



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**  
**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

**“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA PILOTO DE  
FLOTACIÓN PARA LA FILTRACIÓN DE PARTÍCULAS  
SUSPENDIDAS EN AGUA, USANDO UN  
CONTROLADOR PREDICTIVO”**

**TRABAJO DE TITULACIÓN**

Previo a la obtención del Título de:  
**MAGISTER EN AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL  
INDUSTRIAL**

**JOSÉ MAURICIO VILLARROEL INTRIAGO  
PABLO DANILO MENDEZ MAIGUA  
GUAYAQUIL – ECUADOR**

**AÑO: 2019**

## AGRADECIMIENTOS

A mi abuelita

Esperancita, gracias por sus palabras de aliento que me han ayudado a crecer como persona.

A mis padres

Rosa y Gustavo, gracias por enseñarme valores para alcanzar una gran meta.

A mis hermanos

Alejandra y Marlon, gracias por su apoyo y cariño en todos los momentos de mi vida.

A mi Director

Ing. Carlos Salazar, por el tiempo y paciencia en la elaboración de este documento.

A mi esposa

Maricela, por el apoyo y confianza en todo momento

Pablo Danilo Méndez Maigua

## DEDICATORIA

A mis hijos

Pablo Isaac y Nikola Daniel, quienes son la razón de mi vida.

Pablo Danilo Méndez Maigua

## AGRADECIMIENTOS

A Dios por estar a mi lado dándome sus bendiciones y no permitir que me rinda.

A mis padres y hermanos que siempre han estado a mi lado durante toda mi etapa de estudios y darme su amor y consejos para no decaer y continuar hasta cumplir mis metas.

A mi esposa por estar a mi lado incondicionalmente ante todas las circunstancias de la vida.

Al Ing. Carlos Alberto Salazar por su colaboración en la presente investigación.

A los docentes de la MACI, que con sus enseñanzas he logrado obtener conocimientos que serán de gran ayuda en mi vida profesional.

José Mauricio Villarroel Intriago

## DEDICATORIA

Dedico este Trabajo de Titulación a Dios por sus bendiciones, y no dejarme rendir en los momentos más difíciles, y permitir que mis padres, demás familiares, y mis amigos estén a mi lado.

A mis padres, por haberme dado la vida y guiarme siempre por el buen camino, gracias a sus consejos y por depositar su entera confianza en mí.

A mi esposa, por alentarme a salir adelante ante cada dificultad que se pueda presentar en la vida, demostrándome su amor en cada paso que damos juntos.

José Mauricio Villarroel Intriago

## TRIBUNAL DE EVALUACIÓN

---

Ph.D. César Martín  
SUBDECANO DE LA FIEC

---

Ing. Carlos Salazar López M.Sc  
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

---

Ronald Solís M. M.Sc  
MIEMBRO PRINCIPAL DEL TRIBUNAL

## **DECLARACIÓN EXPRESA**

"La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, me(nos) corresponde exclusivamente; y doy(damos) mi(nuestro) consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"

Pablo Danilo Méndez Maigua  
José Mauricio Villarroel Intriago

## RESUMEN

En el presente trabajo se realiza la implementación de un sistema piloto de tratamiento de agua, el mismo que está basado en la aplicación de microburbujas para la limpieza del agua, al ser un proceso relativamente nuevo en el tratamiento, se hace una revisión bibliográfica del estado del arte para la generación de burbujas y se prueban varios métodos, para mejorar la eficiencia del sistema se ha implementado los actuadores básicos que permitan realizar un control para mantener el proceso de una forma autónoma y remota, para esto se ha usado microcontroladores y plataformas de open source que inter operan con la interfaz de Labview, para obtener el modelo del sistema e implementar los controladores que permitan alcanzar este objetivo, los que se han comparado y ajustado para el control del sistema



## ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos .....	ii
Dedicatoria .....	iii
Agradecimientos .....	iv
Dedicatoria .....	v
Tribunal de Evaluación .....	vi
Declaración Expresa.....	vii
RESUMEN.....	viii
Índice General .....	ix
Índice de Tablas .....	xvi
Índice de Figuras .....	xvii
CAPÍTULO 1.....	1
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	1
1.1. Descripción del Problema.....	1
1.1.1. Agua para consumo humano.....	1
1.1.2. Aguas estancadas.....	3
1.2. Justificación.....	4
1.2.1. Descripción del sistema a utilizar. ....	5
1.2.2. Sistema de flotación .....	6
1.3. Objetivos .....	7
1.3.1. Objetivo General .....	7
1.3.2. Objetivos Específicos .....	7

1.4. Metodología .....	7
CAPÍTULO 2.....	9
2. ESTADO DEL ARTE .....	9
2.1. Sistemas de tratamiento de aguas .....	9
2.1.1. Contaminantes presentes en agua.....	9
2.1.2. Sistemas de tratamiento.....	10
2.1.2.1. Tratamientos físicos.....	10
2.1.2.2. Tratamientos químicos.....	11
2.1.2.3. Tratamiento con energías intensivas. ....	11
2.1.2.4. Tratamientos biológicos y de lodos.....	12
2.1.3. TECNOLOGÍAS USADAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS ....	13
2.1.3.1. Osmosis Inversa.....	13
2.1.3.2. Coagulación - Flocculación.....	14
2.1.3.3. Microfiltros. ....	14
2.1.3.4. Filtro de Carbón Activado. ....	15
2.1.3.5. Cloro.....	16
2.1.3.6. Neutralización.....	16
2.1.3.7. Flotación por Aire Disuelto.....	17
2.2. Sistemas de microburbujeo .....	18
2.2.1. Antecedentes.....	19
2.2.2. Eficiencia.....	20
2.2.3. Generación y propiedades de las microburbujas.....	20
2.2.4. Métodos de obtención de microburbujas .....	23
2.2.4.1. Sin flujo de líquido .....	23
2.2.4.2. Con flujo de líquido.....	25
2.3. Control PID y Predictivo .....	32

2.3.1. Control on-off .....	33
2.3.2. Control PID .....	34
2.3.3. Estructura del PID .....	34
2.3.4. Control proporcional .....	36
2.3.5. Control Integral.....	37
2.3.6. Control proporcional-integral .....	38
2.3.7. Control proporcional-derivativo .....	38
2.3.8. Control proporcional-integral-derivativo .....	39
2.3.9. Actuación proporcional.....	41
2.3.10. Método de ajuste del PID experimental .....	43
2.3.11. Controlador predictivo .....	44
2.3.12. Situación actual.....	45
2.3.13. Conceptos básicos de control predictivo .....	46
2.3.14. Estrategia de los controladores .....	48
2.3.15. Control Predictivo basado en modelos .....	51
2.3.15.1. Modelo de Predicción .....	51
2.3.15.2. Modelo de proceso .....	52
2.3.15.3. Modelo de perturbaciones .....	56
2.3.15.4. Respuesta libre y forzada .....	56
2.3.16. Función Objetivo.....	58
2.3.17. Obtención de la ley de control.....	61
2.3.18. Revisión de algunos algoritmos MPC .....	62
2.3.18.1. Matriz de control dinámico.....	62
2.3.18.2. Modelo de control algorítmico.....	64
2.3.18.3. Control predictivo funcional .....	65
2.3.18.4. Predicción Extendida Auto Control Adaptativo.....	66

2.3.19. Extended Horizonte Control Adaptativo .....	67
2.3.20. Control Adaptativo Generalizado .....	68
2.3.20.1. Formulación del control predictivo generalizado .....	69
2.3.20.2. Predicción óptima.....	71
2.3.20.3. Obtención de la ley de control .....	76
2.3.20.4. Aplicaciones de los controles PID y Predictivo en sistemas de tratamiento de aguas.....	77
2.3.20.5. Análisis rápido de las Aplicaciones Industriales del Control Tradicional PID .....	77
2.3.20.6. Análisis rápido de las aplicaciones del Control Predictivo Generalizado .....	79
2.3.20.7. Aplicaciones de control Predictivo en Plantas de Tratamiento de Agua .....	80
2.3.21. Aplicaciones de control Tradicional en Plantas de Tratamiento de Agua 84	
2.3.21.1. Etapas en el proceso de tratamiento. ....	85
2.3.21.2. Control del proceso .....	87
CAPÍTULO 3.....	94
3. DISEÑO E IMPLEMENTACION DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO.....	94
3.1. Diseño del sistema de tratamiento.....	94
3.1.1. Normas generales de diseño.....	97
3.1.2. Parámetros de diseño .....	99
3.1.3. Dimensionamiento.....	100
3.1.4. Tanque de flotación.....	103
3.1.4.1. Parámetros de Diseño para la Celda de Flotación .....	104
3.1.5. Adición de aire .....	105
3.1.6. Sistema de bombeo .....	107

3.1.6.1. Equipos de Bombeo .....	108
3.2. Determinación de las características de equipos del sistema.....	108
3.2.1. Selección del sistema de inyección y mezclado de aire .....	111
3.2.2. Selección del equipo de bombeo.....	113
3.2.3. Selección del equipo de calentamiento .....	114
3.3. Implementación del sistema de tratamiento.....	115
3.4. Acondicionamiento de las señales de entrada y salida.....	119
3.4.1. Control general del sistema.....	121
3.4.2. Circuito de disparo .....	125
3.4.3. Circuito detector de cruce por cero.....	126
3.4.4. Sistema de adquisición de datos y lectura de sensores. ....	128
3.4.5. Tarjeta de adquisición de datos National Instruments DAQ USB – 6008	
129	
3.4.6. Sensor de caudal .....	132
3.4.7. Actuador para el control de temperatura. ....	134
3.4.8. Actuador para la válvula de control de caudal .....	136
3.4.9. Sensor de Temperatura .....	139
3.4.10. Sensor de distancia ultrasónico.....	140
3.4.11. Sensor de pH .....	141
3.4.12. Sensor de turbiedad.....	143
3.5. Pruebas de los sensores y calibración del sistema.....	144
3.5.1. Calibración del sensor de temperatura.....	144
3.5.2. Calibración del sensor de caudal.....	145
3.5.3. Calibración del actuador para el control de temperatura .....	145
3.5.4. Calibración del actuador de la válvula de control de caudal. ....	145
3.5.5. Calibración del sensor de distancia ultrasónico.....	146

3.5.6.	Calibración del sensor de pH. ....	146
3.5.7.	Calibración del sensor de turbiedad .....	147
CAPÍTULO 4.....		149
4. IDENTIFICACION DEL SISTEMA Y CONTROLADORES .....		149
4.1.	Identificación del sistema en condiciones normales .....	149
4.2.	Modelos de sistemas dinámicos.....	150
4.3.	Modelos de entrada salida .....	151
4.4.	Modelos paramétricos lineales .....	151
4.5.	OE Output Error .....	152
4.6.	ARMAX o Auto Regressive Moving Average with eXogenous inputs... ..	152
4.7.	Modelo en el espacio de estados .....	153
4.8.	Caracterización de Perturbaciones.....	155
4.9.	Análisis por Correlación.....	155
4.10.	Procedimiento de la identificación .....	157
4.11.	Obtención del modelo de la dinámica de la temperatura .....	157
4.12.	Procesamiento de las señales obtenidas y filtrado .....	160
4.12.1.	Acondicionamiento de los datos .....	160
4.13.	Simulación de algoritmos para control PID .....	164
4.14.	Simulación de algoritmos para control Predictivo .....	167
CAPÍTULO 5.....		172
5. DISEÑO DE PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....		172
5.1.	Diseño de pruebas simuladas y reales para el control de las variables del sistema. ....	172
5.2.	Análisis de resultados obtenidos con los controladores.....	175
5.3.	Análisis comparativo de resultados con los dos tipos de controles.....	177
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....		180

BIBLIOGRAFIA.....	182
ANEXOS .....	183

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla # 1.</i> Ajuste experimental del PID. Fuente [10] .....	44
<i>Tabla # 2.</i> Principales parámetros de diseño de un sistema DAF en aguas residuales. Fuente [18] .....	100
<i>Tabla # 3.</i> Resultados de la caracterización fisicoquímica de los tres días de muestreo de agua residual típica industrial. Fuente [24]. .....	101
<i>Tabla # 4.</i> Solubilidad del aire a presión atmosférica en el agua en función de la temperatura. Fuente [18] .....	102
<i>Tabla # 5.</i> Características del tanque de flotación diseñado. Fuente [16]....	111
<i>Tabla # 6.</i> Características del sistema de inyección elegido Fuente [16]...	112
<i>Tabla # 7.</i> Entradas y salidas asignadas a la DAQ .....	130
<i>Tabla # 8.</i> Características de los modelos estándar de Arduino. Fuente [2 ] .....	131
<i>Tabla # 9.</i> Pines de conexión establecidos.....	132
<i>Tabla # 10.</i> Características del sensor de flujo. Fuente [El fabricante].....	134
<i>Tabla # 11.</i> Características del motor Fuente [El fabricante].....	138
<i>Tabla # 12.</i> Características técnicas del sensor con chip DS18B20 Fuente [El fabricante] .....	139
<i>Tabla # 13.</i> Características del sensor de pH. Fuente [ Datos del fabricante] .....	142
<i>Tabla # 14.</i> Características del sensor de turbidez. Fuente [Datos del fabricante].....	143



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura # 1.1. Indicadores prioritarios agua entubada por red pública. Fuente: [23]	2
Figura # 1.2. Histórico de cobertura de agua entubada por red pública Zona 1	3
Figura # 2.1. Distribución del tamaño de las burbujas generadas por varios sistemas. Fuente: [4].....	21
Figura # 2.2. Generador de microburbujas tipo (M2-LM) .....	25
Figura # 2.3. Diagrama esquemático de un mezclador estático de OHR.....	26
Figura # 2.4. Diagrama esquemático de un generador de microburbujas por aire disuelto	28
Figura # 2.5. Celda de flotación de aire inducido IAF WMCO. Fuente: [8]....	31
Figura # 2.6. Unidad de flotación de aire de boquilla de una sola etapa. Fuente: [8].....	32
Figura # 2.7. Estructura general en diagrama de bloques de un controlador PID.....	35
Figura # 2.8. Evolución de cálculo de un controlador PID. Fuente: [13].....	40
Figura # 2.9. Estrategia del Control Predictivo. Fuente: [13] .....	49
Figura # 2.10. Estructura básica del Controlador Predictivo basado en Modelo. Fuente: [13] .....	50
Figura # 2.11. Respuesta impulsional del sistema. Fuente: [13].....	52
Figura # 2.12. Respuesta del sistema ante una entrada escalón. Fuente:[13] .....	54
Figura # 2.13. Respuesta libre y forzada. Fuente: [13].....	58
Figura # 2.14. Trayectoria de referencia. Fuente: [13].....	60
Figura # 2.15. Componentes típicos que se encuentran en el esquema de una red de alcantarillado. Fuente: [ 3] .....	81
Figura # 3.16. Esquema del sistema de flotación. Fuente: [10] .....	95
Figura # 3.17. Tanque de flotación rectangular. Fuente: [2].....	104
Figura # 3.18. Aplicación del teorema de Bernoulli: “Las microburbujas se generan donde el fluido tiene una velocidad muy elevada con la correspondiente disminución de la presión”. Fuente: [2] .....	106
Figura # 3.19. Venturi Modelo $\frac{3}{4}$ ( $\frac{3}{4}$ " X 0,9) Fuente: [16].....	107
Figura # 3.20. Modelo del sistema F. Fuente: [16].....	113
Figura # 3.21. Tanque rectangular para el sistema piloto .....	116
Figura # 3.22. Esquema general del sistema implementado.....	118
Figura # 3.23. Diagrama de bloques del sistema de control de la planta piloto.....	121
Figura # 3.24. Circuito de potencia .....	125

Figura # 3.25. Diagrama del circuito detector de cruce por cero. ....	126
Figura # 3.26. Diagrama de conexión DAC 6008 .....	129
Figura # 3.27. Sensor de flujo de Agua FL-608. Fuente: [El fabricante] ..	134
Figura # 3.28. Circuito para el calentamiento del agua .....	135
Figura # 3.29. Ciclos de potencia PWM.....	136
Figura # 3.30. Servo válvula construida .....	137
Figura # 3.31. Disposición de estos dispositivos en el Arduino Uno. ....	138
Figura # 3.32. Diagrama de conexión digital de Arduino .....	139
Figura # 3.33. Pulsos recibidos y enviados por el sensor. Fuente: [Arduino ]	141
Figura # 3.34. Diagrama de conexión para medir el pH .....	142
Figura # 3.35. Diagrama de conexión en modo analógico .....	144
Figura # 3.36. Curva de calibración del sensor de distancia ultrasónico ..	146
Figura # 3.37. Calibración del sensor de pH.....	147
Figura # 3.38. Calibración del sensor de turbiedad .....	147
Figura # 3.39. Curva de calibración del sensor de turbiedad.....	148
Figura # 4.40. Interfaz para la adquisición de datos del sistema .....	158
Figura # 4.41. Señales de entrada – salida y temperatura de la planta ....	159
Figura # 4.42. Señales de entrada y salida nivel. ....	160
Figura # 4.43. Obtención de los modelos de identificación en Matlab - temperatura.....	161
Figura # 4.44. Respuesta del sistema en lazo abierto, temperatura. ....	162
Figura # 4.45. Obtención de los modelos de identificación en Matlab - nivel. ....	163
Figura # 4.46. Respuesta del sistema en lazo abierto - nivel. ....	164
Figura # 4.47. Respuesta del sistema para un controlador PID.....	164
Figura # 4.48. Parámetros de ajuste del PID y calidad del controlador temperatura.....	165
Figura # 4.49. Respuesta del sistema para un controlador PID.....	166
Figura # 4.50. Parámetros de ajuste del PID y calidad del controlador nivel. ....	166
Figura # 4.51. MPC design tools, ingreso de la planta al simulador.....	167
Figura # 4.52. Ingreso de la planta del sistema. ....	168
Figura # 4.53. Ingreso de las restricciones al controlador.....	169
Figura # 4.54. Ingreso de pesos para la entrada y salida. ....	170
Figura # 4.54. Simulación del controlador mpc de temperatura.....	170
Figura # 4.55. Simulación del controlador mpc de nivel. ....	171
Figura # 5.56. Pruebas de eliminación de sólidos suspendidos. ....	173
Figura # 5.57. Configuración de parámetros de la planta. ....	173
Figura # 5.58. Visualización de los parámetros del sistema para iniciar el control.....	174

Figura # 5.59. Control de bomba PWM.....	174
Figura # 5.60. Simulación de la respuesta del sistema de nivel con un controlador MPC.....	175
Figura # 5.61. Obtención de datos reales en la planta control de nivel MPC .....	176
Figura # 5.62. Obtención de datos de la planta simulada con MPC, temperatura.....	176
Figura # 5.63. Simulación de la respuesta del sistema control de temperatura MPC.....	177
Figura # 5.64. Respuesta del sistema real con un controlador PID. ....	178
Figura # 5.65. Respuesta del sistema real con un controlador MPC. ....	178
Figura # 5.66. Respuesta del sistema usando un controlador PID, nivel. ....	179
Figura # 5.67. Respuesta de sistema usando un controlador MPC, nivel... ..	179

## **CAPÍTULO 1**

### **1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **1.1. Descripción del Problema**

El tratamiento de aguas, para consumo humano mejora las condiciones de vida de la población, sin embargo en Ecuador existen lugares sin acceso a plantas de tratamiento donde mediante procesos de tratamiento se potabiliza el agua para el consumo humano, debido a la inversión económica que esto implica, en esta investigación en este trabajo se diseña como implementar un sistema de potabilización usando flotación como un método alternativo y de bajo costo con respecto a los procesos convencionales usados para la reducción de partículas contaminantes presentes en el agua.

##### **1.1.1. Agua para consumo humano**

En 2009, la cobertura de agua mediante red pública, en relación con las viviendas habitadas en la Zona de Planificación 1 (Imbabura, Carchi, Esmeraldas y la Amazonia) corresponde a 70%. La provincia de Esmeraldas y la región amazónica son las que menores índices de cobertura reflejan. Por otro lado, en esta Zona se ratifica la tendencia nacional en relación con la cobertura urbano-rural, que muestra una concentración de los servicios de agua en el área urbana (87%) en comparación con la rural (33%).

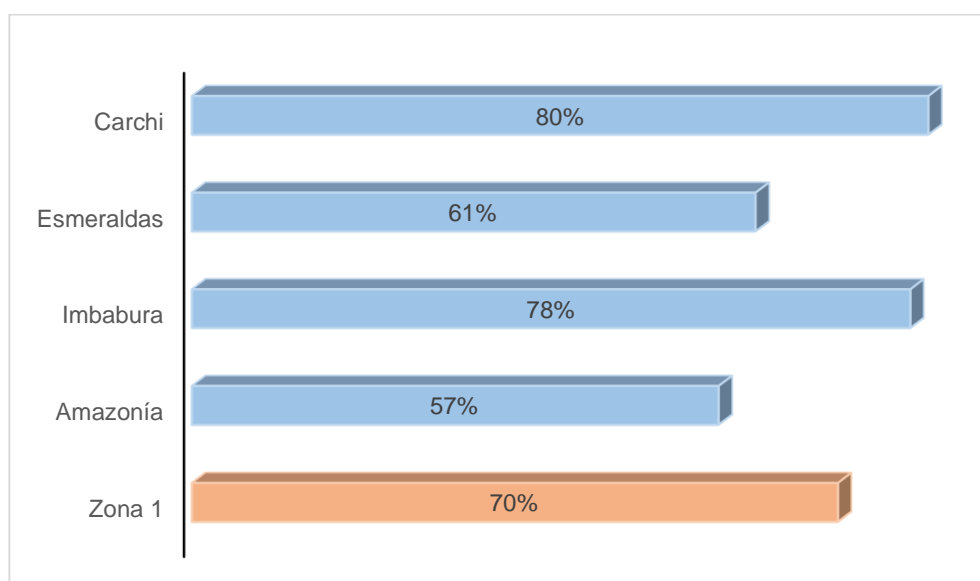


Figura # 1.1. Indicadores prioritarios agua entubada por red pública. Fuente: [23]

Uno de los indicadores de viviendas abastecidas por agua de la red pública a través de tubería, se encuentra en los datos del INEC según los últimos datos disponibles, expresado como porcentaje del total de viviendas y se refiere tanto al sistema (tubería) como al medio de abastecimiento (red pública). La red pública se refiere al sistema que comprende captación, conducción y distribución del agua hacia las viviendas; pueden o no incluir procesos de tratamiento del agua. La medida excluye los casos de vivienda que no se abastecen de la red pública (sino de, por ejemplo, carro repartidor, pozos, entre otros).

$$[\%viviendas] = \frac{\#viviendas \text{ abastecidas años}}{\text{total de viviendas}} * 100$$

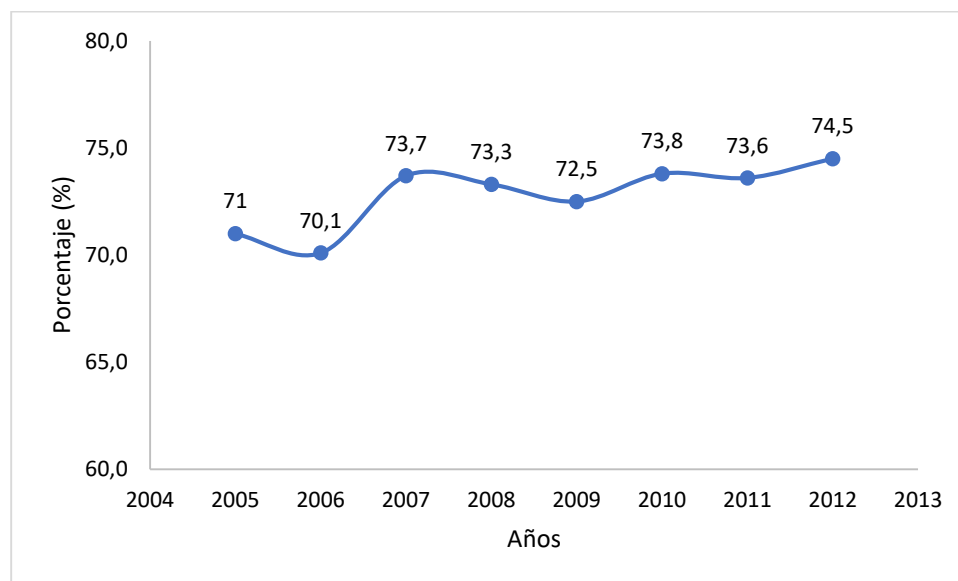


Figura # 2.2. Histórico de cobertura de agua entubada por red pública Zona 1  
Fuente: [23]

### 1.1.2. Aguas estancadas

En la provincia de Imbabura, las autoridades municipales, están preocupadas por el avance de la contaminación ambiental a la que están sujetas las lagunas naturales de la provincia y sus alrededores; provocada por el manejo inadecuado de los desperdicios producidos por la venta de alimentos preparados, además del flujo de turistas que genera basura en cantidades considerables, estos desechos líquidos al no tener un adecuado tratamiento se van acumulando en las orillas de las lagunas, produciendo un acelerado proceso de eutrofización (exceso de nutrientes) en el agua cuyo espejo está en los límites máximos de tolerancia y la sedimentación producida por las descargas de aguas residuales de un sector de la población que habita en sus alrededores, que de continuar con estos procesos existe el peligro que a futuro las lagunas se conviertan en un pantano insalubre, siendo esta una constante preocupación.

Por lo visto entonces, se intenta aportar con el diseño de una unidad ecológica para el tratamiento del agua, que no inyecte productos químicos adicionales a los procesos

usados en aguas estancadas o potables, con el fin de mantener las condiciones de vida estables en el ecosistema; mediante este trabajo se busca responder la siguiente pregunta:

¿Cómo implementar una unidad piloto de tratamiento para aguas estancadas o potables, usando un sistema de micro-burbujeo, en el que se pueda controlar sus parámetros físicos para optimizar su funcionamiento y que permita reducir la cantidad de sólidos disueltos que originan la presencia de turbiedad y color en el agua?

## **1.2. Justificación**

En el agua potable o estancada los parámetros de turbiedad y color están fuera del rango por la presencia de sólidos disueltos provocados generalmente por arrastre de partículas en suspensión desde las captaciones y en las aguas estancadas por las descargas residuales domésticas e industriales, para disminuir estos parámetros físicos se han usado métodos de tratamiento generalmente con compuestos de aluminio, este metal si no es retenido en el proceso se disuelve en el agua y llega hasta la población para su consumo o cambia las características de las aguas estancadas por la presencia de este metal.

Por tanto la flotación al usar aire no produciría cambios en la calidad del agua, este proceso utiliza una fase flotante para eliminar las partículas dispersas en una solución. Las burbujas de aire son la fase flotante más comúnmente utilizada pero también las emulsiones de aceite y más recientemente las esferas de plástico, se han utilizado como portadores flotantes para la fase dispersa.

El objetivo de la flotación es unir una burbuja diminuta, generalmente de aire a los sólidos en suspensión y hacer que se separen del agua en una dirección ascendente. Esto es debido al hecho de que las partículas sólidas tienen un peso específico menor que el agua, cuando se une la burbuja. Los sólidos que pueden ser eliminados por

flotación, pueden ser tan variados como metales, precipitados de hidróxido, desechos de diversos tipos, material biológico, minerales y combustibles fósiles.

### **1.2.1. Descripción del sistema a utilizar.**

La velocidad de flotación con gas es mayor que la separación por gravedad de gotas de aceite y sólidos suspendidos en el agua. La flotación con gas modifica dos variables de la Ley de Stokes: la densidad de la partícula y el diámetro de la partícula. Al chocarse y adherirse finas burbujas a las partículas, decrece la densidad efectiva del aglomerado resultante y aumenta su diámetro efectivo. El resultado neto es que las partículas se elevan rápidamente hasta la superficie del fluido. Al igual que para las partículas, este fenómeno también aplica a las gotas de aceite que por su tamaño también se encuentran suspendidas en el fluido.

La flotación consta de varias etapas para que el proceso se lleve a cabo:

- 1) Generación y distribución de microburbujas en el agua por tratar.
- 2) Colisión entre las microburbujas y las partículas suspendidas en el agua.
- 3) Contacto interfacial del sistema partícula/burbuja.
- 4) Arrastre de otras partículas que se encuentran en la trayectoria de los aglomerados que ya se han formado.
- 5) Ascenso del aglomerado a la superficie donde debe removerse.

En operaciones de transferencia de masa "gas-líquido", frecuentemente utilizadas en procesos de tratamiento de aguas, el aumento del área interfacial es uno de los parámetros más importantes para aumentar la eficiencia en la operación. En el caso de la flotación, la uniformidad y continuidad del proceso están ligadas al diámetro de burbujas colocadas en la fase líquida. Esto se mejora si hay presencia de



microburbujas pues el incremento de su densidad numérica y el aumento del tiempo de residencia elevan la probabilidad de colisión y adhesión del sistema partícula / burbuja.

La principal interrogante por resolver en el tratamiento por flotación es cómo alcanzar alta generación de microburbujas dentro del rango de tamaños efectivos para el proceso y cómo distribuirlas eficientemente en el agua para lograr, así, la máxima remoción de partículas contaminantes suspendidas.

### **1.2.2. Sistema de flotación**

El proceso de separación por flotación a diseñar está basado en la inyección de aire atmosférico utilizando agua como fluido motriz. En este proceso, el contacto aire - agua se realiza mediante boquillas inyectoras, beneficiando especialmente en lo referente al costo del proceso.

El funcionamiento del sistema consiste en recircular parte del agua por tratar presente en el contenedor (piscina). Se debe utilizar un sistema de bombeo para enviar el fluido a un Venturi abierto a la atmósfera. Al producirse el cambio de velocidad dentro del Venturi, se produce un vacío que induce el aire hacia la salida de este, mezclándolo con el agua en forma de microburbujas. Esta corriente puede entonces ser distribuida por un arreglo de tubería dentro de la piscina para producir la flotación.

Este sistema logra la generación de una alta cantidad de microburbujas, de tamaño promedio entre 150 y 250  $\mu\text{m}$ . Es un sistema que permite, haciendo algunos ajustes en su configuración, cumplir funciones adicionales como disminución de sustancias contaminantes, homogeneización, neutralización, aireación, tratamiento químico y/o biológico, entre otros, procesos necesarios para el tratamiento integral de aguas claras o residuales.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo General**

Implementar un sistema de micro burbujeo para la filtración de partículas suspendidas usando un controlador de temperatura y nivel basado en control predictivo generalizado.

#### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- Analizar los principios y el funcionamiento del sistema de micro burbujeo para el tratamiento de aguas.
- Implementar un sistema piloto de micro burbujeo con control de presión y temperatura para el tratamiento de aguas.
- Realizar la identificación del sistema piloto para la obtención del modelo matemático y diseño de controladores.
- Simular los algoritmos de control tanto clásicos como predictivo, para ajustar la respuesta del sistema.
- Realizar un análisis comparativo entre los esquemas de control propuestos, para analizar cuál es el que mejor se adapta al sistema implementado.

### **1.4. Metodología**

Se utilizará una técnica experimental de flotación mediante microburbujeo con aire para disminuir las partículas de sólidos en suspensión presentes en el agua. En la primera parte de esta investigación, se realiza un estado del arte para obtener la información que permita diseñar un sistema piloto de flotación. Se evalúa el efecto de parámetros de diseño sobre la remoción de sólidos en las celdas de flotación,

como las condiciones de flujo y temperatura, las alternativas de distribución y el mejor arreglo del sistema de inyectores que permita conocer las condiciones óptimas de operación.

Para optimizar el proceso de flotación y mantener las condiciones de operación, se realizará una metodología experimental, donde se implementará un sistema de control predictivo generalizado con el fin de mantener los parámetros de temperatura y caudal dentro de los rangos óptimos de funcionamiento y para mantener al sistema dentro de un punto de operación, se diseñará los controladores basados en el modelo que fueron obtenidos a través de la identificación paramétrica, usando los sensores de temperatura y nivel, con señales PRBS previamente construidas para este objetivo.

Por último, se diseñará una interfaz basada en Labview y open source que permita realizar todas las pruebas de optimización y control del sistema para efectuar la operación de una manera didáctica y en tiempo real.

## **CAPÍTULO 2**

### **2. ESTADO DEL ARTE**

#### **2.1. Sistemas de tratamiento de aguas**

El agua constituye, un recurso básico para la vida y el bienestar de la sociedad. A pesar de tratarse de una sustancia materialmente abundante en la superficie de la tierra, las diferencias en su calidad, su desigual distribución geográfica y una demanda creciente, compuesta por una diversidad de usos han hecho que exista escasez mundial del recurso destinado especialmente para el consumo humano.

En la actualidad, a pesar de la tecnología existente para el tratamiento de agua potable, han permitido tener acceso a reservas del recurso antes no utilizadas; aún sin embargo siguen produciéndose diferencias entre la disponibilidad física limitada del recurso y las cantidades demandadas por los sistemas de producción y el consumo en continuo crecimiento.

El número y complejidad de las unidades de proceso y las operaciones unitarias que se incluyen en los sistemas de tratamiento de agua, son funciones de los requerimientos legales y operacionales del agua tratada, de la naturaleza y el grado de contaminación del agua cruda que ingresa a la planta, así como también de la cantidad de agua a ser procesada. Esto significa, que la complejidad del tratamiento de agua varía desde el punto de vista operacional y de diseño.

##### **2.1.1. Contaminantes presentes en agua**

Antes de implementar cualquier control en planta o alternativa de tratamiento, se debe primero analizar el proceso para reducir la presencia de contaminantes y evitar la producción de compuestos inorgánicos u orgánicos que puedan estar presentes en el agua de consumo o reúso y luego examinar la viabilidad de reciclar productos generados durante la producción. Los principales contaminantes que comúnmente que se encuentran son:

- Sustancias insolubles, que pueden ser separados físicamente con o sin floculación.
- Sustancias orgánicas, separables por adsorción.
- Sustancias separables por precipitación.
- Sustancias que pueden ser separadas por desgasificación o desorción.
- Sustancias que pueden ser concentradas por intercambio iónico u osmosis inversa.
- Sustancias tratables por métodos biológicos.

### **2.1.2. Sistemas de tratamiento.**

Los sistemas de tratamientos de aguas y residuos industriales líquidos (RIL) se pueden organizar en cuatro formas generales de tratamientos: físicos, químicos, con energías intensivas y en menor medida los biológicos y de lodos.[1] Además, de la desinfección de aguas, que puede llevarse a cabo por operaciones clasificadas en otro tratamiento y con un objetivo distinto. Las operaciones que se llevan a cabo para el tratamiento de aguas, se describen a continuación:

#### **2.1.2.1. Tratamientos físicos**

Los tratamientos físicos se pueden describir como técnicas de separación sólido-líquido, donde la filtración juega un rol determinante. Esta a su vez puede ser separada en dos categorías: convencional y no convencional, siendo una componente integral en el tratamiento de agua. Sin embargo, existe una variedad de equipos y sistemas desarrollados que se aplican dependiendo del objetivo final del tratamiento, entre los principales están:

- Evaporación.
- Osmosis Inversa.
- Destilación.
- Filtración.

- Intercambio Iónico.
- Electrólisis.
- Sedimentación - Clarificación.
- Flotación.
- Aireación.
- Adsorción.

#### **2.1.2.2. Tratamientos químicos.**

Consisten en una interacción química, entre los contaminantes que se desea remover del agua y la aplicación de reactivos que ayuden en la separación, destrucción o neutralización de los efectos nocivos asociados con ellos. Los tratamientos químicos son utilizados por si solos como una tecnología integral del proceso o cuando se utilizan en conjunto con tratamientos físicos; entre los principales elementos y unidades químicas están:

- Cloro.
- Yodo.
- Plata.
- Permanganato de potasio.
- Coagulación.
- Floculación.
- Precipitación.
- Neutralización.
- Remoción de Iones por Oxido Reducción.

#### **2.1.2.3. Tratamiento con energías intensivas.**

En los sistemas con energías intensivas, los métodos térmicos tienen un doble rol en el tratamiento de agua. Pueden ser aplicados con el objetivo de esterilización en el proceso de los desechos sólidos o lodos, generados del proceso mismo de

tratamiento de agua, o ser aplicados de la misma manera para la reducción de volumen, entre los principalmente usados están:

- Ozono.
- Radiación Ultravioleta.

#### **2.1.2.4. Tratamientos biológicos y de lodos**

El tratamiento biológico de aguas residuales comprende una serie de operaciones bioquímicas cuyo objetivo es la transformación de contaminantes, utilizando fundamentalmente microorganismos aerobio o anaerobios que presentan una gran diversidad metabólica y esta propiedad puede ser utilizada para generar procesos de tratamiento que compiten con los físicos y químicos, entre ellos se mencionan:

- Digestión aeróbica.
- Digestión anaeróbica.
- Estabilización.
- Acondicionamiento.
- Deshidratación.
- Reducción de Volumen.

Los cuatro tipos de tratamientos pueden ser combinados, dependiendo de las características del agua y los objetivos del tratamiento. Cada proceso, posee estructuras y tecnologías individuales que uno puede elegir. La selección de la adecuada unidad de proceso y la estructura de cada tipo de tratamiento, además de la combinación óptima de ellas, depende de factores tales como:

- La calidad del efluente que la planta generará.
- La calidad y naturaleza del afluente que se necesita tratar.

- Las propiedades físicas y químicas de los contaminantes que se necesitan remover o neutralizar en el afluente.
- Las propiedades físicas, químicas y termodinámicas de los desechos sólidos generados del tratamiento de agua, y
- El costo del tratamiento del agua, incluyendo el procesamiento y disposición final de los sólidos residuales.

Todos los sistemas están compuestos de un número de unidades de proceso, que corresponden a las distintas etapas del proceso de producción.

### **2.1.3. TECNOLOGÍAS USADAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS**

Las tecnologías que a continuación se describen, no necesariamente se encasillan en el tratamiento de agua para consumo humano, ya que son operaciones unitarias que pueden ser utilizadas indistintamente como entes principales o complementarios en los sistemas o en la remoción de metales pesados. En las que, los criterios de diseño y operación serán diferentes y dependerán de los contaminantes a ser removidos.

Las características de las tecnologías, su principio de funcionamiento que principalmente son aplicadas en los tratamientos de aguas son:

#### **2.1.3.1. Osmosis Inversa**

Según Féris y Rubio [2], la Osmosis Inversa conduce el agua, bajo presión, a través de una membrana que es impermeable a muchos contaminantes. La membrana actúa mejor rechazando sales que bases y ácidos débiles no ionizados, y pequeñas moléculas orgánicas. La aplicación de la Osmosis Inversa para desalinizar agua de mar, requiere una considerable presión (1000 psi) para operar. Al utilizar esta tecnología el producto, como el agua destilada, estaría cercana al agua pura. Por tanto, a veces es necesario el agregar o compensar el contenido de minerales, dependiendo del uso que se le dará al producto.



### **2.1.3.2. Coagulación - Flocculación**

El objetivo de las operaciones de coagulación-floculación es la sedimentación de las partículas. Agregar reactivos para la coagulación, tales como aluminio, incrementa la velocidad a la cual las partículas suspendidas sedimentan por unión de muchas partículas más pequeñas en un gran flóculo, el cuál sedimenta más rápido. En [2] se recomienda que estas dosis deben ser rápidamente mezcladas con el agua, luego debe ser agitada por 5 minutos para estimular a las partículas a formar los flóculos. Después de esto, serán al menos 30 minutos los necesarios para que los flóculos lleguen al fondo, y el agua clara pueda ser transportada a otro proceso de tratamiento.

La mayoría de los agentes floculantes son removidos mediante los flóculos, no obstante, se deben tomar precauciones debido a la toxicidad del aluminio. En las plantas de tratamiento, la dosificación de aluminio puede ser variada hasta que la concentración ideal sea encontrada. La misma depende del pH del agua y el tamaño de las partículas. El incremento de la turbiedad hace que los flóculos sean formados con facilidad, pero se ve afectada su duración debido a las colisiones entre partículas.

Si bien la floculación no elimina los patógenos, si reducirá sus niveles con la remoción de partículas que pueden protegerlos de los reactivos químicos, y la materia orgánica que pueda reaccionar con el cloro agregado en una etapa posterior para la purificación, se estima en [2] que del 60% al 98% de coliformes son eliminados, así como del 65% al 99% de virus, y del 60% al 90% de giardia serán removidos del agua, en conjunto con la materia orgánica y los metales pesados.

### **2.1.3.3. Microfiltros.**

Los microfiltros son filtros a pequeña escala, diseñados para remover sólidos suspendidos, protozoos, y en algunos casos, bacterias del agua. En su mayoría usan elementos de fibra o cerámica que pueden ser limpiados una vez saturados, dejando la unidad operativa nuevamente después de un proceso de mantenimiento. Muchas unidades usan un sistema de bombeo, también, usan la gravedad, colocando el agua

a ser filtrada por sobre este o colocando el filtro en el agua, y por medio de un sifón a un estanque colector colocado debajo de este.

En el artículo de Féris y Rubio [2], se analiza que cuando los micro filtros se utilizan para la potabilización del agua comparten un problema con los filtros de carbón, que es el crecimiento de bacterias sobre el medio filtrante. Sin embargo, los microfiltros son el único método, aparte de la ebullición, que remueve la *Cryptosporidium*, pero no remueven virus. Para evitar el crecimiento de bacterias, se utilizan impregnaciones del elemento filtrante con plata. Muchos microfiltros utilizan pre filtros de sedimentos, carbón activo, o tintura de yodo.

#### **2.1.3.4. Filtro de Carbón Activado.**

En [2] los autores afirman que cuando el agua es tratada en un filtro de carbón activo, este funciona con el principio de la adsorción química y que algunos metales pesados son atraídos a la superficie del carbón, y son retenidos en él. Estos filtran algunos patógenos, aunque ellos usarán la capacidad de adsorción del filtro, y pueden incluso contribuir a la contaminación, ya que el carbón es un excelente actor para el crecimiento de bacterias y algas. Algunos filtros de carbón están impregnados con plata para prevenir esto, aunque en algunas investigaciones dicen los autores, se concluye que las bacterias que crecen sobre el filtro son inofensivas, incluso si el agua no fuese desinfectada antes del contacto con el filtro.

El carbón activo puede ser usado en conjunto con el tratamiento químico del yodo y cloro que eliminarán los patógenos, mientras el filtro de carbón removerá los químicos. El lecho de carbón debe ser de una profundidad suficiente para el adecuado contacto con el agua. El tamaño efectivo del carbón activo a utilizar debe ser de 0.6 a 0.9 mm para la máxima velocidad de flujo, puede ser utilizado como bloque o como carbón activo en polvo (tamaño efectivo 0.01 mm) para incrementar el área de contacto. Este último puede ser mezclado con el agua y luego filtrado. Usualmente es necesaria en los filtros de carbón una fuerte presión de agua para trabajar a un flujo razonable. [2]

### **2.1.3.5. Cloro.**

Féris y Rubio [2], afirman que: el cloro es el reactivo más familiar utilizado en el tratamiento de agua. Cuando el cloro reacciona con un material orgánico, ataca a los compuestos que poseen nitrógeno como son los iones amonio y aminoácidos, reduciéndolo luego de esta reacción y dejando menos cloro libre para la desinfección.

A menos que el cloro libre sea medido, la desinfección no puede estar garantizada, el cloro debe estar en la concentración adecuada para que exista cloro residual y evitar contaminaciones durante la distribución y cuando el agua llegue a los hogares la población se encuentre protegida de presencia de bacterias.

Los autores de [2], sostienen que el cloro es sensible al pH y la temperatura del agua tratada. La temperatura retarda la reacción de cualquier tratamiento químico, pero el tratamiento con cloro es particularmente susceptible a las variaciones de pH. A pH bajo, se forma ácido hipocloroso, mientras que, a pH alto, tiende a disociarse en hidrogeno e iones clorito, los cuales son menos efectivos como desinfectantes. Como resultado, la efectividad de cloro cae cuando el pH es mayor que 8. Generalmente, el cloro comercial contiene 5% de hipoclorito de sodio ( $\text{NaOCl}$ ) y puede ser usado para purificar agua si no contiene otros ingredientes activos, perfumes, o colorantes.

### **2.1.3.6. Neutralización.**

La neutralización es uno de los tratamientos más comunes utilizados en la minería, para el procesamiento de las aguas ácidas generadas durante las operaciones de producción. Esta consiste en la reacción de un ácido con una base, dando como producto una sal neutra con un pH aproximado a 7. En este contexto, el ácido generalmente es el RIL generado en las industrias mineras y como base se utiliza cal, carbonato e hidróxido de sodio, como donador de iones  $\text{OH}$ . Siendo la cal, la sustancia disponible más barata para neutralizar ácidos. El carbonato de sodio es el neutralizante más caro, pero frecuentemente más conveniente que la cal debido a la formación de menos lodos. Esta base se agrega al RIL en un estanque, donde se

homogeniza con el efluente y luego es enviado a piscinas impermeabilizadas, en las cuales las sales generadas sedimentan y el líquido queda como sobrenadante.

#### **2.1.3.7. Flotación por Aire Disuelto.**

La flotación por aire disuelto, según Féris y Rubio [2], es una tecnología usada por más de 50 años para la clarificación de residuos líquidos provenientes de distintos procesos industriales o domésticos. Consiste en la separación de los contaminantes contenidos en las aguas de procesos, mediante la adhesión de éstos a finas burbujas de aire, lo que disminuye la densidad de las partículas o líquidos y permiten que de este modo floten debido a la fuerza boyante existente. Estos son recuperados en canaletas y luego procesados para la obtención de un lodo. Su aplicación alcanza un amplio rango de contaminantes tales como sólidos coloidales, grasas, aceites, iones, macromoléculas, microorganismos, tintas y fibras.

En el caso del tratamiento de aguas residuales o de aguas de efluentes naturales, la adhesión entre el contaminante y la burbuja de aire por lo general no es suficientemente resistente a las altas condiciones de agitación, por lo que dificulta el proceso de flotación convencional por aire disperso. Por lo tanto, el agua saturada con aire introducido a alta presión (entre 40-50 psi), es bombeada a una celda de flotación, a una presión de 1 atm., para el contacto con los sólidos en suspensión. Debido a que el agua se encuentra previamente saturada con aire, las burbujas generadas por la corriente entrante son más pequeñas que en el caso de la flotación por aire disperso (entre 30 - 60  $\mu\text{m}$ ) por lo que la adhesión de las partículas sólidas se realiza de mejor manera.

Las características que posee esta tecnología en el tratamiento de aguas compiten con aquellas tecnologías que utilizan la sedimentación de partículas o compuestos sólidos para la clarificación, ya que tienen algunas ventajas considerables, como, por ejemplo:

Menores tiempos y mayor eficiencia (> 95%) en la remoción de las partículas pequeñas o más ligeras.

Mayor flexibilidad operacional cuando el flujo de alimentación es variable y hay tendencia de algunas partículas a flotar de manera natural.

Menor espacio físico requerido para la instalación de las celdas y equipos de apoyo.

Este tipo de tecnología a pesar de ser eficiente en la separación de contaminantes este tratamiento posee algunas desventajas en su aplicación como:

- Altos costos de inversión, operación y mantenimiento de compresores y tuberías, y por reactivos químicos utilizados en el proceso.
- Generación de lodos los cuales necesitan tratamiento o disposición final adecuada, debido a que pueden contener niveles concentrados de contaminantes provenientes del residuo líquido, necesitándose de un adecuado plan de disposición final.

## **2.2. Sistemas de microburbujeo**

La flotación, es un proceso en el que se utiliza una fase flotante para eliminar las partículas dispersadas en una solución. Las burbujas de aire son la fase flotante más comúnmente utilizada pero también las emulsiones de aceite y más recientemente las esferas de plástico [3], se han utilizado como portadores flotantes para la fase dispersa. La flotación de la fase suspendida puede ser total, como en aplicaciones de separación sólida / líquida, o parcial, como en el proceso de flotación por espuma, en el que ciertos minerales son separados selectivamente de otros por burbujas de aire.

El objetivo de la flotación es unir una burbuja diminuta, generalmente de aire a los sólidos en suspensión y hacer que los sólidos se separen del agua en una dirección ascendente. Esto es debido al hecho de que las partículas sólidas tienen un peso específico menor que el agua, cuando se une la burbuja. Los sólidos que pueden ser eliminados por flotación, pueden ser tan variados como el metal, precipitados de

hidróxido, desechos de diversos tipos, materiales biológicos, minerales y combustibles fósiles.

La aglomeración de estos sólidos flotantes, conforman lodos, los mismos que pueden ser eliminados fácil y rápidamente de la superficie del líquido mediante la utilización de barrederas mecánicas. Estos lodos son normalmente estables y libres de olores [4].

### **2.2.1. Antecedentes.**

Tapia y Cázares en [5], dicen que: Uno de los más interesantes avances en la potabilización de aguas superficiales, ha sido el desarrollo de la flotación con aire disuelto (FAD) (Dissolved Air Flotation DAF), que hasta hace poco ha comenzado a ganar popularidad en Estados Unidos. El proceso inicialmente fue desarrollado en la industria minera para la separación de sólidos y en 1924 se patentó el método de FAD para usarse en la remoción de celulosa de los desechos de la industria del papel en Escandinavia. Desde ese tiempo el proceso se ha venido refinando en usos diferentes tales como la remoción de grasas, aceites, fibras, hasta que, al inicio de los sesenta, se usó por vez primera, en la misma Escandinavia, en la clarificación de agua para potabilización.

El proceso es ampliamente aceptado en Europa, en 1973 había 71 plantas en Finlandia, Noruega y Suiza (Hyde 1977), en 1985 había 20 en Inglaterra (Zabel 1985). También es ampliamente aceptado en Asia, Australia y recientemente en Estados Unidos de América donde se espera que tome mayor importancia debido a las nuevas imposiciones de ley para el tratamiento de aguas superficiales que requiere la filtración y eliminación de *Cryptosporidium* y *Giardia*. En este país actualmente hay ocho plantas operando y hay otras bajo estudio y diseño [5].

Una de las principales ventajas, que se mencionan en [5] para este proceso, es que funciona con tiempos de retención para la floculación previa, menores a los requeridos

por el proceso tradicional de sedimentación. Esto debido a que el proceso de FAD es eficiente con flóculos pequeños, aunque otra teoría cinética para FAD también sostiene que se requieren flóculos grandes para una mejor separación.

### **2.2.2. Eficiencia**

Como en muchos otros casos, las aplicaciones industriales de flotación se desarrollan mucho más rápido que la comprensión científica de los fenómenos involucrados. Sin embargo, pronto se reconoció que el tamaño de las burbujas tenía una influencia en la eficiencia del proceso de flotación [3]. Se hizo evidente que el tamaño de la burbuja dependía del método utilizado para la generación de burbujas y, por tanto, se desarrollaron ciertas máquinas de flotación para aplicaciones específicas.

Es ampliamente aceptado, que un diámetro de burbuja ( $d_b$ ) de alrededor de 1 mm es óptimo para la flotación convencional, el uso principal de las microburbujas ha sido en aplicaciones de flotación para la separación sólido/líquido, es decir suspensiones de sólidos disueltos en líquidos. En esta área, los procesos industriales más importantes de flotación de microburbujas son la electroflotación y la flotación por aire disuelto (también conocida como "flotación por presión" o "flotación por liberación de presión"). Las microburbujas se definen como burbujas que tienen un  $d_b$  medio, por debajo de 100  $\mu\text{m}$ . Las distribuciones del tamaño de la burbuja se indican como la media  $d_h \pm$  la desviación estándar.

### **2.2.3. Generación y propiedades de las microburbujas.**

En [3], los autores describen que las microburbujas, pueden generarse por varios mecanismos, entre los más conocidos están: electroquímicamente, cavitación líquida inducida por reducción de presión o altas velocidades de cizallamiento, y por inyección de gas a través de dispositivos porosos. La distribución típica del tamaño de las burbujas generadas por varios sistemas se presenta en la Figura # 2.1.

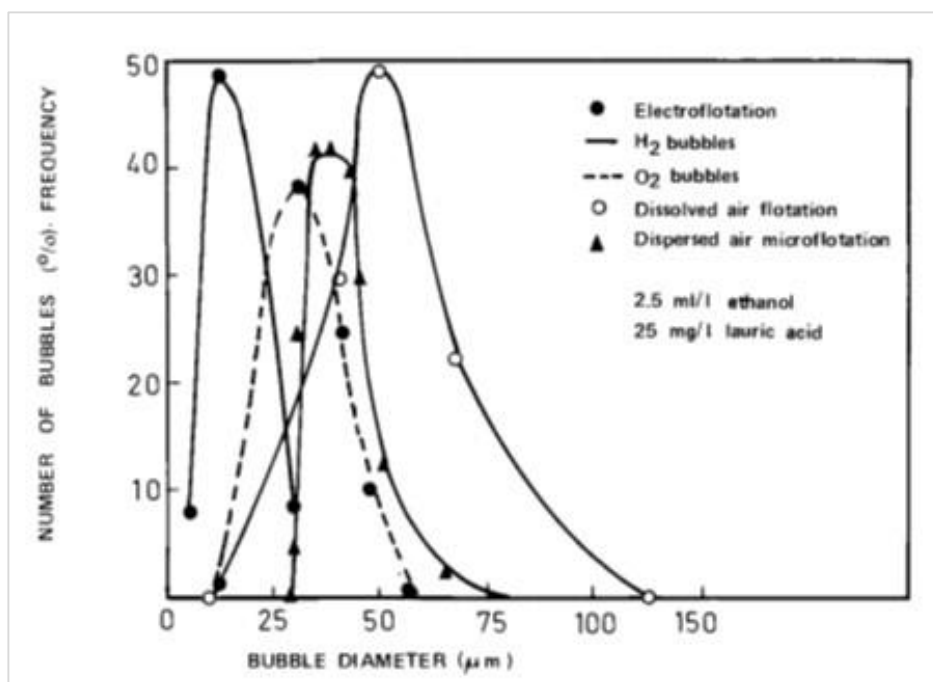


Figura # 2.3. Distribución del tamaño de las burbujas generadas por varios sistemas. Fuente: [4]

Laskowski y Ralston en [3], analizaron los métodos de producción de microburbujas mediante el paso de gas a presión a través de discos de vidrio sinterizado de porosidad adecuada, que se ha sido utilizado principalmente para estudios de flotación a escala de laboratorio, ellos informan que un disco sinterizado de tamaño de poro 5-15  $\mu\text{m}$ , produjo una distribución de tamaño de burbuja de  $74,7 \pm 21 \mu\text{m}$ . Este método de generación de burbujas requiere la adición de agentes tensoactivos con el fin de obtener microburbujas y se ha utilizado para flotar precipitados de metales y para estudiar el mecanismo de flotación de partículas finas por pequeñas burbujas.

En el proceso de flotación por aire disuelto (DAF), las microburbujas se generan por cavitación usando una solución acuosa, que ha sido saturada con aire a alta presión (300-500 kPa). Esta solución se empuja a través de una constricción (usualmente una placa de orificio, una boquilla o una válvula de aguja) donde se produce la reducción



de presión, la solución se sobre satura y el aire precipita fuera de la solución como microburbujas con db en el rango de 50-80  $\mu\text{m}$ .

Los estudios detallados sobre la formación de microburbujas en sistemas DAF se llevaron a cabo en el Imperial College de Londres a finales de los años 70 [3]. A partir de este y otros trabajos, se sabe que el tamaño de las burbujas generadas en estos sistemas, es una función de la presión de saturación de aire, la reducción de presión en la constricción, el diseño de la boquilla y la presión de inyección de agua de entrada. Además, el rendimiento del dispositivo saturador influye en la distribución del tamaño de las burbujas a través de su efecto sobre la eficiencia de la saturación del aire en el agua.

Otra forma de generar microburbujas a través de la cavitación líquida ha sido analizada, en este método, una corriente de líquido de movimiento rápido (10 l/min) es forzada a través de un Venturi al que se inyecta aire en el punto de presión más baja. Mediante la recirculación repetida y la mezcla con una solución que contiene aproximadamente 0,01 M de un tensoactivo, se ha obtenido una "microespuma" que consiste en microburbujas de media db = 25  $\mu\text{m}$ .

La investigación sobre la aplicación de la generación de microburbujas a una máquina de flotación se continuó en la última década por los investigadores de la Universidad Estatal de Virginia y se ha resumido recientemente en [3]. Estos investigadores han diseñado varios generadores de microburbujas basados en el principio de cavitación pero que permiten el uso directo de suspensiones minerales en el dispositivo de cavitación. Esto tiene la ventaja de que no se necesita añadir agua adicional al reactor de flotación para generar burbujas y, por lo tanto, se reduce el consumo de agua y se maximiza la capacidad del reactor.

De esta forma, las microburbujas, también pueden generarse mediante un disco giratorio que arrastra aire en una solución de tensoactivo cuando la velocidad de agitación está por encima de un valor crítico de más de 4000 r.p.m. En pruebas

realizadas, se ha utilizado un disco que gira a alta velocidad en una pequeña cámara para obtener microburbujas de distribución de tamaño  $55 \pm 25 \mu\text{m}$  a 8000 r.p.m. y  $75 \pm 35 \mu\text{m}$  a 5000 r.p.m.

Otro método de generación de microburbujas, es la electrólisis de soluciones acuosas conductivas diluidas, con la producción de burbujas de gas en ambos electrodos. Según los autores de [3], los principales parámetros que controlan el tamaño y el número de microburbujas electrogeneradas son la densidad de corriente, el pH y material de electrodo. Los valores de obtenidos para db, están en el rango 20-70  $\mu\text{m}$ , pero las distribuciones de tamaño de burbuja generadas por los sistemas de electroflotación son generalmente mucho más estrechas que en las máquinas DAF (ver Figura # 2.1).

#### **2.2.4. Métodos de obtención de microburbujas**

De acuerdo con el autor en [6], describe los métodos de formación de microburbujas, divididos en dos casos: uno es con gas introducido en un flujo de líquido y otro soplando el gas en líquido quiescente.

##### **2.2.4.1. Sin flujo de líquido**

Dentro de esta clasificación se tienen diferentes tipos los cuales se detallana a continuación:

- **Tipo capilar**

En estos sistemas, se usa vidrio poroso sinterizado de suelo arcilloso y se puede generar nanoburbujas cuyo diámetro es de 720 nm, que se forman a partir de la membrana sinterizada de tamaño medio de poro de 84 nm [6]. Para evitar la coalescencia de las burbujas, a menudo se añade agente tensoactivo.

- **Tipo de rotación**

El rotor hecho de material sinterizado se hace girar a alta velocidad en el estator circundante, y el gas se absorbe automáticamente. Se forman microburbujas de 50  $\mu\text{m}$ . El mérito del generador es que no necesita de una bomba de líquido. Los generadores de tipo giratorio son producidos por Fuki Works Co., Nomura Electronics Co. y Royal Electric Co. y han sido utilizados para la purificación de lagos y pantanos [6].

- **Tipo de ultrasonido**

Las burbujas son formadas a partir de una aguja que genera ultrasonido y produce microburbujas del tamaño de aproximadamente 10  $\mu\text{m}$  en líquido de alta viscosidad, como el aceite de silicio [6]. Este método es aplicable para la producción de microburbujas homogéneas y se propone para la aplicación de materiales médicos.

- **Tipo de condensación de vapor**

Cuando vapores mezclados de nitrógeno se están soplando desde la boquilla hacia el agua, se obtienen los condensados de vapor y las microburbujas de nitrógeno no condensables. El diámetro de las mismas es 20-40  $\mu\text{m}$  [6]. El tamaño del MB se ve afectado por la composición del gas, el diámetro de la boquilla y el caudal de vapor.

- **Tipo de electrólisis**

El autor de [6], analizó la electrólisis del agua y encontró el efecto de la vibración de las placas vibratorias de la baja frecuencia y del electrolito, el tamaño medio de microburbujas es 35-55  $\mu\text{m}$ .

#### 2.2.4.2. Con flujo de líquido

- Método de flujo de líquido de rotación

En la Figura # 2.2, se muestra un generador de microburbujas de tipo (M2-LM), que es de tipo cilíndrico (diámetro 50 mm, altura 100 mm), este se alimenta con agua presurizada del tubo de agua de fondo mediante una bomba y se produce un flujo de líquido rotacional en el cilindro [6]. Según el teorema de Bernoulli, la parte central del cilindro se convierte en baja presión producida por el flujo rotatorio del líquido, y el aire es aspirado automáticamente. Se forma flujo de aire en forma de remolino, y se producen las microburbujas cerca de la salida del cilindro.

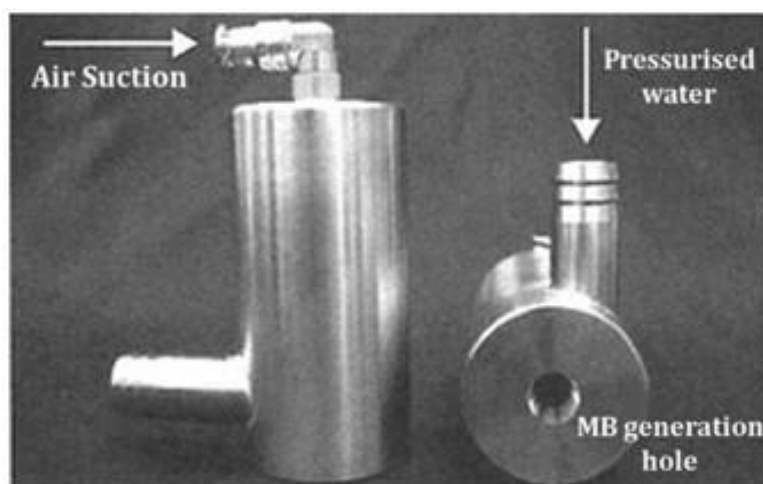


Figura # 4.2. Generador de microburbujas tipo (M2-LM)

Fuente: [7]

El autor Hideki Tsuge en [6], dice que el caudal del líquido necesario para este generador es de aproximadamente 12 l/min, y la velocidad de rotación del flujo de dos fases en el cilindro es de 300-600 vueltas/s. La relación entre el caudal de gas y el caudal de líquido es de 1/7 - 1/15. El generador tipo M2-LM fue utilizado para la acuicultura de ostras en Hiroshima, y la buena promoción del crecimiento fue reportada por noticias de televisión. La distribución del tamaño de microburbujas por

el generador del tipo M2-LM es de 10-50  $\mu\text{m}$ . La concentración de microburbujas por M2-LM es más baja que la del método de flotación con aire disuelto.

- **Tipo de mezclador estático**

En la Figura # 2.3, se muestra el mezclador estático (OHR Fluid Engineering Institute Corp.), el mismo que induce un flujo helicoidal de dos fases por las proyecciones de la paleta guía y del hongo (cortador de corriente) y destruye el agua y las microburbujas generadas están entre 5-50  $\mu\text{m}$ , cuya producción es máxima a 1500 L/min [6].

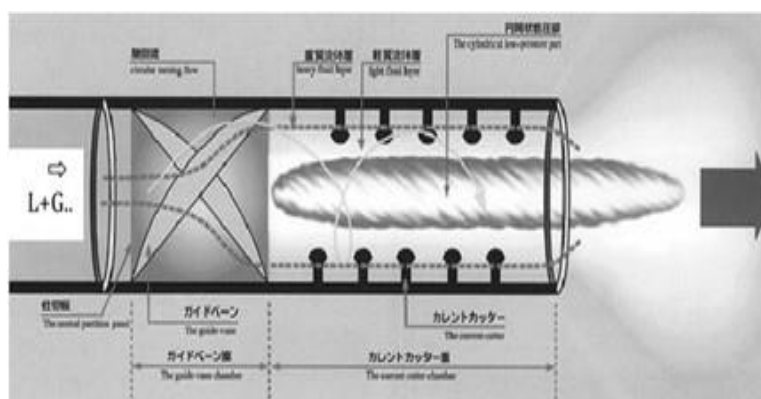


Figura # 2.5. Diagrama esquemático de un mezclador estático de OHR

Fuente: [7]

- **Tipo de expulsor**

La boquilla del tipo expulsor inyecta líquido a alta velocidad como aspirador, y el gas es absorbido por la contrapresión en la salida, finalmente produce microburbujas por el mecanismo turbulento de mezcla y de cizallamiento. El tamaño medio de las microburbujas producidas es de 424  $\mu\text{m}$  [6].

- **Tipo de Venturi**

Cuando el gas y el líquido fluyen simultáneamente en la parte exprimidora del tubo Venturi, el cambio repentino del caudal del líquido produce una onda de choque y las grandes burbujas se destruyen, produciendo microburbujas. Para evitar la coalescencia de las burbujas, se añaden 50 ppm de 3-pentanol, en cuyo caso se producen principalmente 100  $\mu\text{m}$  de microburbujas [6].

- **Sistema de flotación de aire disuelto (DAF)**

En el proceso DAF, según los autores de [7], se generan burbujas de gas muy finas, al reducir la presión sobre una corriente de aguas que ha estado expuesta al aire a presión atmosférica, cuando esta se reduce, a medida que el líquido fluye a través de una válvula reductora de presión en la cubeta de flotación, se forman pequeñas burbujas en solución, en las que se adhieren y atrapan los aceites y las partículas sólidas que se elevan hacia la superficie desde donde se retiran en procesos posteriores. Aunque el aire es el gas más común usado en este proceso, también son usados metano, nitrógeno y dióxido de carbono.

En [7], explican que existen dos métodos para generar burbujas de aire en el proceso DAF:

La primera consiste en que el aire se disuelve en el agua residual líquida bajo presión (30-85 psi). La corriente presurizada pasa a través de una válvula de alivio de presión para ser descargada cerca del fondo de un tanque de flotación donde la presión total es igual a la presión del aire atmosférica más la hidrostática, aquí pequeñas burbujas suben a la superficie llevando los contaminantes con ellos.

En la segunda, las aguas residuales se airean hasta que se satura con aire a presión atmosférica, subsecuente la aplicación de vacío, aproximadamente 9 en Hg, produce burbujas por desorción al vacío, sin embargo, este proceso ya no se utiliza.

El generador de microburbujas de flotación de aire disuelto se muestra en la Figura # 2.4. En este sistema se inyecta líquido en alrededor de 3-4 atm de presión, el aire presurizado se disuelve en agua y se enjuaga a través de la boquilla; El aire sobresaturado produce microburbujas en el agua. En [6], el autor dice que la concentración de microburbujas es alta, y el líquido se vuelve visualmente similar a la leche.

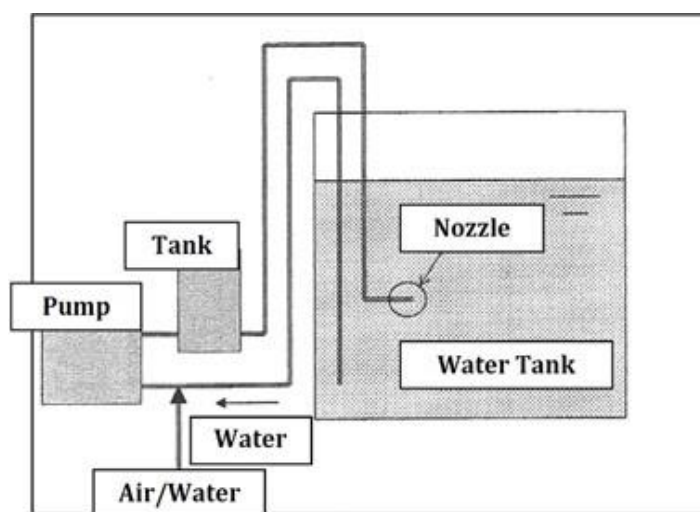


Figura # 6.4. Diagrama esquemático de un generador de microburbujas por aire disuelto

Fuente: [7]

En un proceso DAF los valores típicos del tamaño de burbuja generado oscilan entre 10 y 100  $\mu\text{m}$ . Este proceso es bastante costoso, pues se requiere el compresor que genere en el aire una presión de 304,07 kPa a 405,43 kPa por encima de la presión de la corriente de agua. Además, se necesita la cámara presurizada con recirculación y un sistema para controlar la presión al liberar la corriente de agua saturada [5].

- **Sistema de flotación por aire inducido (IAF)**

La flotación de gas inducido (aire) (IAF) usada durante muchos años en la industria minera para el tratamiento de aguas residuales industriales, consiste en operaciones industriales que utilizaban mezclas mecánicas con impulsores para este proceso de

separación, primero se generan burbujas y se descargan en el líquido por impulsores de rotación de alta velocidad por difusores, o por homogeneización de una corriente de gas/líquido. El autor en [6], declara que, en general, la DAF puede caracterizarse por el alto tiempo de retención, utilizando cantidades relativamente pequeñas de gas, primero disuelto luego desorbido, en contraste con el IAF que es un proceso de baja retención de tiempo, utilizando un volumen relativamente grande de gas.

La diferencia fundamental que se analiza en [7], entre los dos procesos de flotación del aire es el mecanismo de generación, en el que las burbujas de aire se introducen en el líquido, cuyo proceso se describe a continuación:

- 1) En el sistema DAF, el aire se disuelve primero en alta presión y después se deja que se concentre como relativamente pequeñas burbujas a presión atmosférica. En el sistema IAF estándar, los impulsores rotativos de alta velocidad inducen cantidades mayores de aire a la suspensión, produciendo burbujas por un orden de magnitud mayor, aproximadamente 1000  $\mu\text{m}$  de diámetro, que las burbujas de DAF.
- 2) La cinética del IAF es muy rápida, dando como resultado un tiempo de retención relativamente corto, menor a 5 minutos con una reducción concomitante en el tamaño del equipo.
- 3) En DAF, se agregan sustancias químicas para flocular los aceites y los sólidos suspendidos, de manera que las burbujas se pueden unir y / o convertirse en floc para flotar a la superficie. En la flotación de aire inducido, los productos químicos se agregan para causar que el aceite y sólidos suspendidos engullan a la burbuja de aire y floten a la superficie.
- 4) En los sistemas DAF, los productos químicos suelen añadirse y mezclarse con las aguas residuales en un recipiente que precede al equipo DAF. En los sistemas IAF, los productos químicos se introducen en las aguas (célula de flotación), con



las condiciones turbulentas en esta celda proporcionando la energía necesaria para la mezcla.

En [7], los autores describen dos zonas de mezcla, que se muestran en la Figura # 2.5, que son:

La zona de flotación, que está generalmente por encima de la región de mezcla a través de la cual los contaminantes con las burbujas de gas pueden subir como espuma sin disturbios físicos excesivos que podrían causar el contaminante para separarse de la burbuja de gas y volver a la corriente de líquido residual original. La zona desnatadora, en esta zona se trata de proporcionar un patrón de flujo superficial que sea suficiente para barrer la espuma cargada de contaminantes, producida como resultado del colapso de burbujas, continuamente desde el recipiente, con perturbación mecánica.

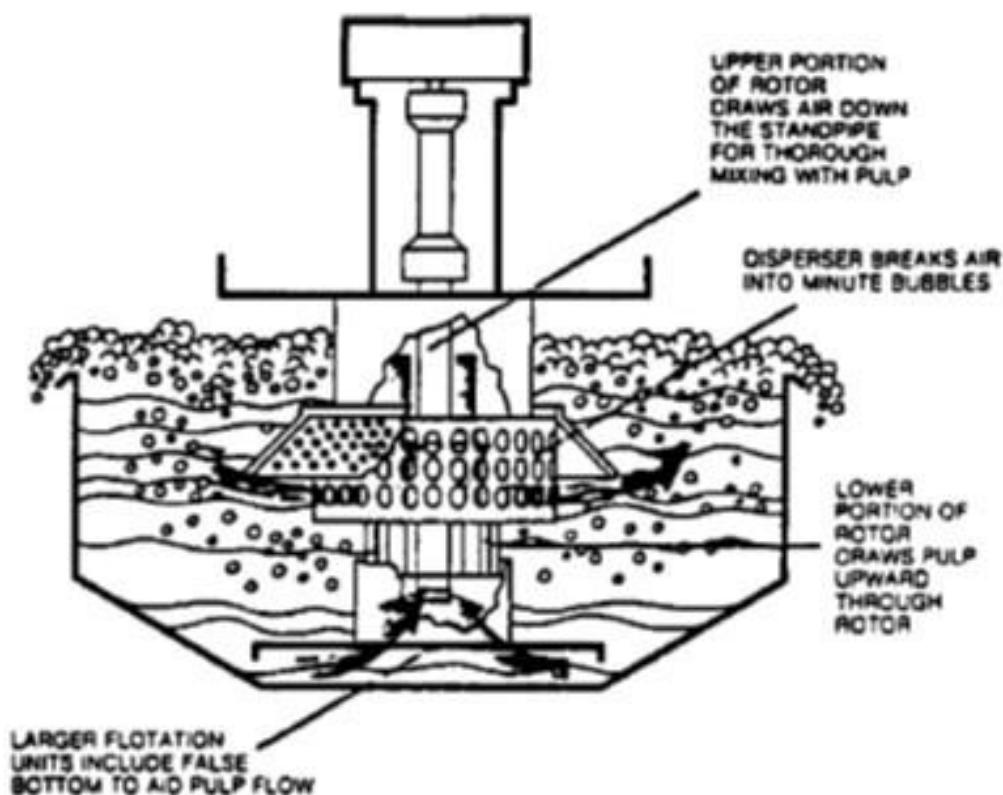


Figura # 7.5. Celda de flotación de aire inducido IAF WMCO. Fuente: [8]

Una innovación en el campo de IAF es el desarrollo de la unidad de inyección de aire con boquilla para la cual se concedieron patentes a Degner y Colbert analizados en [7]. Hay cuatro aspectos de este sistema de inyección:

- 1) El dispositivo de inyección usa un extractor, como una boquilla de aspiración de gas para dibujar aire en aguas residuales tratadas, desarrollando verdaderamente una mezcla bifásica de aire y posteriormente descargado en el recipiente de flotación.
- 2) El funcionamiento exitoso de los sistemas depende del régimen de flujo en la curva en el que la densidad de energía de los efluentes definida por la energía cinética del líquido descargado, que es igual a  $\frac{1}{2} mv^2/g$ , dividido por el volumen del tanque se representa frente a la densidad de la mezcla de efluentes aire más agua. En la región de baja presión, se obtiene una excelente absorción que, al operar en esta región, el líquido en el depósito se llena de burbujas de gas y la superficie del líquido contiene esta solución espumosa.
- 3) Se utiliza más de una celda, convencionalmente se emplean cuatro, cada una con un tiempo de residencia aproximado de 1 minuto; las aguas residuales fluyen de célula a célula pasando bajo un deflector que divide cada uno de los compartimientos.
- 4) Una contrapresión de 0.03-0.06 psi, mantiene una manta de gas entre el nivel de líquido y el gas hermético que elimina los olores y permitiría que cualquier gas residual fuera tratado en un tratamiento de contaminación del aire, reduciendo así las emisiones de hidrocarburos a la atmósfera.

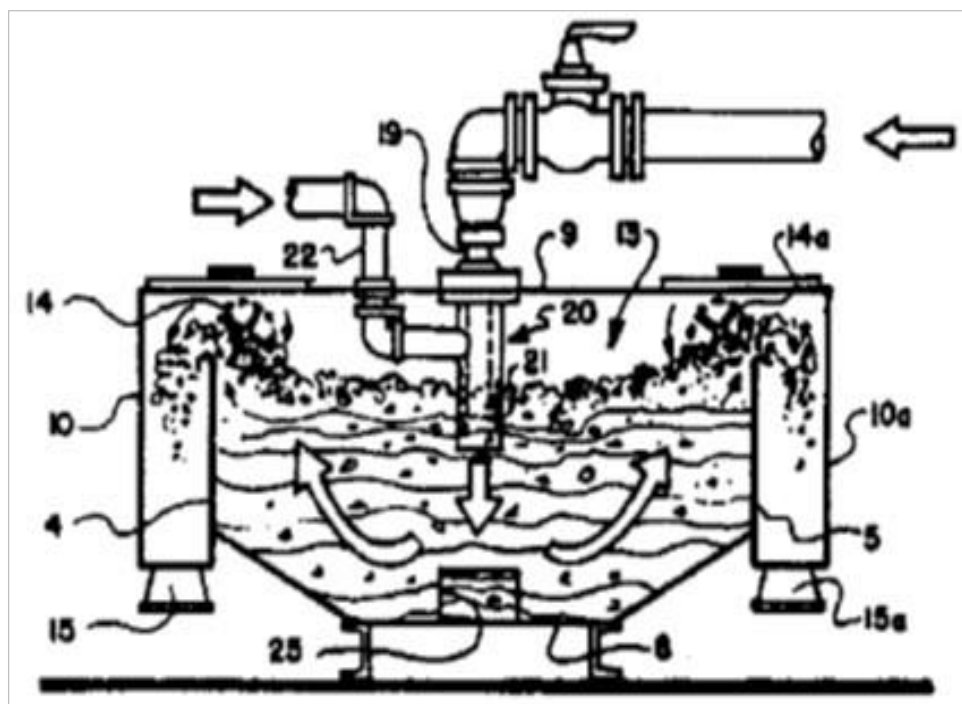


Figura # 2.8. Unidad de flotación de aire de boquilla de una sola etapa.

Fuente: [8]

### 2.3. Control PID y Predictivo

La rápida evolución de los componentes electrónicos ha dado como resultado que los sistemas controlados cambien en la misma relación. La importancia del control automático aplicado con criterios de ingeniería permite la integración y el desarrollo de procesos industriales modernos. Por lo que el desarrollo de nuevos esquemas de control es un campo abierto de estudio para implementar nuevos algoritmos de optimización de procesos y automatización de tareas que funcionen independientes la mayor parte del tiempo.

Un controlador permite mantener la variable a controlar dentro de límites admisibles de desviación entorno a la señal la referencia, minimizando interferencias externas que alteren los valores de la variable a controlar. En [9], los autores explican que existen múltiples formas de acción de control, cuyo tipo depende de la forma de

obtención de la ley de control. Entre estos los tipos básicos de acción de control que se usan comúnmente en procesos industriales son:

- Acción de control on-off.
- Acción de control proporcional.
- Acción de control derivativa.
- Acción de control integral.

En la práctica los controles integral y derivativo no se usan solos, sino en combinación con otras, y se obtienen las siguientes acciones de control posibles:

- Acción de control proporcional más derivativa.
- Acción de control proporcional más integral.
- Acción de control proporcional más integral más derivativa.

### 2.3.1. Control on-off

En un control de este tipo, la realimentación se puede realizar de muchas formas diferentes. Un mecanismo de realimentación simple se puede describir como:

$$u = \begin{cases} u_{m\acute{a}x}, & \text{si } e > 0 \\ u_{m\acute{i}n}, & \text{si } e < 0 \end{cases} \quad (2.1)$$

Donde  $e = y_{sp} - y$ , es el error de control. Esta ley de control implica que siempre se utiliza una acción correctora máxima. Este tipo de realimentación se llama *control on-off*. Es simple y no hay parámetros que elegir. A menudo funciona al mantener la variable del proceso próxima al punto de consigna, pero generalmente resultará en un sistema donde las variables oscilan, esto de acuerdo a la Ecuación 2.1, donde la variable de control no está definida cuando el error es cero. Es común realizar algunas modificaciones para este caso, bien introduciendo una histéresis o una zona muerta.

### 2.3.2. Control PID

En [10], la autora analiza que el controlador PID (Proporcional, Integral, Derivativo), es de lejos el algoritmo más común. Numerosos lazos de control utilizan este algoritmo, que puede ser implementado de diferentes maneras: como controlador stand-alone, como parte de un paquete de control digital directo o como parte de un sistema de control distribuido. Los autores de [9], indican que los sistemas de control industriales, pueden tener una red cuyo bloque principal es un módulo PID. El mismo tiene una larga historia de uso y ha sobrevivido a los cambios de tecnología de la era analógica, en el sistema de control digital de computador envejece satisfactoriamente.

Fue el primer y único controlador que se produjo en masa para el mercado de alto volumen que existía en las industrias de procesos. La introducción de la transformada de Laplace para estudiar el rendimiento de los sistemas de control de realimentación apoyó su éxito tecnológico. La base teórica para analizar el rendimiento del control PID se ve considerablemente favorecido por la simple representación de un integrador por la transformada de Laplace,  $\left[\frac{1}{s}\right]$ , y un diferenciador usando  $[s]$ .

### 2.3.3. Estructura del PID

La estructura de un controlador PID, se muestra en la Figura # 2.7, según [10] en la misma resalta su simplicidad, aunque es también es su debilidad, dado que limita el rango de plantas donde pueden controlar en forma satisfactoria (existe un grupo de plantas inestables que no pueden ser estabilizadas con ningún miembro de la familia PID). Un lazo de control de una entrada y una salida (SISO) de un grado de libertad.

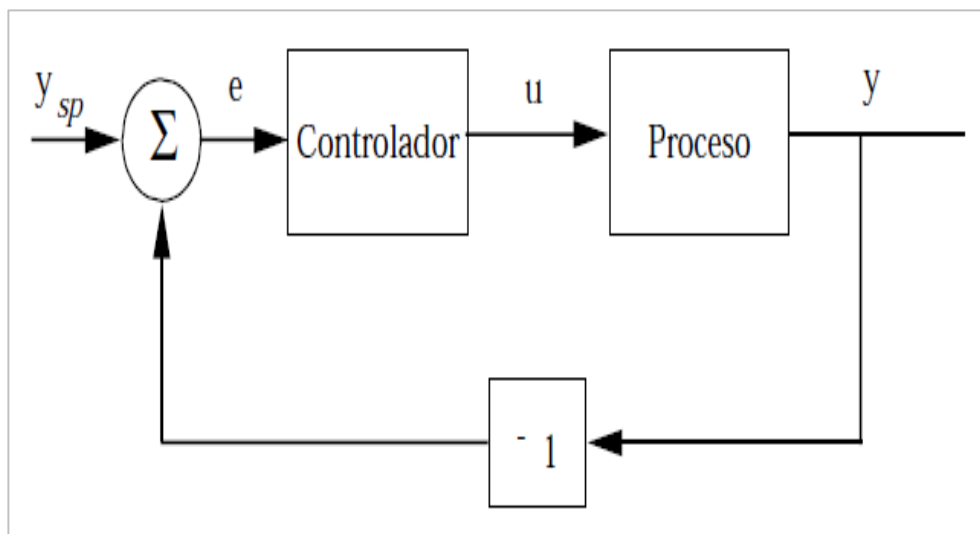


Figura # 2.9. Estructura general en diagrama de bloques de un controlador PID.

Según la autora [10], el sistema tiene un lazo de realimentación sencilla, con dos grandes componentes, el proceso y el controlador, representados como cajas con flechas que denotan la relación causal entre entradas y salidas. El proceso tiene una entrada, en la que se tiene la variable manipulada (MV), también llamada variable de control y se denota por  $u$ . La variable de control influye sobre el proceso por medio de un actuador, que suele ser una válvula o un motor. La salida del proceso se llama la variable de proceso (PV) y se representa por  $y$ . Esta variable se mide con un sensor.

En la Figura # 2.7, el actuador y el sensor se consideran parte del bloque que representa la planta o el proceso. El valor deseado de la variable de proceso se llama el punto de consigna (SP) o valor de referencia. Se denota por  $y_{sp}$ . El error de control  $e$  es la diferencia entre el punto de consigna y la variable de proceso.

$$e = y_{sp} - y \quad (2.2)$$

De la relación anterior, si la variable de proceso aumenta, cuando se incrementa la variable manipulada. El principio de realimentación hará que el actuador tienda a

aumentar la variable manipulada, cuando el error es positivo, y disminuirla cuando el error es negativo. Este tipo de realimentación se llama *realimentación negativa* porque la variable manipulada se mueve en dirección opuesta a la variable de proceso  $e = y_{sp} - y$ . Según [11], la realimentación funcionará bien, si el error es pequeño, e idealmente será cero. Cuando el error es pequeño la variable de proceso está también próxima al punto de consigna independientemente de las propiedades del proceso.

Para conseguir realimentación es necesario tener sensores y actuadores apropiados que efectúen las acciones de control. La realimentación puede reducir los efectos de las perturbaciones, hacer que un sistema sea insensible a las variaciones del proceso además de crear relaciones bien definidas entre variables en un sistema. [11]

Los controladores PID, incluyen tres acciones: proporcional (P), integral (I) y derivativa (D). Estos controladores son los denominados P, I, PI, PD y PID.

#### 2.3.4. Control proporcional

Según [11], la razón de por qué el control on-off a menudo da lugar a oscilaciones es que el sistema sobreactúa, ya que un pequeño cambio en el error hará que la variable manipulada varíe entre los valores máximos. Este efecto se evita en el control proporcional, donde la característica del controlador es proporcional al error de control para pequeños errores. Esto se puede conseguir haciendo la señal de control proporcional al error como:

$$u = K(y_{sp} - y) = K_p * e \quad (2.3)$$

Lo que desde su función transferencia queda:

$$C_p(s) = K_p \quad (2.4)$$

Donde  $K_p$  es una ganancia proporcional ajustable. Un controlador proporcional puede controlar cualquier planta estable, pero posee desempeño limitado y error en régimen permanente (*off-set*).

### 2.3.5. Control Integral

Según [11], el control proporcional tiene la desventaja de que la variable de proceso a menudo se desvía del punto de consigna. Esto se puede evitar haciendo la acción de control proporcional a la integral del error:

$$u(t) = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (2.5)$$

Donde  $K_i$  es la ganancia integral. Esta estrategia se llama control integral. Si hay un estado estacionario con un error constante  $e_0$  y una señal de control constante  $u_0$ . Se sigue de la ecuación anterior que [11]:

$$u_0 = K_i e_0 t \quad (2.6)$$

Al tratarse  $u_0$  de una constante se sigue que  $e_0$  debe ser cero. Existe un estado estacionario y un controlador tiene acción integral, el error en estado estacionario es siempre cero. Por lo que, dada una referencia constante, o perturbaciones, el error en régimen permanente es cero. La acción del control integral, da una salida del controlador que es proporcional al error acumulado, lo que implica que es un modo de controlar lento, cuya función de transferencia es:

$$C_i(s) = \frac{K_i}{s} \quad (2.7)$$

Según [11], la señal de control  $u(t)$  tiene un valor diferente de cero cuando la señal de error  $e(t)$  es cero.



### 2.3.6. Control proporcional-integral

Se define mediante:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (2.8)$$

Donde  $T_i$ , se denomina tiempo integral y es quien ajusta la acción integral. La función de transferencia se expresa como [11]:

$$C_{PI}(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (2.9)$$

Según [11], Con un control proporcional, es necesario que exista error para tener una acción de control distinta de cero. Con acción integral, un error pequeño positivo siempre nos dará una acción de control creciente, y si fuera negativo la señal de control será decreciente. Este razonamiento sencillo nos muestra que el error en régimen permanente será siempre cero.

Muchos controladores industriales tienen solo acción PI. Se puede demostrar que un control PI es adecuado para todos los procesos donde la dinámica es esencialmente de primer orden. Lo que puede demostrarse en forma sencilla, por ejemplo, mediante un ensayo al escalón [11]

### 2.3.7. Control proporcional-derivativo.

Se define mediante:

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.10)$$

Según [11]. Donde  $T_d$ , es una constante denominada tiempo derivativo. Esta acción tiene carácter de previsión, lo que hace más rápida la acción de control, aunque tiene la desventaja importante que amplifica las señales de ruido y puede provocar saturación en el actuador. La acción de control derivativa nunca se utiliza por si sola, debido a que solo es eficaz durante periodos transitorios. La función transferencia de un controlador PD resulta:

$$C_{PD}(s) = K_p + sK_pT_d \quad (2.11)$$

En [11]. Cuando una acción de control derivativa se agrega a un controlador proporcional, permite obtener un controlador de alta sensibilidad, es decir que responde a la velocidad del cambio del error y produce una corrección significativa antes de que la magnitud del error se vuelva demasiado grande.

El control derivativo no afecta en forma directa al error en estado estacionario, añade amortiguamiento al sistema y, por tanto, permite un valor más grande que la ganancia  $K$ , lo cual provoca una mejora en la precisión en estado estable. [11]

### 2.3.8. Control proporcional-integral-derivativo.

Este control es robusto porque resulta de la unión de las cualidades individuales de las tres acciones de control. Mediante el uso de extrapolación lineal se puede dar al controlador la capacidad de predecir o anticiparse al estado de la salida de la variable de control.

La expresión matemática de un controlador con esta acción combinada se obtiene mediante:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.12)$$

La función de transferencia resulta:

$$C_{PID}(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2.13)$$

La acción de control entonces es, una suma de tres términos que representan el pasado por la acción integral del error (el término-I), el presente (el término-P) y el futuro por una extrapolación lineal del error (el término-D). El término  $e + T_d \frac{de}{dt}$ , es una predicción lineal del error  $T_d$  unidades de tiempo en el futuro.

Según [13], los parámetros del controlador se llaman: ganancia proporcional  $K_p$ , tiempo integral  $T_i$ , y tiempo derivativo  $T_d$ . Empíricamente, se ha comprobado que el controlador PID es capaz de resolver un amplio espectro de problemas de control. Hay controladores más complejos que difieren del controlador PID porque utilizan métodos más sofisticados para la predicción.

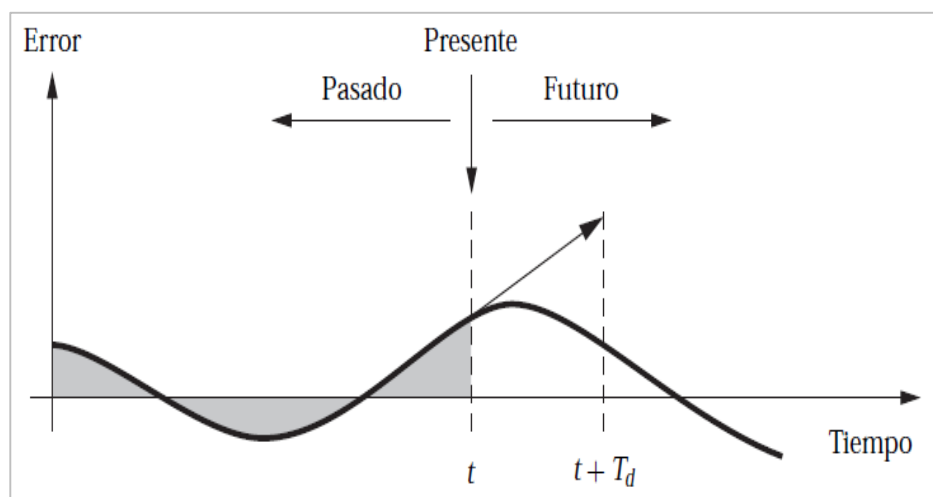


Figura # 2.10. Evolución de cálculo de un controlador PID. Fuente: [13]

Es posible, ajustar los parámetros de un controlador PID sin un conocimiento preciso del tipo de actuación que realiza cada una de las partes de este. Sin embargo, resulta

muy conveniente para poder predecir cómo afecta al sistema la modificación de cada uno de ellos [9].

### 2.3.9. Actuación proporcional

Según [13]. Si el tiempo de integración se hace infinito y el de derivación nulo, el controlador PID se transforma en una ley de control puramente proporcional al error entre la referencia y la salida.  $u(t) = K_p e(t)$ .

- **Actuación proporcional-derivativa**

Una forma de evitar las fuertes oscilaciones que se pueden producir en torno a la referencia es añadir a la actuación proporcional otra actuación proporcional a la derivada del error. Esto es lo mismo que dotar al sistema una cierta capacidad de “anticipación” porque la inclusión del término derivativo es equivalente a actuar proporcionalmente al error que existirá dentro de  $T_d$  segundos.

$$u(t) = K_p e(t) + T_d de(t)dt \approx K_p e(t + T_d) \quad (2.14)$$

Esta antelación es beneficiosa porque el sistema es capaz de “frenar” antes de llegar a la referencia [13]. En la Figura # 2.8 se muestra como en el instante  $t_1$  el error todavía es positivo, por lo que el control proporcional seguirá actuando en la planta para acercar la masa a la referencia, aunque sea una fuerza pequeña. Según [13], Pero un usuario previsor, deduciría que con la elevada velocidad que lleva la masa en breves instantes se rebasara la posición de referencia por lo que en ese instante introduciría una fuerza contraria o de “frenado”. Es decir, actuar en  $t_1$  con la fuerza que se estima para  $t_2$ .

- **Actuación proporcional-integral**

Una característica común de la actuación proporcional y la proporcional-derivativa es que se hace cero cuando el error desaparece. Sin embargo, en algunos casos puede ser necesario que esto no sea así.

Si se desea que no exista error en régimen permanente a la acción proporcional hay que añadir una actuación extra  $u_0$ . En los primeros sistemas controlados, la actuación  $u_0$  se añadía de forma manual, incrementando esa especie de *offset* hasta que desaparecía el error.

La solución automatizada más adecuada a este problema es ir aumentando el valor de  $u_0$  de forma proporcional a la integral del error. La función integral del error aumenta paulatinamente mientras exista error no nulo hasta alcanzar, con error nulo, un valor finito. [13].

Según [13]. La constante de tiempo de integración  $T_i$  da una idea del tiempo que se tarda en anular el error de forma automática. La constante de tiempo  $T_i$  da una idea del momento en que se anula el error en régimen permanente. Si se elige una  $T_i$  muy elevada, el sistema tarda mucho en alcanzar la referencia. La interpretación física que se acaba de dar a la actuación integral concuerda con el hecho de que cuando  $T_i$  se hace infinito entonces el sistema no tiene actuación integral. Un valor adecuado para  $T_i$  puede ser el periodo de oscilación del sistema, o un tiempo algo menor. La actuación integral puede darse también en sistemas que, carezcan de error en régimen permanente ante un determinado tipo de entrada. Lo que consigue entonces la parte integral es elevar el tipo del sistema en una unidad y anular el error ante entradas más severas.

### 2.3.10. Método de ajuste del PID experimental

Uno de los métodos más aplicados para el ajuste del PID, se basa en inicio en un solo lazo de control con ganancia proporcional y que de acuerdo al valor de esta, se busca que el sistema comience a oscilar, entonces se miden estas oscilaciones y en función de estas se procede a calcular las ganancias del controlador PID, este método según [11], fueron propuestos por Ziegler y Nichols en 1942, quienes usaron métodos experimentales para desarrollarlos por lo que se lo conoce de esta forma a este método de ajuste.

Este procedimiento experimental, solo es válido para plantas con una respuesta estable a lazo abierto, donde se realizan los siguientes pasos para ajustar el PID.

Se usa en primer lugar el control proporcional, comenzando con un valor de ganancia pequeño y se continúa incrementando la ganancia hasta que el lazo comience a oscilar. Por lo que se requiere obtener oscilaciones lineales y las mismas deben ser observadas a la salida del controlador.

Se registra la ganancia crítica, es decir el máximo valor de  $K_p$ , que hace que el sistema entre en el límite de la estabilidad y se produzcan oscilaciones, entonces se hace que  $K_p = K_c$  y el período de oscilación a la salida del controlador  $P_c$  que corresponde a que  $K_c G(j\omega)$  cruza el punto  $(-1,0)$  cuando  $K_p = K_c$ .

El último paso consiste en ajustar los parámetros del controlador según la Tabla 1, dada por los autores de este método:

	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0.5 K_c$		
PI	$0.45K_c$	$P_c / 1.2$	
PID	$0.6 K_c$	$0.5 P_c$	$P_c/8$

Tabla # 1. Ajuste experimental del PID. Fuente [10]

La tabla anterior fue propuesta por Ziegler y Nichols, quienes buscaban una respuesta a la función paso de bajo amortiguamiento para plantas que puedan describirse de manera satisfactoriamente por mediante un modelo de la forma:

$$G_o(s) = \frac{K_o e^{-s\tau_o}}{v_o s + 1}, \text{ con } v_o > 0 \quad (2.15)$$

### 2.3.11. Controlador predictivo

A finales de los años setenta, según Camacho en [13] surgieron diversos algoritmos que usaban explícitamente un modelo dinámico del proceso para predecir el efecto de las acciones de control futuras en la salida, las cuales eran determinadas minimizando el error predicho sujeto a restricciones de operación. La optimización se repetía en cada instante de muestreo con información actualizada del proceso.

Estas formulaciones eran de naturaleza heurística y algorítmica e intentaban aprovechar el creciente potencial de los computadores digitales por aquella época.

Rápidamente el MPC (Model Predictive Control), adquirió gran popularidad en las industrias de procesos químicos principalmente debido a la simplicidad del algoritmo y al uso del modelo de respuesta impulsional o en escalón, que, aunque posea muchos más parámetros que las formulaciones en el espacio de estados o función de transferencia suele ser preferido por ser intuitivo y necesitar menos información *a priori* para identificar. La mayoría de las aplicaciones fueron llevadas a cabo sobre sistemas multivariables incluyendo restricciones. Los algoritmos utilizados fueron principalmente el IDCOM (Identification-Command) y el DMC (Control con Matriz Dinámica, *Dynamic Matrix Control*).

Independientemente fue surgiendo otra línea de trabajo en torno a las ideas del control adaptativo, desarrollando estrategias esencialmente para procesos monovariantes formuladas con modelos entrada/salida. En este contexto se extendieron las ideas del Controlador de Mínima Varianza y se desarrolló el Control Predictivo Generalizado (*Generalized Predictive Control GPC*) que es uno de los métodos más populares en la actualidad.

### **2.3.12. Situación actual**

La situación actual de aplicaciones de MPC en la industria está bien reflejada en la recopilación de Qin y Badgwell [16], que recoge unas 2200 aplicaciones, principalmente en el sector petroquímico (desde entonces el número de aplicaciones puede estimarse en torno a las 3000). La mayoría de las aplicaciones son en procesos multivariantes, registrándose casos como un controlador con 40 entradas y 80 salidas. Sorprendentemente, MPC ha tenido menor impacto en otro tipo de industrias, aunque estudios de 1993 sugieren que unas 20.000 aplicaciones podrían beneficiarse de esta técnica.

El éxito actual del MPC en la industria se debe a tres razones principales:

- La incorporación de un modelo explícito del proceso en los cálculos, que permite al controlador tratar con todas las características importantes de la dinámica del proceso.
- La consideración del comportamiento del proceso a lo largo de un horizonte futuro que permite tener en cuenta el efecto de las perturbaciones en realimentación y *pre*-alimentación, permitiendo al controlador conducir la salida a la trayectoria de referencia deseada.
- La consideración de restricciones en la fase del diseño del controlador evita en lo posible su variación, resultando en un control más preciso en torno al



punto óptimo de operación. La inclusión de restricciones es quizás la característica que más distingue al MPC respecto a otras metodologías.

Otra de las razones que han contribuido a que el MPC se haya convertido en un éxito comercial es el hecho de que existen unos 15 suministradores que instalan el producto llave en mano, con periodos de amortización de entre 3 y 12 meses, permitiendo que medianas empresas puedan tener acceso a esta tecnología. Además, los nuevos Sistemas de Control Distribuido empiezan a ofertar productos MPC genéricos que ofrecen al usuario la posibilidad de realizar futuras modificaciones sin depender de un producto cerrado.

### **2.3.13. Conceptos básicos de control predictivo**

Según Camacho [13]. El Control Predictivo Basado en Modelo, Model (Based) Predictive Control (MBPC ó MPC) constituye un campo muy amplio de métodos de control desarrollados en torno a ciertas ideas comunes, e integra diversas disciplinas como control óptimo, control estocástico, control de procesos con tiempos muertos, control multivariable o control con restricciones.

En [13]. Estos métodos de diseño conducen a controladores lineales que poseen prácticamente la misma estructura y presentan suficientes grados de libertad. Las ideas que aparecen en mayor o menor medida en toda la familia de controladores predictivos se refieren básicamente a:

- El uso explícito de un modelo para predecir la salida del proceso en futuros instantes de tiempo (horizonte).
- Cálculo de las señales de control minimizando una cierta función objetivo.
- Una estrategia deslizante, de forma que en cada instante el horizonte se va desplazando hacia el futuro, lo que implica aplicar la primera señal de control

en cada instante y desechar el resto, repitiendo el cálculo en cada instante de muestreo.

Los distintos algoritmos de MPC difieren entre si casi exclusivamente en el modelo usado para representar el proceso y los ruidos, así como en la función de coste a minimizar. Estas diferencias, pueden provocar distintos comportamientos en bucle cerrado, siendo críticas para el éxito de un determinado algoritmo en una determinada aplicación [13].

Según [13]. El Control Predictivo es un tipo de control de naturaleza abierta, dentro del cual se han desarrollado muchas aplicaciones industriales y en el mundo académico. En la actualidad existen numerosas aplicaciones de controladores predictivos funcionando con éxito, tanto en la industria de procesos como en control de motores o Robótica. El buen funcionamiento de estas aplicaciones muestra la capacidad del MPC para conseguir sistemas de control de elevadas prestaciones, capaces de operar sin grandes intervenciones durante largos periodos de tiempo.

El MPC presenta una serie de ventajas sobre otros métodos, entre las que destacan:

- No se necesita un conocimiento profundo de control, puesto que los conceptos resultan muy intuitivos, a la vez que la sintonización es relativamente fácil.
- Puede ser usado para controlar una gran variedad de procesos, desde aquellos con dinámica relativamente simple hasta otros más complejos incluyendo sistemas con grandes retardos, de fase no mínima o inestable.
- Permite tratar con facilidad el caso multivariable.
- Posee intrínsecamente compensación del retardo.

- Resulta conceptualmente simple la extensión al tratamiento de restricciones, que pueden ser incluidas de forma sistemática durante el proceso de diseño.
- Es muy útil cuando se conocen las futuras referencias (robótica o procesos en *batch*) [13].
- Es una metodología completamente abierta basada en algunos principios básicos que permite futuras extensiones.

Pero, lógicamente, también presenta inconvenientes. Uno de ellos es la carga de cálculo necesaria para la resolución de algunos algoritmos. Pero quizás el mayor inconveniente se vea reflejado en la necesidad de disponer de un modelo apropiado del proceso. El algoritmo de diseño está basado en el conocimiento previo del modelo y es independiente de este, pero resulta evidente que las prestaciones obtenidas dependerán de las discrepancias existentes entre el proceso real y el modelo usado.

#### **2.3.14. Estrategia de los controladores**

Según Camacho [13]. La metodología de todos los controladores pertenecientes a la familia del MPC se caracterizan por la estrategia representada en la Figura # 2.9:

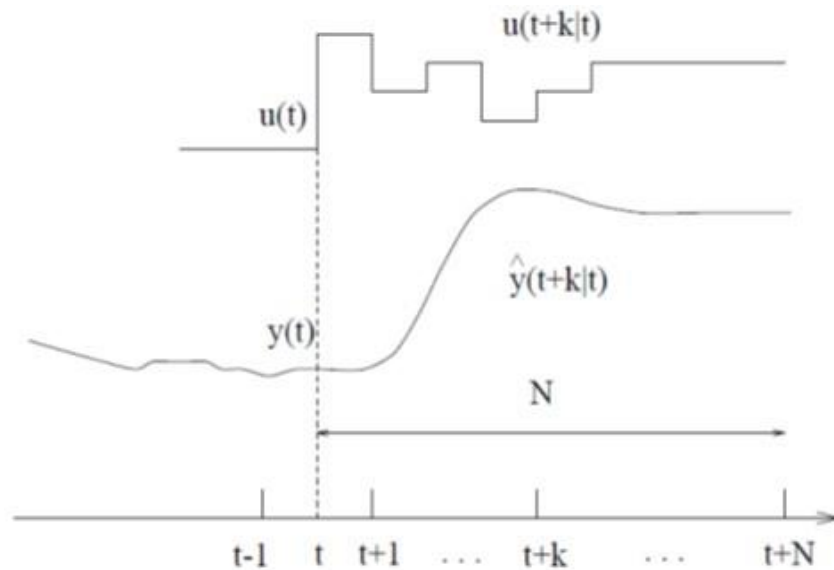


Figura # 11.12. Estrategia del Control Predictivo. Fuente: [13]

1. En cada instante  $t$  y haciendo uso del modelo del proceso se predicen las futuras salidas para un determinado horizonte  $N$ , llamado horizonte de predicción. Estas salidas predichas,  $\hat{y}(t+k|t)$  para  $k = 1 \dots N$  dependen de los valores conocidos hasta el instante  $t$  (entradas y salidas pasadas) y de las señales de control futuras  $u(t+k|t)$ ,  $k = 0 \dots N-1$ , que se pretenden enviar al sistema y que son las que se quieren calcular. [13].

2. El conjunto de señales de control futuras, se calcula optimizando un determinado criterio en el que se pretende mantener el proceso lo más próximo posible a la trayectoria de referencia  $w(t+k)$  (que puede ser directamente el setpoint o una suave aproximación a este). Este criterio suele tomar la forma de una función cuadrática de los errores entre la salida predicha y la trayectoria de referencia también predicha, incluyendo en muchos casos el esfuerzo de control. Si el criterio es cuadrático, el modelo lineal y no existen restricciones se puede obtener una solución explícita, en otro caso se debe usar un método iterativo de optimización. Adicionalmente se hace alguna suposición sobre la estructura de la ley de control futura, como por ejemplo que va a ser constante a partir de cierto instante. [13].

3. La señal de control  $u(t|t)$  es enviada al proceso mientras que las siguientes señales de control calculadas son desechadas, puesto que en el siguiente instante de muestreo ya se conoce  $y(t + 1)$  y se repite el paso 1 con este nuevo valor y todas las secuencias son actualizadas. Se calcula por tanto  $u(t + 1|t + 1)$  (que en principio será diferente al disponer de nueva información), haciendo uso del concepto de horizonte deslizante. [13].

Para llevar a cabo esta estrategia, se usa una estructura como la mostrada en la Figura # 2.10. Se hace uso de un modelo para predecir las salidas futuras del proceso, basándose en las futuras señales de control propuestas. Estas señales son calculadas por el optimizador teniendo en cuenta la función de coste (donde aparece el futuro error de seguimiento) así como las restricciones. Por tanto, el modelo juega un papel decisivo en el controlador. El modelo elegido debe ser capaz de capturar la dinámica del proceso para poder predecir las salidas futuras al mismo tiempo que debe ser sencillo de usar y de comprender.

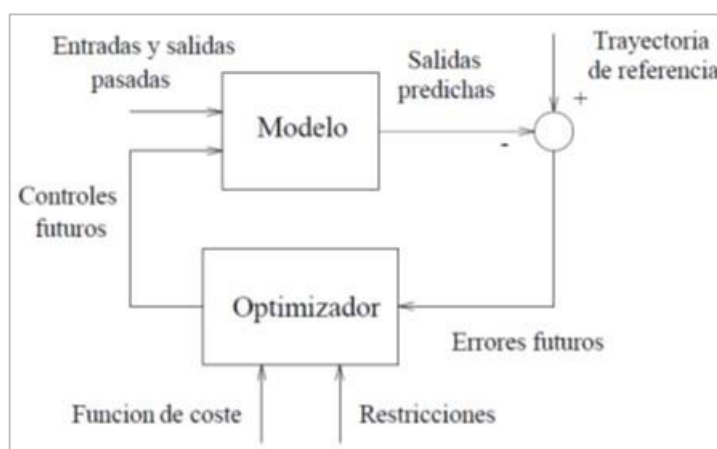


Figura # 2.13. Estructura básica del Controlador Predictivo basado en Modelo. Fuente: [13]

El optimizador es otra parte fundamental de la estrategia pues proporciona las acciones de control. En [13]. Si la función de coste es cuadrática, el mínimo se puede obtener como una función explícita de las entradas y salidas pasadas y de la trayectoria de referencia. Sin embargo, cuando existen restricciones de desigualdad la solución debe ser calculada por métodos numéricos con más carga de cálculo.

### 2.3.15. Control Predictivo basado en modelos

Camacho y Bordons en [13], dicen que todos los controladores predictivos poseen elementos comunes y para cada uno de estos elementos se pueden elegir diversas opciones, dando lugar a distintos algoritmos, estos elementos son:

- Modelo de predicción
- Función objetivo
- Obtención de la ley de control

#### 2.3.15.1. Modelo de Predicción

El modelo es la base fundamental del MPC (Control Predictivo basado en Modelo), un diseño completo debe incluir los mecanismos necesarios para obtenerlo lo mejor posible, ya que debe ser lo suficientemente completo para captar el máximo de los procesos dinámicos y ser capaz de permitir las predicciones calculadas al mismo tiempo. El uso de este modelo de proceso es determinante por la necesidad de calcular las salidas predictivas instantáneas futuras  $\hat{y}(t + k|t)$ .

Las diferentes estrategias del MPC pueden usar varios modelos para representar las relaciones entre las salidas y las entradas manipuladas, algunas de las variables manipuladas y otras, pueden ser consideradas para ser perturbaciones manipuladas para ser compensadas por la acción de alimentación. Un modelo de perturbación puede también ser tomado en cuenta para describir el orden del comportamiento que no es reflejado por el modelo del proceso, incluyendo el efecto de las entradas no manipuladas, ruido y error del modelo. Este puede ser separado en dos partes: el modelo de proceso actual y los modelos de perturbaciones. Ambas partes son necesarias para la predicción.

### 2.3.15.2. Modelo de proceso

Prácticamente en cada posible forma de modelar un proceso aparece una formulación MPC dada, siendo el siguiente el más comúnmente utilizado:

- Respuesta impulso. Es la secuencia de los pesos o modelo de convolución, la salida y entrada se relacionan por la siguiente ecuación.

$$y(t) = \sum_{i=1}^{\infty} h_i u(t-i)$$

La salida  $h_i$  es muestreada cuando el proceso es sometido a un impulso unitario.

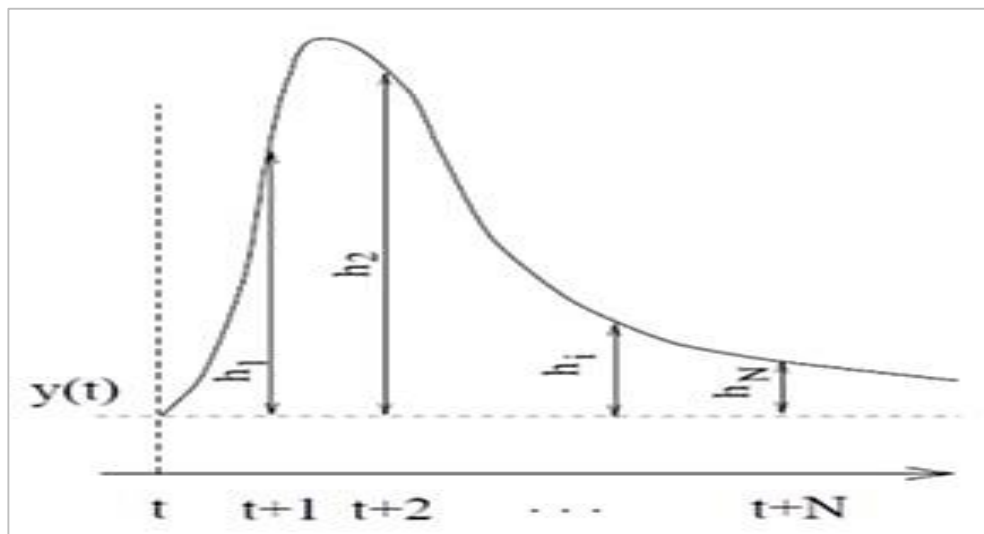


Figura # 2.14. Respuesta impulsional del sistema. Fuente: [13]

Esta sumatoria es truncada y solamente los valores de N son considerados. (Solo así el proceso es estable sin que los integradores puedan ser representados), teniendo:

$$y(t) = \sum_{i=1}^N h_i u(t-i) = H(z^{-1})u(t) \quad (2.16)$$

El inconveniente de este método es el extenso número de parámetros necesarios, ya que  $N$  es usualmente un valor alto (en el orden de 40 - 50). La predicción se puede obtener por:

$$\hat{y}(t+k|t) = \sum_{i=1}^N h_i u(t+k-i|t) = H(z^{-1})u(t+k|t) \quad (2.17)$$

Este método es extensamente aceptado en la práctica industrial porque es muy intuitivo y refleja claramente la influencia de cada variable manipulada sobre una determinada salida. Si el proceso es multivariable, las diferentes salidas reflejan el efecto de las entradas  $m$  en la siguiente forma:

$$y_j(t) = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^N h_i^{kj} u^k(t-i) \quad (2.18)$$

La gran ventaja de este método dice Camacho y Bordons en [12], es que no hay información previa acerca de la necesidad del proceso, de modo que el proceso de identificación se simplifica y al mismo tiempo permite las dinámicas complejas como son fase no mínima y retrasos para ser descritos con facilidad.

Respuesta paso, muy similar al anterior excepto que ahora la señal de entrada es un paso. Para un sistema estable la respuesta truncada se obtiene por:

$$y(t) = y_0 + \sum_{i=1}^N g_i \Delta u(t-i) = y_0 + G(z^{-1})(1-z^{-1})u(t) \quad (2.19)$$

Donde  $g_i$  son los valores de la salida muestreada por la entrada paso  $\Delta u(t) = u(t) - u(t-1)$  como muestra la Figura # 2.12.



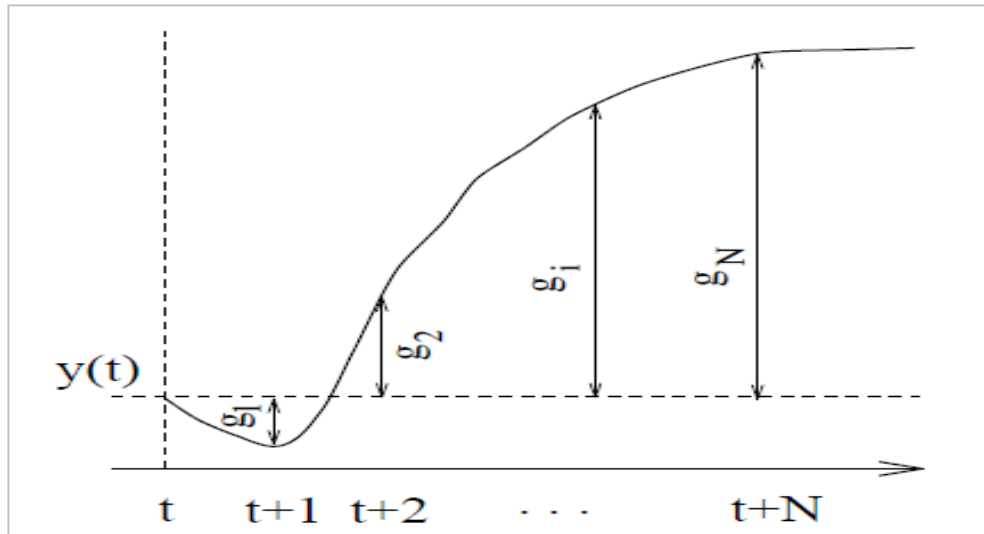


Figura # 2.15. Respuesta del sistema ante una entrada escalón.

Fuente:[13]

El valor de  $y_0$  se puede tomar para ser 0 generalmente sin pérdidas, de modo que el predictor será:

$$\hat{y}(t+k|t) = \sum_{i=1}^N g_i \Delta u(t+k-i|t) \quad (2.20)$$

- Función de transferencia, utilizan el concepto de función de transferencia  $G=B/A$  de manera que las salidas se obtienen por:

$$A(z^{-1})y(t) = B(z^{-1})u(t) \quad (2.21)$$

Con:

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_{na} z^{-na} \quad (2.22)$$

$$B(z^{-1}) = b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_{nb} z^{-nb} \quad (2.23)$$

Esta predicción se obtiene por:

$$\hat{y}(t+k|t) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} u(t+k|t) \quad (2.24)$$

Esta representación también es válida para un proceso inestable, con la ventaja que únicamente necesita pocos parámetros, aunque un conocimiento a priori del proceso es fundamental, especialmente en el orden de los polinomios  $A$  y  $B$ .

- Espacios de estados, utiliza, la siguiente es su representación:

$$x(t) = Ax(t-1) + Bu(t-1) \quad (2.25)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (2.26)$$

Donde  $x$  es el estado y  $A$ ,  $B$ ,  $C$  las matrices del sistema de entrada y salida respectivamente. La predicción de este modelo se obtiene por:

$$\hat{y}(t+k|t) = C\hat{x}(t+k|t) = C[A^k x(t) + \sum_{i=1}^k A^{i-1} Bu(t+k-i|t)] \quad (2.27)$$

La ventaja, de este modelo es que puede ser usado por procesos multivariables de manera directa. La ley de control es la simple realimentación de una combinación lineal de los vectores de estado, aunque en algún momento la base del estado elegido no tiene significado físico. Los cálculos se pueden complicar con una necesidad adicional de incluir un observador si no son accesibles los estados.

Otros pueden utilizar modelos no lineales para representar el proceso, pero el problema de usar los datos de la fuente es que estos causan problemas de optimización por ser más complicado. Redes neuronales, así como la lógica difusa son otras formas de representación usadas en algunas aplicaciones.

### 2.3.15.3. Modelo de perturbaciones

La elección del modelo de representación de las perturbaciones es tan importante como la elección del modelo del proceso. Un modelo ampliamente utilizado es el controlador Autorregresivo Integrado de Media Móvil (ARIMA del inglés) en las perturbaciones, es decir, las diferencias entre la salida medida y la calculada por el modelo, se dan por:

$$n(t) = \frac{C(z^{-1})e(t)}{D(z^{-1})} \quad (2.28)$$

Cuando el polinomio  $D(z^{-1})$  explícitamente incluye el integrador  $\Delta = 1 - z^{-1}$ ;  $e(t)$  es un ruido blanco de media cero y el polinomio  $C$  es normalmente considerado igual a uno. Este modelo es considerablemente apropiado por dos tipos de perturbaciones: cambios aleatorios que ocurren por instantes aleatorios (por ejemplo los cambios en la calidad del material) y movimiento browniano (en procesos con balance de energía). En el caso particular de ARIMA puede ser incluida la perturbación constante.

$$n(t) = \frac{e(t)}{1-z^{-1}} \quad (2.29)$$

Cuya mejor predicción será  $\hat{n}(t+k|t) = n(t)$ .

### 2.3.15.4. Respuesta libre y forzada

Según Camacho en [13]. Una característica típica de la mayoría de los controladores MPC es utilizada en conceptos de respuesta libre y forzada. La idea es expresar la secuencia de control como la suma de dos señales:

$$u(t) = u_f(t) + u_c(t) \quad (2.30)$$

La señal  $u_f(t)$  corresponde a las entradas pasadas y se mantiene constante e igual al último valor de la variable manipulada en los instantes de tiempos futuros. Es decir:

$$\begin{aligned} u_f(t-j) &= u(t-j) \text{ para } j = 1, 2, \dots & (2.31) \\ u_f(t+j) &= u(t-1) \text{ para } j = 0, 1, 2, \dots \end{aligned}$$

La señal  $u_c(t)$  se hace igual a cero en el pasado e igual a los próximos movimientos de los controles en el futuro. Es decir:

$$\begin{aligned} u_c(t-j) &= 0 \text{ para } j = 1, 2, \dots & (2.32) \\ u_c(t+j) &= u(t+j) - u(t-1) \text{ para } j = 0, 1, 2, \dots \end{aligned}$$

En [13], los autores Camacho y Bordons explican que la predicción de la secuencia de salida es separada en dos partes como se puede ver en la Figura # 2.13. Una de ellas  $y_f(t)$ , la respuesta libre, corresponde a la predicción de la salida cuando el proceso de la variable manipulada es igual a  $u_f(t)$ , y el otro, la respuesta forzada  $y_c(t)$ , corresponde a la predicción de la salida del proceso cuando la secuencia de control es hecha igual a  $u_c(t)$ . La respuesta libre corresponde a la evolución del proceso debido al presente estado, mientras la respuesta forzada se debe al control de movimientos futuros.

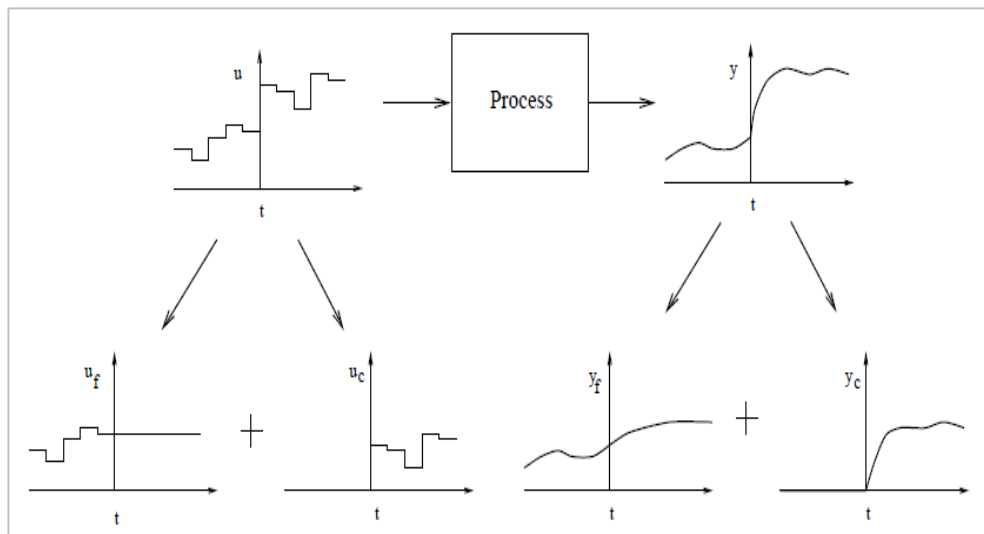


Figura # 2.16. Respuesta libre y forzada. Fuente: [13]

### 2.3.16. Función Objetivo

Varios algoritmos MPC proponen diferentes costos funcionales para obtener la ley de control. El objetivo general es que las salidas futuras ( $y$ ) en el horizonte considerado debe seguir una señal de referencia determinada ( $w$ ) y, para un tiempo de muestreo, el esfuerzo de control  $\Delta u$  necesario para hacerlo se debe penalizar. La expresión general para cada función objetivo será:

$$J(N_1, N_2, N_u) = \sum_{j=N_1}^{N_2} \delta(j) [\hat{y}(t+j|t) - w(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda(j) [\Delta u(t+j-1)]^2 \quad (2.33)$$

En algunos métodos el segundo término, que considera el esfuerzo de control, no se tiene en cuenta, mientras que en otros los valores de la señal de control (no sus incrementos) también aparecen directamente. En la función de costos es posible considerar:

- **Parámetros:**  $N_1$  y  $N_2$  son el mínimo y máximo horizonte de coste y  $N_u$  es el horizonte de control, que no necesariamente es el horizonte máximo. El significado de  $N_1$  y  $N_2$  son más bien intuitivos y marcan el límite de los instantes en que es

deseable la siguiente salida de referencia. Si se toma un alto valor de  $N_1$ , es porque no tiene ninguna importancia si hay errores en los primeros instantes y originará una respuesta suave del proceso. Nótese que el proceso con tiempo muerto  $d$  no hay ninguna razón para que  $N_1$  sea inferior a  $d$ , debido a que la salida no comenzará a evolucionar hasta el instante  $t+d$ . Además, si el proceso es de fase no mínima, estos parámetros permitirán en el primer instante de respuesta inversa eliminarla de la función objetivo. Los coeficientes  $\delta(j)$  y  $\lambda(j)$  son secuencias que consideran el comportamiento futuro, usualmente valores constantes o secuencias exponenciales. Por ejemplo, es posible obtener un peso exponencial de  $\delta(j)$  a lo largo de los horizontes mediante el uso:

$$\delta(j) = \alpha^{N_2-j} \quad (2.34)$$

Si  $\alpha$  tiene un valor dado entre 0 y 1, los errores más alejados desde el instante  $t$  son penalizados, dando lugar a un control más suave con menos esfuerzo. Si, por otra parte,  $\alpha > 1$ , son más penalizados los primeros errores, provocando un control más brusco. Todos estos valores pueden usarse como sintonización paramétrica para cubrir un amplio campo de opciones, desde un control estándar hasta una estrategia de diseño hecha a medida para un proceso particular.

- **Trayectoria de referencia:** una de las ventajas de control predictivo es que se conoce anticipadamente la evolución futura de la referencia, el sistema puede reaccionar antes de que efectivamente se ha realizado el cambio, evitando así los efectos de la demora en la respuesta del proceso. La evolución futura de referencia  $r(t+k)$  es conocida de antemano en muchas aplicaciones, como son robóticas, servos o procesos en batch; en otras aplicaciones una mejora notable se da con sólo saber el instante en que el valor cambia y adelantarse a esta circunstancia.

En la minimización, la mayoría de los métodos generalmente utilizan una trayectoria de referencia  $w(t+k)$  que no necesariamente tiene que coincidir con la referencia real. Es normalmente una aproximación suave desde el valor actual

de la salida  $y(t)$  hacia el de referencia conocido por medio del sistema de primer orden:

$$w(t) = y(t); w(t+k) = \alpha w(t+k-1) + (1-\alpha)r(t+k); k = 1 \dots N \quad (2.35)$$

$\alpha$  es un parámetro entre 0 y 1 (cuanto más cerca de 1, la aproximación será más suave) que constituye un valor ajustable que influirá en la respuesta dinámica del sistema. En la Figura # 2.14 se muestra la forma de la trayectoria cuando la referencia  $r(t+k)$  es constante y para dos valores diferentes de  $\alpha$ ; valores pequeños de este parámetro proporcionan seguimiento rápido ( $w_1$ ), si se aumenta entonces la trayectoria de referencia se convierte en ( $w_2$ ) dando lugar a una respuesta más suave.

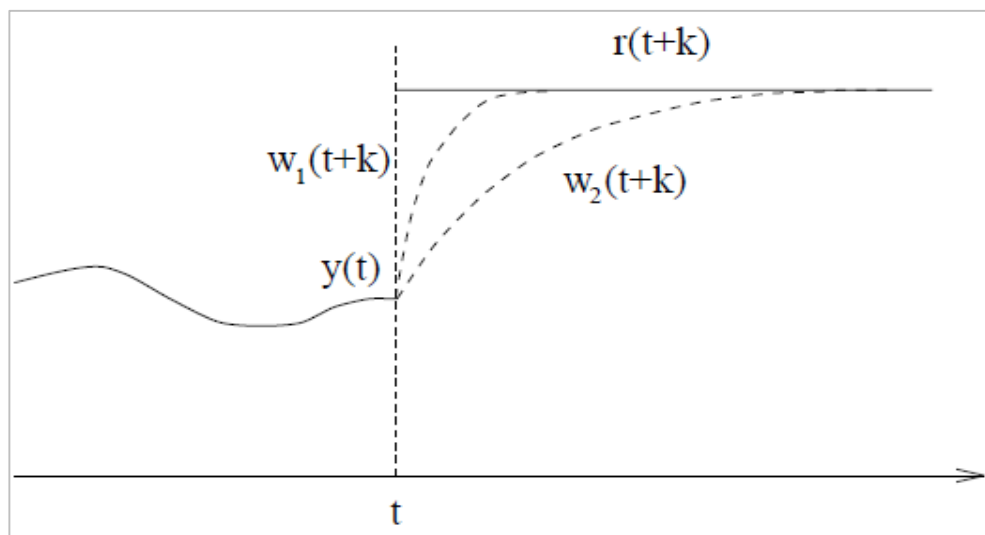


Figura # 2.17. Trayectoria de referencia. Fuente: [13]

- **Restricciones:** En la práctica todos los procesos son sujetos a restricciones, por ejemplo, el actuador tiene un límite de campo de acción, así como una determinada velocidad de subida, como es el caso de las válvulas, que son limitadas por la posición de apertura, cierre total y por la rapidez de la respuesta. Razones constructivas, seguridad, medioambientales o incluso el sensor pueden causar límites en las variables de proceso, tales como los niveles de los tanques, los flujos en las tuberías o las temperaturas y presiones máximas; Por otra parte,

las condiciones operativas se definen normalmente por la intersección de ciertas restricciones para básicamente razones económicas, de modo que el sistema de control funcionará cerca de los límites.

Esto hace necesario la introducción de restricciones en la función que se reduce la función a minimizar. Muchos algoritmos predictivos intrínsecamente tienen en cuenta las restricciones y por lo tanto han tenido mucho éxito en la industria, normalmente se considerarán límites en la amplitud y en la velocidad de subida de la señal de control y límites en la salida:

$$u_{min} \leq u(t) \leq u_{max} ; \forall t \quad (2.36)$$

$$du_{min} \leq u(t) - u(t - 1) \leq du_{max} ; \forall t \quad (2.37)$$

$$y_{min} \leq y(t) \leq y_{max} ; \forall t \quad (2.38)$$

Mediante la suma de estas restricciones a la función objetivo, la minimización se hace más compleja, de manera que la solución no se puede conseguir de forma explícita como en el caso sin restricciones.

### 2.3.17. Obtención de la ley de control

Con el fin de obtener los valores  $u(t + k|t)$  es necesario minimizar la función  $J$ . Para ello los valores de las salidas predichas  $\hat{y}(t + k|t)$  son calculadas en función de valores pasados de entradas y salidas de las señales de control futuro, haciendo uso del modelo elegido y sustituido en la función de coste, obteniendo una expresión cuya minimización conduce a los valores buscados.

Sea cual sea el método, la obtención de la solución no es fácil, ya que habrán  $N_2 - N_1 + 1$  variables independientes, un valor que puede ser alto (en el orden de 10 a 30). Con el fin de reducir estos grados de libertad se puede proponer una determinada



estructura de la ley de control. Además, se ha encontrado que esta estructuración de la ley de control, produce una mejora en la robustez y en el comportamiento general del sistema, debido al hecho de permitir la libre evolución de las variables manipuladas (sin ser estructuradas) que pueden conducir a indeseables señales de control de frecuencias altas y que en la peor situación podrían conducir a la inestabilidad.

Esta estructura ley de control a veces se impone por el uso de horizonte de control ( $N_u$ ), que consiste en considerar que después de un cierto intervalo  $N_u < N_2$  no hay variación en las señales de control propuestas, es decir:

$$\Delta u(t + j - 1) = 0 \quad ; \quad j > N_u \quad (2.39)$$

Que es equivalente a dar pesos infinitos a los cambios en el control de un cierto instante. El caso extremo sería considerar  $N_u$  igual a 1 con lo que todas las acciones futuras serían igual a  $u(t)$ .

### **2.3.18. Revisión de algunos algoritmos MPC**

Los métodos más populares y sus características más destacadas se revisan a continuación, entre estos se consideran los más representativos, DMC, Mac, GPC, PFC, EPSAC y EHAC, y brevemente serán tratados.

#### **2.3.18.1. Matriz de control dinámico**

La función objetivo de este método, puede considerar sólo errores futuros o incluir también el esfuerzo de control, en cuyo caso toma la forma genérica. Una de las características de este método que lo ha hecho muy popular en la industria es la inclusión de restricciones, que se traduce en inecuaciones de la forma genérica. En este caso la optimización debe ser numérica y se lleva a cabo en cada periodo de

muestreo, enviándose la señal de control y recalculando todo en el nuevo periodo de muestreo. Los principales inconvenientes de este método son el tamaño del modelo empleado y la imposibilidad de tratar procesos inestables.

Se utiliza la respuesta al escalón (2.2) para modelar el proceso, teniendo en cuenta sólo los primeros  $N$  términos, por lo tanto, suponiendo que el proceso sea estable y sin integradores. En cuanto a las perturbaciones, su valor será considerado para ser el mismo que en el instante  $t$  a lo largo de todo el horizonte, es decir, para que sea igual al valor medido de la salida ( $y_m$ ) menos la estimada por el modelo ( $\hat{y}(t|t)$ ).

$$\hat{n}(t + k|t) = \hat{n}(t|t) = y_m(t) - \hat{y}(t|t) \quad (2.40)$$

Por lo tanto el valor predicho de la salida será:

$$\hat{y}(t + k|t) = \sum_{i=1}^k g_i \Delta u(t + k - i) + \sum_{i=k+1}^N g_i \Delta u(t + k - i) + \hat{n}(t + k|t) \quad (2.41)$$

Donde el primer término contiene las acciones de control futuras que ser calculados, el segundo contiene los valores pasados de las acciones de control y por lo tanto se conoce, y el último representa las perturbaciones. Las funciones de coste pueden considerar errores en el futuro sólo, o puede incluir el esfuerzo de control, en cuyo caso, se presenta el genérico. Una de las características de este método lo que es muy popular en la industria es la adición de restricciones, de tal manera que las ecuaciones de la forma:

$$\sum_{i=1}^N C_{yi}^j \hat{y}(t + k|t) + C_{ui}^j u(t + k - i) + c^j \leq 0, \quad j = 1 \dots N_c \quad (2.42)$$

Los coeficientes anteriores, son añadidos a la minimización u optimización que se lleva a cabo en cada instante de muestreo y el valor de resultante de  $u(t)$ , se envía al proceso. Los inconvenientes de este método son el tamaño del modelo de proceso

requerido y por otro lado la incapacidad para trabajar con un movimiento de precesión inestable.

### 2.3.18.2. Modelo de control algorítmico

También conocido como modelo predictivo heurístico de control que se comercializa bajo el nombre de IDCOM (orden de identificación). Es muy similar al método anterior con algunas diferencias. En primer lugar, se utiliza un modelo de respuesta de impulso válido sólo para procesos estables, en la que el valor de  $u(t)$  aparece en lugar de  $\Delta u(t)$ . Además, no hace uso del concepto horizonte de control de modo que en los cálculos aparecen como muchas señales de control como salidas futuras. Se introduce una trayectoria de referencia como un sistema de primer orden que evoluciona a partir de la salida real al punto de ajuste de acuerdo con una constante de tiempo determinado, después de la expresión. La varianza del error entre esta trayectoria y la salida es lo que se pretende reducir al mínimo en la función objetivo. Los trastornos pueden ser tratados como en la DMC o sus estimaciones pueden llevarse a cabo por la siguiente expresión recursiva:

$$\hat{n}(t+k|t) = \alpha \hat{n}(t+k-1|t) + (1-\alpha)(y_m(t) - \hat{y}(t|t)) \quad (2.43)$$

Con  $\hat{n}(t|t) = 0$ .  $\alpha$  es un parámetro ajustable  $0 \leq \alpha < 1$  estrechamente relacionado con el tiempo de respuesta, el ancho de banda y la robustez del sistema de bucle cerrado. También tiene en cuenta las restricciones en los actuadores, así como en las variables internas o salidas secundarias. Varios algoritmos se pueden utilizar para la optimización en presencia de limitaciones, de las que se presentan inicialmente también se puede utilizar para identificar la respuesta de impulso. Según Camacho [13].

### 2.3.18.3. Control predictivo funcional

Según Camacho en [13]. El controlador para el caso de procesos rápidos. Se utiliza un modelo de espacio de estado del proceso y permite un modelo interno lineal no lineal e inestable. Dinámica no lineal se pueden introducir en la forma de un modelo de espacio de estados no lineal. PFC tiene dos características distintivas: el uso de los *puntos de coincidencia y funciones de base*.

El concepto de puntos de coincidencia se utiliza para simplificar el cálculo considerando sólo un subconjunto de puntos en el horizonte de predicción  $h_j, j = 1, \dots, n_H$ , el deseado y se requieren las salidas futuras previstas para coincidir en estos puntos, no en todo el horizonte de predicción.

$$u(t+k) = \sum_{i=1}^{n_B} u_i(t) B_i(k) \quad (2.44)$$

El controlador incluye parámetros para la señal de control usando un conjunto de funciones de base de polinomios escalones dados por ( $B_1(k) = 1$ ), rampas ( $B_2(k) = k$ ) o parábolas ( $B_3(k) = k^2$ ). Esto permite un perfil relativo de entrada compleja, que se especifique lo largo de un horizonte de gran tamaño usando un pequeño número de parámetros. La elección de la familia de funciones de base establece muchas de las características del perfil de entrada calculada. Estas funciones se pueden seleccionar con el fin de seguir una consigna polinomio sin retraso, una característica importante para aplicaciones de control de servomecanismos.

La función de costo a ser minimizada es:

$$J = \sum_{j=1}^{n_H} [\hat{y}(t+j) - w(t+j)]^2 \quad (2.45)$$

Donde  $w(t+j)$  suele ser una aproximación de primer orden a la referencia conocida.

El algoritmo de PFC también puede acomodar las limitaciones máximas y mínimas de aceleración de entrada que son útiles en aplicaciones de control de servomecanismos.

#### 2.3.18.4. Predicción Extendida Auto Control Adaptativo

La aplicación de EPSAC es diferente a los métodos anteriores. Para predecir, el proceso es modelado por la función de transferencia.

$$A(z^{-1})y(t) = B(z^{-1})u(t - d) + v(t) \quad (2.46)$$

Donde  $d$  es el retardo y  $v(t)$  la perturbación. El modelo puede ser extendido por un término  $D(z^{-1})d(t)$ , con  $d(t)$  es una perturbación medible con el fin de incluir el efecto *anticipativo*. Una característica del método es que la estructura de la ley de control es muy sencilla, ya que se reduce teniendo en cuenta que la señal de control va a permanecer constante desde el instante  $t$ , es decir,  $\Delta u(t + k) = 0$  para  $k > 0$ . En resumen, el horizonte de control se reduce a 1 y por lo tanto, el cálculo se reduce a un solo valor:  $u(t)$ . Para obtener este valor de una función de coste se utiliza de la forma:

$$\sum_{k=d}^N \gamma(k) [w(t+k) - P(z^{-1})\hat{y}(t+k|t)]^2 \quad (2.47)$$

Donde  $P(z^{-1})$  es un polinomio diseñado con la unidad de ganancia estática y el factor de  $\gamma(k)$  que es una secuencia de ponderación. La señal de control puede ser calculada analíticamente (que es una ventaja sobre los métodos anteriores) en la forma:

$$u(t) = \frac{\sum_{k=d}^N h_k \gamma(k) [w(t+k) - P(z^{-1})\hat{y}(t+k|t)]}{\sum_{k=d}^N \gamma(k) h_k^2} \quad (2.48)$$

Donde  $h_k$  es la respuesta discreta del sistema al impulso.

### 2.3.19. Extended Horizonte Control Adaptativo

Esta formulación considera el proceso de modelado por su función de transferencia sin tener un modelo de las perturbaciones en cuenta:

$$A(z^{-1})y(t) = B(z^{-1})u(t - d) \quad (2.49)$$

Su objetivo es reducir al mínimo la diferencia entre el modelo y la referencia en el instante  $t + N$ :  $\hat{y}(t + N|t) - w(t + N)$ , con  $N \geq d$ . La solución a este problema no es única (a menos que  $N = d$ ); una posible estrategia es considerar que el horizonte de control es 1, es decir,

$$\Delta u(t + k - 1) = 0 ; 1 < k \leq N - d \quad (2.50)$$

O para reducir al mínimo el esfuerzo de control:

$$J = \sum_{k=0}^{N-d} u^2(t + k) \quad (2.51)$$

En esta formulación un predictor de  $N$  pasos se utiliza de la siguiente forma:

$$\hat{y}(t + N|t) = y(t) + F(z^{-1})\Delta y(t) + E(z^{-1})B(z^{-1})\Delta u(t + N - d) \quad (2.52)$$

Donde

$E(z^{-1})$  y  $F(z^{-1})$  son polinomios que satisfacen la ecuación

$$(1 - z^{-1}) = A(z^{-1})E(z^{-1})(1 - z^{-1}) + z^{-N}F(z^{-1})(1 - z^{-1}) \quad (2.53)$$

Con el grado de  $E$  igual a  $N - 1$ . Una ventaja de este método es que una solución explícita sencilla se puede conseguir fácilmente, dando lugar a

$$u(t) = u(t - 1) + \frac{\alpha_0(w(t+N) - \hat{y}(t + N|t))}{\sum_{k=0}^{N-d} \alpha_k^2} \quad (2.54)$$

Donde  $\alpha_i$  es el coeficiente que corresponde a  $\Delta u(t + k)$  en la ecuación de predicción. Por lo tanto la ley de control sólo depende de los parámetros del proceso y, por tanto, pueden fácilmente hacer un auto-ajuste si tiene un identificador en línea. Como se puede ver el único parámetro de ajuste es el horizonte de predicción de  $N$ , lo que simplifica su uso, pero proporciona poca libertad para el diseño. Se ve que la trayectoria de referencia no puede ser utilizado debido a que el error sólo se considera en un instante  $(t + N)$ , tampoco es posible reflexionar sobre los esfuerzos de control en cada punto.

### 2.3.20. Control Adaptativo Generalizado

El controlador predictivo generalizado fue propuesto por Clarke et al en 1987 [Cla87]. Este controlador ha marcado el desarrollo definitivo de los controladores MBPC que hasta ese entonces aún no contaban con el apoyo de algunos sectores de académicos. Como ya se ha comentado, en los primeros años de desarrollo de los controladores MBPC, y a pesar de su éxito en la industria, los algoritmos propuestos carecían de una base teórica que permitiera asegurar robustez y estabilidad para los procesos. Con la aparición del GPC muchas dudas planteadas fueron disipadas debido principalmente al grado de robustez que presentaba esta nueva formulación. Así, el GPC ha sido implementado en la industria desde finales de la década de los ochenta y durante toda la década de los noventa con notable éxito.

Esta estrategia es capaz de abordar con cierta robustez problemas con plantas de fase no-mínima, plantas inestables en lazo abierto o con polos mal amortiguados, plantas con retardo variable o incluso desconocido, plantas mal modeladas, de orden

desconocido, sobre-parametrizadas. Se pueden abordar problemas de control muy diferentes para una amplia variedad de plantas. Para ello es necesario fijar una serie de parámetros de diseño que deben ser especificados por el usuario a partir del conocimiento previo de la planta y de las especificaciones de control.

Según Camacho, [13]. El controlador GPC está inspirado en el controlador de mínima varianza generalizado. Pero las prestaciones que ofrece son, en general, superiores tanto al GMV como al control por asignación de polos. La idea es calcular una secuencia de control futura de tal forma que se minimice una función criterio definida sobre un horizonte de predicción. En esta función aparece un término cuadrático que pesa los errores predichos sobre este horizonte de predicción y los incrementos del comando sobre otro horizonte. El resultado de esta minimización es una solución analítica que da la secuencia de control a aplicar en cada instante.

Desde su formulación el GPC ha sido objetivo de investigadores para mejorar las prestaciones y la robustez del controlador. Por ello, en la década de los noventa se han prodigado gran variedad de algoritmos que son modificaciones o mejoras del original propuesto en 1987. Incluso, otros algoritmos ligeramente diferentes se han inspirado en la idea del GPC, como es el caso del control por asignación de polos generalizado (GPP, Generalized Pole Placement) [Wei93].

### 2.3.20.1. Formulación del control predictivo generalizado

La mayoría de los procesos de una sola entrada y una sola salida (*Single-input single output, SISO*), al ser considerados en torno a un determinado punto de trabajo y tras ser linealizados, pueden ser descritos de la siguiente forma:

$$A(z^{-1})y(t) = z^{-d}B(z^{-1})u(t-1) + C(z^{-1})e(t) \quad (2.55)$$



Según Camacho [13]. Donde  $u(t)$  y  $y(t)$  son respectivamente la señal de control y la salida del proceso y  $e(t)$  es un ruido blanco de valor promedio igual a cero.  $A$ ,  $B$  y  $C$  son los polinomios en el operador de desplazamiento hacia atrás  $z^{-1}$ :

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_{na}z^{-na} \quad (2.56)$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_{nb}z^{-nb} \quad (2.57)$$

$$C(z^{-1}) = 1 + c_1z^{-1} + c_2z^{-2} + \dots + c_{nc}z^{-nc} \quad (2.58)$$

Donde  $d$  es el tiempo muerto del sistema.

Este modelo es conocido como Autorregresivo de Media Móvil (Controller Auto Regressive Moving-Average CARMA). En muchas aplicaciones industriales en las que las perturbaciones son no estacionarias, es más conveniente el uso de un modelo CARMA integrado, generando el CARIMA:

$$A(z^{-1})y(t) = B(z^{-1})z^{-d}u(t-1) + C(z^{-1})\frac{e(t)}{\Delta}, \text{ donde } \Delta = 1 - z^{-1} \quad (2.59)$$

En [13]. Por simplicidad a partir de ahora el polinomio  $C$  se va a tomar igual a 1. La derivación de la predicción óptima se lleva a cabo mediante la resolución de una ecuación de Diophantine cuya solución se puede encontrar por un algoritmo recursivo eficiente.

Este algoritmo, como con todos los algoritmos que utilizan modelos de función de transferencia, puede fácilmente ser implementado en un modo de adaptación utilizando un algoritmo de estimación en línea, tales como mínimos cuadrados recursivos GPC y utiliza una función de coste cuadrática de la forma:

$$J(N_1, N_2, N_u) = \sum_{j=N_1}^{N_2} \delta(j) [\hat{y}(t+j|t) - w(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda(j) [\Delta u(t+j-1)]^2 \quad (2.60)$$

Donde es la predicción óptima  $j$  pasos hacia delante de la salida del proceso con datos conocidos hasta el instante  $t$ ,  $N_1$  y  $N_2$  son los horizontes mínimo y máximo de coste,  $N_u$  es el horizonte de control y  $\delta(j)$  y  $\lambda(j)$  son las secuencias de ponderación mientras que  $w(t+j)$  es la futura trayectoria de referencia. En muchas situaciones se considera  $\delta(j)$  igual a 1 y  $\lambda(j)$  constante. El objetivo es el cálculo de la futura secuencia de control  $u(t), u(t+1), \dots$  de tal manera que la salida futura del proceso  $y(t+j)$  permanezca próxima a  $w(t+j)$ . Esto se logra minimizando  $J(N_1, N_2, N_3)$ .

### 2.3.20.2. Predicción óptima

Según Camacho, [13]. Con la intención de minimizar la función de coste, se obtendrá previamente la predicción óptima de  $y(t+j)$  para  $j \geq N_1$  y  $j \leq N_2$ . Considérese la siguiente ecuación diofántica:

$$1 = E_j(z^{-1})\Delta A + z^{-j}F_j(z^{-1}) \quad (2.61)$$

$$1 = E_j(z^{-1})\tilde{A} + z^{-j}F_j(z^{-1}) \quad (2.62)$$

Los polinomios  $E_j$  y  $F_j$  están únicamente definidos con grados  $j-1$  y  $na$  respectivamente. Se pueden obtener dividiendo 1 entre  $\tilde{A}(z^{-1})$  hasta que el resto pueda ser factorizado como  $z^{-j}F_j(z^{-1})$ . El cociente de la división es entonces el polinomio  $E_j(z^{-1})$

Así se multiplica la ecuación de CARIMA, dice Camacho en [13]. por  $E_j(z^{-1})z^j\Delta A$

$$\tilde{A}(z^{-1})E_j(z^{-1})y(t+j) = E_j(z^{-1})B(z^{-1})\Delta u(t+j-d-1) + E_j(z^{-1})e(t+j) \quad (2.63)$$

Insertando la ecuación diofántica en la anterior queda:

$$(1 - z^{-j}F_j(z^{-1}))y(t + j) = E_j(z^{-1})B(z^{-1})\Delta u(t + j - d - 1) + E_j(z^{-1})e(t + j) \quad (2.64)$$

La cual se puede escribir como

$$y(t + j) = F_j(z^{-1})y(t) + E_j(z^{-1})B(z^{-1})\Delta u(t + j - d - 1) + E_j(z^{-1})e(t + j) \quad (2.65)$$

Al ser el grado del polinomio  $E_j(z^{-1})$  igual a  $j - 1$  los términos del ruido en la ecuación anterior, están todos en el futuro. La mejor predicción de  $y(t + j)$  será, por consiguiente:

$$\hat{y}(t + j|t) = G_j(z^{-1})\Delta u(t + j - d - 1) + F_j(z^{-1})y(t) \quad (2.66)$$

Donde

$$G_j(z^{-1}) = E_j(z^{-1})B(z^{-1}) \quad (2.67)$$

Resulta simple demostrar que los polinomios  $E_j$  y  $F_j$ , se pueden obtener recursivamente, de forma que los nuevos valores en el paso  $j + 1$  ( $E_{j+1}$  y  $F_{j+1}$ ) sean función del paso  $j$ . A continuación, se muestra una demostración simple de la recursividad de la ecuación diofántica. Existen otras formulaciones del GPC que no están basadas en la recursividad de esta ecuación.

Considérense que los polinomios  $E_j$  y  $F_j$  se han obtenido dividiendo 1 entre  $\tilde{A}(z^{-1})$  hasta que el resto haya sido factorizado como  $z^{-j}F_j(z^{-1})$ .

Con:

$$F_j(z^{-1}) = f_{j,0} + f_{j,1}z^{-1} + \dots + f_{j,na}z^{-na} \quad (2.68)$$

$$E_j(z^{-1}) = e_{j,0} + e_{j,1}z^{-1} + \dots + e_{j,j-1}z^{-(j-1)} \quad (2.69)$$

Supóngase que se utiliza el mismo procedimiento para obtener los polinomios  $E_{j+1}$  y  $F_{j+1}$ , es decir, dividir 1 entre  $\tilde{A}(z^{-1})$  hasta que el resto se pueda factorizar como  $z^{-(j+1)}F_{j+1}(z^{-1})$  con:

$$F_{j+1}(z^{-1}) = f_{j+1,0} + f_{j+1,1}z^{-1} + \dots + f_{j+1,na}z^{-na} \quad (2.70)$$

Está claro que solamente es necesario dar un paso más en la división para obtener los polinomios  $E_{j+1}$  y  $F_{j+1}$ . Al ser  $E_{j+1}$  el nuevo cociente de la división, será igual al cociente que había hasta el momento ( $E_j$ ) más un nuevo termino, que será el  $f_{j,0}$  pues el divisor ( $\tilde{A}$ ) es polinómico. Por tanto:

$$E_{j+1}(z^{-1}) = E_j(z^{-1}) + e_{j+1,j}z^{-j} \quad \text{con} \quad e_{j+1,j} = f_{j,0} \quad (2.71)$$

Teniendo en cuenta que el nuevo resto será el resto anterior menos el producto del cociente por el divisor, los coeficientes del polinomio  $F_{j+1}$  se pueden expresar como:

$$f_{j+1,i} = f_{j,i+1} - f_{j,0}\tilde{a}_{i+1}; \quad i = 0 \dots na \quad (2.72)$$

En resumen, la forma de obtener los polinomios  $E_j$  y  $F_j$  es la siguiente:

1. Comenzar con  $E_1 = 1, F_1 = z(1 - \tilde{A})$
2. Ir añadiendo nuevos términos a  $E_j$  con  $e_{j+1,j} = f_{j,0}$
3. Calcular  $f_{j+1,i} = f_{j,i+1} - f_{j,0}\tilde{a}_{i+1}; \quad i = 0 \dots na$  (siendo  $f_{j,na+1} = 0$ ).

El polinomio  $G_{j+1}$  puede ser obtenido recursivamente como sigue:

$$G_{j+1} = E_{j+1}B = (E_j + f_{j,0}z^{-j})B = G_j + f_{j,0}z^{-j}B \quad (2.73)$$

Es decir, los primeros  $j$  coeficientes de  $G_{j+1}$  serán idénticos a los de  $G_j$  mientras que el resto viene dado por:

$$g_{j+1,j+i} = g_{j,j+i} + f_{j,0}b_i \quad \text{para } i = 0 \dots nb \quad (2.74)$$

Para resolver el GPC es necesario obtener el conjunto de señales de control  $u(t), u(t+1), \dots, u(t+N)$  que minimizan la ecuación de coste. Al tener el proceso un retardo de  $d$  periodos de muestreo, la salida solo se verá influenciada por la señal  $u(t)$  después del instante  $d+1$ . Los valores  $N_1$ ,  $N_2$  y  $N_u$  que marcan los horizontes pueden ser definidos como  $N_1 = d+1$ ,  $N_2 = d+N$  y  $N_u = N$ . No tiene sentido hacer  $N_1 < d+1$  ya que los términos de la ecuación de coste, solo dependerán de las señales de control pasadas. Por otro lado, haciendo  $N_1 > d+1$  los primeros puntos de la secuencia de salida, que serán los mejor estimados, no se tendrán en cuenta.

El conjunto de las  $j$  predicciones óptimas:

$$\hat{y}(t+d+1|t) = G_{d+1}\Delta u(t) + F_{d+1}y(t) \quad (2.75)$$

$$\hat{y}(t+d+2|t) = G_{d+2}\Delta u(t+1) + F_{d+2}y(t) \quad (2.76)$$

.

.

.

$$\hat{y}(t+d+N|t) = G_{d+N}\Delta u(t+N-1) + F_{d+N}y(t) \quad (2.77)$$

Puede ser escrito en forma matricial como:

$$y = Gu + F(z^{-1})y(t) + G'(z^{-1})\Delta u(t-1) \quad (2.78)$$

Donde:

$$y = \begin{bmatrix} \hat{y}(t+d+1|t) \\ \hat{y}(t+d+2|t) \\ \vdots \\ \hat{y}(t+d+N|t) \end{bmatrix} \quad u = \begin{bmatrix} \Delta u(t) \\ \Delta u(t+1) \\ \vdots \\ \Delta u(t+N-1) \end{bmatrix} \quad (2.80)$$

$$G = \begin{bmatrix} g_0 & 0 & \cdots & 0 \\ g_1 & g_0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g_{N-1} & g_{N-2} & \cdots & g_0 \end{bmatrix}$$

$$G'(z^{-1}) = \begin{bmatrix} z(G_{d+1}(z^{-1}) - g_0) \\ z^2(G_{d+2}(z^{-1}) - g_0 - g_1z^{-1}) \\ \vdots \\ z^N(G_{d+N}(z^{-1}) - g_0 - g_1z^{-1} - \cdots - g_{N-1}z^{-(N-1)}) \end{bmatrix}$$

$$F(z^{-1}) = \begin{bmatrix} F_{d+1}(z^{-1}) \\ F_{d+2}(z^{-1}) \\ \vdots \\ F_{d+N}(z^{-1}) \end{bmatrix}$$

Al depender los últimos términos de la ecuación (2.80) solo del pasado, pueden agruparse en  $\mathbf{f}$ , dando lugar a:

$$y = Gu + f \quad (2.81)$$

Que es la misma expresión que se obtiene para el DMC, aunque en este caso la respuesta libre es distinta.

### 2.3.20.3. Obtención de la ley de control

Entonces la ecuación de la función de coste puede escribirse como:

$$J = (Gu + f - w)^T(Gu + f - w) + \lambda u^T u \quad (2.82)$$

Donde:

$$w = [w(t + d + 1) \quad w(t + d + 2) \quad \cdots \quad w(t + d + N)]^T \quad (2.83)$$

La ecuación de la función de coste entonces se puede poner como:

$$J = \frac{1}{2}u^T H u + b u + f_0 \quad (2.84)$$

Donde:

$$H = 2(G^T G + \lambda I) \quad (2.85)$$

$$b = 2(f - w)^T G \quad (2.86)$$

$$f_0 = (f - w)^T (f - w) \quad (2.87)$$

El mínimo de  $J$ , siempre que no existan restricciones en la señal de control, puede ser calculado igualando a cero el gradiente de  $J$ , lo cual conduce a:

$$u = -H^{-1}b^T \quad (2.88)$$

Debido al uso de la estrategia deslizante, solo se aplica realmente el primer elemento del vector  $u$ , repitiendo de nuevo el mismo procedimiento al siguiente instante de

muestreo. La solución propuesta involucra la inversión (o al menos la triangularización) de una matriz de dimensión  $N \times N$ , lo cual conlleva una gran carga de cálculo. El concepto ya usado en otros métodos de horizonte de control se emplea con la finalidad de reducir la cantidad de cálculo, asumiendo que las señales de control permanecerán en un valor constante a partir del intervalo  $N_u < N$ . Por tanto la dimensión de la matriz que hay que invertir queda reducida a  $N_u \times N_u$ , quedando la carga de cálculo reducida (en el caso límite de  $N_u = 1$ , se reduce al caso escalar) aunque restringiendo la robustez.

#### **2.3.20.4. Aplicaciones de los controles PID y Predictivo en sistemas de tratamiento de aguas.**

#### **2.3.20.5. Análisis rápido de las Aplicaciones Industriales del Control Tradicional PID**

Los controladores PID son suficientes para resolver el problema de control de muchas aplicaciones en la industria, particularmente cuando la dinámica del proceso lo permite en general procesos que pueden ser descritos por dinámicas de primer y segundo orden y los requerimientos de desempeño son básicos, generalmente limitados a especificaciones del comportamiento del error en estado estacionario y una rápida respuesta a cambios en la señal de referencia.

Los fabricantes proporcionan los controladores PID de variadas formas. Existen sistemas del tipo “*stand alone*” con capacidad para controlar uno o varios lazos de control. Estos dispositivos son fabricados en el orden de cientos de miles al año. El controlador PID es también un actor importante en los sistemas de control distribuido, ya que proporciona regulación a nivel local de manera eficaz. Por otro lado, pueden también venir empotrados, como parte del equipamiento, en sistemas de control de propósito especial, formando así parte integrante de la aplicación.

Su uso extensivo en la industria es tal que el 95% de los lazos de control que existen en las aplicaciones industriales son del tipo PID, de los cuales la mayoría son



controladores PI, lo que muestra la preferencia del usuario en el uso de leyes de control muy simples. En la actualidad, el control PID dispone de una serie de prestaciones, que en el pasado han sido consideradas como secretos de los fabricantes. Un par de ejemplos típicos de este tipo de prestaciones son las técnicas de conmutación de modos de control y el anti windup del integrador.

Los algoritmos actuales se combinan con funciones lógicas y secuenciales y una serie de mecanismos y funciones adicionales para adecuarse a los requerimientos de los modernos sistemas de control y automatización industrial, lo que da lugar a dispositivos especializados para el control de temperatura, velocidad, distribución de energía, transporte, máquinas, herramientas, reacción química, fermentación, entre otros. El desarrollo de los sistemas de control PID está también influenciado por el desarrollo en el campo de la comunicación de datos de campo, lo que ha permitido su inserción como módulos importantes en los esquemas de control distribuido.

Si bien a nivel industrial existen grupos de ingenieros de procesos e instrumentación que están familiarizados con los controladores PID, en el sentido de que llevan una práctica continua de instalación, puesta en marcha y operación de sistemas de control con lazos PID, también es cierto que existe mucho desconocimiento acerca de los detalles involucrados en la construcción de los algoritmos. Prueba de ello es que muchos controladores son puestos en modo manual y, entre aquellos que están en el modo automático, frecuentemente la acción derivativa se encuentra desactivada. La razón es obvia, el ajuste de los controladores es un trabajo tedioso y requiere de cierta intuición basada en los principios de funcionamiento tanto de los procesos físicos controlados como de la misma teoría de control. Otras razones del pobre desempeño tienen que ver con problemas en la instrumentación y los equipos y accesorios utilizados en el lazo de control, como son los sensores, actuadores, dispositivos de comunicación, interfaces de adquisición de datos, entre otros. Los principales problemas de los actuadores están generalmente relacionados con fallas de dimensionamiento, (en general están subdimensionados) y los problemas de histéresis que introducen no linealidades importantes. Por su parte, los dispositivos asociados con la medición de las señales de la planta (sensores, dispositivos de

adquisición de datos, adecuación de señales y sistemas de comunicación de datos de campo) a menudo se encuentran mal calibrados y, es frecuente que estén dotados de mecanismos inadecuados de filtraje pobre o bien de filtraje excesivo (producido en los llamados sensores inteligentes). Más aún, muchos sistemas de control no cumplen con las condiciones mínimas para su operación en tiempo real.

Es así que quedan por hacer muchas mejoras sustanciales con respecto al desempeño de los procesos industriales. Por su parte, la industria, a medida que la demanda de productos requiere una mejor calidad, está obligada a mejorar sus lazos de control, lo que a su vez requiere un mayor conocimiento acerca de los procesos y de sus mecanismos de regulación.

#### **2.3.20.6. Análisis rápido de las aplicaciones del Control Predictivo Generalizado**

Es un método de control propuesto por Clarke y emplea un modelo CARIMA para la predicción de la salida y la perturbación que viene dada por un ruido blanco coloreado. Como en la práctica es difícil encontrar el verdadero valor del ruido, se puede emplear como parámetro de diseño el rechazo de perturbaciones lo que mejora la robustez. La predicción óptima se lleva a cabo resolviendo una ecuación diofántica, lo cual puede hacerse eficazmente de forma recursiva.

Este algoritmo, al igual que otros que usan el modelo de función de transferencia y se puede implementar fácilmente en forma adaptativa usando un algoritmo de identificación en línea como los mínimos cuadrados recursivos. El GPC usa una función objetivo cuadrática teniendo en cuenta el error y el esfuerzo de control, además de factores de ponderación para ambos términos que pueden ser constantes o variables con el tiempo.

Existen aplicaciones de control predictivo a diversos procesos que van desde procesos tan diversos como robots (Gómez Ortega y Camacho, 1996) a la anestesia

clínica (Linkers y Mahfonf, 1994). Aplicaciones en la industria de cemento, brazos robóticos se pueden encontrar descritas en (Clarke, 1988), mientras que desarrollos para columnas de destilación, generadores de vapor y servos se presentan en (Richalet, 1993). El control predictivo presenta una serie de ventajas sobre otros métodos, entre las que se pueden citar las siguientes:

Es una técnica particularmente atractiva para los operadores que requiere pocos conocimientos de control porque los conceptos son muy intuitivos y la sintonización relativamente simple.

Se puede utilizar para controlar una gran variedad de procesos, desde procesos muy simples hasta procesos con dinámicas complejas como procesos con grandes tiempos muertos, procesos de fase no mínima, procesos inestables o procesos multivariables,

Su carácter predictivo lo hace compensar intrínsecamente los tiempos muertos.

Introduce un control anticipativo (*feed forward*) que de forma natural compensa las perturbaciones medibles.

La ley de control resultante es de fácil implementación.

Es muy útil cuando se conocen las referencias futuras, como en el caso de robótica o procesos por lotes.

Permite tratar las restricciones de una forma sistemática y conceptualmente muy simple durante la fase de diseño.

### **2.3.20.7. Aplicaciones de control Predictivo en Plantas de Tratamiento de Agua**

Durante la última década, la comunidad investigadora ha hecho hincapié en la importancia del control integrado para toda la planta de tratamiento y la industria de

aguas residuales empieza a darse cuenta de los beneficios de este enfoque. Las plantas biológicas de tratamiento de aguas residuales (ETAR) se consideran sistemas complejos no lineales y su control es muy desafiante, debido a la complejidad de los procesos biológicos y bioquímicos que tienen lugar en la planta debido a las fluctuaciones del caudal afluente. Además, existen requerimientos de efluentes como el definido por la Unión Europea (Directiva Europea 91/271 de aguas residuales urbanas) con sanciones económicas, lo que ha hecho que sea necesario para modernizar las plantas de tratamiento de aguas residuales existentes para cumplir con normas.

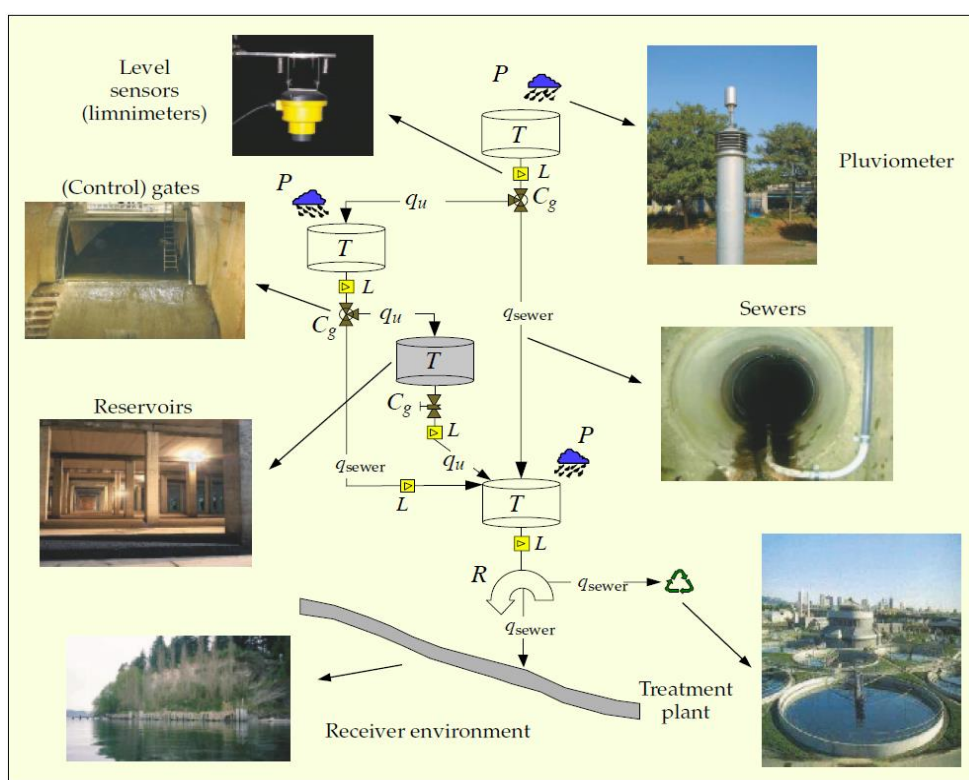


Figura # 2.18. Componentes típicos que se encuentran en el esquema de una red de alcantarillado. Fuente: [ 3]

La evaluación y comparación de las diferentes estrategias de control se basan en la Obtención Modelo de Referencia y la Simulación del Modelo Referencia, desarrollado por la Asociación Internacional de Investigación y Control de Contaminación del Agua. Estos puntos definen un diseño de planta, cargas, procedimientos de prueba y

criterios de evaluación, además proporcionan también una estrategia de control por defecto.

Existen tratamientos biológicos de aguas residuales que se realizan utilizando reactores de lodos activados. La evaluación se basa en una semana de funcionamiento de la planta, luego se extiende a una simulación completa, incluyendo también un clarificador, digestores anaeróbicos, espesantes, sistemas de deshidratación y otros subprocesos. La evaluación se basa en un año de datos de operación.

La aplicación de diferentes estrategias de control se centran en la obtención de mejoras en el rendimiento de la planta. Existe literatura con muchos trabajos que presentan diferentes métodos para el control. La mayoría de las obras utilizan un modelo de referencia como escenario de trabajo. En algunos casos, se enfocan en evitar las variaciones de los límites de efluentes aplicando un control directo a las variables del efluente. Sin embargo, necesitan fijar los puntos de ajuste de los controladores en niveles inferiores para garantizar su objetivo, lo que puede implicar un gran aumento de costos. Por lo general, se ocupan de la estrategia básica de control del oxígeno disuelto (SO) de los depósitos aireados y de la concentración de nitrógeno en nitratos (SNO) o proponen estructuras de control jerárquicas que regulan los puntos de ajuste de SO, de acuerdo con algunos estados de la planta, normalmente concentración de nitrógeno amoniacal y amoníaco (SNH) y valores de SON.

Otros trabajos existentes usan el modelo de la planta de prueba. Algunos de ellos están enfocados en la implementación de estrategias de control en el tratamiento biológico. Específicamente, proponen estrategias de control basadas en el control del SO mediante la manipulación del coeficiente de transferencia de oxígeno, el control jerárquico mediante la manipulación de los valores de ajuste de SO, el control SNO<sub>2</sub> mediante la manipulación del caudal de reciclado interno, control de los sólidos suspendidos (TSS) mediante la manipulación del caudal de desgaste (Qw).

La evaluación y comparación de diferentes estrategias de control se han basado en dos puntos de referencia; En primer lugar, en el modelo de la planta que se ha utilizado como de pruebas, ya que requiere un menor tiempo de simulación y por lo tanto diferentes estrategias de control se pueden probar más rápidamente. Posteriormente, el funcionamiento de estas estrategias de control, añadiendo algunas modificaciones, ha sido probado en una planta piloto de referencia. Se trata de una versión actualizada de la primera, más cercana a una planta real, que se extiende hasta un año de simulación, con un modelo de planta mucho más complejo, incluyendo también un proceso de pretratamiento y procesos de tratamiento de lodos. En este caso, se ha requerido una predicción del efluente para la selección de la estrategia de control a aplicar. En cualquier caso, las estrategias de control han sido aplicados en la zona de los reactores de lodos activados.

A continuación, se ha aplicado un control jerárquico para mejorar la calidad de los efluentes y reducir los costos operativos. Se ha implementado en el nivel inferior, donde los controladores MPC + FF rastrean el SO<sub>5</sub> en los tanques aireados mejorando el rendimiento de control con una reducción ISE de más del 90% en comparación con los controladores PI por defecto. El rendimiento de control de los controladores MPC + FF también se ha comparado con los trabajos referenciados, mostrando la mejora del método propuesto y, por tanto, el seguimiento exitoso.

En primer lugar, para la selección del controlador de nivel superior, se propusieron tres alternativas diferentes, manipulando sólo SO<sub>5</sub> set-point: un MPC, una función affine y un FC. Fueron probados y comparados en las tres condiciones climáticas: seco, lluvia y tormenta. Como resultado, EQI y OCI se redujeron significativamente. Los resultados de OCI y EQI con mayor nivel de función afín y FC de nivel superior fueron similares y mejores que los obtenidos con MPC de nivel más alto. Esto se debe al hecho de que el nivel más alto MPC intenta mantener el valor de SNH<sub>5</sub> a un nivel de referencia, pero esto no es posible. Por este motivo, se probaron las alternativas de función afín y FC para el nivel superior con la idea de variar el SO<sub>5</sub> basado en el SNH<sub>5</sub> medido, teniendo en cuenta las variables comportamiento en los procesos biológicos, pero sin intentar mantener SNH<sub>5</sub> en una referencia fija. Por lo tanto,

mejorar el proceso de nitrificación cuando SNH, 5 aumenta, para oxidar más SNH y empeorar el proceso de nitrificación cuando SNH, 5 disminuye para generar menos SNO y reducir los costos. Para asegurar el ajuste correcto de los controladores y, por tanto, la relación correcta entre el control aplicado y los resultados, se ha realizado un análisis de compensación entre OCI y EQI variando dos parámetros de sintonización para cada controlador.

### **2.3.21. Aplicaciones de control Tradicional en Plantas de Tratamiento de Agua**

En [15], se indica que, el desarrollo de una estrategia de control para una planta de tratamiento de agua, está íntimamente relacionado con el comportamiento dinámico de la planta, ya que la necesidad de control, ya sea manual o automático, es provocada por el comportamiento de este. Los sistemas de control pueden mejorar el rendimiento de las plantas de tratamiento y deben recibir más consideración tanto para las plantas existentes como para el diseño de nuevas plantas. Cuando las características de la planta a controlar son constantes, al igual que para las plantas existentes, las mejoras que se pueden obtener pueden ser limitadas, debido a una falta de flexibilidad de la planta. Sin embargo, en el diseño de una nueva planta es posible encontrar un mejor equilibrio entre el esfuerzo y el gasto dedicado a la misma y al sistema de control. El principal punto de importancia es que tanto el sistema de control como la planta controlada afectan las salidas de la planta y, por lo tanto, los dos deben diseñarse como un sistema integrado.

Actualmente la mayoría de plantas industriales, poseen algún tipo de sistemas de adquisición y control, para la supervisión de sus procesos, debido a las ventajas que estos ofrecen, entre las que se destacan la adquisición de datos en tiempo real, la configuración gráfica por medio de interfaces gráficas de fácil manejo para el operador y la comunicación con computadores remotos a través de una red, lo cual hace que se pueda llevar a cabo un control y supervisión desde cualquier sitio [16]. Las plantas de tratamiento de agua potable integran dentro del proceso de modernización, la

vinculación de estas tecnologías para un mejor manejo del proceso y de la información a cualquier nivel.

En este aspecto, en el medio local según [16], es poco el desarrollo que se ha obtenido en la automatización de los procesos de tratamiento de aguas; éste proceso se ha regulado manualmente, con base en la experiencia de los operadores. Aunque el tratamiento se ha llevado a cabo de forma eficiente, suministrando a los usuarios agua de buena calidad, según la normativa INEN, el proceso puede ser mejorado con la utilización de nuevos equipos y sistemas automáticos

#### **2.3.21.1. Etapas en el proceso de tratamiento.**

Básicamente son siete las etapas las más comunes que conforman el proceso de potabilización a saber: toma de agua, retención de sólidos sedimentables, coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección [16]. Después de este último proceso el agua está lista para su distribución.

La toma del agua (captación) es llevada a cabo en la bocatoma y el sistema de conducción hasta la planta puede ser por gravedad o por bombeo, dependiendo de su ubicación.

La retención de sólidos sedimentables tiene como objetivos:

- Proteger la planta de la posible llegada intempestiva de grandes flotantes capaces de provocar obstrucciones en las distintas unidades de la instalación y
- Separar y evacuar fácilmente las materias arrastradas por el agua que podrían disminuir la eficacia de los tratamientos siguientes o complicar la realización de los mismos.

La coagulación se realiza con el fin de eliminar la turbiedad, tanto orgánica como inorgánica, el color (real o aparente), las bacterias y otros organismos patógenos, las



algas y las sustancias que producen olores y sabores, la coagulación comienza en el mismo instante en que se agregan los coagulantes al agua y dura solamente fracciones de segundo. Básicamente, consiste en una serie de reacciones físicas y químicas entre los coagulantes, la superficie de las partículas, la alcalinidad y el agua misma.

El proceso de coagulación es reforzado con la floculación, fenómeno por el cual las partículas ya desestabilizadas chocan, unas con otras, para formar coágulos mayores. La floculación es estimulada por un mezclado lento que junta poco a poco los flóculos.

La sedimentación es el proceso de remoción de partículas más pesadas que el agua, por acción de la fuerza de gravedad. Mediante este proceso son eliminadas, empleando un tiempo de retención adecuado a los materiales en suspensión.

El objetivo básico del proceso de filtración es el de remover partículas suspendidas en el agua, pasándolas a través de un medio poroso, como arena, antracita, entre otros. La filtración remueve casi la totalidad de los sólidos sedimentables.

La desinfección o cloración significa una eliminación de la población de bacterias, por medio de la aplicación de cloro, en ocasiones el proceso de desinfección es complementado con la estabilización, que consiste en la dosificación de cal con el fin de obtener un adecuado nivel de pH en el agua de suministro.

En el proceso de tratamiento de aguas, la instrumentación está relacionada con la medición de las principales variables de proceso, estas son: caudal, nivel, presión, turbiedad, pH, cloro residual, temperatura, conductividad, sólidos disueltos totales, demanda de oxígeno disuelto, para lo cual hay que tener en cuenta no sólo los elementos primarios de medición sino también los elementos auxiliares y los elementos finales de control.

### **2.3.21.2. Control del proceso**

Para el control del proceso de tratamiento de agua se deben considerar las principales variables del proceso, para las cuales se presentan los esquemas de control más adecuados, además es importante vincular dentro del sistema de automatización el proceso de lavado de filtros y tener en cuenta que se tiene que llegar a una supervisión completa de la planta, con el fin de lograr un manejo más adecuado y una sistematización de la información.

A continuación, se realiza una vista rápida de los sistemas más adecuados para el control de estas variables mencionando las más utilizadas y que los autores de [15, 16] describen en su documento:

- **Control de turbiedad**

En el tratamiento del agua potable es de vital importancia la medición de turbiedad, tanto del agua tratada como del agua cruda. Sin embargo, su control se hace un tanto complejo porque depende de varios factores tales como caudal de entrada, pH, nivel de lodos (residuo floculento de un proceso) en los reactores, velocidad de los agitadores y lo más importante, de un adecuado sistema de dosificación del floculante.

- **Control de adelanto de flujo-turbiedad**

El control anticipativo (*feed-forward*) parte de la medida de una o más variables de entrada y actúa simultáneamente sobre la variable manipulada que produce la salida deseada del proceso. En este tipo de control se tienen en cuenta las variaciones en la turbiedad de entrada (adelanto de turbiedad) y con el fin de ajustar el bucle de control a las características dinámicas del proceso se lleva a cabo la medición del caudal de entrada, que es la otra variable que va a incidir en el suministro del floculante. Si se

presenta un cambio brusco de flujo o de turbiedad, el sistema de control responderá antes que se detecte, a través de la señal de realimentación de turbiedad, la correspondiente variación de turbiedad residual.

La señal de adelanto de turbiedad es multiplicada por la señal del flujo de entrada, proporcionando la demanda de flujo de coagulante para lograr el punto de consigna. Esta señal de relación, flujo turbiedad de entrada es corregida por la adición del controlador de realimentación de turbiedad a la salida, lo cual garantiza un control dinámico sin *offset*.

Una alternativa importante para el control de turbiedad es recurrir a la dosificación del polímero, cuando las condiciones del agua cruda así lo exijan (altas turbiedades y olores desagradables). Por esta razón se puede pensar en un sistema de control para la dosificación de dos tipos de coagulantes sulfato de aluminio y polímero. Este sistema proporciona una mayor confiabilidad en cuanto al control de calidad del agua potable.

- **Control de pH**

El pH da una medición indirecta del grado de acidez o alcalinidad de una solución. Los términos "alcalinidad" y "acidez" se definen normalmente por concentraciones equivalentes de las sustancias tituladoras. Aunque el pH no es una medición directa de la acidez y la alcalinidad, constituye uno de los criterios más importantes en los sistemas físicos, electroquímicos y biológicos, y tienen una gran aplicación en el tratamiento de agua potable. El esquema más adecuado de control de esta variable es el de adelanto de pH-flujo de entrada, que tiene en cuenta las variaciones presentadas en el flujo actuando sobre la válvula de control para lograr un nuevo ajuste de la dosificación.

- **Control de adelanto de pH-flujo de entrada**

El control de adelanto de pH fue complejo de implementar antes de la llegada de los microcontroladores. La potencia computacional, exacta y flexible de estos ha facilitado

el desarrollo de un método que presenta menos problemas de funcionamiento y es relativamente simple y más efectivo, basándose en la curva de titulación. Realmente, el generador de la señal de adelanto puede ser visto como un controlador proporcional, solamente de la demanda lineal de cal, con una ganancia de modo proporcional igual a 1.

La dosificación de cal por flujo de entrada requerido para ir del valor del pH del afluente al set point de pH es calculado a partir de la curva de titulación programada en el microprocesador. Esta señal se multiplica por la señal de flujo de entrada, proporcionando la demanda de flujo de cal para llegar al valor establecido en el set point. Esta demanda de flujo puede ser corregida por la adición de un controlador de realimentación de pH a la salida del 50%. Para controlar correctamente el proceso, será necesario que el controlador disponga de autoajuste de las acciones para que pueda cambiar su ganancia de acuerdo con la zona donde esté el pH, lo que representará un trabajo continuo de las rutinas de identificación del proceso y de adaptación de los coeficientes del controlador.

.

- **Control de cloro residual**

El cloro residual, es una variable de tipo analítico muy importante para cumplir con la calidad del agua tratada. Su control continuo permite establecer la cantidad bacteriológica del agua y evita que se presenten futuras contaminaciones a lo largo de la red de distribución. Con un sistema de control de adelanto de flujo, se tiene un sistema más preciso de la dosificación de cloro al tener en cuenta las variaciones en el caudal de agua de entrada, lo cual influye sobre el cloro resultante (cloro residual). Además del caudal se puede tener en cuenta las variaciones en la turbiedad de entrada, ya que, a mayor turbiedad, mayor debe ser la demanda de cloro debido a que la presencia de mayor cantidad de sustancias y microorganismos alteran el cloro residual; con esta nueva consideración se tiene un sistema de adelanto de flujo-turbiedad que hace más preciso el control. Debido a los retardos de tiempo del proceso, el controlador puede ser configurado con una acción proporcional integral,

lográndose un cambio en la acción del controlador a una velocidad que concuerde con el tiempo natural de reacción del proceso.

- **Control de nivel de lodos**

El manto de lodos es la capa que separa el agua en tratamiento del agua clarificada presente en el reactor. Su función es principalmente ser un filtro que ayuda a remover las partículas presentes en el agua, después del proceso de coagulación y floculación. Si se pretende implementar un control automático de la cantidad de lodos presentes en el reactor se puede considerar el nivel del mismo.

- **Sistema de control de nivel de lodos**

El control de esta variable se puede realizar a partir del conocimiento del nivel mínimo y máximo de estos lodos en el reactor, de tal forma que cuando se detecte el valor máximo configurado en el controlador, éste envíe una señal de apertura a la válvula de deslode para que inmediatamente se inicie el proceso de remoción de lodos, el cual se lleva a cabo hasta que el sensor detecte el nivel mínimo ajustado en el controlador, momento en el que la válvula de deslode debe cerrarse.

Por esta razón, el control de nivel de lodos se puede implementar con un sencillo control todo o nada.

- **Control de oxígeno disuelto.**

El control del oxígeno disuelto es un parámetro importante en el proceso de lodos activados, ya que el oxígeno disuelto es esencial para la respiración biológica de los microorganismos. La concentración del mismo (DO) debe mantenerse dentro de límites razonables, independientemente de la carga de DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno), ya que tanto la sub-aireación como la sobre-aireación disminuirán la tasa de metabolismo. La sub-aireación puede causar problemas tales como bulto de lodo, lo que conduce a la mala calidad de los efluentes, mientras que la sobre-

aireación puede causar un corte innecesario de las partículas de floc, resultando en pobres características de sedimentación.

El oxígeno disuelto se detecta en cada cuenca de aireación por el analizador y la sonda de oxígeno disuelto de Weston y Stack. Se genera una señal de error en función de la diferencia entre las concentraciones de oxígeno disuelto deseadas y medidas en una cuenca de aireación designada. Un controlador PID usa esta señal para producir un comando de velocidad de soplado de aire para las tres cuencas de aireación. En el proyecto actual de Palo Alto, la salida del controlador se imprime en el teletipo y el operador ajusta manualmente el caudal de aire cambiando las velocidades del soplador de aire.

Camacho en [13], ha indicado que no cree que sea práctico aplicar el control por computadora a plantas de tratamiento de aguas residuales por dos razones: (1) no hay suficiente conocimiento disponible sobre los procesos para preparar un modelo viable y (2) los sensores no están disponibles o no son suficientemente fiables para proporcionar información al ordenador, incluso si los modelos estuvieran disponibles. Ambas declaraciones representan argumentos comúnmente utilizados contra el control por computadora y son consideraciones que el diseñador debe tomar en cuenta.

Con respecto a la primera afirmación, se admite fácilmente que la modelización dinámica de los procesos de tratamiento de aguas residuales, sobre la que deben basarse las estrategias de control, todavía están en sus inicios. Sin embargo, un número razonable de estos modelos y estrategias de control sugeridas a través de la simulación por ordenador utilizando estos modelos ya están disponibles. Varios están listos para el siguiente paso que es la verificación de campo a través de estudios de planta piloto. No obstante, no es válido el argumento de que el control por computadora no es posible debido a la falta de modelos viables, ya que es posible implementar el control por computadora de forma empírica, sin un modelo dinámico, como muchas plantas de tratamiento han sido diseñadas en los últimos años sobre una base empírica. En estos controladores, por ejemplo, el ordenador puede ser

programado principalmente para los algoritmos clásicos de control tales como on-off, PID, relación, cascada, entre otros, como se han utilizado durante años en sistemas de control analógicos.

La principal ventaja de utilizar un ordenador digital para el control; es que la estrategia de control puede cambiarse fácilmente mediante la reprogramación (cambios de software) de la computadora mientras que los controladores convencionales requieren reemplazo o recableado (cambios de hardware). Quizás el aspecto clave del control por computadora es que proporciona flexibilidad con respecto al procesamiento de la información.

Por lo que se refiere a la segunda declaración, también debe admitirse que hay muchos sensores necesarios que no están disponibles o son suficientemente fiables para el uso en línea en las plantas de tratamiento de aguas residuales. Algunos de los problemas asociados con la fiabilidad del sensor pueden ser superados usando sensores redundantes cuando el precio del sensor primario es relativamente bajo y el valor de la información obtenida por el sensor es alto. Un ejemplo es el conjunto de tres sondas de oxígeno disuelto utilizadas en un computador analógico de propósito especial para el proceso de lodos activados. Una lógica adecuada puede programarse en el ordenador para indicar cuál de los múltiples sensores está dando una mala lectura y por lo tanto necesita recalibración o reemplazo. La provisión de potencia de cálculo también puede permitir el cálculo de una variable importante que no puede medirse a partir de las variables que pueden medirse. Brouzes en [15], ha utilizado este principio para calcular la tasa de crecimiento específico del lodo activado a partir de las mediciones de la concentración de oxígeno disuelto y de la tasa de flujo de aire influente.

- **Otras variables**

Además de las señales consideradas, existen otras que en un momento determinado pueden requerir de un control automático, con el fin de llevar a cabo un control más amplio de la planta o del proceso. Dentro de estas variables tenemos nivel y flujo, para las cuales se van a plantear los esquemas básicos de control.

El control de nivel es utilizado para mantener los niveles de agua, o cualquier fluido, dentro de un tanque o cisterna, de tal forma que se pueda regular el suministro sin afectar la cantidad de fluido requerido para almacenamiento.

El control de flujo es indispensable cuando se requiere regular el suministro de agua que está pasando por una tubería, logrando de esta forma mantener el caudal y la presión del líquido a determinadas condiciones exigidas por una dosificación o, en última instancia, por la distribución a la ciudad.

- **Control de operación de los filtros**

Los filtros desempeñan un papel importante dentro del proceso de tratamiento de agua potable, de ahí que el control de las válvulas que intervienen en su operación debe cumplir con los requerimientos básicos que garanticen un suministro de agua de óptima calidad, facilitando un consumo racional tanto de agua de lavado como de energía, además de sistematizar la información referente a la operación de los mismos.



## CAPÍTULO 3

### 3. DISEÑO E IMPLEMENTACION DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO

#### 3.1. Diseño del sistema de tratamiento.

El proceso de separación por flotación diseñado en este trabajo, está basado en la inyección de aire atmosférico, que utiliza agua como fluido motriz. En este proceso, el contacto aire - agua se realiza mediante boquillas inyectoras de tipo Venturi, que realizan la introducción directa, en el agua a tratar, de pequeñas burbujas de aire, mediante la utilización de un difusor de burbujas, situados en el fondo del tanque de flotación, simulando un proceso DAF, pero con ventajas de un proceso IAF, especialmente en lo referente a la economía del proceso.

El funcionamiento del sistema consiste en recircular parte del agua por tratar presente en una celda de flotación, para lo que se debe utilizar un sistema de bombeo para enviar el fluido a un Vénturi abierto a la atmósfera. Al producirse el cambio de velocidad dentro de este, se produce un vacío que induce el aire hacia dentro del flujo, mezclándolo con el agua en forma de microburbujas. Esta corriente puede entonces ser distribuida por un arreglo de tubería dentro de la piscina para producir la flotación.

Este sistema es muy eficiente debido al gran incremento en el área interfacial como consecuencia de la generación de una gran cantidad de microburbujas, de tamaño promedio entre 150 y 250  $\mu\text{m}$ . Es un sistema flexible que permite, haciendo algunos ajustes en su configuración, cumplir funciones adicionales como disminución de sustancias contaminantes, homogeneización, neutralización, aireación, tratamiento químico/biológico, entre otros, procesos necesarios para el tratamiento integral de aguas residuales.

Las partes esenciales de un sistema de flotación de aire con presurización en la recirculación son los siguientes:

- Tanque de flotación, donde tiene lugar la separación de los contaminantes.
- Sistema de adición de aire.
- Equipo de bombeo para llevar a cabo la presurización.

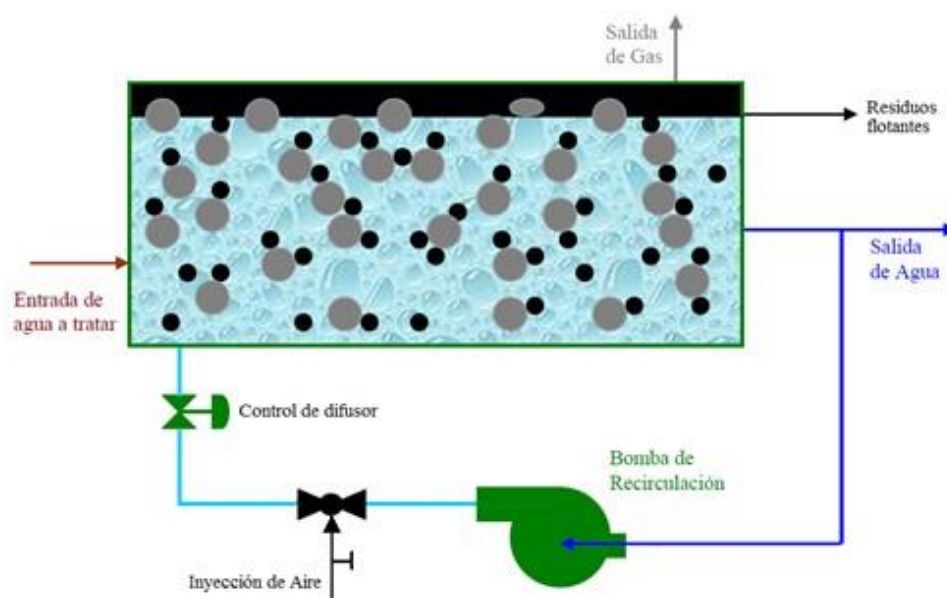


Figura # 3.19. Esquema del sistema de flotación. Fuente: [10]

Principales variables que se consideran afectan a los sistemas de flotación, se pueden clasificar en cuatro tipos a saber:

### Variables de perturbación

- Composición mineralógica.
- Grado de oxidación del mineral.
- Fluctuación de la distribución del tamaño del alimento.
- Fluctuación de las leyes del alimento.
- Viscosidad y densidad de la pulpa.
- Caudal de la pulpa.

- Características del agua (pH, dureza).
- pH natural del mineral de cabeza.
- Hold-up.
- Cristalización del mineral.

### **Variables controladas**

- Ley o grado
- Recuperación
- Porcentaje de sólidos del alimento.
- Tonelaje tratado.
- Nivel de pulpa.
- Razón del BIAS.
- Tamaño de burbuja.
- Longitud de la zona de colección.

### **Variables medibles**

- Ensaye químico (Concentrado, relaves, entre otros.)
- Velocidad de flujo volumétrico (Alimento, relave, agua de lavado)
- Densidad de pulpa
- Nivel de pulpa
- Eh
- pH
- Distribución de tamaño
- Adiciones de reactivo
- Adición de surfactante
- Razón del BIAS
- Hold-up

### **Variables manipulables**

Caudal volumétrico (Alimento, relave, agua de lavado).

Densidades de pulpa.

Nivel de pulpa.

Razón del BIAS.

Adición de reactivos y surfactante.

pH.

Eh.

Cantidad de aireación.

Los parámetros de operación sujetos a control incluyen:

La proporción de aireación.

La velocidad del Mecanismo.

El nivel de la pulpa.

La profundidad de espuma.

La dosificación del reactivo.

Cantidad de agua de lavado del alimento

#### **3.1.1. Normas generales de diseño**

El sistema utilizado de forma generalizada, es el de flotación por disolución de aire en la recirculación.

Los tanques de flotación circulares no deben ser mayores de 20 m de diámetro, por los problemas mecánicos que ocasionarían.

Si el diámetro determinado en los cálculos es mayor del valor indicado anteriormente, se instalarán unidades múltiples, de tal forma que el diámetro unitario sea inferior a 20 m.

En los tanques de flotación rectangulares, el ancho no debería sobrepasar los 6 m y la longitud 20 m. En el caso de requerir más superficie se instalarán unidades múltiples.

Los tanques de flotación, deben disponer de barrederas de fondo, con el fin de arrastrar los sólidos no flotados y por tener más densidad que el agua puedan decantar en el fondo.

El sistema de accionamiento de las rasquetas debe disponer de un variador de velocidad, con el fin de ajustar la misma a las necesidades de proceso. Una velocidad de arrastre muy lenta, puede conllevar a la rotura de las espumas formadas y el retorno de los sólidos al agua, con la correspondiente pérdida de rendimiento.

La concentración normal de las espumas, se encuentra en un orden de magnitud entre el 3% y 3,5% de sólidos en suspensión, pudiendo aumentar esta concentración mediante el empleo de polielectrolitos.

En el caso de que el agua de alimentación tenga coloides o emulsiones será preciso llevar a cabo un proceso de coagulación floculación previa para su eliminación.

Al igual que en el proceso de decantación, los coloides y emulsiones no se separan por flotación.

- La eliminación de sólidos en suspensión y grasas y aceites en el tratamiento de aguas residuales por este sistema, se alcanza unos rendimientos normales entre el 80-90%.
- El proceso de flotación, es igualmente utilizado para el espesamiento de fangos biológicos o de baja densidad, utilizando, en este caso, otros parámetros de diseño.

- Es importante que estos equipos trabajen de forma continua, ya que al arrancar hay que ajustar las condiciones de aire del proceso.
- En el ajuste del sistema de despresurización, hay que lograr que se formen burbujas de un tamaño muy fino, de forma que para la misma cantidad de aire utilizada se formen un número elevado de burbujas y en consecuencia se capturen más sólidos. Por otra parte, las burbujas de tamaño elevado se rompen con gran facilidad.

Esta forma de operar conlleva unas velocidades ascensionales bajas, como queda reflejado en las cargas hidráulicas recomendadas.

### 3.1.2. Parámetros de diseño

Para la implementación del sistema de flotación se deben realizar ensayos a nivel de piloto, para determinar los parámetros de diseño. Se recomiendan los siguientes criterios dados en RAS-2000 [17], para los sistemas de potabilización, que se detallan:

1. Sistema de saturación de aire
  - a) La presión debe estar entre 350 kPa a 420 kPa.
  - b) La razón de recirculación de agua presurizada debe ser de 8 a 10 g de aire/m<sup>3</sup> de agua tratada.
2. La carga superficial debe ser de 200 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>.día) a 300 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>.día).
3. Tiempo de contacto mínimo de 5 min a 15 min.

Así mismo se consideran los parámetros de diseño para un sistema de DAF en aguas residuales.

Parámetro	Valor
Relación Aire/Sólidos (kg/kg)	0.03 - 0.09
Presión de trabajo (atm.)	2.5 (4 a 6)
Tasa de presurización (*) (%)	10 – 40

Carga hidráulica (velocidad descendional) (m/h)	2.5 - 10 (3,5 a 3)
Tiempo de retención hidráulica (TRH) (minutos)	5 – 40
Carga de solidos (carga másica) kg/m <sup>2</sup> /h	4.5 – 5 no limitante

Tabla # 2. Principales parámetros de diseño de un sistema DAF en aguas residuales. Fuente [18]

### 3.1.3. Dimensionamiento

La eficacia de un sistema de flotación por aire disuelto está en función de la relación entre kilos de aire utilizado y kilos de sólidos separados. Esta relación varía entre 0.005 y 0.09 kg aire/kg solidos separados. El valor exacto a utilizar depende entre otros factores de:

- La presión de trabajo del sistema, que normalmente varía entre 4 y 7 atmosferas
- La concentración y naturaleza de los sólidos en suspensión, aceites y grasas a separar.
- Otras características del agua residual, como el pH.

La cantidad de aire necesaria será:

$$A = p * k \quad (3.89)$$

Donde:

$A$ , es la necesidad de aire (kg/h)

$p$ , es la necesidad específica de aire (kg aire/kg solidos a separar)

$k$ , flujo de solidos a eliminar (kg/h)

Los FAD con recirculación se dimensionan teniendo en cuenta que el caudal de recirculación depende de:

- La cantidad de sólidos en suspensión, aceites y grasas presentes en el agua residual.
- Caudal de agua a tratar.
- Condiciones de presión y temperatura.

A continuación, se muestran algunos valores típicos, resultantes de la caracterización físico química de concentraciones de parámetros de aguas residuales tomadas de una industria.

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Promedio</b>	<b>Límite máximo permisible</b>
Aceites y grasas	mg/L	692,23	0,3
Sólidos totales	mg/L	2290	1600
Sólidos suspendidos totales	mg/L	293	100
Sólidos sedimentables	mg/L	10	1
DQO	mg O <sub>2</sub> /L	7200	250
DBO <sub>5</sub>	mg O <sub>2</sub> /L	3350	100

Tabla # 3. Resultados de la caracterización fisicoquímica de los tres días de muestreo de agua residual típica industrial. Fuente [24].

El caudal de recirculación se estima mediante:

$$Q_r = \frac{A}{\alpha \cdot X_S^P} \quad (3.90)$$

Donde:

$Q_r$ , es el caudal de recirculación (m<sup>3</sup>/h)

$X_S^P$ , es la solubilidad del aire en agua pura a la temperatura y presión de trabajo (kg/m<sup>3</sup>)



$\alpha$ , es el coeficiente que tiene en cuenta el contenido de impurezas del agua residual (0,60 a 0,80)

La solubilidad del aire a presión atmosférica en el agua en función de la temperatura se indica en la tabla siguiente:

Temperatura (°C)	Solubilidad del aire en agua pura (ppm)
0	29,2
5	25,7
10	22,8
15	20,6
20	18,7
25	17,1
30	15,6

Tabla # 4. Solubilidad del aire a presión atmosférica en el agua en función de la temperatura. Fuente [18]

Así, el caudal para el diseño de la cámara o tanque de flotación será:

$$Q = Q_{AR} + Q_r \quad (3.91)$$

Donde, Q es el caudal de diseño (m<sup>3</sup>/h) y Q<sub>AR</sub> es el caudal de tratamiento (m<sup>3</sup>/h).

La superficie del flotador vendrá dada por:

$$S = \frac{Q}{CSH} \quad (3.92)$$

Donde, S es la superficie horizontal (m<sup>2</sup>) y CSH es la carga hidráulica, o velocidad descensional (m/h).

Para el volumen y el calado del tanque de flotación se tiene:

$$V = TRH * Q ; h = \frac{V}{S} \quad (3.93)$$

Donde:

$V$ , es el volumen del tanque de flotación ( $m^3$ )

$TRH$ , es el tiempo de retención hidráulica (h)

$h$ , es el calado (m)

La profundidad o calado varía entre 1 y 3 metros, dependiendo del tipo de dispositivo para la distribución de agua presurizada en el interior de la cámara de flotación.

El grupo de bombeo para la presurización vendrá definido por el caudal de recirculación y la presión de trabajo seleccionada.

#### 3.1.4. Tanque de flotación

En estos tanques es donde tiene lugar la despresurización del agua residual presurizada previamente y saturada en aire, y en consecuencia donde tiene lugar la formación de burbujas y la flotación de los contaminantes a eliminar. La construcción de estos tanques puede ser de forma rectangular o bien circular, estando provisto en el primer caso de unas barrederas superficiales arrastradas por cadenas sinfín para la extracción de las espumas y en el segundo caso las barrederas son radiales. Con el fin de poder ajustar la velocidad de giro o de desplazamiento de las barrederas, se debe disponer de variador de la velocidad en el mecanismo de arrastre.

Para el diseño de cámaras rectangulares la autora de [2], recomienda la instalación de una pantalla con un ángulo de inclinación de  $60^\circ$  con la horizontal y con 30 a 50 cm de largo, conforme se muestra en la Figura # 3.17, donde el ancho de la cámara depende del tipo de equipo usado para el raspado del material flotante y rara vez excede de 8 metros. El largo puede variar entre 4 y 12 metros siempre que no ocurran las situaciones A o C mostradas en la Figura. En el primer caso, el largo es insuficiente, y en el segundo, hay deposición de material flotante. La profundidad varía entre 1 y 3 metros, dependiendo del tipo de dispositivo para la distribución de agua presurizada en el interior de la cámara de flotación.

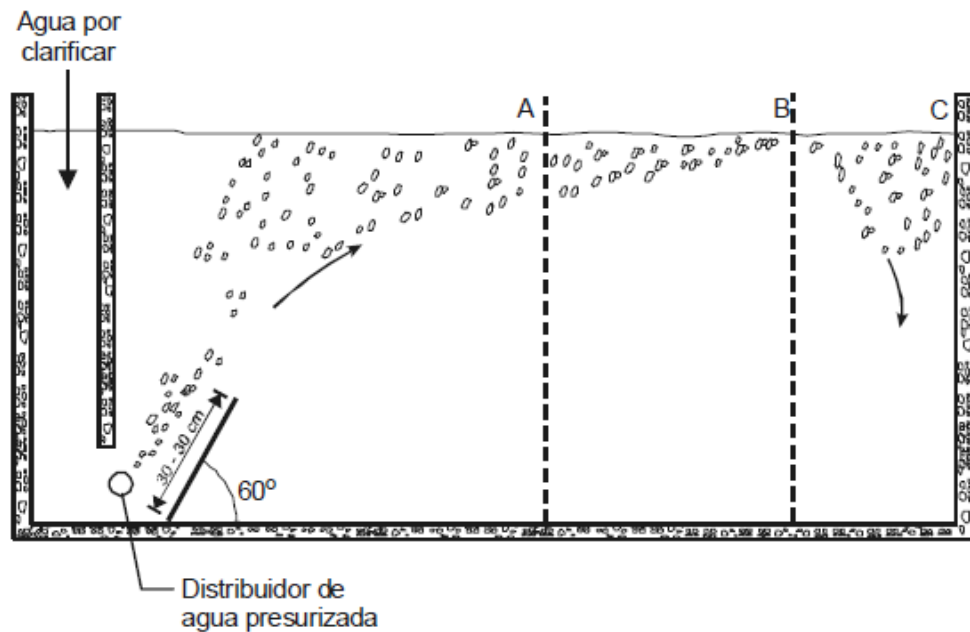


Figura # 3.20. Tanque de flotación rectangular. Fuente: [2]

#### 3.1.4.1. Parámetros de Diseño para la Celda de Flotación

El cálculo de las dimensiones de la celda se hizo para un diseño rectangular, asumiendo una base de cálculo que cumpliera con las normas generales de diseño fijadas en Sainz [19], para tanques rectangulares. Con la aplicación de las ecuaciones descritas se obtuvieron los datos para el diseño de la celda de flotación.

$$V_T = Q * t_r \quad (3.94)$$

Donde:

$V_T$ , es el volume del tanque de flotación en  $m^3$ .

$Q$ , es el caudal de entrada en  $m^3/min$ .

$t_r$ , es el tiempo de retención en el tanque de flotación en min.

La cámara de flotación dice Vargas en [2], independientemente de la forma que tenga, es proyectada para un tiempo medio de retención comprendido entre 10 y 20 minutos, mientras que en sistemas de mezcla rápida, el tiempo de floculación necesario estará

comprendido será entre 5 y 20 minutos, para que los flóculos alcancen un tamaño de 0,5 y 1 mm, considerado ideal para la flotación.

### 3.1.5. Adición de aire

El aire utilizado en este proceso, normalmente es tomado de los servicios generales de la industria, o bien se instala un compresor, siendo suficiente una sobrepresión de dos atmósferas superior a la de trabajo del tanque de presurización. La cantidad de aire necesaria va a depender de la cantidad de contaminantes a separar, presión de trabajo y temperatura del agua.

Este proceso tiene como objetivo disolver aire en agua a presión elevada. La disolución de aire en agua depende de la temperatura y presión, se encuentra determinada por la ley de Henry. La cinética de disolución dependerá de las características de diseño del sistema de saturación. Existen varias formas para contactar el aire con el agua, entre los más utilizados están los difusores de tipo placa porosa sumergida en el líquido para contactar íntimamente con el aire.

Las microburbujas se generan disolviendo aire en el agua a presiones elevadas e inyectando la mezcla en la celda de flotación por medio de constrictores de presión [4].

En sistemas reales, como regla heurística, los tanques a presión suelen alcanzar entre 85 a 90% de saturación; representada por la ecuación (3.95):

$$P = S_a * A \quad (3.95)$$

Donde:

A Cantidad de aire despresurizado, ml/L

P Presión, atm

S<sub>a</sub> Solubilidad del aire en agua, ml/atm

$f$  Fracción de saturación obtenida en el tanque a presión (varía entre 0.85 y 0.90).

Donde  $A$ , depende de las condiciones de turbulencia en el punto de reducción de presión (diseño del constrictor) y del grado de saturación obtenido en el sistema a presión,

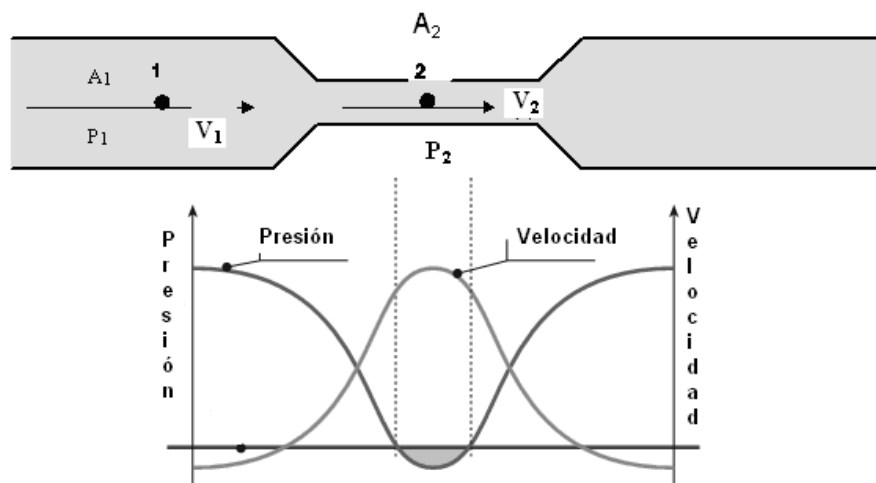


Figura # 3.21. Aplicación del teorema de Bernoulli: “Las microburbujas se generan donde el fluido tiene una velocidad muy elevada con la correspondiente disminución de la presión”.

Fuente: [2]

En base a la presión de 10.3 MPa (1500 psi) que se utilizará para la mezcla del aire con el agua, se definirá el tipo de Venturi adecuado para llevar a cabo esta acción.

Las presiones de trabajo utilizadas en todos los equipos fabricados en la empresa no son mayores a 0.5 MPa ( $73.0 \times 10^{-6}$  psi) y dicha presión es muy significativa comparada con la de este proyecto.

Se consultaron varios modelos de venturis fabricados con el material polipropileno, como se muestra en la Figura # 3.19, y anteriormente empleados en la inyección de ozono. Se toma la decisión de utilizar dos modelos comunes, el SL-0137Y y el SL-0453.

Los modelos de Venturi SL-0287Y y SL-02833 Ozono Polaris®, soportan una presión de entrada máxima de 0.83 MPa (120 psi) cuando están hechos de polipropileno [16]. Al cambiar el material a acero inoxidable, como se muestra en la Figura, se incrementa este valor, aunque la empresa Ozono Polaris® no cuenta específicamente con este dato. Sin embargo, a base de una serie de pruebas, se concluirá si estos modelos de Venturi podrán ser utilizados en el proceso de éste equipo.



Figura # 3.22. Venturi Modelo  $\frac{3}{4}$  ( $\frac{3}{4}$ " X 0,9) Fuente: [16]

Para la saturación del efluente en el tanque de saturación, se requiere el suministro de aire comprimido a una presión de 40 psi, dado que esta fue la condición operacional seleccionada al culminar la parte experimental por brindar mejores resultados para el caso estudiado. Por lo anterior, se recomienda utilizar un compresor de al menos 1 Hp para cubrir los requerimientos del sistema.

### 3.1.6. Sistema de bombeo

Para establecer las especificaciones de la bomba de alimentación de la unidad de flotación, encargada de suministrar el efluente presurizado a la celda de flotación. Igualmente, se establecieron las características de una bomba para lodo flotado. Para calcular la potencia de la bomba requerida, según la ecuación (3.96) que a continuación se presenta.

$$P = \frac{100 \cdot Q \cdot HDT}{75 \cdot \eta} \quad (3.96)$$

### **3.1.6.1. Equipos de Bombeo**

Se utilizó un HDT de 1,10 m por ser la altura máxima existente respecto a la horizontal entre la ubicación de los sólidos flotados y los sedimentados. Se asumió una eficiencia de 0,50 por ser una bomba pequeña, obteniendo una potencia aproximada de 1,5 Hp. Necesitando así dos bombas sumergibles de al menos 1,5 Hp para la descarga de los sólidos sedimentables, así como también aquellos sólidos flotados acumulados.

### **3.2. Determinación de las características de equipos del sistema.**

Los equipos de flotación por disolución de aire en la recirculación, son los más generalmente utilizados y se dimensionan de acuerdo con los parámetros de diseño anteriormente expuestos, donde se tiene en cuenta que el caudal de recirculación es dependiente principalmente de:

- La cantidad de sólidos en suspensión y grasas y aceites presentes en el agua residual.
- Caudal de agua a tratar.
- Condiciones de presión y temperatura.

En el sistema piloto de tratamiento se mantendrá una temperatura promedio controlada de 30°C, por lo tanto, de la Tabla 4, se considerará la solubilidad del aire en el agua igual a: 15.6 ppm.

Por otra parte, la presencia de contaminantes en el agua residual, va a disminuir la solubilidad del aire en agua, pudiendo estimarse que la solubilidad se encontrará entre el 60 y 80% del valor teórico.

El cálculo del equipo comienza con la determinación de la carga horaria de contaminantes a eliminar, que será la suma del caudal a tratar por la concentración

de los diferentes contaminantes, en las unidades adecuadas para obtener el resultado en Kg/h.

Fijando las necesidades promedio de aire por kilo de contaminante en 0,015; (generalmente entre 0,02 y 0,05), se obtiene la cantidad de aire preciso para el proceso y considerando una concentración promedio de 293(mg/l).

En aguas residuales, de acuerdo a la Tabla 3 para un caudal de circulación de 35(l/min) (de acuerdo con el caudal disponible), se tiene un flujo de 0,62(kg/h), aplicando la ecuación descrita en el análisis de diseño, se encuentra que, el flujo de aire necesario es:

$$A = 0,015 * 0,62 \left( \frac{Kg}{h} \right)$$

$$A = 9,23 * 10^{-3} \left( \frac{kg}{h} \right)$$

Esta cantidad de aire deberá ser disuelto en el caudal de recirculación, por lo tanto, si se divide el valor de A, entre la solubilidad del aire en agua (en Kg/m<sup>3</sup>) en las condiciones de trabajo de presión y temperatura, de acuerdo con la tabla 4, que es de 15,6 ppm, lo que equivale a 0,0156 (kg/m<sup>3</sup>) se obtiene:

$$Q_r = \frac{9,23 * 10^{-3}(kg/h)}{0,7 * 0,0156(kg/m^3)}$$

$$Q_r = 0,85(m^3/h) = 14,09(l/min)$$

Este valor se deberá incrementar con el porcentaje de disolución de aire en agua en condiciones reales, que suele encontrarse entre el 60 y el 80%. De esta manera el caudal de agua a emplear en los cálculos de dimensionamiento del tanque de flotación será:



$$Q = 35 \left( \frac{l}{min} \right) + 14,09 \left( \frac{l}{min} \right)$$

$$Q = 49,09 \left( \frac{l}{min} \right) \approx 50(l/min)$$

La superficie de flotador vendrá dada por:

$$CSH = \frac{50(l/min)}{0.5(m) * 1(m)} = 6 \left( \frac{m}{h} \right)$$

La CSH o carga superficial hidráulica, se ha calculado considerando las dimensiones del tanque con  $l = 0,5m$  y  $a = 1m$ , por lo que la superficie del flotador es igual a  $S = 0,5m^2$ , esta carga se encuentra dentro de los parámetros de diseño.

El volumen de tanque se determina a partir del tiempo de retención  $t_r$  preciso en este equipo, para lo que se ha considerado igual a 7min, obteniéndose los siguientes resultados:

$$V_T = 50 \left( \frac{l}{min} \right) * 7min = 0,35m^3$$

Conociendo el volumen y la superficie del tanque de flotación, la altura del equipo vendrá determinada por:

$$h = \frac{0,35m^3}{0.5m^2} = 0,7m$$

Parámetro	Valor
Q	50(m <sup>3</sup> /min)
T	30(°C)
t <sub>r</sub>	7(min)

$V_T$	0,35 (m <sup>3</sup> )
$l_T$	1(m)
$a_T$	0,5(m)
$h_T$	0,7(m)
CSH(m <sup>3</sup> / m <sup>2</sup> .min)	6(m/h)
A/S	0,015(kg/m <sup>3</sup> )
Material de fabricación	Vidrio templado de 5mm, cuya tensión de trabajo es de 500kg/cm <sup>2</sup> .

Tabla # 5. Características del tanque de flotación diseñado. Fuente [16]

### 3.2.1. Selección del sistema de inyección y mezclado de aire

El inyector opera en base al principio Venturi, es decir que una constricción en el flujo con una entrada específica y un diseño de salida instalado en la tubería, crea un vacío producto del incremento en la velocidad a través de la constricción. La tasa de inyección que puede ser alcanzada por un Venturi depende del gradiente de presión que lo atraviesa, este gradiente oscila entre 5 y 75% según el diseño del Venturi.

Para poder escoger el modelo adecuado es importante definir sus propiedades, de acuerdo al tipo y fabricante se definen algunas:

- Rango de presión en la entrada
- Perdidas de presión, el gradiente entre la entrada y la salida, se expresa en porcentaje de la presión de entrada. En la mayoría de los modelos este gradiente es de 1/3 de la presión de entrada. Sin embargo, existen algunos que pierden hasta un 50%.
- La tasa de succión se expresa en litros por hora, esta depende de la presión de entrada, la pérdida de carga y el tamaño de la construcción. La tasa de succión puede ser regulada por medio de varios accesorios.

- Rango de flujo de agua. La presión de agua y la boquilla, afecta el flujo de agua a través del inyector. El fabricante define el rango de operación, se requiere una tasa mínima de flujo que atraviese el inyector para iniciar la succión.

El caudal principal, de procesamiento  $Q = 35(\text{lt}/\text{min})$ ; La cantidad de aire necesaria para el proceso  $A = 9,23 * 10^{-3}(\text{kg}/\text{h})$ . Considerando la densidad de aire a condiciones normales de  $T = 25(^{\circ}\text{C})$ ;  $P = 1(\text{atm})$  igual a  $\delta_a = 1,21 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$ , entonces la cantidad de flujo de aire necesaria será:

$$A = 0,127(\text{l}/\text{min})$$

Por lo tanto, el caudal de inyección es  $A = 0,127(\text{l}/\text{min})$ , por lo que la relación caudal principal/caudal inyectado es 1: 276, o 0.36%.

La operación del inyector comienza con la apertura de las dos válvulas auxiliares una instalada a la entrada y la otra a la salida del Venturi. Para lograr succión se debe cerrar parcialmente la válvula reguladora de presión hasta que se haya conseguido el flujo de succión propio del dispositivo.

Parámetro	Netafim Venturi Inyector	
	Modelo F (3/4*0.9)	
	Mínimo	Máximo (l/h)
Flujo de agua por el inyector	10 (l/h)	2500 (l/h)
Caudal de inyección	0.02 (l/h)	40 (l/h)
Capacidad de ajuste de inyección	0.2 %	1.6 %
Relación flujo / succión	1:500	1:62.5
Presión de trabajo	4.26 PSI	60 PSI

Tabla # 6. Características del sistema de inyección elegido Fuente [16]

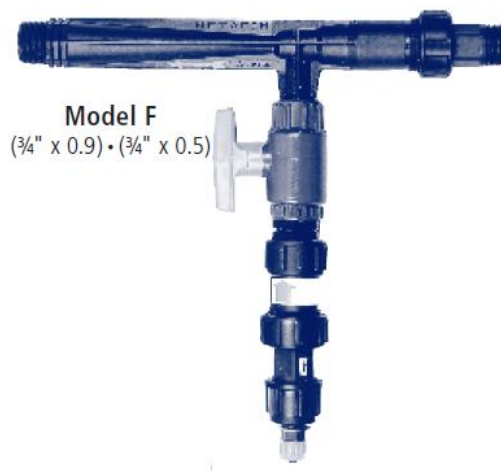


Figura # 3.23 Modelo del sistema F. Fuente: [16]

### 3.2.2. Selección del equipo de bombeo

El equipo de bombeo para presurización vendrá definido por el caudal de agua de recirculación empleado y la presión de trabajo que se haya seleccionado para el sistema de flotación.

Para el cálculo se considerará una presión máxima en el inyector  $P = 60(PSI)$ , para un caudal  $Q = 50l/min$ .

$$Potencia = \frac{4,14(bar) * 50(l/min)}{450} = 0,46(Hp) * 1,7 = 0,79(Hp)$$

De lo anterior se escogerá una bomba monofásica, de 1Hp, asumiendo un rendimiento  $\eta = 50\%$ , un caudal de entrada de  $50(l/min)$ , una altura de  $h = 1,2m$  y pérdidas del 20%.

El equipo de bombeo para presurización vendrá definido por el caudal de agua de recirculación empleado y la presión de trabajo que se haya seleccionado para el sistema de flotación.

Para el cálculo se considerará una presión máxima en el inyector  $P=60$  PSI, para un caudal  $Q=50$  l/min.

$$Potencia = \frac{4,14(bar) * 50(l/min)}{450} = 0,46(Hp) * 1,7 = 0,79(Hp)$$

De lo anterior se escogerá una bomba monofásica, de 1Hp, asumiendo un rendimiento  $\eta=50\%$ , un caudal de entrada de 50(l/min), una altura de  $h=1,2m$  y pérdidas del 20%.

### 3.2.3. Selección del equipo de calentamiento

El dimensionamiento de la resistencia eléctrica, que calienta el agua que se almacena en el tanque, se realizó un análisis de la potencia de la misma. El cálculo está basado en los principios de transferencia de calor. Al conocer el volumen de agua en el tanque de flotación, se realiza el cálculo, aplicando la ecuación de energía calorífica como sigue:

$$\Delta Q = mc\Delta T \quad (3.96)$$

De lo anterior los parámetros descritos son:

$\Delta Q$ , es la variación de energía calorífica.

$m$ , es la masa de agua, contenida en el tanque de flotación en  $kg$ .

$c$ , es el calor específico del agua, igual a  $1(cal/(g * ^\circ K))$ .

$\Delta T$ , es la variación de temperatura, que se considerará el control ajustará de  $25^\circ C$  a  $30^\circ C$ .

La cantidad de agua en el tanque de flotación será dimensionada como:

$$m = \rho \cdot V_T \quad (3.97)$$

Dónde:

$m$ , es la masa del agua, considerando agua pura.

$\rho$ , es la densidad del agua, asumiendo agua pura.

$V_T$ , es el volumen total del agua.

$$m = 1000 \left( \frac{kg}{m^3} \right) * 0,35(m^3) = 350 * 10^3 g$$

$$\Delta Q = 350 * 10^3 (g) * 1 \left( \frac{cal}{g * ^\circ K} \right) * 5(^{\circ}K) = 1,75 * 10^6 (cal)$$

$$Energía = 1,75 * 10^6 (cal) \left( \frac{4,186J}{1 cal} \right) = 7,33 * 10^6 (Joules)$$

$$Potencia = \frac{7.33 * 10^6 (Joules)}{1200(s)} = 6,1kW$$

Por lo que se escogerá una resistencia eléctrica a 110V, con una potencia total de 6kW.

### 3.3. Implementación del sistema de tratamiento.

Concluido el diseño y dimensionamiento, se ha procedido con la construcción del equipo piloto, donde se empezaron a correr pruebas experimentales siguiendo el ciclo

operativo del mismo, para hallar las condiciones óptimas de generación de microburbujas para la flotación. Durante el desarrollo de las pruebas experimentales, se ha podido observar que las microburbujas ingresan a la celda de flotación y empiezan a ascender en forma de una nube blanca; una vez que llegan a la superficie del líquido, forman un colchón estable.

El sistema piloto para el tratamiento de agua, consiste principalmente en un tanque rectangular, construido en vidrio de 5mm, donde se realiza la flotación por aire disuelto FAD, cuya capacidad es de 350 litros; Su base tiene dimensiones de 0,5(m)\*1,0 (m) y una altura de 0,7(m); Tiene dos entradas de ½ pulgada, una correspondiente a la mezcla de aire/agua y la otra por la que ingresará el agua a tratar, además posee una salida de ¾ de pulgada, por la que se extraerá el agua tratada para su almacenamiento.



Figura # 3.24 Tanque rectangular para el sistema piloto

Para la inyección de aire se usan dos boquillas Venturi de la marca Netafim, que incluyen un dispositivo regulador para el caudal secundario a succionar, además de válvulas para el control manual, estos dispositivos son usados normalmente en irrigación y se han probado varios arreglos de acuerdo a la literatura consultada en [20] y los resultados que los autores de la misma detallan, sin embargo la mayor cantidad de burbujas, se encontraron al usar las boquillas en paralelo con la línea de flujo de manera independiente, por lo que se usará esta configuración en la planta piloto final en la que tanto el flujo de entrada como el de salida es regulado manualmente a través de dos válvulas de bola. El arreglo de doble succión es un

conjunto de dos boquillas que operan en paralelo para el fluido motriz (agua) y en serie para el fluido inyectado (aire).

La alimentación del flujo motriz agua a la celda de flotación, se la realiza con una bomba centrífuga monofásica de 1Hp, con capacidad de 50 (l/min), la cual succiona agua desde la salida del tanque de flotación, la misma que primero atraviesa un filtro de papel que elimina cualquier impureza, para luego ser enviada en dos fracciones, la primera y en mayor caudal al equipo inyector a aproximadamente (35l/min), este caudal es medido por un sensor de flujo de ½ pulgada de efecto hall y el caudal restante del líquido, es transportado al tanque de reserva, cuyo almacenamiento será controlado.

En este tanque de procesamiento, se ha dispuesto un sistema flotante de calentamiento del agua, compuesto de tres niquelinas eléctricas a 110v de 2kW, 1kW y 3kW, con el fin de mantener la temperatura del agua a 30°C, el encendido del mismo será controlado desde la interfaz con un sistema PWM diseñado para este fin en donde actuarán los controladores PID y GPC.

El tanque de reserva almacenará y simulará la cantidad de agua tratada y que para fines didácticos servirá para mantener un nivel de agua constante dentro del mismo, por lo que para controlar el caudal de entrada de líquido a él, se ha automatizado una válvula de bola de ½ (pulgada) por medio de un servomotor acoplado, el mismo que será controlado desde la interfaz general, por medio de un shield Arduino Uno, que medirá el caudal por un sensor de efecto hall y actuará en el servo para garantizar el flujo adecuado de entrada, derivado de la línea principal, con lo que se logrará mantener el nivel de reserva del líquido de acuerdo con el set point y que será medido por un sensor ultrasónico que envía los datos al computador a través de un shield Arduino Mega, para luego aplicar el control PID y Predictivo Generalizado.

La salida de caudal de este tanque se la realiza mediante una bomba de succión centrífuga monofásica, cuya potencia nominal es de ¾Hp, este flujo es monitoreado



por otro sensor de efecto hall y enviado al tanque principal para mantener la recirculación.

Con el fin de monitorear algunos parámetros físico-químicos que intervienen en el proceso, se ha incluido la posibilidad de medir valores de sensores de diferentes magnitudes, de acuerdo con los equipos disponibles para este fin, es así que obtienen mediante visión artificial valores en tiempo real de Temperatura, Oxígeno Disuelto, pH, Conductividad, Sólidos Totales Disueltos.

Para los dos sistemas de impulsión del líquido se han construido los sistemas de control por fase correspondientes, con el fin de generar perturbaciones al caudal de entrada al tanque principal y de reserva a fin de verificar la actuación de los sistemas de control diseñados. El esquema general del sistema implementado, se encuentra en la Figura # 3.22, donde se describen todos los dispositivos principales empleados para este fin.

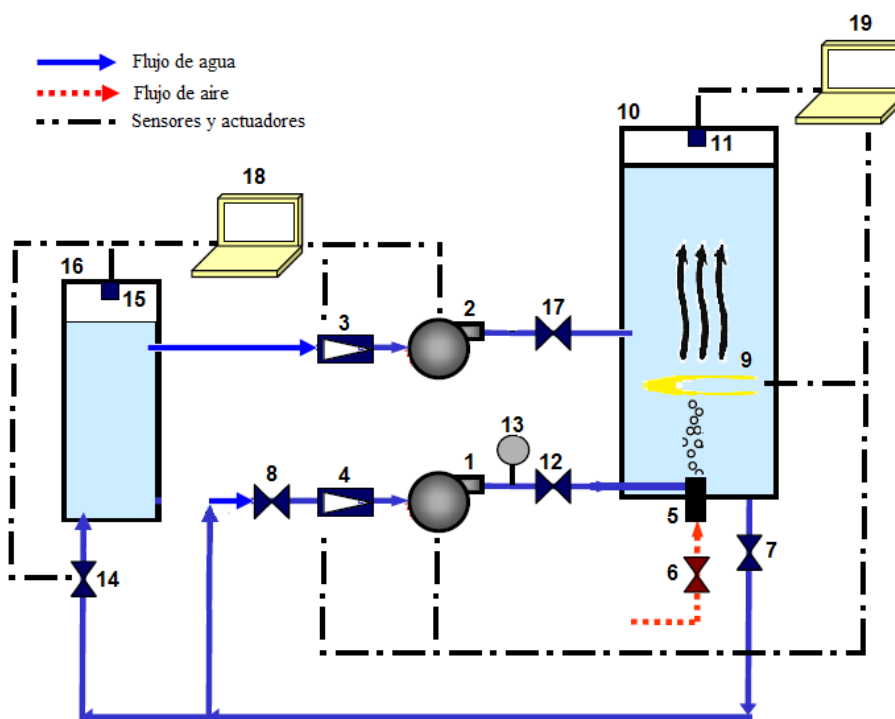


Figura # 3.25 Esquema general del sistema implementado.

- 1) Bomba principal de impulsión monofásica controlada, potencia (1Hp).
- 2) Bomba secundaria de impulsión monofásica controlada para agua cruda a tratar.
- 3) Sensor de caudal secundario.
- 4) Sensor de caudal principal.
- 5) Arreglo de mezclador inyector de aire tipo Venturi.
- 6) Válvula manual control de entrada de aire
- 7) Válvula manual control de salida de agua tratada principal
- 8) Válvula manual reguladora de caudal principal.
- 9) Configuración paralelo de calentadores controlados de resistencia eléctrica total 6KW.
- 10) Tanque de flotación en vidrio 5mm, capacidad 350 (litros)
- 11) Sensor ultrasónico de nivel.
- 12) Válvula manual de regulación de caudal principal de entrada
- 13) Medidor analógico de presión de entrada principal.
- 14) Válvula controlada reguladora de caudal al tanque de reserva.
- 15) Sensor de nivel en el tanque de reserva.
- 16) Tanque de reserva para recirculación de agua, producto final.
- 17) Válvula manual reguladora, simulación de caudal de mezcla
- 18) Control de parámetros de tanque de reserva.
- 19) Control de parámetros de tanque principal.
- 20) Sensores de pH, oxígeno, disuelto, temperatura, TDS, en tanque principal.

#### **3.4. Acondicionamiento de las señales de entrada y salida.**

Para la implementación del sistema de la planta piloto, se realiza un análisis previo, con el fin de obtener un resultado que permita controlar y medir algunas de las variables básicas que intervienen. Las variables que tratar son principalmente los valores de entrada y salida del caudal respectivamente, por lo que se implementará un control por fase, para cambiar o generar perturbaciones en los caudales, a través de la dosificación de energía eléctrica a las bombas impulsoras.

De acuerdo con las condiciones de operación, es necesario que la planta trabaje a una temperatura fija definida por el usuario, para mantener un tiempo de retención igual de las microburbujas, ya que esto hará que la velocidad de ascensión de estas se mantendrá en promedio constante, por lo que se implementará un sistema para la medición y control de temperatura.

Durante el proceso de tratamiento del agua, se monitorea y controlan ciertos parámetros físicoquímicos, por lo que el sistema piloto, realizará la medición mediante equipos específicos portátiles por lo que se ha optado por usar el sistema de Visión Artificial de Labview, para no alterar los procedimientos de calibración de estos.

La interfaz de monitoreo y control se la realiza con la plataforma Labview de National Instruments, donde la interacción del sistema con el usuario y la implementación de los controladores a través de un computador serán en tiempo real. Además, se dispondrá de un control manual emergente para ser utilizado dado el caso que el control en modo manual y remoto se encuentren bloqueados.

Las funciones del sistema de control son:

- Poner en marcha las bombas y dispositivos que conforman el sistema.
- Generar perturbaciones en el caudal de entrada, cambiando los tiempos de disparo del sistema de control de fase, para comprobar la respuesta de los controladores.
- Adquirir los datos de los sensores de turbiedad, temperatura, caudal, nivel, físicoquímicos (pH).
- Controlar la temperatura del agua en el tanque de flotación, actuando sobre el sistema calentador para graduar la energía que se aplica usando control de fase.
- Controlar el nivel de agua en el tanque de reserva, actuando sobre el motor servo de la válvula para graduar el caudal de entrada.
- Transmitir los datos para visualizarlos en la interfaz.

- Guardar los datos necesarios para realizar el análisis y procesamiento correspondientes a la variación de temperatura y nivel, y visualizar los parámetros de operación del sistema piloto.

Con estos objetivos se muestra el diagrama de bloques de la Figura # 3.23.

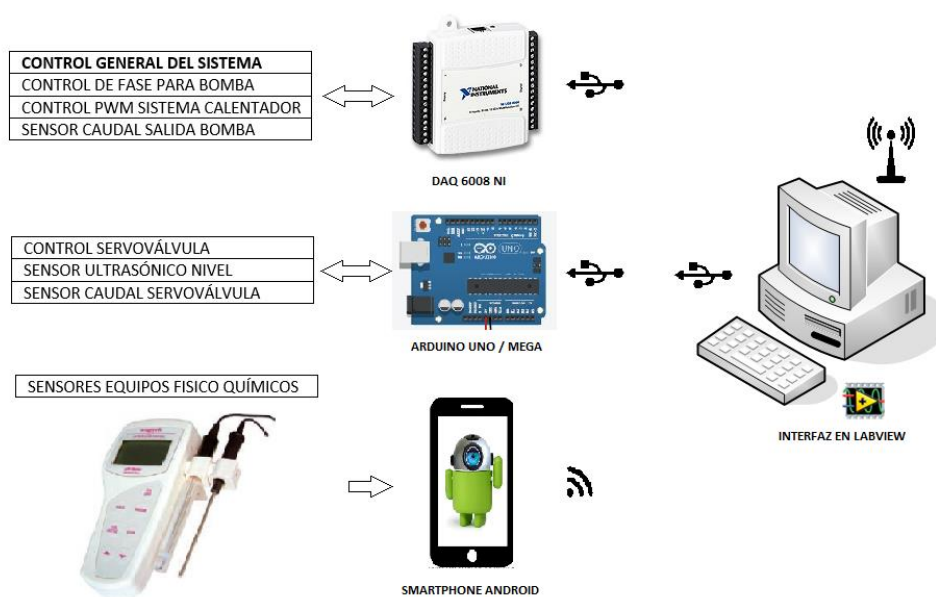


Figura # 3.26 Diagrama de bloques del sistema de control de la planta piloto.

### 3.4.1. Control general del sistema

Este módulo se encarga, de adquirir los datos provenientes del sensor de caudal y simular perturbaciones al cambiar la energía entregada a la bomba, usando el control por fase, lo que cambiará la cantidad de flujo del líquido entrante al sistema; además transmitirá estos parámetros al computador para analizarlos a través de la interfaz en Labview.

Los requisitos que debe cumplir este actuador a diseñar y que estará constituido por un circuito de disparo, otro de potencia basado en microcontroladores estos son:

- Al menos 1 canal de conversión A/D.
- Poseer la suficiente cantidad de I/O digitales.
- Al menos 1 puerto de salida rápida para realizar el control PWM.
- Conexión con una pantalla para la visualización de los parámetros en la planta.
- Tener un puerto de comunicación para transmitir a la interfaz en el computador.

El sistema general que gobierna la bomba está diseñado, utilizando un microcontrolador Atmega8 de la familia ATMEL, el que se encargará de realizar la técnica de conversión AC – AC con control de fase directo, el cual es muy utilizado especialmente en dispositivos de iluminación.

El elemento de potencia a utilizar es un triac, mismo que se caracteriza por ser robusto, manejo simple y adecuado para altas frecuencias de trabajo, cuya implementación se muestra el circuito de potencia implementado que se muestra en la Figura # 3.24, en el que también se ha acoplado en la etapa de conmutación, una red Snubber, que servirá para mejorar el rendimiento del circuito convertidor de potencia, suprimiendo los picos de voltaje y amortiguando la oscilación transitoria provocada por la inductancia del circuito cuando se abre un interruptor. Para esta red, se ha escogido la configuración de resistor capacitor (RC) al ser el circuito de amortiguación más popular, recomendada por el fabricante del triac.

Los parámetros eléctricos de la bomba de acuerdo con los datos de placa son:

Voltaje nominal: 110 [VAC].

Corriente nominal: 4,8 [A].

El voltaje pico inverso del TRIAC puede ser mayor a 155 [V].

Se escoge el Triac BT136, cuyas características son las siguientes:

Corriente máxima:  $I_{TRMS}=8$  [A]

Voltaje pico inverso:  $VRRM=600 [V]$

Corriente de compuerta:  $IGT=10 [mA]$

Voltaje de compuerta:  $VGT=2.5 [V]$

Para la selección del optotriac se toma en cuenta la corriente de compuerta necesaria para activar el triac la cual es de  $IGT=10 [mA]$ , con esto se selecciona el optotriac MOC3021 que presenta las siguientes características:

Voltaje de aislamiento:  $7500 [V]$

Corriente máxima de led:  $60 [mA]$

Voltaje reverso de led:  $3 [V]$

Potencia del optotriac:  $330 [mW]$

Para dimensionar R1 resistencia limitadora de corriente de compuerta del triac, se toma en cuenta el valor de la corriente de compuerta  $IGT=10 [mA]$  y el valor del voltaje de la red:

$$R_1 \leq \frac{V_{RMS}}{I_{GT}}$$

$$R_1 \leq \frac{110 [V]}{10 [mA]}$$

$$R_1 \leq 11 [k\Omega]$$

Para asegurar el disparo del triac  $R_1=4.7 [k\Omega]$

$$I_{GT} = \frac{110 [V]}{4.7 [k\Omega]}$$

$$I_{GT} = 23.4 [mA]$$

Debido a que se trabaja con un valor de voltaje alto se calcula la potencia mínima que debe disipar la resistencia limitadora R1:

$$P_{R_1} = V_{RMS} \cdot I_{R_1}$$

$$PR_1 = 110 [V_2] 4.7 [k\Omega]$$

$$PR_1 = 2,57[W]$$

$$PR_1 = 2.57 [W]$$

Se escoge:  $R_1=4.7 [k\Omega]$ ;  $PR_1=5 [W]$

La resistencia  $R_2$ , se dimensiona a partir de la corriente necesaria del led del opto triac, el valor máximo a partir de sus características es de 60 [mA]; se toma como valor de corriente 30 [mA] y como voltaje se toma el valor de la fuente 5 [V], entonces la resistencia  $R_2$  se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$R_2 = (+) - V_{led} - V_{diodo}IF \quad (2.98)$$

$$R_2 = 5 - 1.5 - 0.730 [mA]$$

$$R_2 = 93.3 [\Omega]$$

Entonces el valor de la resistencia  $R_2$  es 100 [ $\Omega$ ].

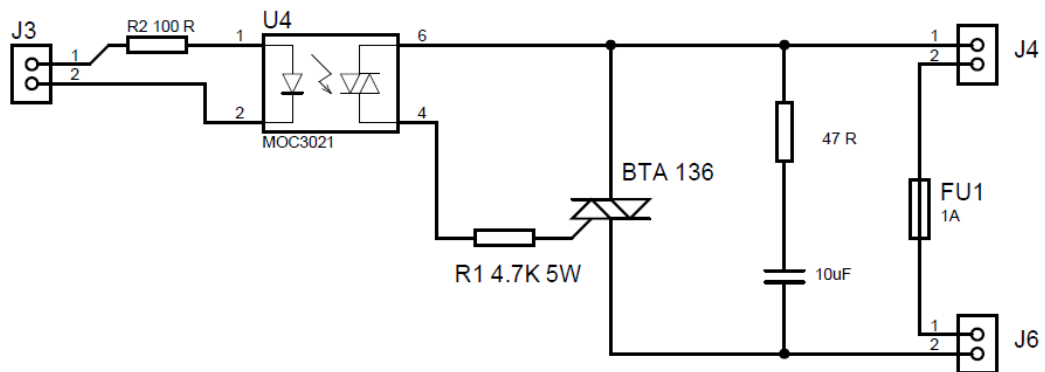


Figura # 3.27 Circuito de potencia

Los valores de la red Snubber, se toman los recomendados por el fabricante para este triac.

### 3.4.2. Circuito de disparo

El circuito de disparo es el que permite tener el control del voltaje aplicado a la carga, es el control a partir del cual opera el circuito de potencia.

Existen algunos tipos de circuitos de disparo como el de rampa lineal, cosenoidal, el uso de UJT o por programación en un microcontrolador entre otros. Para esta aplicación, se opta por la programación de un Atmega 8, el cuál funcionará como circuito detector de cruce por cero, lectura de la señal analógica aplicada que será correspondiente con la frecuencia de una señal PWM generada a la salida.

El diseño del circuito de disparo comprende la detección del cruce por cero mediante hardware para la posterior obtención mediante software del pulso que controla el circuito de potencia. Este pulso permite controlar el ángulo de disparo, según requiera el sistema.



### 3.4.3. Circuito detector de cruce por cero

Este circuito, tiene como objetivo la sincronización con la red eléctrica, sirve para detectar el momento exacto cuando la señal de la red eléctrica sea de 0V, tanto para el semiciclo positivo como negativo y de esta manera se genera el pulso de disparo.

En la Figura # 3.25, se muestra el diagrama del circuito detector de cruce por cero, donde se indica la señal obtenida (color rojo) en la sincronización con la red eléctrica, junto con la señal PWM que se entrega al opto triac del circuito de potencia (color azul).

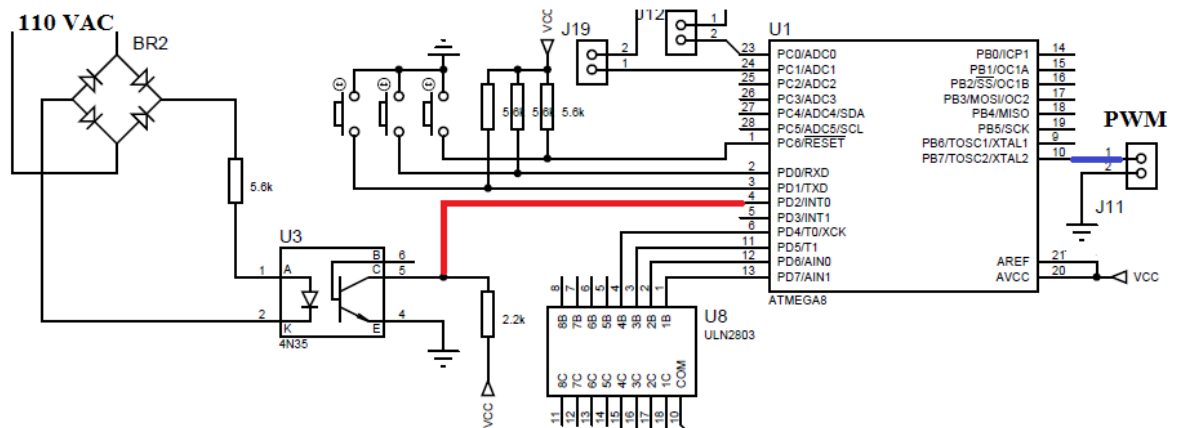


Figura # 3.28 Diagrama del circuito detector de cruce por cero.

Para rectificar el voltaje se realiza un puente formado por diodos de propósito general 1N4007, cuyas características son:

Corriente media:  $I = 1$  [A]

Voltaje pico inverso:  $V = 1000$  [V]

Máximo pico de corriente directa:  $I_{FSM} = 50$  [A]

Voltaje máximo del diodo en conducción:  $V_F = 1$  [V]

Para acoplar la señal al microcontrolador se utiliza el opto transistor 4N25 cuyas características son las siguientes:

Voltaje de aislamiento: 7500 [V]

Corriente máxima del led: 60 [mA]

Voltaje reverso de led: 3 [V]

Potencia de disipación del led: 120 [mW]

La resistencia limitadora  $R_3$  permite limitar la corriente que circula por los diodos, así como la corriente del led del opto transistor 4N25;  $R_3$  se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$R_3 = \frac{V_{led} - 2 * V_{diodo}}{I_F} \quad (3.99)$$

$$R_3 = \frac{110 - 1.5 - 2 * 0.720}{0.720} [mA]$$

$$R_3 = 5355 [\Omega]$$

Se escoge  $R_3 = 5.6 [k\Omega]$

$$I_F = \frac{110 - 1.5 - 2 * 0.720}{5600} = 19 [mA]$$

Debido a que se trabaja con un valor de voltaje alto se calcula la potencia mínima que debe disipar la resistencia limitadora  $R_3$ :

$$P_{R_3} = \frac{V_{RMS}^2}{R_1} \quad (3.100)$$

$$P_{R_3} = \frac{110^2}{5.6 [k\Omega]}$$

$$P_{R_3} = 2.16 [W]$$

Se escoge:  $R_3=5.6 [k\Omega]$ ;  $PR3=5 [W]$

Para calcular  $R_4$  se escoge una corriente de colector  $I_C < 40 [mA]$ , el cual es el valor máximo que maneja el Pin del microcontrolador, entonces  $R_4$  se puede calcular a partir de la siguiente ecuación con  $I_C = 2 [mA]$ :

$$R_4 = 5 - V_{C(sat)} I_C \quad (3.101)$$

$$R_4=5-0.152 [mA]$$

$$R_4=2425 [\Omega]$$

Se escoge  $R_4 = 2.2 [k\Omega]$ .

#### **3.4.4. Sistema de adquisición de datos y lectura de sensores.**

El sistema de adquisición se encuentra constituido por todos los sensores encargados de recolectar los datos de las diferentes variables involucradas, la interfaz desarrollada para este fin se la realiza en Labview, implementando en esta, todas las condiciones operativas y de control para el funcionamiento adecuado de la planta piloto, incluyendo la transmisión de datos para su consecuente visualización a través de las interfaces efectuadas.

Entre las variables involucradas en el sistema tenemos:

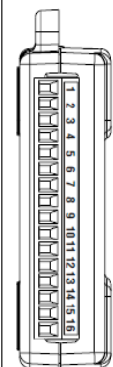
- 1) Medición y control de la temperatura del agua en el tanque de procesamiento. ( $^{\circ}C$ )
- 2) Medición del caudal de entrada a los tanques de procesamiento y almacenamiento de agua. (l/min)
- 3) Medición y control de nivel de agua en el tanque de distribución. (cm)
- 4) Medición del nivel de agua en el tanque de procesamiento. (cm)

- 5) Medición de la turbiedad en el tanque de procesamiento. (NTU)
- 6) Medición del potencial de hidrógeno en el tanque de procesamiento. (pH)
- 7) Control del servo válvula a la entrada del tanque de distribución. (l/min – v)

### 3.4.5. Tarjeta de adquisición de datos National Instruments DAQ USB – 6008

La DAQ NI USB-6008 posee 8 entradas analógicas, 2 salidas analógicas como se observa en la Figura # 3.26, 12 entradas/salidas digitales, 1 bit de sincronización PFI0, 2 alimentaciones Vcc (+2.5V y +5V) y una interfaz USB de alta velocidad con contador de 12 bits.

Cuenta con un contador de 32-bit, alimentado por USB para alta movilidad; Versión de OEM (Original Equipment Manufacturer) o Fabricante de Equipos Originales disponible, Compatible con LabVIEW, LabWindows/CVI y compatible con Visual.NET, cuenta con controladores software NI-DAQmx como librerías y NI LabVIEW Signal Express LE, como un software interactivo para el registro de datos.

Modulo	Terminal	Señal, Nodo Simple	Señal, Diferencial
	1	GND	GND
	2	AI 0	AI 0+
	3	AI 4	AI 0-
	4	GND	GND
	5	AI 1	AI 1+
	6	AI 5	AI 1-
	7	GND	GND
	8	AI 2	AI 2+
	9	AI 6	AI 2-
	10	GND	GND
	11	AI 3	AI 3+
	12	AI 7	AI 3-
	13	GND	GND
	14	AO 0	AO 0
	15	AO 1	AO 1
	16	GND	GND

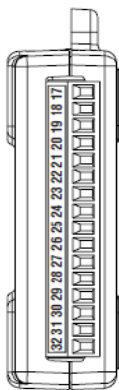
Modulo	Terminal	Señal
	17	PO.0
	18	PO.1
	19	PO.2
	20	PO.3
	21	PO.4
	22	PO.5
	23	PO.6
	24	PO.7
	25	PI.0
	26	PI.1
	27	PI.2
	28	PI.3
	29	PFI 0
	30	+2.5V
	31	+5V
	32	GND

Figura # 3.29. Diagrama de conexión DAC 6008

La información adquirida de la tarjeta se envía por medio del USB a la PC y se mostrará en pantalla por medio de un programa de prueba desarrollado en LabVIEW. La DAQ 6008, enviará al sistema de control general, el voltaje analógico para el control de fase con PWM para las perturbaciones del caudal de la bomba, el voltaje analógico para el control PWM de la activación del sistema de calentamiento, voltaje analógico para el control del accionamiento de la servo-válvula y lectura de los sensores de caudal. En la Tabla # 7, se resume las entradas y salidas asignadas a la DAQ.

<b>PIN DAQ</b>	<b>DISPOSITIVO</b>	<b>FUNCIÓN</b>
6008 AO0	ADC0 PC0 ATMEGA8	Control de fase bomba principal
AO0	ADC10 Arduino Mega	Control de fase temperatura
PO.0	PD0	Control de encendido sistema
PFI0	OUT	Salida sensor de caudal

*Tabla # 7.* Entradas y salidas asignadas a la DAQ

Para realizar la supervisión de los diferentes sensores instalados en esta aplicación, se usa la plataforma Arduino, que permitirá acoplar los mismos y actuar sobre el sistema para adquirir y controlar las variables de este.

De entre las plataformas disponibles en el mercado se optó por Arduino debido a que es una de hardware y software libre, además de que existe gran cantidad de información disponible en la web, así como una gran cantidad de librerías desarrolladas para sensores y los tipos de pantallas que se van a utilizar. En la Tabla # 8, se resume las características de los modelos más generalmente accesibles de Arduino disponibles en el mercado.

<b>Modelo</b>	<b>Arduin o Uno</b>	<b>Arduino Leonard o</b>	<b>Arduino Mega</b>	<b>Arduino Due</b>
<b>Microcontrolador</b>	ATmega 328	ATmega3 2u4	ATmega 2560	AT91SAM3 X8E
<b>Voltaje de Operación</b>	5V	5V	5V	3.3V
<b>Voltaje de entrada</b>	6-20V	6-20V	6-20V	6-20V
<b>Pines I/O digitales</b>	14	20	54	54
<b>Pines I/O digitales con salida PWM</b>	6	7	15	12
<b>Pines de entrada analógicos</b>	6	12	16	12
<b>Pines de salida analógicos</b>	2 (DAC)			
<b>Corriente total de salida DC en todas las líneas I/O</b>	40 mA	40 mA	40 mA	130 mA
<b>Corriente DC para pin 3.3V</b>	50 mA	50 mA	50 mA	800 mA
<b>Memoria Flash</b>	32 KB	32 KB	256 KB	512 KB
<b>SRAM</b>	2 KB	2.5 KB	8 KB	96 KB
<b>EEPROM</b>	1 KB	1 KB	4 KB	
<b>Velocidad de reloj</b>	16 MHz	16 MHz	16 MHz	84 MHz
<b>Tipo de USB</b>	Estándar	Mini	Estándar	Mini

Tabla # 8. Características de los modelos estándar de Arduino. Fuente [2 ]

NÚMERO DE PIN	TIPO	DESCRIPCIÓN
0 al 7 y	IN/OUT	Conexión a la pantalla UTF
22 al 53	IN/OUT	Mediante shield de Arduino
8	IN	Bus sensores de temperatura de agua
9	IN	Sensor de temperatura y humedad -ingreso de Aire-
10	IN	Sensor de temperatura y humedad -salida de Aire-
11	IN	Interruptor para activar termostato en modo manual
12	IN	Interruptor para activar bomba en modo manual
13	OUT	Pulso de Disparo para controlar Ventilador
14	IN	Interruptor de operación Manual/Automático
15	OUT	Activa relé del termostato
16	OUT	Activa relé de la bomba
17	OUT	Activa relé del ventilador
18	IN	Sensor de Flujo de Agua
19	OUT	Activa relé del ventilador en modo manual
20	IN	Pulso detector de cruce por cero
21	IN	Interruptor para activar Ventilador en modo manual
A0	IN	Sensor de presión diferencial

Tabla # 9. Pines de conexión establecidos

### 3.4.6. Sensor de caudal

El sensor de flujo de agua está formado por un cuerpo plástico, un rotor de agua y un sensor de efecto hall. Cuando el agua fluye a través del rotor, este gira, cambiando la velocidad según el flujo de agua que atraviesa el sensor. La señal de salida que se obtiene, son pulsos correspondientes al flujo, los cuales pueden ser conectados

directamente a un pin del sistema de medición de dicha frecuencia como un microcontrolador o una DAQ.

En esta aplicación, se utiliza el sensor de flujo de agua FL-608 mostrado en la Figura # 3.26, el mismo que entregará la señal de frecuencia para ser medida en el puerto PFI0 de la DAQ o a través de un puerto digital de Arduino y cuyas características se detallan a continuación:

Frecuencia	$F = 5,5 * Q$ (L/min), de error: 2%
Voltaje	3.5 – 24 VDC, la corriente no puede exceder de 10 mA, 330 pulsos/litro, $f =$ constante. Unidades de flujo (L/min) * Tiempo (segundos).
Rango de flujo	1 – 60 L/min
Corriente máxima	15 mA (DC 5 V)
Rango de voltaje de trabajo	DC 5 – 24 V
Capacidad de carga	10 mA (DC 5 V)
Temperatura de funcionamiento	< 80 °C
Humedad de funcionamiento	35% « 90% RH
Permitir compresión	Presión del agua de 1,75 Mpa
Resistencia de aislamiento	> 100 m Ohm
Temperatura de almacenamiento	-25°C a + 80 °C
Humedad de almacenamiento	25% « 95% RH



Pulso de salida de forma de onda de salida	Onda cuadrada.
Longitud de cable	15 cm.

Tabla # 10. Características del sensor de flujo. Fuente [El fabricante]



Figura # 3.30 Sensor de flujo de Agua FL-608. Fuente: [El fabricante]

### 3.4.7. Actuador para el control de temperatura.

En el lazo de control de la temperatura, el actuador será encargado de activar y desactivar, en función de la señal del controlador el sistema de resistencias eléctricas, que calentarán y mantendrán en un valor constante dicho parámetro. Estará constituido por el circuito de disparo y el circuito de potencia, el que entregará la energía necesaria al sistema para controlar esta variable.

Para la implementación del sistema de control de temperatura, se usa como el dispositivo de estado sólido del tipo SSR, que es un elemento que permite aislar eléctricamente el circuito de entrada o mando y el circuito de salida. La parte fundamental de un SSR son: Circuito de entrada, donde generalmente se encuentra un dispositivo de acoplamiento óptico (opto-triac). Fotodiodo o detector de cruce por cero. Circuito de potencia que conducirá de acuerdo con la señal del circuito de entrada, para señales de CA se usan tiristores antiparalelos o triacs, salida CC con

transistor bipolar o MOSFET, salida CA-CC con transistor MOSFET (ya que tiene igual ganancia en directo que en inverso)

Los relés de estado sólido con la función de detección de cruce por cero son adecuados para cargas resistivas, capacitivas y cargas inductivas con un factor de potencia entre 0.7 y 1.

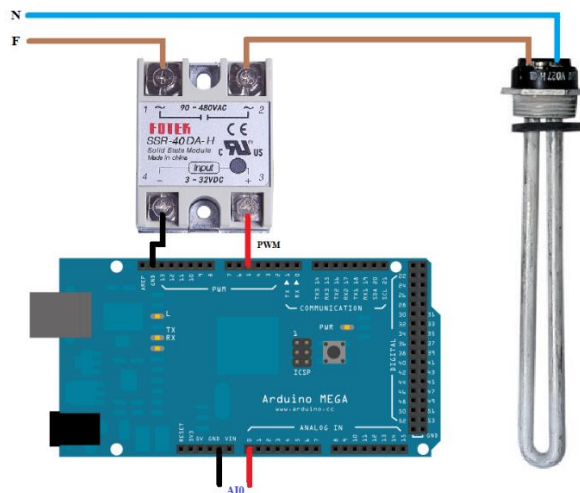


Figura # 3.31 Circuito para el calentamiento del agua

Para la activación del control de temperatura, se envía una señal de voltaje de DC de entre 0 a 5V, que envía el puerto analógico de la DAQ 6008, al pin AIN0 de Arduino; dicho valor es proporcional a los valores de duración del ancho de pulso que puede entregar la salida de Arduino, donde 0 VDC representa una salida siempre baja y 5 VDC representará una salida siempre alta.

El puerto de PWM de Arduino, es conectado al relé de estado sólido, quién activará la salida de potencia en función de los ciclos a la entrada, los mismos que son los valores de disparo para el triac, obteniéndose a la salida unos ciclos de potencia cómo los que se muestra en la Figura # 3.29.

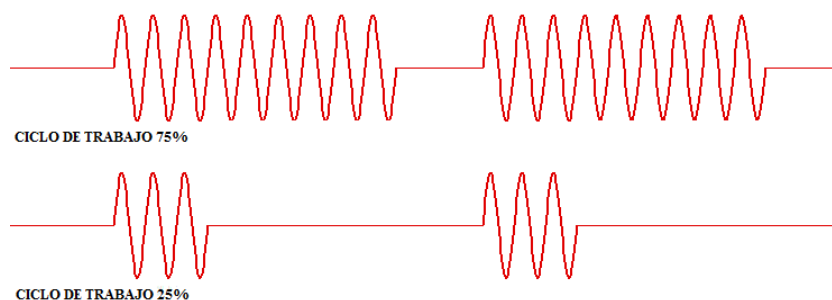


Figura # 3.32 Ciclos de potencia PWM

La configuración y programación completa para el control de temperatura en el Arduino Mega, se muestran en los Anexos.

#### 3.4.8. Actuador para la válvula de control de caudal

La válvula de control permitirá actuar sobre el caudal a la entrada al tanque de almacenamiento permitiendo cambiar entre los valores máximos y mínimos, que dependen de las posiciones entre totalmente abierta y totalmente cerrada respectivamente. En este piloto, servirá para controlar el nivel a través de dicho control.

Los componentes principales de la válvula de control son: parte motriz y cuerpo o actuador; la parte motriz, es un motor tipo servo y es el que regula la apertura del actuador (válvula), lo que controla de esta manera el caudal de salida, un potenciómetro multivuelta, sensorá la posición de la válvula de control entre sus estados: totalmente abierta y totalmente cerrada, es decir entre 0% y 100% de su apertura. A continuación, en la Figura # 3.30 se presenta la servo válvula construida:



Figura # 3.33 Servo válvula construida

Para esta construcción, se seleccionaron sus componentes principales siendo estos: el motor servo, la válvula de control y acoplamiento motor-válvula de la siguiente manera; en primer lugar, se escogió una válvula de media vuelta tipo comercial de ½ pulgada, a la que se acopló una platina para la instalación del servomotor.

Por la disponibilidad y por sus características, se escogió un motor servo construido para trabajo intermitente o continuo, además por tener un torque que se acopla a los fines del proyecto, este motor será el encargado de accionar la válvula de control y tiene las siguientes características que se resumen en la Tabla # 11, y que posee 3 polos de ferrita, con engranaje de nylon con rodamientos de bolas para la ubicación de cada pin.

Significado de colores:	rojo V(+), marrón V(-), amarillo (señal).
Voltaje de funcionamiento:	4.8V ~ 6.0V
Velocidad de operación:	0.20sec/60 grados (4.8V) 0.16sec/60 grados (6.0V)

Torque de accionamiento:	5,2 kg * cm (4,8 V) 6,5 kg * cm (6.0V)
Rango de temperatura:	-20 ° C ~ 60 ° C
Ancho de banda muerta: 4ms	5,2 kg * cm (4,8 V) 6,5 kg * cm (6.0V)
Dimensión:	41 x 20 x 38 mm
Peso:	41 g

Tabla # 11. Características del motor Fuente [El fabricante]

La señal de control para el servomotor y que corresponde a la apertura de la válvula entre 0% y 100%, proviene de un dispositivo Arduino Uno, al que adicionalmente se ha conectado un sensor de caudal para medir las variaciones de este al actuar la válvula, la programación que se ha desarrollado incluye las condiciones que para que la apertura de la válvula esté en función de un voltaje analógico de entre 0 y 5 VDC proveniente de la DAQ 6008, mismo que corresponderá a los valores entre cerrado y abierto o entre los rangos respectivamente.

En la Figura # 3.31, se muestra la disposición de estos dispositivos en el Arduino Uno.

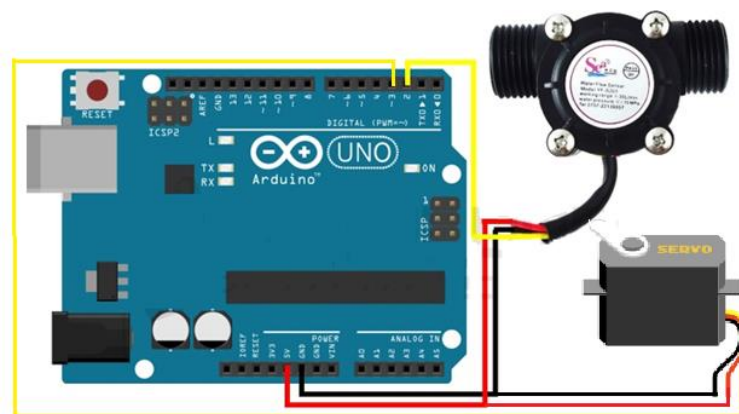


Figura # 3.34 Disposición de estos dispositivos en el Arduino Uno.

El código implementado para cumplir el objetivo de la válvula de control y lectura del sensor de caudal, para el Arduino Uno, se encuentra en el Anexo.

### 3.4.9. Sensor de Temperatura

Para realizar la adquisición de la temperatura en el tanque principal, se usa el sensor con chip DS18B20, cuya encapsulado está diseñado para medir este tipo de variable sumergida en agua, construida en alta calidad dentro de una cápsula metálica en acero inoxidable. Las características técnicas de detallan en la tabla:

Rango de alimentación:	3.0V to 5.5VDC
Detalle de salida:	red (VCC), black (GND), yellow (DATA)
Rango de operación de temperatura:	-55°C a +125°C (-67°F a +257°F)
Sensibilidad de medición:	-10°C a +85°C: $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$
Longitud de cable:	100

Tabla # 12. Características técnicas del sensor con chip DS18B20 Fuente [El fabricante]

El terminal correspondiente a DATA, es por donde se envían los datos usando el protocolo 1-Wire. Este protocolo tiene la ventaja de utilizar un solo cable para conectar varios sensores de temperatura DS18B20. Por lo tanto, solo se utilizará 1 pin digital de Arduino para conectar múltiples sensores. El diagrama de conexión se muestra en la Figura # 3.32.

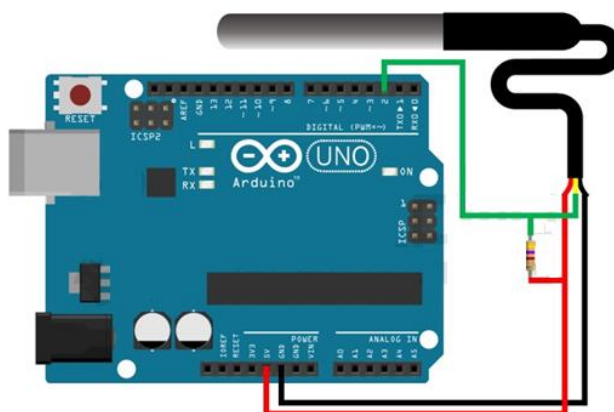


Figura # 3.35 Diagrama de conexión digital de Arduino

La configuración y el código desarrollado en el IDE de Arduino se encuentra en el Anexo, donde se ha declarado las librerías de OneWire y DallasTemperature, para el uso de este tipo de sensor, y que se encuentran disponibles en la página del fabricante.

#### **3.4.10. Sensor de distancia ultrasónico**

El sensor HC-SR04 es un módulo que tiene un par de transductores de ultrasonido, los que se utilizan de manera conjunta para determinar la distancia hacia un objeto colocado enfrente de este. El primer transductor emite una “ráfaga” de ultrasonido y el otro capta el rebote de dicha onda. El tiempo que tarda la onda sonora en ir y regresar se usa para conocer la distancia que existe entre el sensor y el objeto.

El sensor HC-SR04 se conecta por medio de dos pines digitales a Arduino, siendo el uno el pin de disparo (trigger) y el otro el eco (echo). El funcionamiento de cada uno de estos es el siguiente:

El pin trigger o de disparo, es habilitado por el Arduino, para que emita la señal.

El pin echo del sensor devuelve al Arduino, un pulso cuyo ancho es proporcional al tiempo que tarda el sonido en viajar del transductor al obstáculo y luego de vuelta al módulo.

Mediante una fórmula se puede calcular la distancia entre el sensor y el obstáculo si se conoce el tiempo de viaje del sonido, así como la velocidad de propagación de la onda sonora. La siguiente Figura, muestra los pulsos recibidos y enviados por el sensor, de acuerdo a la hoja de datos.

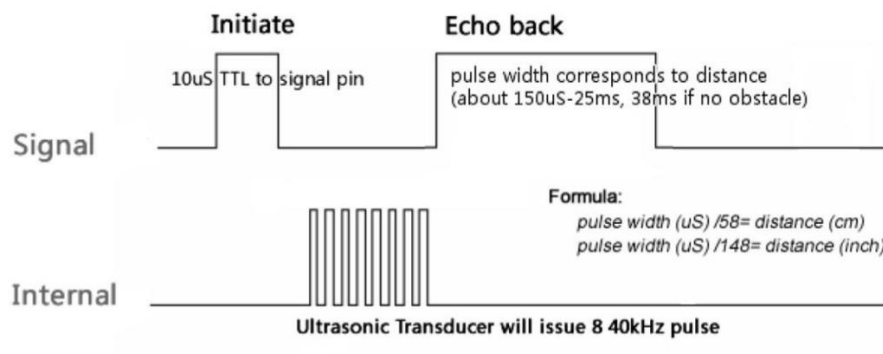


Figura # 3.36 Pulsos recibidos y enviados por el sensor. Fuente: [Arduino ]

Para calcular la distancia entre el módulo y el objeto, se usa la velocidad del sonido de 340 m/s, entonces el tiempo que demora en llegar el ultrasonido al objeto y regresar al sensor, es dos veces la distancia hacia el objeto, reemplazando en la ecuación, se tiene:

$$d = \frac{t(us)}{59(us/cm)} \quad (3.102)$$

El código implementado en Arduino para este fin se encuentra en el Anexo:

### 3.4.11. Sensor de pH

El sensor analógico para medir el pH, está especialmente diseñado para adquisición de datos con Arduino y tiene conexión instantánea a la sonda a través del puerto analógico desde donde se puede obtener mediciones de pH en una sensibilidad de  $\pm 0.1$  pH (25 °C). Para propósitos generales, este rango es de gran precisión lo que lo hace una gran herramienta para proyectos bio-robóticos y otros de bajo costo.



El sistema de medición dispone de un LED que funciona como el indicador de que tiene energía, una interfaz del sensor de PH 2.0 y un conector BNC, donde se conecta la sonda de pH. Para usarlo, de debe conectar el enchufe tipo BNC del sensor de pH, a esta interfaz para luego conectar la salida analógica en el puerto del mismo tipo de cualquier tarjeta de Arduino, las características de este dispositivo se resumen en la siguiente tabla.

Módulo de alimentación:	de	5.00 VDC
Módulo Tamaño:		43 x 32 x 32 mm
Rango de medición:		0 – 14PH
Medición de temperatura:	de	0 – 60 °C
Precisión:		± 0.1PH (25 °C)
Tiempo de respuesta:		≤ 1 min

Tabla # 13. Características del sensor de pH. Fuente [ Datos del fabricante]

El diagrama de conexión, usado para la medición directa del pH, se muestra en la Figura # 3.34.

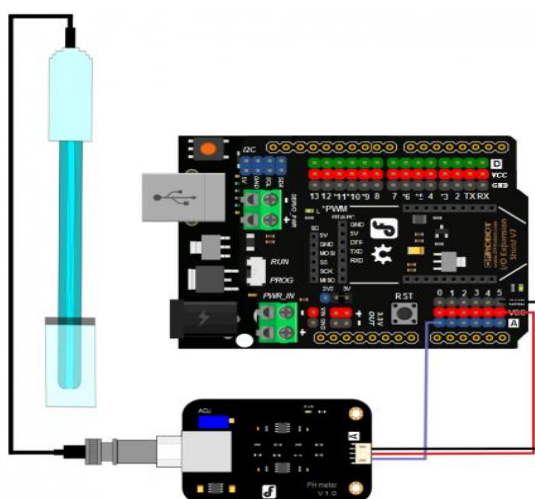


Figura # 3.37 Diagrama de conexión para medir el pH

### 3.4.12. Sensor de turbiedad

Este sensor determina el nivel de la turbidez del agua, es capaz de detectar partículas suspendidas en agua por la tasa de dispersión de transmitancia de luz.

El sensor, tiene dos modos de salida de señal, analógica y digital. Se puede seleccionar el modo en la tarjeta de control y acondicionamiento, teniendo un umbral que es ajustable en modo de señal digital.

El sensor está construido para poder ser utilizado en la medición de la calidad del agua en los ríos, arroyos, aguas residuales, medidas de efluentes, transporte de sedimentos y en laboratorios de investigación, dispone de las siguientes características:

Voltaje de operación:	5 VDC
Corriente de funcionamiento:	40 mA (Max)
Tiempo de respuesta:	< 500ms
Resistencia de aislamiento:	100 m (min)
Método de salida:	analógica
Salida analógica:	0 – 4,5 V
Salida digital:	Alto/Bajo señal de nivel (puede ajustar el valor umbral ajustando el potenciómetro)
Temperatura de funcionamiento:	5 °C ~ 90 °C
Temperatura de almacenamiento:	-10 °C ~ 90 °C
Peso:	30 g
Adaptador Dimensiones:	38 * 28 * 10 mm/1.5 *1.1*0.4inches

Tabla # 14. Características del sensor de turbidez. Fuente [Datos del fabricante]

El diagrama de conexión se muestra en la Figura # 3.35, en la que se muestra el uso en modo analógico para obtener los valores de turbiedad correspondientes, a través de la lectura de la entrada analógica del dispositivo Arduino.

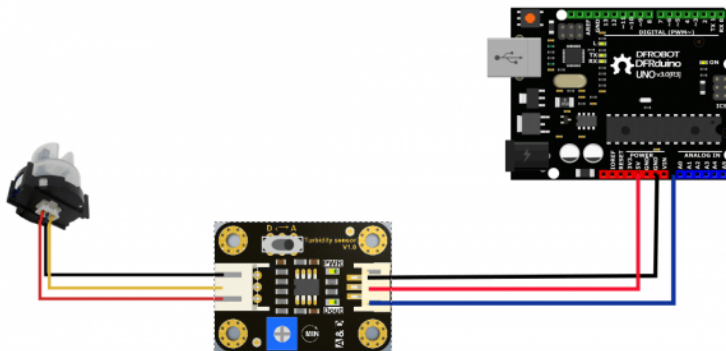


Figura # 3.38 Diagrama de conexión en modo analógico

### 3.5. Pruebas de los sensores y calibración del sistema.

Para realizar la adquisición de las variables de medida y control, se procede con la calibración de los sensores destinados para cada una de ellas, para algunos el fabricante garantiza la sensibilidad y exactitud de la medición dentro de los parámetros normales de operación, mientras que para otros es necesario realizar una calibración para garantizar el resultado de la medición realizada.

Al usar dispositivos de acondicionamiento de los sensores a través de la DAQ de NI o de la plataforma Arduino, cualquier corrección en las mediciones, se las realizará a través de líneas de programación que corregirán la curva de medida.

#### 3.5.1. Calibración del sensor de temperatura

Al usar el dispositivo DS18B20, se ha comparado con un equipo comercial de medición de temperatura, obteniendo resultados iguales en cada una de las pruebas realizadas, haciendo no necesaria la corrección de la medición realizada con el equipo.

### 3.5.2. Calibración del sensor de caudal

De acuerdo con las especificaciones del fabricante, para el sensor de flujo modelo FL-608, se obtendrán pulsos proporcionales al movimiento de las aspas del sensor de efecto Hall, mismo que entregará un pulso en alto cada vez que este atraviese el mismo. La frecuencia de estos pulsos es medida en el puerto PF10 de la DAQ 6008 o en uno de los digitales de Arduino con habilitación de interrupciones, luego de lo que este valor se debe dividir entre 5.5 de acuerdo a las especificaciones del fabricante, donde el valor resultante, representará el caudal en litros/minuto.

### 3.5.3. Calibración del actuador para el control de temperatura

El sistema de control de temperatura está basado en el sistema On/Off de las resistencias eléctricas conectadas al sistema y que proporcionarán el calor necesario en función de la señal PWM del controlador aplicada a los relés de estado sólido o SSR. Para entregar la correspondiente señal de control que sea proporcional a la frecuencia de la red eléctrica, se ha configurado en IDE el timer de los puertos de Arduino, donde se conectan los SSR de la siguiente forma:

```
TCCR2B = TCCR2B & 0b11111000 | 0x07; //controla el timer 2 pin 3 y 11 en fase-  
correcta
```

Esto configura a los pines 3 y 11 para que tengan una salida PWM de frecuencia 30 Hz.

### 3.5.4. Calibración del actuador de la válvula de control de caudal.

La válvula de control de caudal, está gobernada a través de los pulsos entregados por el pin digital de Arduino y de acuerdo con la configuración. Sin embargo, al ser una válvula de un cuarto de vuelta, está físicamente podrá variar únicamente para ángulos comprendidos entre 0° a 90° y que son correspondientes a los niveles de voltaje analógicos entregados por el pin AO0 de la DAQ 6008, experimentalmente se

encuentra que estos valores corresponden a un voltaje entre 0,4 y 2,4 VDC, los mismo que serán restricciones al momento de realizar las pruebas con los controladores.

### 3.5.5. Calibración del sensor de distancia ultrasónico

El sensor de distancia ultrasónico será utilizado para medir el nivel de agua presente en los tanques de almacenamiento, luego de aplicar varias pruebas de medición, se obtiene una curva con los datos para la corrección, misma que permitirá obtener una medida precisa al aplicar la ecuación que se muestra en la figura.

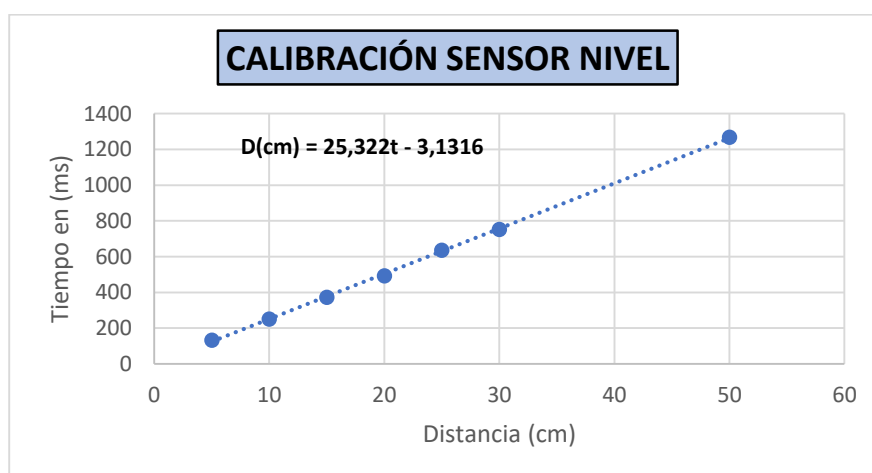


Figura # 3.39 Curva de calibración del sensor de distancia ultrasónico

### 3.5.6. Calibración del sensor de pH.

Para realizar la calibración, se compara la medición con una sustancia patrón comercial aplicada para este fin, con lo que se concluye que no es necesario realizar ninguna compensación, debido a la concordancia con el valor medido de pH de 4.15 y el valor declarado en la sustancia de  $4 \pm 0,1$  unidades.



Figura # 3.40 Calibración del sensor de pH

### 3.5.7. Calibración del sensor de turbiedad

Para realizar la calibración del sensor de turbiedad, se usan 5 sustancias patrones, que se muestran en la Figura # 3.38, con diferentes valores de turbiedad, con lo que se construye una curva y se obtiene una ecuación polinómica de grado 2 que sirve para corregir la medida y que se aplica al programa de Arduino para ajustar dicha medición.

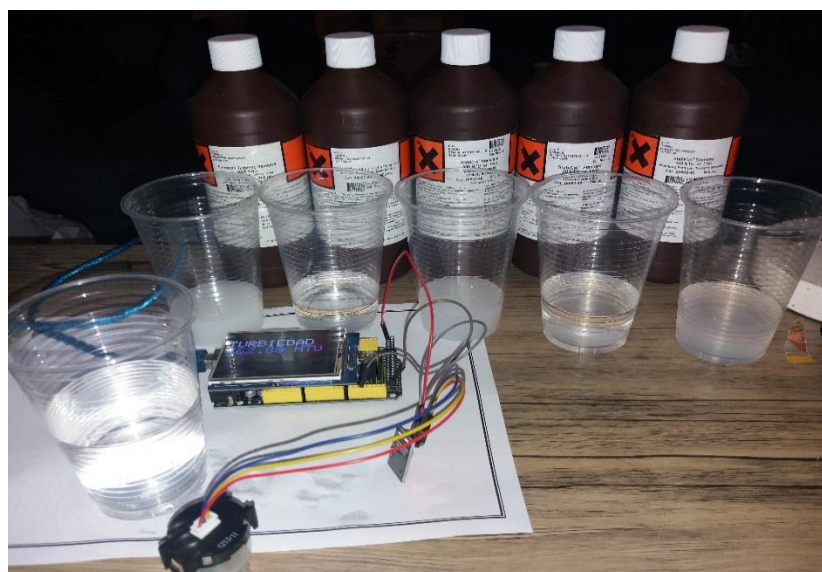


Figura # 3.41 Calibración del sensor de turbiedad

La ecuación de ajuste y corrección se muestra en la Figura # 3.39.

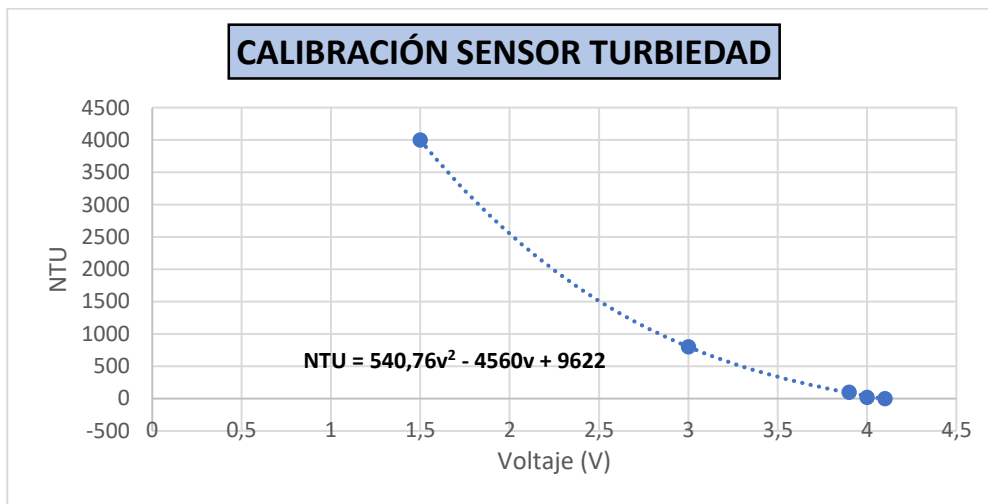


Figura # 3.42 Curva de calibración del sensor de turbiedad

## CAPÍTULO 4

# 4. IDENTIFICACION DEL SISTEMA Y CONTROLADORES

### 4.1. Identificación del sistema en condiciones normales

La identificación de sistemas dinámicos, dice Garrido en [21], es un proceso mediante el cual se busca hallar un modelo matemático, usando los valores medibles de la entrada y la salida; su metodología de cálculo, se basa en aplicar técnicas estadísticas así como métodos de regresión lineal y no lineal. Construir el modelo para un sistema desconocido, es uno de los objetivos para desarrollar sistemas de control, lo que permite simular el comportamiento real al tener un conocimiento de la estructura del sistema.

Existen varios modelos lineales que se pueden obtener como solución al proceso de identificación, entre ellos están el OE y ARX, entre los más sencillos para calcular los parámetros del modelo, el mismo que será mucho más eficiente, mientras más cerca refleje el comportamiento real de un sistema, aunque esto incrementa el coste debido a aplicación de algoritmos mucho más avanzados con estructuras más complejas.

Los modelos obtenidos, pueden ser paramétricos que están definidos por un pequeño conjunto de coeficientes o de tipo no paramétrico como las redes neuronales, cuya definición no está restringida por un número pequeño de descripciones del modelo.

La identificación de sistemas según el autor de [21], fue reconocida como un campo de investigación dentro del área de control automático, en el tercer congreso de la IFAC en Londres en 1966.



## 4.2. Modelos de sistemas dinámicos

Al trabajar en un modelo matemático obtenido a partir de las variables, se tiene una idea de la relación entre ellas, siendo estas relaciones ya un modelo del sistema; los modelos se los puede obtener a través de diferentes estructuras y con distintas formulaciones matemáticas, este modelo puede contener un grado de sofisticación requerido y dependiente de las aplicaciones y técnicas del área de aplicación.

La identificación se basa en la observación de las entradas  $u(t)$  y la de las salidas  $y(t)$ , para un número de muestras para  $t=1, \dots, N$ , entonces la construcción de modelo está dada por la relación entre estas de la forma:

$$y(t) + a_1 y(t - 1) = b_1 u(t - 1) + b_2 u(t - 2) \quad (4.102)$$

Por lo que el siguiente paso será determinar los valores de los coeficientes  $a_1$ ,  $b_1$  y  $b_2$ , para esto se podría usar entre otros el método de los mínimos cuadrados como sigue:

$$\min_{a_1, b_1, b_2} \sum_{t=1}^N (y(t) + a_1 y(t - 1) - b_1 u(t - 1) - b_2 u(t - 2))^2 \quad (4.103)$$

Al ser la anterior una función cuadrática, los valores de pueden ser calculados y el modelo resultante estará dado por:

$$y(t) + \hat{a}_1^N y(t - 1) = \hat{b}_1^N u(t - 1) + \hat{b}_2^N u(t - 2) \quad (4.104)$$

De lo anterior quedará entonces representado el modelo de un sistema, siendo este un caso especial de los problemas de identificación.

### 4.3. Modelos de entrada salida

Un modelo dinámico de entrada-salida, es descrito por Garrido en [21], como aquél que está basado en la relación de la entrada frente a la salida y supone que la salida del sistema, puede ser predicha a partir de las entradas y salidas pasadas del sistema, si se supone que este sea del tipo determinista, invariante en el tiempo de una entrada y una salida o SISO, entonces el modelo quedará definido por:

$$y(k) = f(y(k-1), y(k-2), \dots, y(k-n), u(k-1), u(k-2), \dots, u(k-m)) \quad (4.105)$$

Donde  $u(k), y(k)$ , representa la dupla entrada salida en el tiempo  $k$ ;  $n$  y  $m$ , son números enteros positivos y representan las salidas pasadas (orden del sistema) y entradas. Generalmente  $m \leq n$ , y la función  $f$ , que define el sistema, puede ser cualquiera no lineal definida en el espacio de entradas y salidas pasadas proyectadas hacia el de futuras.

Cuando el sistema es lineal, la ecuación anterior se la puede representar como:

$$y(k) = a_1 y(k-1) + a_2 y(k-2) + \dots + a_n y(k-n) \quad (4.106)$$

$$+ b_1 u(k-1) + b_2 u(k-2) + \dots + b_m u(k-m) \quad (4.107)$$

### 4.4. Modelos paramétricos lineales

La estimación de parámetros en la identificación de sistemas corresponde a procesos de la teoría de la regresión y está basada en métodos estadísticos, algunos de los modelos lineales más conocidos y que se desarrollan en [21] son:

24ARX (Auto Regresive with eXogenous inputs), y la representación viene dada por:

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t - nk) + e_k \quad (4.108)$$

Y se puede entender como una forma de encontrar el siguiente valor de la salida dadas las observaciones anteriores y las entradas,  $A(q^{-1})$  y  $B(q^{-1})$ , son polinomios en el operador que desplazan hacia atrás  $q^{-1}$ , los datos  $y(t)$ ,  $u(t)$  y  $e(t)$ , representan las salidas, entradas y ruido respectivamente, siendo este último una sucesión aleatoria normalmente distribuida con una media igual a cero y una varianza  $\sigma^2$ .

#### 4.5. OE Output Error

Cuya expresión viene dada por:

$$y(t) = \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})}u(t - nk) + e(t) \quad (4.109)$$

El valor de  $e(t)$ , representa la diferencia o error entre la salida real y la salida libre de ruido o teórica.

#### 4.6. ARMAX o Auto Regressive Moving Average with eXogenous inputs.

La expresión para este modelo viene dada por:

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t - nk) + C(q^{-1})e(t) \quad (4.110)$$

Para este modelo, la expresión  $A(q^{-1})y(t) = e(t)$  representa la auto regresión,  $y(t) = C(q^{-1})e(t)$  es la media móvil de ruido blanco, mientras que  $B(q^{-1})u(t)$ , es la entrada externa. También se suele usar la representación en el espacio de estados o el modelo de polos y ceros.

#### 4.7. Modelo en el espacio de estados

Los sistemas dinámicos, pueden ser también descritos por un modelo en el espacio de estados de orden  $n$ , de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO), no-lineal e invariante en el tiempo que tiene la forma:

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \boldsymbol{\phi}(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k)) \\ \mathbf{y}(k) = \boldsymbol{\psi}(\mathbf{x}(k)) \end{cases} \quad (4.111)$$

Donde:

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k) = (x_1(k), x_2(k), \dots, x_n(k))^\top \\ \mathbf{u}(k) = (u_1(k), u_2(k), \dots, u_m(k))^\top \\ \mathbf{y}(k) = (y_1(k), y_2(k), \dots, y_l(k))^\top \end{cases} \quad (4.112)$$

$\mathbf{x}(k)$ ,  $\mathbf{u}(k)$ , e  $\mathbf{y}(k)$  representan el vector de estados, el vector de entradas y el vector de salidas, respectivamente. Si el sistema es lineal, se lo puede representar mediante la expresión:

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{D}\mathbf{u}(k) \end{cases} \quad (4.113)$$

Donde  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$  y  $\mathbf{D}$  son matrices  $(n \times n)$ ,  $(m \times n)$ ,  $(n \times l)$  y  $(m \times l)$  respectivamente. Las expresiones anteriores, sirven para modelar tanto sistemas lineales como no-lineales.

Para la identificación de la planta piloto diseñada en este documento, se ha diseñado para cada variable su controlador independiente, por lo que se considera a cada uno de estos como un sistema lineal, causal e invariante en el tiempo que tiene una única entrada  $u(t)$  y una salida  $y(t)$ , o SISO.

Un sistema es lineal, si su respuesta es una combinación lineal de las entradas individuales y se lo considera invariante en el tiempo si su respuesta no depende del tiempo (es decir si la respuesta se mantiene constante en el tiempo), además los sistemas son causales si las salidas para un determinado instante, solo depende de la entrada actual y de los valores anteriores a dicho instante, para la respuesta impulso podrá ser descrito de la siguiente forma:

$$y(t) = \int_{\tau=0}^{\infty} g(\tau) \cdot u(t - \tau) d\tau \quad (4.115)$$

Al realizar las mediciones de las entradas y salidas, las señales se convierten casi exclusivamente en las de tipo discreto, por lo que  $y(t)$ , será obtenida solo en los instantes de muestreo  $t_k = kT$ , donde  $K=1,2,3,4,\dots$ , expresándose el sistema entonces de la forma:

$$y(kT) = \int_{\tau=0}^{\infty} g(\tau) \cdot u(kT - \tau) d\tau \quad (4.116)$$

Donde T, representará el período de muestreo. En la práctica durante la identificación, la entrada  $u(t)$ , es mantenida constante entre los intervalos de muestreo, de tal forma que:

$$u(t) = u_k, \text{ donde } kT \leq t < (k + 1)T \quad (4.117)$$

Esto hace que se simplifique el proceso del análisis, quedando:

$$\begin{aligned} y(kT) &= \sum_{n=1}^{\infty} \int_{\tau=(n-1)T}^{nT} g(\tau) \cdot u(kT - \tau) d\tau \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \int_{\tau=(n-1)T}^{nT} g(\tau) d\tau \right] \cdot u_{k-n} = \sum_{n=1}^{\infty} g_T(n) \cdot U_{k-n} \end{aligned} \quad (4.118)$$

Al asumir un intervalo de tiempo unitario, se puede escribir lo anterior para valores de  $t=1,2,3\dots$  como:

$$y(t) = \sum_{k=1}^{\infty} g_{T=1}(k) \cdot u(t-k) = \sum_{k=1}^{\infty} g(k) \cdot u(t-k) \quad (4.119)$$

#### 4.8. Caracterización de Perturbaciones

Por definición, las perturbaciones no se pueden predecir, sin embargo, la información acerca de valores pasados de estas resulta de mucha utilidad para predecir valores futuros, entonces se define un marco probabilístico que describa posibles valores futuros como sigue:

$$v(t) = \sum_{k=0}^{\infty} h(k) \cdot e(t-k) \quad (4.120)$$

Donde  $\{e(t)\}$  es una secuencia idénticamente distribuida de variables aleatorias independientes, con una cierta función de densidad normal. Mientras que la secuencia  $\{h(k)\}$ , corresponde a la respuesta impulsiva del modelo de ruido. Estos conceptos son aplicados para fines prácticos.

#### 4.9. Análisis por Correlación

Para el sistema supuesto lineal invariante en el tiempo, la salida  $y(t)$ , se puede escribir en función de la respuesta unitaria al sistema como:

$$y(t) = \sum_{k=1}^{\infty} g(k) \cdot u(t-k) + v(t) \quad (4.121)$$

Para una secuencia considerada estacionaria de la entrada, se puede escribir:

$$E\{u(t) \cdot u(t-\tau)\} = R_{uu}(\tau) \quad (4.122)$$

Donde

$$E\{u(t).u(t - \tau)\} = 0 \quad (4.123)$$

Expresando lo anterior en el dominio del tiempo,

$$E\{u(t).u(t - \tau)\} = R_{uu}(\tau) = \sum_{k=1}^{\infty} g(k).R_{uu}(k - \tau) \quad (4.124)$$

La función de auto correlación si la entrada al sistema es ruido blanco será:

$$R_{uu}(\tau) = E\{u(t + \tau).u(t)\} = \sigma^2 \delta(\tau) = \begin{cases} \sigma^2, & \text{si } \tau = 0 \\ 0, & \text{si } \tau \neq 0 \end{cases} \quad (4.125)$$

La inter-correlación o correlación cruzada entre la entrada y la salida será:

$$R_{yu}(\tau) = E\{y(t + \tau).u(t)\} = \sigma^2 g(\tau) \quad (4.126)$$

En la expresión anterior,  $g(\tau)$  es la respuesta impulsiva del sistema. Ahora se puede hallar, una estimación de la respuesta al impulso dada por:

$$\hat{g}(\tau) = \frac{1}{\sigma^2 N} \sum_{t=1}^N y(t + \tau).u(t) \quad (4.127)$$

Cuando en la entrada no se dispone de ruido blanco, se usa un filtro  $L(q)$  que se lo denomina blanqueante, que tomará una serie de datos y se obtendrá una secuencia no correlacionada que tendrá la forma:

$$\mathbf{u}_f(t) = L(q)\mathbf{u}(t) \quad (4.128)$$

Filtrando los nuevos datos con el mismo filtro y tomando estos nuevos se obtiene la estimación de  $g(k)$ .

$$R_{y_f u_f}(\tau) = E\{L(q) \cdot y(t + \tau) \cdot L(q) \cdot u_f(t)\} = L(q) \cdot E\{y(t + \tau) \cdot u_f(t)\} =$$

$$L(q) \cdot E\left\{\frac{1}{L(q)} y'(t + \tau) \cdot u_f(t)\right\} = \sigma_{u_f}^2 \cdot g(\tau) \quad (4.129)$$

Todo el procedimiento seguido se lo conoce como análisis por correlación.

#### 4.10. Procedimiento de la identificación

Para el diseño de los controladores que actuarán en la planta, es necesario obtener los modelos matemáticos, a través del proceso de medición de las variables en lazo abierto, por lo que se ha procedido a realizar una interfaz que permita observar y registrar la dinámica de los sistemas, para esto es necesario realizar experimentos dentro de los rangos de operación del sistema, considerando las características de operación para cada uno de estos.

#### 4.11. Obtención del modelo de la dinámica de la temperatura

La temperatura del sistema está dada por la mezcla del agua recirculante dentro del tanque de flotación con el agua de tratamiento que ingresa al mismo, considerando que esta mezcla permanecerá dentro del tanque por aproximadamente de entre 5 a 40 minutos, según las condiciones planteadas en el diseño y que, para mantener una dinámica aceptable, se considera trabajar a 30°C.

En las mediciones iniciales se ha encontrado una variación, luego de llegar al punto de operación de aproximadamente 0,05 °C/min, por lo que se considera es una variación lenta y que de acuerdo a los objetivos de la planta, se podrá compensar durante el proceso una variación de  $\pm 2^\circ\text{C}$ , por lo que el experimento que se diseña para medir la dinámica del sistema deberá tener cambios en la señal de prueba en intervalos no menores de 20 minutos.



Los ensayos que se realizaron fueron diseñados en una interfaz desarrollada bajo Labview, que permite generar manual o aleatoriamente las señales que servirán para obtener la respuesta del sistema, en la figura siguiente se muestra la interfaz aplicada para este fin.

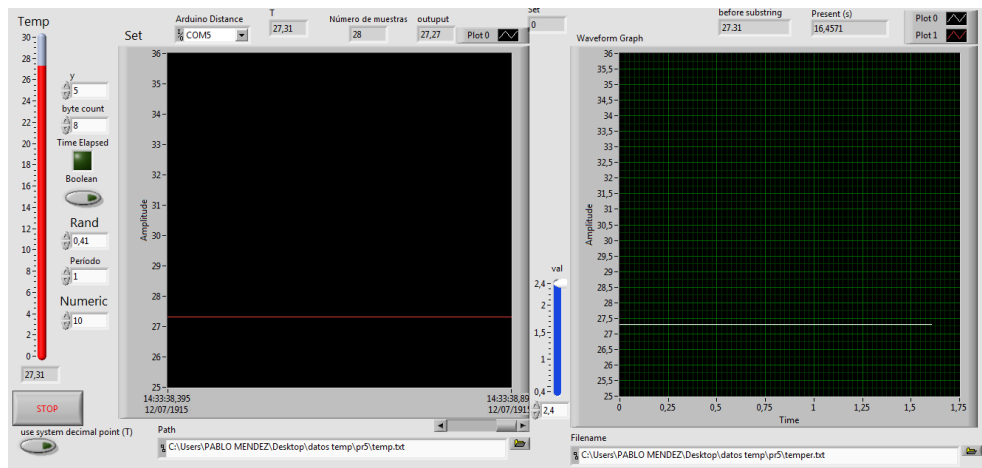


Figura # 4.43 Interfaz para la adquisición de datos del sistema

Los valores obtenidos de las pruebas han sido procesadas y cargadas en el Toolbox Idem de Matlab, mediante el que se procede a encontrar el modelo del sistema y que se muestra a continuación y representa los datos de temperatura medidos al cambiar la entrada en su valor de 0 a 1 de acuerdo con una señal del tipo pseudo aleatoria binaria o PRBS.

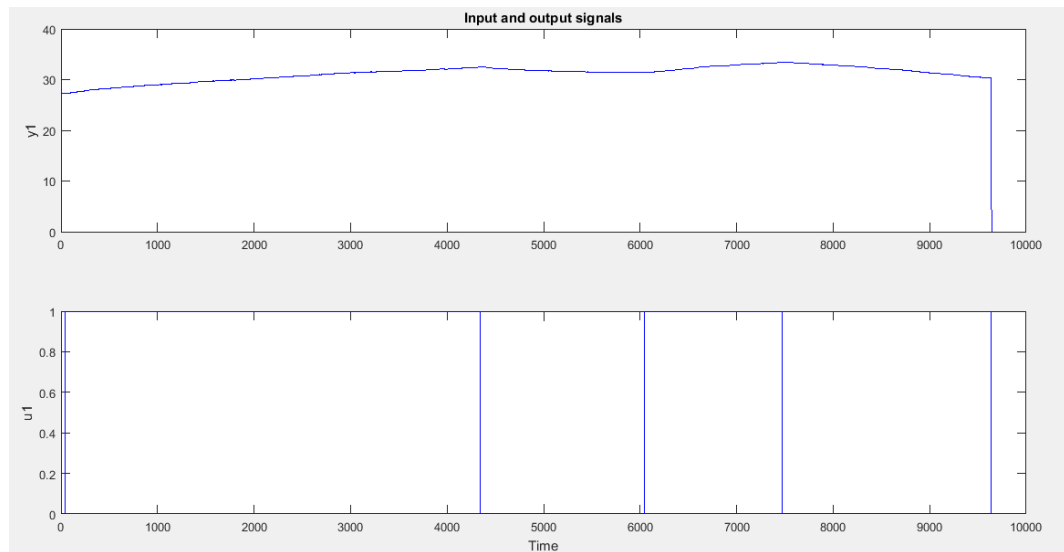


Figura # 4.44 Señales de entrada – salida y temperatura de la planta

Para el controlador de nivel, es necesario realizar la señal PRBS para identificar el sistema con características cambiantes mucho más cortas que para la temperatura; en las primeras pruebas se encuentra que la dinámica del proceso, el nivel cambia a razón de 1 cm/min; se fija un set point en 40 cm y se espera que el proceso por razones físicas no cambie más de  $40 \pm 2,5$  cm. Se utiliza la misma interfaz anterior, modificando los rangos de prueba que serán de 0,4 a 2,4 por las condiciones del sistema. Los resultados obtenidos de las pruebas realizadas se muestran a continuación y representan la dinámica de la variación del nivel.

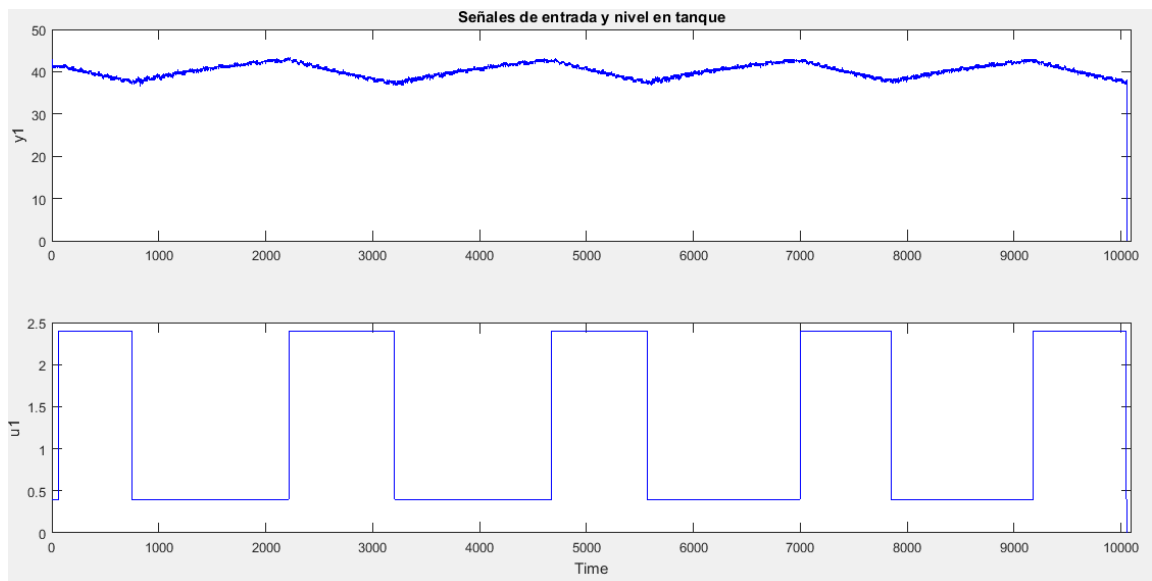


Figura # 4.45 Señales de entrada y salida nivel.

## 4.12. Procesamiento de las señales obtenidas y filtrado

### 4.12.1. Acondicionamiento de los datos

Obtenidos los datos reales de la planta, de acuerdo con Kunusch en [22], es necesario realizar un procesamiento sobre ellos, debido a que en el proceso se pueden haber dado ciertas deficiencias inherentes a la adquisición tales como:

- Perturbaciones con valores de componentes de alta frecuencia no deseados.
- Bursts que son ráfagas de valor unitario y/o outliers o valores que no siguen la distribución teniendo las dos características de señales ocasionales.
- Drift, offset o señales con componentes de baja frecuencia, posiblemente periódicas.

Un sistema lineal e invariante en el tiempo se lo puede describir por medio de una función de transferencia o por la respuesta impulsiva, se pretende ahora obtener estas funciones aplicando técnicas directas sin hacer una preselección de modelos

posibles. El método que aplicar entonces es de análisis por correlación que calcula los parámetros en el dominio del tiempo.

El siguiente paso es obtener el modelo, se ejecuta el Ident de Matlab y se comprueba de entre los modelos calculados, el que más se ajusta a la respuesta, los modelos obtenidos con el mejor valor de correlación se muestran en las figuras donde además en la gráfica obtenida se puede visualizar la respuesta obtenida del proceso de identificación.

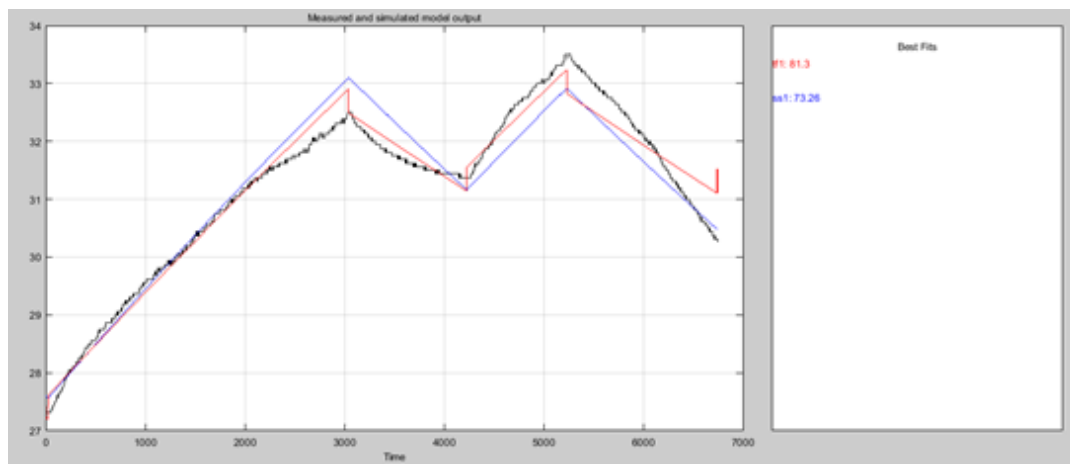


Figura # 4.46 Obtención de los modelos de identificación en Matlab - temperatura.

De los valores de correlación obtenidos en el toolbox de Matlab, se observa que el modelo que más se ajusta a los datos obtenidos es el de función de transferencia con  $tf1 = 81,3\%$ , y también se muestra el modelo del espacio de estados  $ss1 = 72,26\%$ . Los modelos de los procesos obtenidos con Matlab, para los datos de temperatura, se muestran en la ecuación siguiente, para la representación en la forma función de transferencia de grado 1, con la que se realizan los procesos de simulación posteriores:

$$tf1 = \frac{0.08239s + 0.0005711}{s + 3.617e^{-05}} \quad (4.130)$$

En la figura siguiente, se muestra la respuesta del modelo en lazo abierto a una función escalón, en la que se puede observar el incremento de temperatura por efecto de la aplicación de la señal de entrada.

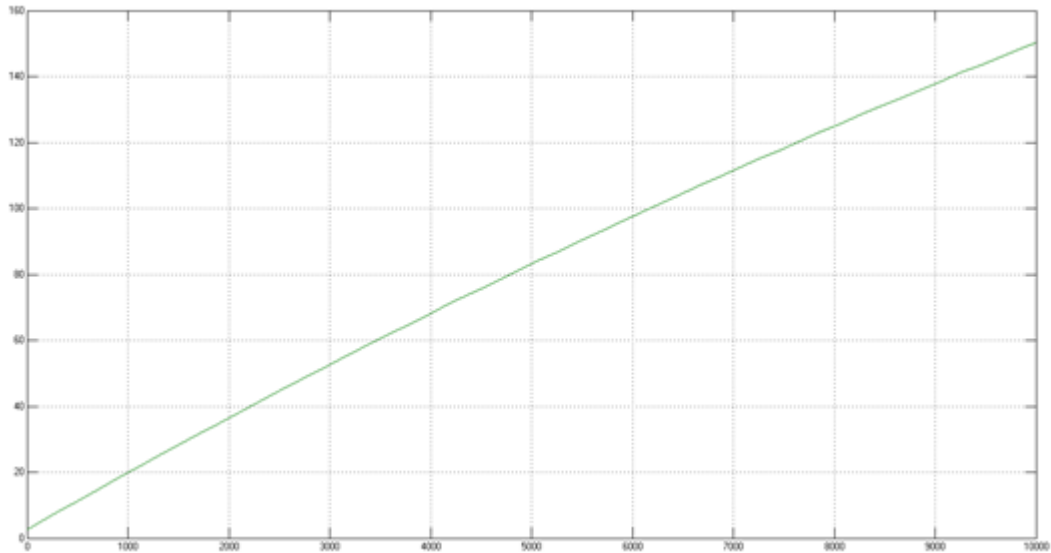


Figura # 4.47 Respuesta del sistema en lazo abierto, temperatura.

Para las variables obtenidas por medio de la interfaz para el control de nivel, se realiza la identificación del sistema usando el mismo método anterior, con él que se obtienen los resultados mostrados en la figura siguiente, aquí se muestra que la mejor respuesta, está dada por el sistema en la representación  $n4s1$ , que es una representación en el espacio de estados.

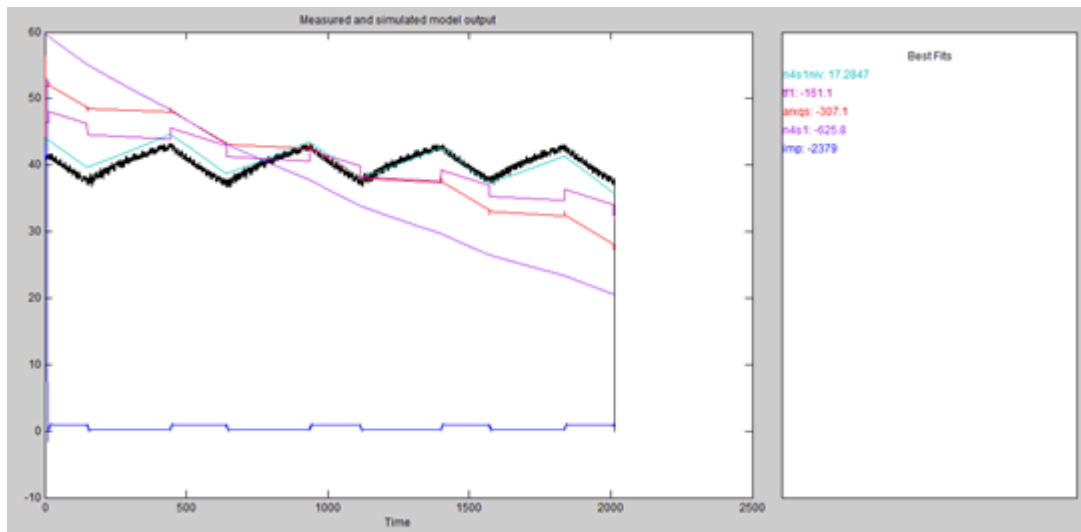


Figura # 4.48 Obtención de los modelos de identificación en Matlab - nivel.

La representación matemática para el sistema identificado en el modelo de espacio de estados se muestra a continuación, para un sistema de orden 1, representado en la siguiente matriz:

$$x(t + Ts) = [1]x(t) + [-1.868e^{-6}]u(t) + 5.983e^{-5}e(t)$$

$$y(t) = [2510]x(t) + [0]u(t) + e(t)$$

La gráfica de la respuesta para lazo abierto del modelo del sistema se muestra a continuación, la misma que indica la variación inversa de la salida con respecto a la entrada, al tener la válvula de control a la salida del tanque de almacenamiento:

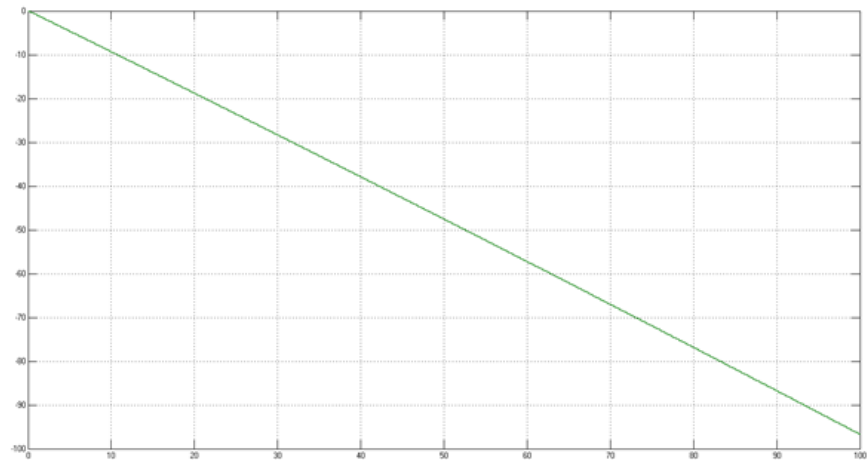


Figura # 4.49 Respuesta del sistema en lazo abierto - nivel.

#### 4.13. Simulación de algoritmos para control PID

A continuación, se realiza la simulación de la dinámica de un controlador PID, al que se lo sintoniza ajustando los parámetros de máximo sobre impulso no mayor al 10%, esto con el objetivo de agilizar la respuesta del sistema tratando de que llegue al valor de consigna de la manera más rápida posible, se considera la estabilización del sistema se realiza la simulación del sistema y se obtienen los siguientes resultados.

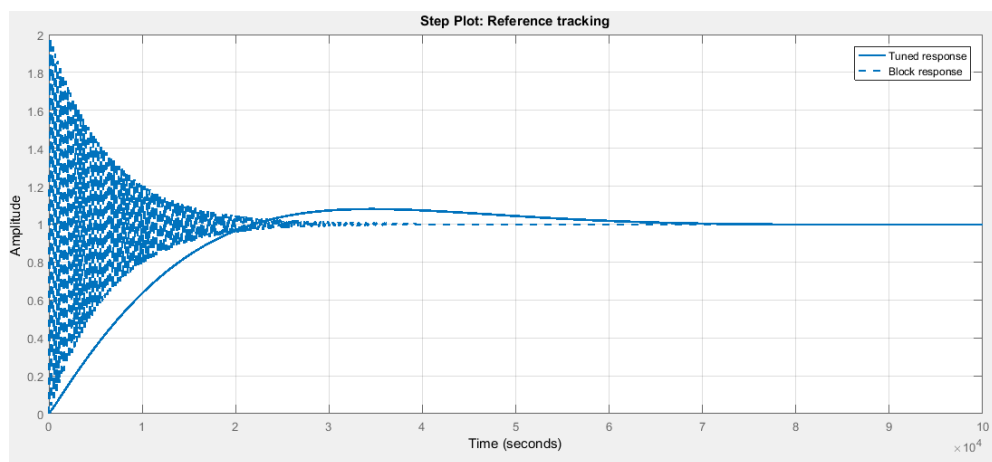


Figura # 4.50 Respuesta del sistema para un controlador PID.

Estos parámetros se consiguen para valores del PID, y las características obtenidas se muestran en la figura.

Controller Parameters		
	Tuned	Block
P	0.14587	0.14587
I	1.4519e-05	1.4519e-05
D	-12.936	-12.936
N	0.011276	0.011276

Performance and Robustness		
	Tuned	Block
Rise time	1.58e+04 seconds	1.58e+04 seconds
Settling time	5.85e+04 seconds	5.85e+04 seconds
Overshoot	7.95 %	7.95 %
Peak	1.08	1.08
Gain margin	88.1 dB @ 0.15 rad/s	88.1 dB @ 0.15 rad/s
Phase margin	71 deg @ 9.87e-05 rad/s	71 deg @ 9.87e-05 rad...
Closed-loop stability	Stable	Stable

Figura # 4.51 Parámetros de ajuste del PID y calidad del controlador temperatura.

Se realiza la simulación del control PID acoplado al modelo de la planta, sintonizado para obtener la respuesta cuyo sobre impulso no supere el 10% y cuya respuesta sea lo más rápida posible considerando la dinámica del proceso. Una vez sintonizado el controlador se muestran los resultados en la siguiente figura:



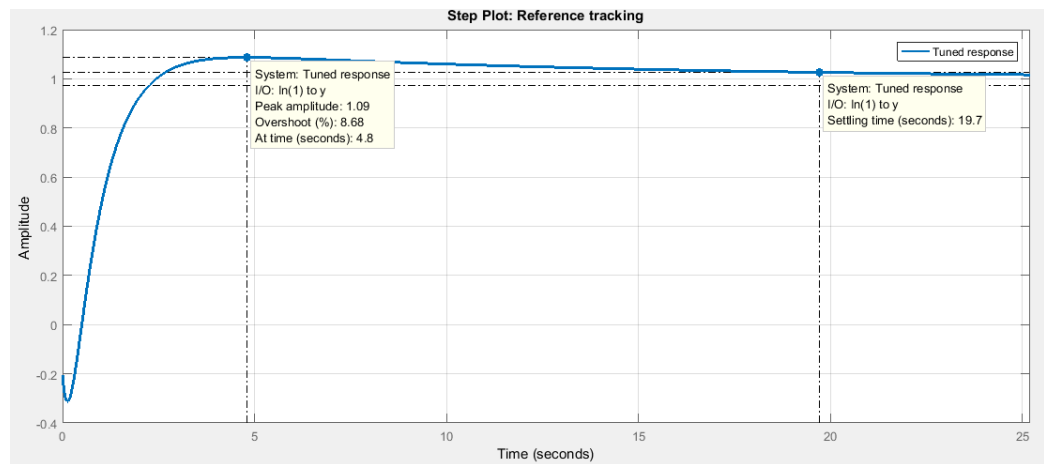


Figura # 4.52 Respuesta del sistema para un controlador PID.

Los parámetros de sintonía y robustez del controlador se muestran en la figura:

Controller Parameters	
	Tuned
P	-156.3844
I	-11.8896
D	10.0177
N	8.325
Performance and Robustness	
	Tuned
Rise time	1.4 seconds
Settling time	19.7 seconds
Overshoot	8.68 %
Peak	1.09
Gain margin	9.62 dB @ 6.11 rad/s
Phase margin	60 deg @ 0.794 rad/s
Closed-loop stability	Stable

Figura # 4.53 Parámetros de ajuste del PID y calidad del controlador nivel.

#### 4.14. Simulación de algoritmos para control Predictivo

Para simular el control predictivo se usa el mpctool de Matlab, para lo que es necesario definir primero la planta en este toolbox. Para realizar la simulación la planta debe ser definida como función de transferencia, esta se ingresa en el simulador del mpc como se muestra en la figura:

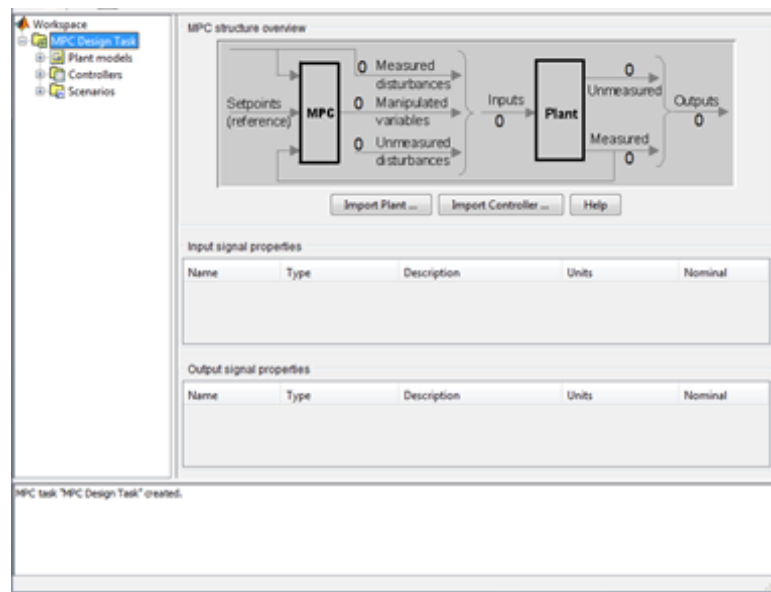


Figura # 4.54 MPC design tools, ingreso de la planta al simulador.

Una vez importado el modelo de la planta, se diseña el controlador, esto consiste básicamente donde se seleccionan los parámetros del diseño como son:

Control interval y es el tiempo cada cuanto se quiere muestrear

Prediction Horizon, es el horizonte de predicción requerido

Control horizon siendo el horizonte de control.

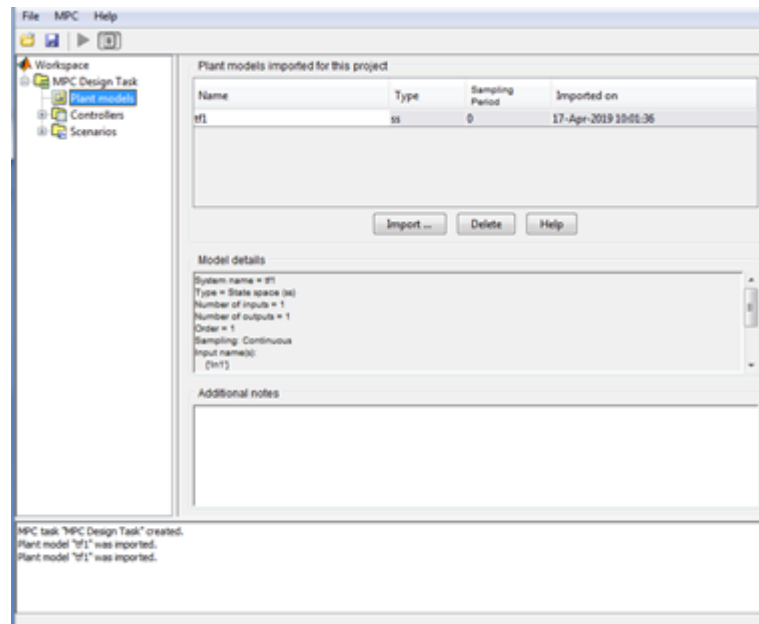


Figura # 4.55 Ingreso de la planta del sistema.

Asignados los valores a estos parámetros de la función de costo, se parametriza los valores de las restricciones que son los límites físicos del sistema y que pueden ser al control (variables manipuladas), a la variación del control, a las variables de salida. En el controlador de temperatura, se utiliza un sistema para la variación del actuador de control de las resistencias, cuyo voltaje cambia de 0V a 5V, mientras que para el actuador de la válvula se tiene un valor mínimo un valor máximo de voltaje son de 0.4V y 2.4V respectivamente. Esos valores son ingresados en los campos de la ventana de Constraints on manipulated variables (Minimum and Maximun).

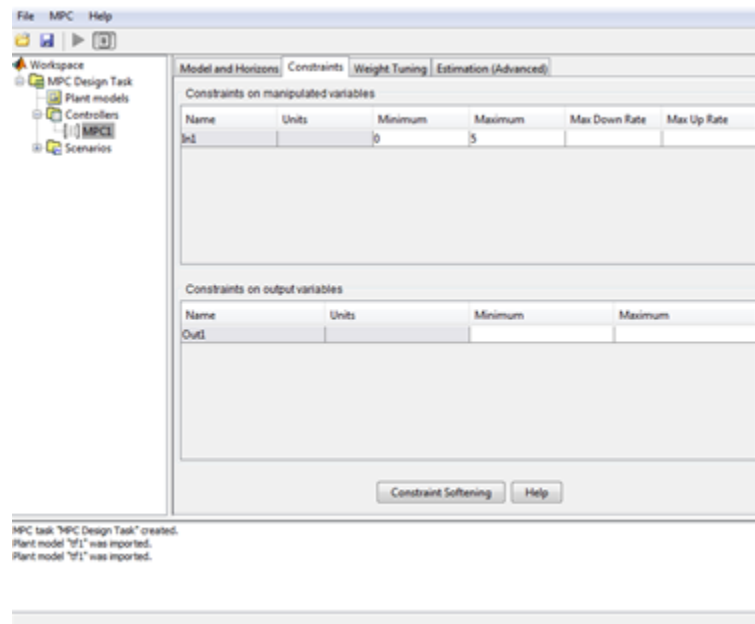


Figura # 4.56 Ingreso de las restricciones al controlador.

Para configurar el escenario de simulación, se pasa a la ventana Scenario, se selecciona Close loops, Enforce constraints, al campo Control interval se asigna el valor 2. En el campo Controller se asigna la variable MPC1, como planta se asigna sys y el tiempo de simulación se programa como.

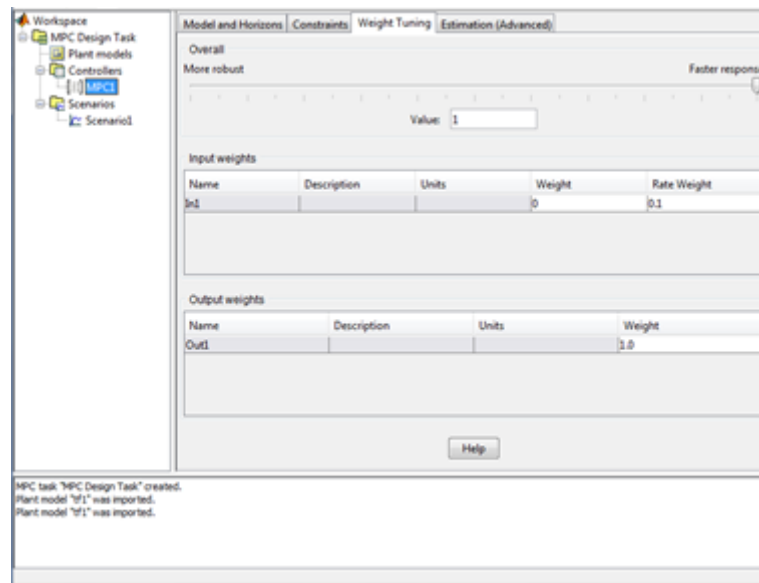


Figura # 4.57 Ingreso de pesos para la entrada y salida.

La respuesta obtenida de la simulación para el control de temperatura, se muestra en la figura.

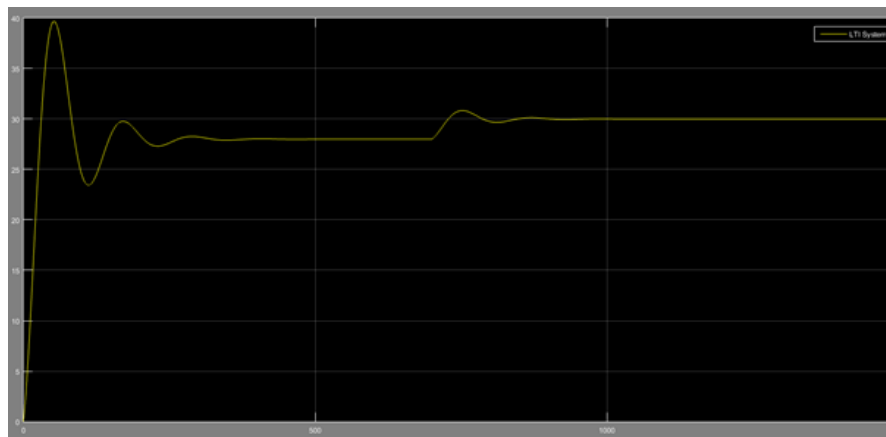


Figura # 4.58 Simulación del controlador mpc de temperatura.

La respuesta para la simulación del control de nivel usando los mismos parámetros se observan en la figura.

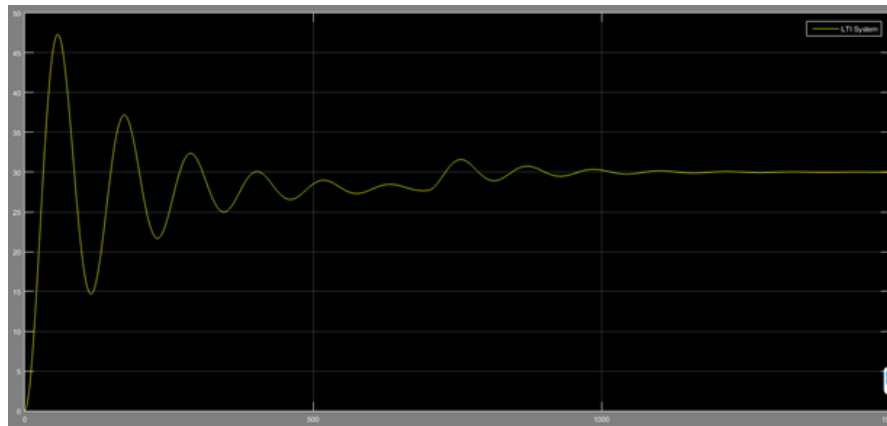


Figura # 4.59 Simulación del controlador mpc de nivel.

## CAPÍTULO 5

### 5. DISEÑO DE PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 5.1. Diseño de pruebas simuladas y reales para el control de las variables del sistema.

Para comprobar el funcionamiento del sistema, se realiza implementa en la aplicación mediante Labview, los controladores diseñados para luego comparar los parámetros de las respuestas obtenidas.

En las pruebas realizadas para los controladores, se usa agua potable debido a que, al ser una planta piloto, no se dispone de un sistema de recolección y drenaje de agua tratada, sin embargo, se prepara una muestra con 2 tipos de materiales, disueltos en agua potable para simular el principio de tratamiento para lo que la planta fue diseñada, obteniéndose los resultados que se muestran en la tabla siguiente.

Material	Cantidad disuelta	Cantidad de agua disuelta	Tiempo de prueba	Cantidad recolectada	Eficiencia
Arcilla	400 gr	100 litros	40 min	86 gr	21,5%
Carbón activado	250 gr	100 litros	40 min	63 gr	25,2%

La siguiente figura, muestra las pruebas realizadas para comprobar el tratamiento y eliminación de sólidos suspendidos.



Figura # 5.60 Pruebas de eliminación de sólidos suspendidos.

Las pruebas generales de funcionamiento se realizan en base al controlador PID por ser mucho más fácil de ajustar su respuesta, para esto se integró todos los sistemas actuadores, controladores con su respectiva programación, adicionalmente se agregó un sistema PWM para el control de las bombas el cuál es gobernado a través de la interfaz general en LabView, los mismos se muestran en la figura adjunta.

En la figura siguiente, se muestra la interfaz diseñada donde se muestra el valor del nivel de los tanques y en la que inicia el funcionamiento del sistema ingresando los valores para la configuración de inicio.

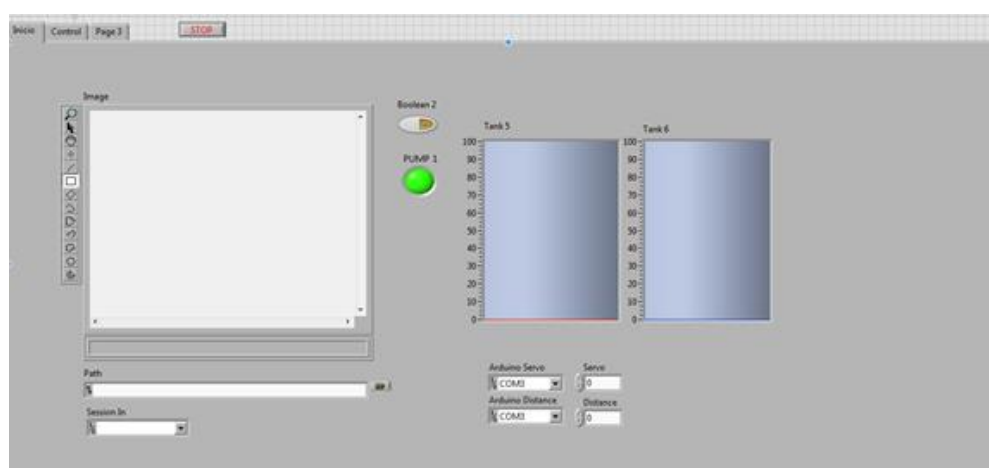


Figura # 5.61 Configuración de parámetros de la planta.



La siguiente pantalla permite visualizar y controlar las variables y características en la planta para iniciar el proceso del sistema.

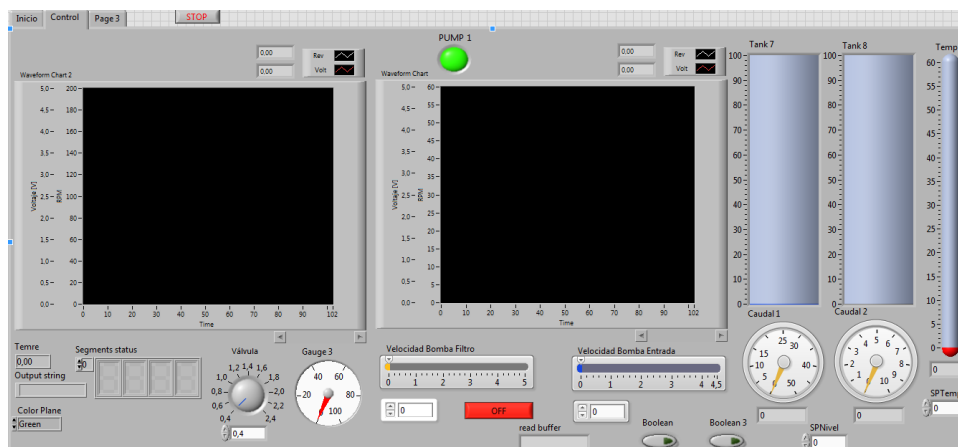


Figura # 5.62 Visualización de los parámetros del sistema para iniciar el control.

La figura adjunta muestra el sistema de control de PWM para las bombas que generan perturbaciones en el sistema.

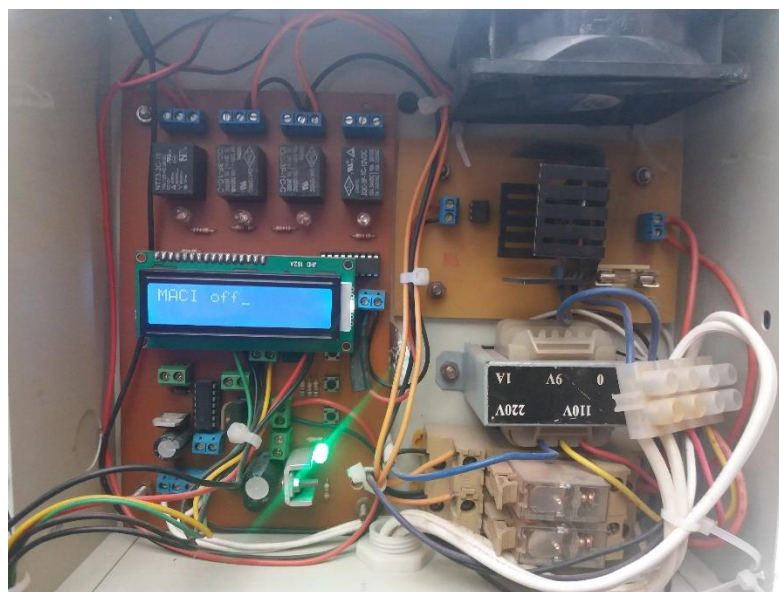


Figura # 5.63 Control de bomba PWM.

## 5.2. Análisis de resultados obtenidos con los controladores.

Se han realizado pruebas con los dos tipos de controladores como se muestra en las figuras siguientes donde se han corrido pruebas dentro de los rangos de operación de trabajo del sistema, sin embargo, para la comparación se han tomado los valores en bajos niveles de agua, para obtener una dinámica más rápida en los tanques con respecto a la temperatura debido a la energía necesaria para calentar el agua dentro de los rangos de operación.

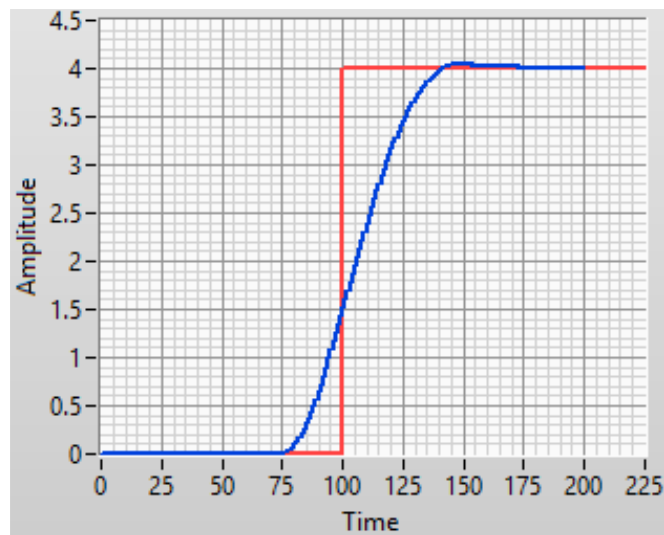


Figura # 5.64 Simulación de la respuesta del sistema de nivel con un controlador MPC.

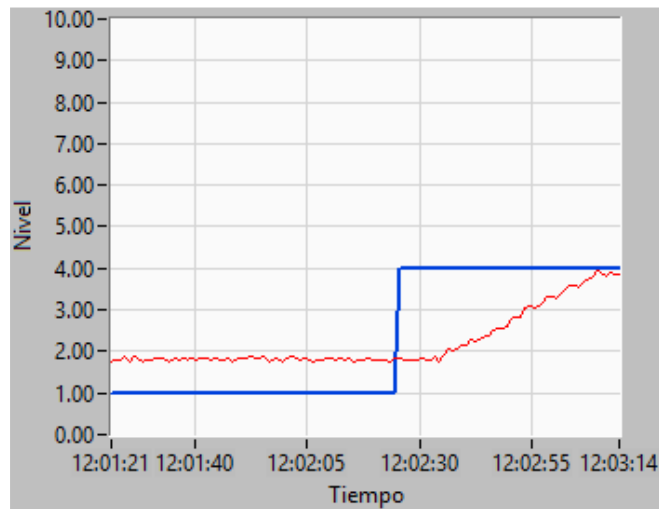


Figura # 5.65 Obtención de datos reales en la planta control de nivel MPC

Para realizar las pruebas de control de temperatura, se ha llevado al sistema a su estado de operación de 30 °C con lo que se ha simulado y obtenido los datos reales de la planta.

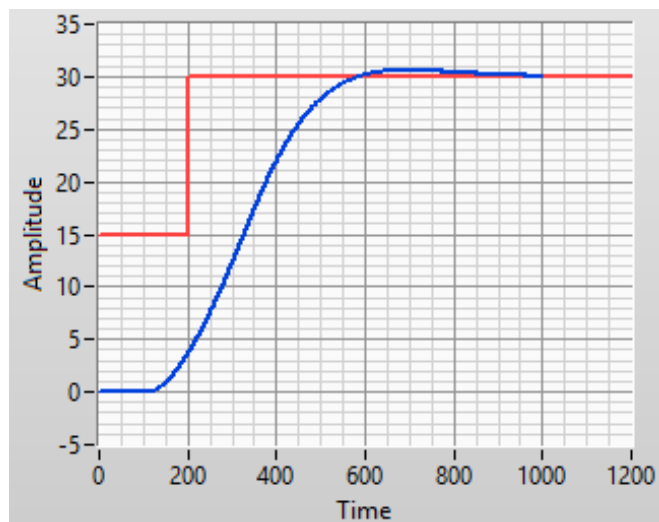


Figura # 5.66 Obtención de datos de la planta simulada con MPC, temperatura.

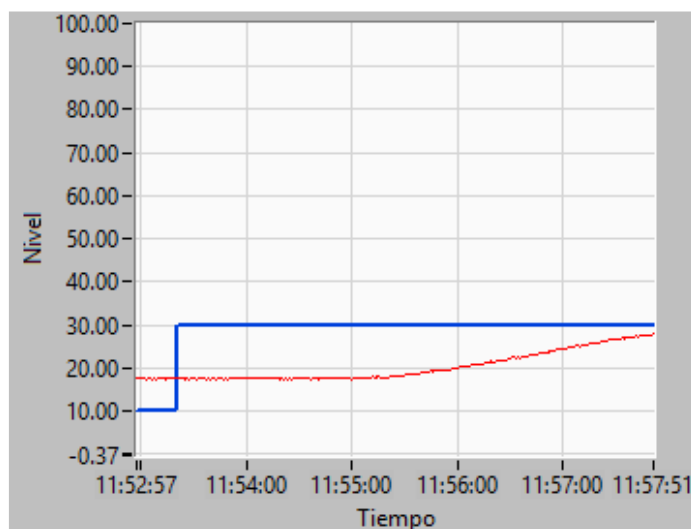


Figura # 5.67 Simulación de la respuesta del sistema control de temperatura MPC.

Los resultados obtenidos en la simulación y experimentación real en la planta han permitido ajustar la respuesta del control MPC, obteniéndose valores muy cercanos al comportamiento práctico, en donde por la medición de las variables de tiene perturbaciones en el sistema y se comprueba la robustez del mismo dentro de los rangos de operación.

### 5.3. Análisis comparativo de resultados con los dos tipos de controles.

La respuesta obtenida en la planta por los tipos de controladores PID y MPC, se muestran en las figuras, para diferentes valores de set point.

Se puede observar que el controlador MPC, tiene una respuesta más suave en el control de temperatura, en la que se estabiliza más pronto en los valores cercanos al punto de trabajo, mientras que el PID, tiene oscilaciones más altas en los valores cercanos al punto de consigna.

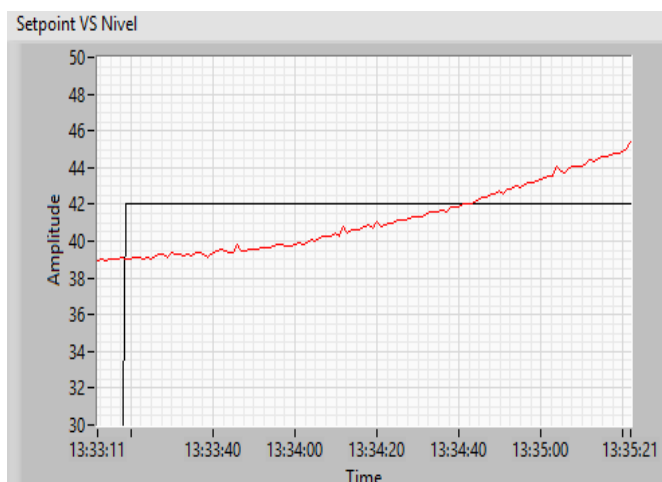


Figura # 5.68 Respuesta del sistema real con un controlador PID.

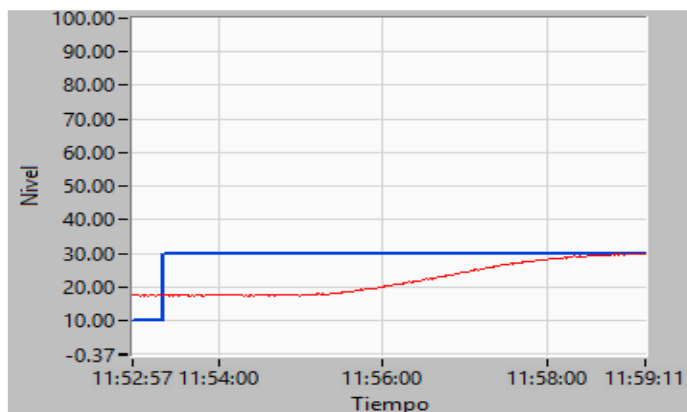


Figura # 5.69 Respuesta del sistema real con un controlador MPC.

Las respuestas del sistema obtenidos para el control de nivel se muestran en la figuras, donde se compara la eficiencia de la respuesta para referencias bajas de nivel.

En estas se muestran las oscilaciones propias del control PID, las mismas que son mucho más considerables que el MPC, mientras que el primero al llegar al punto de consiga sobrepasa la referencia con el valor teorizado, la subida del predictivo se logra sin tener altas variaciones.

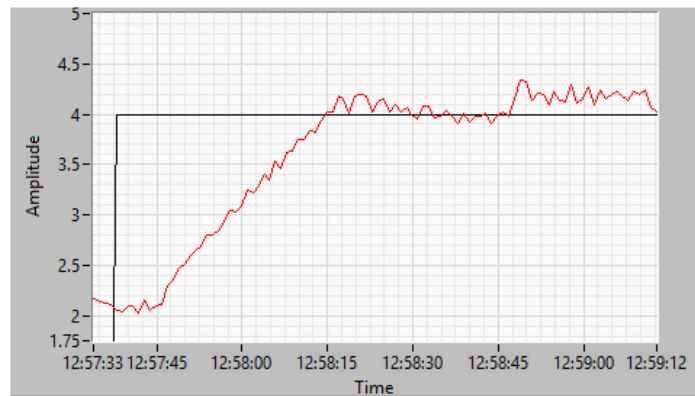


Figura # 5.70 Respuesta del sistema usando un controlador PID, nivel.

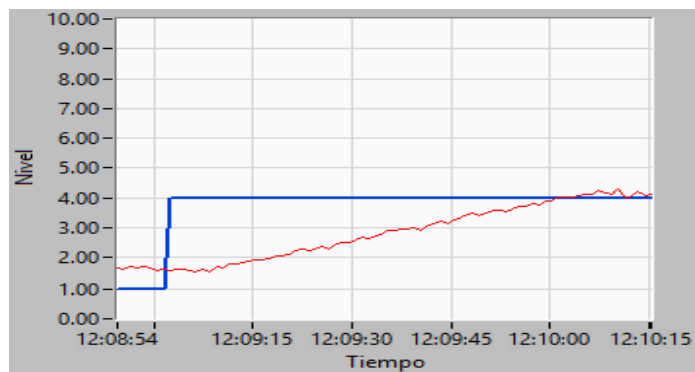


Figura # 5.71 Respuesta de sistema usando un controlador MPC, nivel.

En los dos sistemas analizados, se obtienen resultados más eficientes en cuanto a la estabilidad del equipo usando el control MPC, sin embargo, con mejores ajustes de sintonización del PID se ha logrado mejorar la respuesta del sistema.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En la disminución de contaminantes en el agua, se detecta que las variables principales que limitan el proceso de eficiencia se deben a floculación y la posterior remoción de flóculos.

Cuando se tratan aguas con poca turbiedad, es posible controlar la floculación al no tener muchas partículas disueltas en el agua y el proceso de remoción de flóculos no significa procesos fisicoquímicos complejos.

Para aguas con alta concentración de turbiedad es necesario invertir en altas cantidades de energía para la disminución de los contaminantes, lo que hace menos eficiente el proceso, si bien la implementación de los controladores como el predictivo reduce este consumo y mejora la respuesta de los sistemas aún sigue siendo alto la inversión energética en estos sistemas.

Se ha visto la necesidad de implementar sistemas móviles que sean trasladados hacia los focos de contaminación como lagunas o ríos en lo posible aplicando energías renovables para su mejor aplicación.

La generación de las microburbujas es un factor limitante al momento de aplicar los sistemas de control convencionales como el que se implementó en este trabajo, por lo que para mejorar dicho proceso se puede usar sensores mucho más costosos que midan la concentración de oxígeno en el agua y controlen la generación de burbujas.

El toolbox Ident de Matlab permite identificar los sistemas por medio de los datos obtenidos, lo que hace más relativamente sencillo obtener una representación matemática del modelo, con lo que se puede ajustar los controladores de mejor manera y simular el comportamiento.

Se ha logrado una mejor respuesta con el controlador MPC, en casos sencillos como esta implementación la cantidad de eficiencia energética mejorar es considerable, ya que al no tener oscilaciones como con el PID se logra reducir energía en el calentamiento de la mezcla.

Es recomendable usar sistemas de generación portátiles que permitan aplicar en sitios remotos, reduciendo de esta forma los costos que implica bombear el agua hacia la planta de tratamiento, por lo que es mejor aplicar generación con turbinas que pueden ser transportadas.



## BIBLIOGRAFIA

1. INNOVA, *PRIMER CONCURSO NACIONAL DE PROYECTOS DE FORMACION Y FORTALECIMIENTO DE CAPACIDADES REGIONALES CHILE*. CENTRO PARA EL DESARROLLO DE TECNOLOGÍAS DE EXPLOTACIÓN SUSTENTABLE DE RECURSOS HÍDRICOS EN ZONAS ÁRIDAS (CEITSAZA/FAPZA), 2006.
2. Vargas, I.L., *Manual Plantas de Tratamiento de filtración rápida*, ed. T.d.a.p.c. humano. Vol. I. 2004, Lima: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.
3. Féris, L. and J. Rubio, *Dissolved air flotation (DAF) performance at low saturation pressures*. *Filtration & separation*, 1999. **36**(9): p. 61-65.
4. J. S. Laskowski, J.R., *Colloid Chemistry in Mineral Processing*. 1992, New York: ELSEVIER SCIENCE PUBLISHERS B.V.
5. Arias, D.E.A., *DISEÑO DE UN SISTEMA DE FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO (F.A.D) PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL AGUA RESIDUAL DE LA INDUSTRIA LÁCTEA EL ORDEÑO Y LA CORPABE*, in *FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA*. 2014, ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL QUITO: Quito. p. 157.
6. MC Arturo Tapia Alcaraz, D.E.C.R. *Comparación de los modelos cinéticos para Flotación con aire disuelto*. 2011.
7. Tsuge, H., *MICRO AND NANOBUBBLES FUNDAMENTALS AND APPLICATIONS*, ed. T.F. Group. 2015, Broken Sound Pkwy NW, Boca Raton, FL, USA: PAN STANFORD PUBLISHING.
8. Lawrence K. Wang, P., PE, DEE; Nazih K. Shammass, PhD; William A. Selke, D. Eng; Donald B. Aulenbach, PhD, PE, BCEE, PH, FNSPE, *Flotation Technology*, ed. S. Science. Vol. 12. 2010, New York Dordrecht Heidelberg London: Springer.
9. Karl J. Åström, T.H., *Control PID avanzado*. 2009, Madrid, España: Prentice Hall. 488.
10. Mazzone, V., *Controladores PID*. *Control Automático* 1, 2002.
11. Ogata, K., *Ingeniería de Control Moderna*. Quinta ed. Ingeniería del control automático. 2010, Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, S.A.
12. Dr. Jorge Juan Gil Nobajas, D.Á.R.D.-C., *FUNDAMENTOS DE CONTROL AUTOMÁTICO DE SISTEMAS CONTINUOS Y MUESTREADOS*. 2010, San Sebastián, España: Universidad de Navarra.
13. Camacho, E.F. and C. Bordons, *Model Predictive Control*, ed. I.C. Center. 1999, Great Britain: Springer.
14. Martinez, C.O., *Model Predictive Control of Wastewater Systems*, ed. A.i.I. Control. 2010, Barcelona Spain: Springer. 246.
15. Andrews, J.F., R. Briggs, and S.H. Jenkins, *Instrumentation Control and Automation for Wastewater Treatment Systems*. Vol. 6. 2011, Bath and London: Pergamon Press.
16. Jairo o Panneso T., M.S., J.E.C. O., and J.C.R. C., *Automatización de Plantas de Tratamiento de Aguas*. *Energía y computación*, 1995. **IV**(2).

17. Básico, R.d.C.M.d.D.E.D.d.A.P.y.S., *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS-2000*. Sistemas de Potabilización. 2000, Bogotá: Ministerio de Desarrollo Económico.
18. López, J.S., A.J. Burgos, and P.U. Rodríguez, *Ficha Técnica de Etapas de Proceso de Tratamiento de Aguas Residuales de la Industria Textil*, INDITEX, Editor. 2015: Universiad de Coruña.
19. Sastre, J.A.S., *Procesos y operaciones unitarias en depuración de aguas residuales*. Tecnologías para la sostenibilidad., ed. Sostenibilidad. 2007, Madrid.
20. FORERO, J.E., J. DÍAZ, and V.R. BLANDÓN, *Diseño de un nuevo sistema de flotación para tratamiento de aguas industriales*. Ciencia, Tecnología y Futuro, 1999. 1.
21. Garrido, S., *Identificación, Estimación y Control de Sistemas No-lineales mediante RGO*, in *Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática*. 1999, Carlos III de Madrid: Leganés, 1999.
22. Kunusch, C., *Identificación de Sistemas Dinámicos*, in *Control y Servomecanismos*, U.N.d.I. Plata, Editor. 2003.
23. Plan Nacional para el Buen Vivir. SENPLADES 2009. Agenda para el Buen Vivir, Propuesta de Desarrollo y Lineamientos para el Ordenamiento Territorial. Zona de Planificacion1.2010 SENPLADES
24. Ministerio del Ambiente- Ecuador. Libro de la Calidad Ambiental TULSMA Tomo VI.

## ANEXOS

### .1. Programa para el funcionamiento del actuador de temperatura

```

const int led = 3;//salida visualización
const int pwm = 10;//salida SSR
const int pot = 0;//entrada analógica
int brillo;
void setup() {
pinMode(led, OUTPUT); // configuración del pin como salida
pinMode(pwm, OUTPUT); //configuración del pin como salida
TCCR2B = TCCR2B & 0b11111000 | 0x07;//controla el timer 2 en fase-
correcta }
void loop() {

```

```

brillo =analogRead(pot) / 4; //lectura del puerto analógico
analogWrite(led, brillo);//generación de la señal pwm visualización
analogWrite(pwm, brillo);//generación de la señal pwm SSR
delay(10);//retardo
}

```

## 2. Programa para el funcionamiento del actuador de la válvula de control y sensor de caudal

```

#include<LiquidCrystal.h>
#include <Servo.h>
Servo Servoval;
LiquidCrystal lcd(8,9,4,5,6,7);
volatile int NumPulsos;//variable para la cantidad de pulsos recibidos
int PinSensor = 2;//Sensor caudal conectado en el pin 2
float factor_conversion=5.5;//para convertir de frecuencia a caudal
const int pinPot = 1;//variable entrada analógica
const int pinServo = 3;//salida a servomotor
const int pulsoMin = 650;//pulso a 0 grados
const int pulsoMax = 2550;//pulso a 180 grados
int valor;
int angulo;
//Función que se ejecuta en interrupción
void ContarPulsos ()
{
  NumPulsos++;//incremento la variable de pulsos
}
//Función para obtener frecuencia de los pulsos
int ObtenerFrecuencia()
{
  int frecuencia;
  NumPulsos = 0;//Inicio a 0 el número de pulsos
  interrupts(); //Habilita las interrupciones
  delay(1000); //muestra de 1 segundo
  noInterrupts(); //Deshabilita las interrupciones
  frecuencia=NumPulsos;//Hz(pulsos por segundo)
  return frecuencia;
}
void setup(){
  Servoval.attach(pinServo, pulsoMin, pulsoMax);
}

```

```

Serial.begin(9600);
lcd.begin(16,2);
pinMode(PinSensor, INPUT);
attachInterrupt(0,ContarPulsos,RISING); //(Interrupcion
0(Pin2),funcion,Flanco }
void loop (){
float frecuencia=ObtenerFrecuencia();//Se obtiene Frecuencia de los pulsos
en
float caudal_L_m=frecuencia/factor_conversion;//cálculo caudal en L/m
valor =analogRead(pinPot);
angulo=map(valor, 0, 1023, 180, 0);
Servo.write(angulo);
//Envío por el puerto serie
Serial.println (caudal_L_m,1);
//Muestra de datos en display
lcd.clear();
lcd.print("SERVO VALVÚLA");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("f");
lcd.setCursor(1,1);
lcd.print(frecuencia,1);
lcd.setCursor(6,1);
lcd.print("q");
lcd.setCursor(7,1);
lcd.print(caudal_L_m,1);
lcd.setCursor(13,1);
lcd.print(angulo);}

```

### .3. Programa para la medición de la temperatura

```

#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include <LiquidCrystal.h>
#define ONE_WIRE_BUS 2
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);
LiquidCrystal lcd(8, 9, 4, 5, 6, 7);
float Celcius=0;
void setup(void){
Serial.begin(9600);
sensors.begin();
lcd.begin(16, 2);}

```

```

void loop(void){
sensors.requestTemperatures();
Celcius=sensors.getTempCByIndex(0);
Serial.print("T");
Serial.println(Celcius);
lcd.clear();
lcd.print(Celcius);
lcd.setCursor(5,0);
lcd.print(" C");
delay(50);}

```

#### .4. Programa para la medición del nivel de los tanques

```

#include<LiquidCrystal.h>
#define pingPin 22
#define ecoPin 26
LiquidCrystal lcd(8,9,4,5,6,7);
void setup() {
Serial.begin(9600);
lcd.begin(16,2);
pinMode(pingPin,OUTPUT);
pinMode(ecoPin,INPUT);
void loop() {
long di , tiempo;
float dist;
pinMode(pingPin, OUTPUT);//Activación de pin 1
digitalWrite(pingPin, LOW);
delayMicroseconds(2);
digitalWrite(pingPin, HIGH);
delayMicroseconds(10); //Duración del pulso
digitalWrite(pingPin, LOW);
tiempo=pulseIn(ecoPin,HIGH);
di=(tiempo/2);
dist=(38.97*di-2.94)/1000.0;
lcd.clear();
lcd.print("NIVEL TANQUES");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("H=");
lcd.setCursor(2,1);
lcd.print(dist);
String lonD =String(dist);
String stringD =String("H" + lonD);

```

```
Serial.println(stringD);  
delay(200);}
```