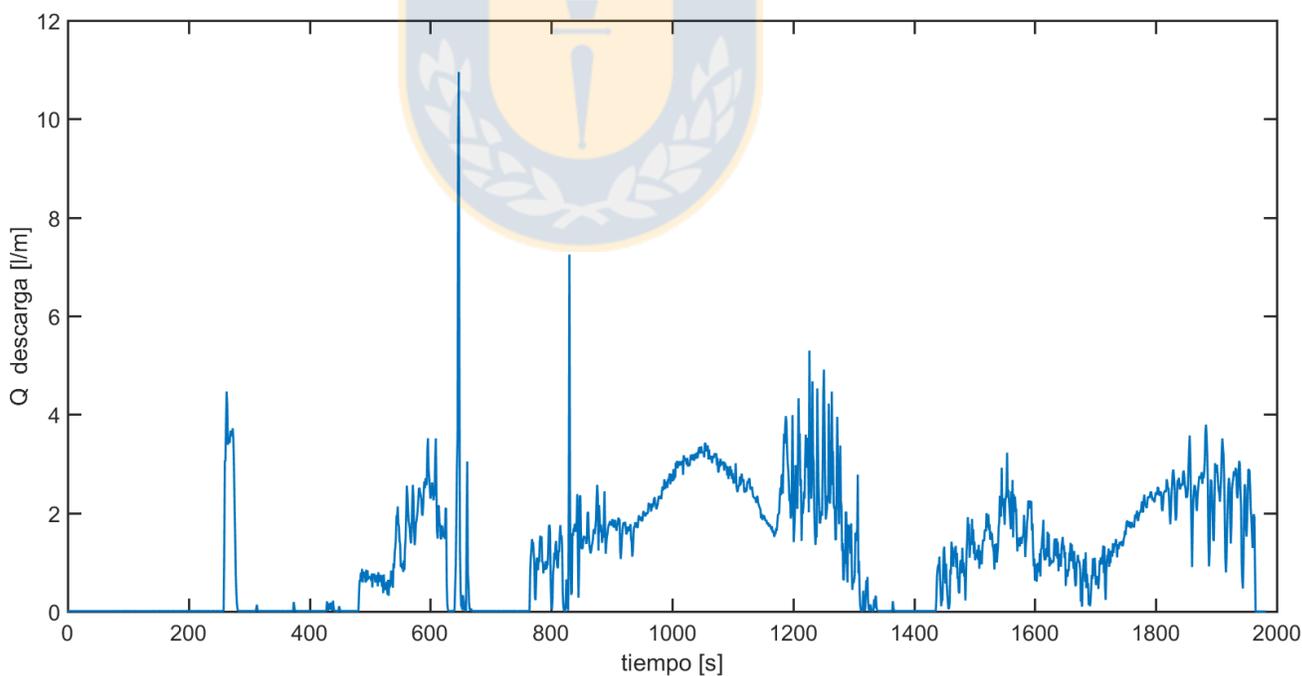


Figura 38. Comportamiento del caudal de descargar. Prueba con controlador PI.

4.5 Ganancia de controladores

Para obtener las ganancias se realizaron simulaciones, las cuales dieron como resultado ganancias cercanas a las ocupadas en las pruebas, estas se definieron empleando un tiempo de prueba y sintonización, y criterio propio del ingeniero guía. Las ganancias ocupadas por los controladores se presentan en la tabla 5 y 6.

Tabla 5. Ganancias del controlador PI.

K_p	2
K_i	30

Tabla 6. Ganancias del controlador Fuzzy.

K_e	3
K_{de}	20

4.6 Cuantificación del error.

Para cuantificar el error presente se optó por calcular la varianza presente durante las pruebas. Para la prueba PI la medida de la muestra se consideró desde los 600 segundos hasta los 1900 segundos aproximadamente. Para la prueba utilizando un controlador Fuzzy la medida de la muestra abarca los 1000 segundos de prueba, considerando en ambas pruebas mediciones de las variables cada 0.02 segundos. En la ecuación (40) se expresa la ecuación para calcular la varianza. En la tabla 7 se presentan los resultados.

$$\sum_{i=1}^n \frac{(\rho(i) - \rho^{sp}(i))^2}{n} \quad (40)$$

Tabla 7. Varianza calculada de pruebas con controladores.

Varianza controlador PI	0.0097
Varianza controlador Fuzzy	0.0034

4.7 Discusiones

Primero que todo, es necesario hacer énfasis respecto a la sintonización de ambos controladores.

Para el controlador PI se utilizó una técnica similar a la técnica propuesta en 2.8.1 para ajustar las constantes proporcional e integral, lo que permite controlar la señal de salida de manera eficiente. Sin embargo, al modificar el valor objetivo de la señal de salida las constantes elegidas previamente se vuelen poco eficientes, lo que implica volver a modificarlas. Por medio de modelaciones, las cuales no son el propósito de esta investigación, se puede obtener que para determinados rangos de la señal deseada existen constantes definidas que ajustan eficientemente la señal de salida al objetivo. El conocimiento de los valores que deben adquirir estas constantes al momento de la modificación de la señal objetivo, podría permitir una reacción más eficaz y con ello, alcanzar en menor tiempo la respuesta deseada.

Respecto a la sintonización del controlador Fuzzy no existe ninguna técnica en particular. En la bibliografía [14] se realiza un enfoque bajo el buen desarrollo de los grupos difusos, en función del conocimiento experto. Se puede apreciar que, en los gráficos de función de pertenencia, los grupos difusos están comprendidos en un rango de -1 y 1, respecto al error y a su derivada. Se han utilizado constantes que posibilitan que las reglas de inferencia generen un efecto notable en el control de la señal de salida y, de no utilizarlas, el error generado en ciertos casos no se hubiese considerado como muy alto o muy bajo, por lo tanto, el flujo en la descarga no hubiese sido modificado como debiese ser. El problema de esta solución es seleccionar debidamente las constantes para generar las respuestas deseadas, el método usado fue simplemente ir variando una constante y posteriormente la otra, una técnica similar a la de la sintonización del PI. Otra forma de abarcar este problema hubiese sido dejar comprendidos los grupos difusos en un rango más acotado, ya que el error máximo alcanzado no sobrepasa el valor de 0.2. Sin embargo, acotar los grupos difusos requiere aun mayor precisión en su definición, por lo que decidir inicialmente esta opción hubiese sido poco viable por la falta de información.

El comportamiento de la densidad en la descarga requiere ser discutido, ya que esta se comporta diferente dependiendo del controlador utilizado.

Al emplear el controlador PI se observa que, entre los 600 y 800 segundos de la prueba, la señal de salida se encuentra cercana al valor deseado. Sin embargo, existe una oscilación constante y de amplitud casi continua, lo que genera un sobrepaso de entre 3.5%-5% del valor deseado debido a las características que produce la constante integrativa. Es posible encontrar una constante que disminuya aún más el sobrepaso, no obstante, aun estará presente la oscilación de la densidad de la descarga. Por otra parte, cuando el valor objetivo de la señal es modificado se observa que la acción tomada sobre el flujo de descarga no es del todo eficaz. Esto se puede observar cercano a los 700 segundos donde la densidad de descarga empieza a alcanzar el valor objetivo, sin embargo, esta continúa disminuyendo bruscamente. Por otra parte, cuando se aumenta el valor objetivo a 1.45, el flujo de descarga idealmente debiese disminuir, sin embargo, existe un momento donde el sistema no responde adecuadamente y se genera un aumento.

Al emplear el controlador Fuzzy, el comportamiento del flujo de la descarga y, con ello, el de la densidad en la descarga, quedan ligados directamente al conjunto de reglas de inferencia desarrollado. Visualmente se puede apreciar que el comportamiento de la señal de salida no es tan oscilatorio como la generada por el controlador PI, esto se produce por el efecto de algunas de las reglas creadas. Por ejemplo, cercano a los 300 segundos donde el error es negativo y decrece con el tiempo, puede ocurrir una rápida disminución del error generando una disminución del caudal (según las reglas de inferencias) y, por ende, provocar un incremento de dicho error. Para este caso, si se hubiese tomado la decisión de seguir aumentando el caudal es posible que la densidad de la descarga hubiese disminuido más de lo deseado, y con ello provocar un efecto indeseado de sobrepaso. Según lo experimentado se puede deducir que las 25 reglas de inferencia no cuadran perfectamente, aunque a grandes rasgos, cumplen con el cometido de llevar la variable de salida al valor deseado. Por otra parte, se observa algo provechoso en el comportamiento del flujo de descarga cuando se decide aumentar el valor de la densidad en la descarga. El caudal disminuye drásticamente, llegando a casi 0,08 litros por minuto durante un gran tiempo, hasta el punto en que la densidad en la descarga empieza a alcanzar el valor deseado. Este comportamiento del caudal es superior al producido por el controlador PI.

En ambas pruebas de control ocurrieron variaciones similares del valor objetivo y, pese a que el controlador Fuzzy inicialmente no permitió alcanzar la densidad de descarga deseada, obtuvo una varianza significativamente menor a la del controlador PI, es decir, el controlador Fuzzy actúa de mejor manera en primera instancia. Ambos controladores pueden ser mejorados, sin embargo, el controlador PI es más limitado pues, la presencia de una acción integradora generara inevitablemente un sobrepaso. En cambio, las características que presenta un sistema de control Fuzzy tales como innovar en la base de reglas de inferencia y en los conjuntos difusos, permiten generar sistemas de control cada vez óptimos.

Respecto al propósito principal de las pruebas con los sistemas de control usados, el cual es obtener un valor deseado en la señal de salida del sistema, se puede decir lo siguiente: Pese a que se la señal de salida pudo acercarse al valor deseado, el tiempo de prueba utilizado para cada valor objetivo no fue suficientemente largo para determinar si la señal de salida se estabiliza en el valor deseado. El motivo de esto es la cantidad de material necesario para realizar cada prueba. En este caso se usó aproximadamente 35 [kg] de material particulado por prueba, el cual fue insuficiente para probar la estabilidad en el tiempo de la densidad en la descarga y el comportamiento de esta frente a cambios en el valor objetivo. Una solución posible sería a futuro realizar pruebas con el simple propósito de estudiar la estabilidad de la señal de salida en el tiempo.

CAPITULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las variaciones generadas en el caudal de descarga fueron más certeras utilizando el controlador Fuzzy dado que el controlador PI hizo aumentar el flujo en situaciones en las cuales debiese disminuir.

El controlador PI genera un sobrepaso elevado, de aproximadamente un 5%, lo que en aplicaciones industriales sería contraproducente.

Pese a que inicialmente el controlador Fuzzy no logró obtener el valor deseado en la descarga, su varianza fue de 0.0034, valor significativamente menor al del controlador PI, el cual fue de 0.0097.

Las reglas de inferencia desarrolladas para el controlador Fuzzy permite alcanzar los valores deseados, sin embargo, genera un efecto oscilante con un sobrepaso considerable, de un 2%, en la densidad del flujo de descarga.

Se deben realizar pruebas con controlador Fuzzy con el objetivo de lograr que la señal de salida sea cercana al valor objetivo a lo largo del tiempo.

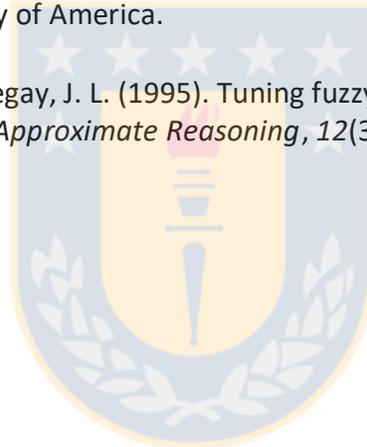
Para futuras pruebas con controlador Fuzzy se debe innovar en la base de reglas difusas aumentando los grupos difusos a emplear y la cantidad de reglas utilizadas, con el fin de disminuir el sobrepaso generado.

Se debería comparar las pruebas controlador Fuzzy con otro controlador moderno. Se sugiere usar un modelo de control predictivo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] COCHILCO. (2018). Consumo de agua en la minería del cobre al 2018. *Comisión Chilena del cobre*.
- [2] Mundial, B. (2011). Diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos. *Departamento de medio ambiente y Desarrollo Sostenible Región para América Latina y el Caribe*.
- [3] Ministerio del Interior y Seguridad Pública. (2013). Estrategia Nacional de Recursos Hídricos 2012-2025.
- [4] Brantes Abarca, R. C., & Zuñiga, A. I. (2009). Gestión del recurso hídrico y la minería en Chile.
- [5] Sergio Prado. (2016). Optimizando la recuperación de agua desde relaves. 2019, de Minería chilena Sitio web: <http://www.mch.cl/reportajes/optimizando-la-recuperacion-de-agua-desde-relaves/>
- [6] Fernando Concha, A. (2014). *Solid-liquid separation in the mining industry*. Springer International Publishing.
- [7] Gregory, J. (2005). *Particles in water: properties and processes*. CRC Press.
- [8] Kynch, G. J. (1952). A theory of sedimentation. *Transactions of the Faraday society*, 48, 166-176.
- [9] Bürger, R., Karlsen, K. H., & Towers, J. D. (2005). Mathematical model and numerical simulation of the dynamics of flocculated suspensions in clarifier–thickeners. *Chemical Engineering Journal*, 111(2-3), 119-134.
- [10] Betancourt, F., Bürger, R., Diehl, S., & Farås, S. (2014). Modeling and controlling clarifier–thickeners fed by suspensions with time-dependent properties. *Minerals Engineering*, 62, 91-101.
- [11] Alvarez Brotons, X. (2004). Control predictivo de canales de riego utilizando modelos de predicción de tipo Muskingum (primer orden) y de tipo Hayami (segundo orden).
- [12] Christian Goñi (2017), Algoritmo y controladores industriales parte 1: controladores PID. *Universidad de Concepción: Departamento de ingeniería metalúrgica*.
- [13] Christian Goñi (2017), Sintonización y filtrado de controladores PID. *Universidad de Concepción: Departamento de ingeniería metalúrgica*.
- [14] Morcillo, C. G. (2011). Lógica Difusa, una introducción práctica. *Técnicas de Softcomputing*, 29.

- [15] Tan, C. K., Bao, J., & Bickert, G. (2017). A study on model predictive control in paste thickeners with rake torque constraint. *Minerals Engineering*, 105, 52-62.
- [16] Betancourt, F., Concha, F., & Sbárbaro, D. (2013). Simple mass balance controllers for continuous sedimentation. *Computers & Chemical Engineering*, 54, 34-43.
- [17] Bürger, R., Bustos, M. C., & Concha, F. (1999). Settling velocities of particulate systems: 9. Phenomenological theory of sedimentation processes: numerical simulation of the transient behaviour of flocculated suspensions in an ideal batch or continuous thickener. *International journal of mineral processing*, 55(4), 267-282.
- [18] Concha, F., & Barrientos, A. (1980, July). Phenomenological theory of thickening. In *Engineering Foundation Conference on Particle Science and Technology, New Hampshire, USA* (pp. 7-11).
- [19] Åström, K. J., & Hägglund, T. (1995). *PID controllers: theory, design, and tuning* (Vol. 2). Research Triangle Park, NC: Instrument society of America.
- [20] Herrera, F., Lozano, M., & Verdegay, J. L. (1995). Tuning fuzzy logic controllers by genetic algorithms. *International Journal of Approximate Reasoning*, 12(3-4), 299-315.



ANEXOS

Tabla 8. Medición de distribución de tamaños. Prueba 1

Tamaño (μm)	Porcentaje pasante acumulativo	Densidad
1,8	18,37	16,25
2,2	23,17	23,99
2,6	27,43	25,55
3	31,22	26,53
3,6	36,17	27,27
4,4	41,66	27,43
5,2	46,09	26,58
6,2	50,48	25,04
7,4	54,53	22,95
8,6	57,69	21,07
10	60,76	20,38
12	64,63	21,3
15	69,89	23,66
18	74,6	25,89
21	78,66	26,42
25	83,08	25,39
30	87,37	23,6
36	91,3	21,62
42	94,29	19,48
50	97,18	16,59
60	99,25	11,37
72	100	4,14
86	100	0

Tabla 9. Medición de distribución de tamaños. Prueba 2

Tamaño (μm)	Porcentaje pasante acumulativo	Densidad
1,8	15,62	13,81
2,2	19,79	20,86
2,6	23,56	22,62
3	26,97	23,88
3,6	31,51	24,98
4,4	36,65	25,69
5,2	40,9	25,48
6,2	45,2	24,51
7,4	49,23	22,87
8,6	52,41	21,17
10	55,49	20,44
12	59,34	21,19
15	64,54	23,43
18	69,22	25,74
21	73,33	26,7
25	77,97	26,65
30	82,7	26,02
36	87,19	24,71
42	90,77	23,28
50	94,45	21,18
60	97,49	16,72
72	99,34	10,17
86	100	3,71
102	100	0

Tabla 10. Mediciones de potencial Z a distintos pH.

N° Medición	Potencial Z [mV]	pH
Medición 1	-54.29	7.55
Medición 2	-53.57	7.7
Medición 3	-43.28	9.3
Medición 4	-37.62	10.03
Medición 5	-2.85	11.33
Medición 6	16.61	12

Tabla 10. Cálculo de velocidad inicial de sedimentación a distintas dosificaciones.

Prueba	Dosificación [g/ton]	phi	Velocidad [m/s]
1	2	2	0,00703
1	2	5	0,00125
1	2	10	0,00027
1	2	12	0,00054
1	2	15	0,00007
2	5	2	0,00572
2	5	5	0,00091
2	5	10	0,00034
2	5	12	0,00022
2	5	15	0,00013
3	8	2	0,01030
3	8	5	0,00301
3	8	10	0,00032
3	8	12	0,00010
3	8	15	0,00011
4	10	2	0,03220
4	10	5	0,00119
4	10	10	0,00021
4	10	12	0,00019
4	10	15	0,00014
5	20	2	0,0068
5	20	5	0,00218
5	20	10	0,00025
5	20	12	0,00027
5	20	15	0,00020
6	30	2	0,00362
6	30	5	0,00139
6	30	10	0,00025
6	30	12	0,00019
6	30	15	0,00010
7	12	2	0,01160
7	12	5	0,00185
7	12	10	0,00024
7	12	12	0,00019
7	12	15	0,00013

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA
Departamento de Ingeniería Metalúrgica
Hoja Resumen Memoria de Título

Título: Aplicación y comparación de controladores PI y fuzzy en espesador piloto		
Nombre Memorista: Carlos David Muñoz Apolonio		
Modalidad	Investigación	Profesor(es) Patrocinante(s)
Concepto		Dr. Fernando Betancourt
Calificación		
Fecha		
Prof. ^a Eugenia Araneda H.		
		Ingeniero Supervisor: Alonso Pereira
		Institución: Universidad de Concepción
Comisión (Nombre y Firma)		
Daniel Sbárbaro		Fernando Concha
Resumen		
<p>Con el propósito de optimizar la recuperación de agua en un espesador, se propuso aplicar y comparar 2 sistemas de control automático, un controlador PI y un controlador Fuzzy en un espesador piloto, con el objetivo de controlar la densidad en su descarga. Para una óptima puesta en marcha de las pruebas se realizó una caracterización físico-química del material a emplear y pruebas de sedimentación batch para determinar la dosificación óptima de floculante. Las pruebas realizadas duraron aproximadamente 35 minutos empleando un total de 35 kilogramos de material aproximadamente por prueba. Se varió 4 veces el valor del objetivo deseado en la descarga con el fin de analizar las acciones realizadas por el controlador. Para cuantificar y comparar las pruebas se calculó la varianza de cada una, en donde se observa que al utilizar el controlador Fuzzy se obtiene un 35% de la varianza presente usando el controlador PI. La falta de material a disposición no permitió analizar la estabilidad en el tiempo de la densidad de descarga, por lo que se recomienda, para futuras pruebas estudiar dicha estabilidad.</p>		