

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey
Campus Ciudad de México

Proyectos de Ingeniería

Contribución al control y monitoreo de una
planta de tratamiento de aguas residuales



Christian Calixto
Marc Cerf
Max Pablos
Roberto Rubio

Asesores:
Dr. Pedro Ponce
M. C. José Castillo

Índice de capítulos

1	Introducción	1
1.1	Antecedentes	1
1.2	Justificación del proyecto	2
1.3	Objetivos y alcances	3
1.3.1	Objetivos	3
1.3.2	Alcances	3
2	Método de tratamiento de aguas residuales por lodos activados	4
2.1	Generalidades sobre el funcionamiento de una P.T.A.R. por lodos activados	4
2.1.1	Principio	4
2.1.2	Planta de tratamiento de aguas residuales genérica	6
2.1.3	Variaciones del proceso de lodos activados:	8
2.2	Ejemplos de plantas de tratamiento por lodos activados	9
2.2.1	Planta de tratamiento de aguas residuales Aragón (DGCOH)	9
2.2.2	Planta de tratamiento de aguas residuales del ITESM	11
2.2.3	Planta de Suncoast en Australia	15
3	Introducción al funcionamiento bioquímico de una PTAR por lodos activados	17
3.1	Contaminantes de importancia dentro del agua residual	17
3.2	Reacción básica de oxidación de la materia orgánica	19
3.3	Bacterias dentro del proceso	19
3.3.1	Clasificación	19
3.3.2	Otros microorganismos	20
3.4	Principales parámetros dentro del proceso de lodos activados	20
3.4.1	Composición (PH, turbidez):	20
3.4.2	Físicos (Flujo y nivel):	21
3.4.3	Mecánicos (velocidad de las bombas y estado de las válvulas):	21
3.4.4	Químicos (tasas de dosificación):	21
3.4.5	Eficiencia (potencia empleada):	21
3.5	Variables características del proceso de lodos activados	22
3.5.1	Compuestos químicos de interés y su clasificación	22
3.6	Parámetros de importancia en el módulo biológico	23
3.6.1	Demanda bioquímica de oxígeno: (DBO)	23
3.6.2	Demanda química de oxígeno: (DQO)	24
3.6.3	Carbono orgánico total: (COT)	26

4	Alternativas de control de la materia orgánica	28
4.1	Condiciones para la eficiencia del proceso de tratamiento de aguas	28
4.2	Sensores	29
4.2.1	Principales métodos de medición usados por DBO-metros comerciales	29
4.2.2	Oxímetro	30
4.3	Alternativas para la regulación del oxígeno en el biorreactor	30
4.3.1	Controlar los tiempos de retención:	30
4.3.2	Controlar el número de difusores y su distribución dentro del biorreactor	31
4.3.3	Controlar la mezcla de aire que se inyecta al biorreactor	32
4.3.4	Controlar la recirculación de lodos en el biorreactor	32
4.3.5	Controlar la cantidad de aire inyectado variando la velocidad del aereador	32
4.4	Opciones de control	33
4.4.1	Modelo Matemático de una P.T.A.R. por lodos activados.	33
4.4.2	Identificación de la planta	40
4.4.3	Control Difuso	41
5	Control de la P.T.A.R del ITESM CCM	43
5.1	Planteamiento del problema	43
5.2	Aplicación del control difuso en la P.T.A.R del ITESM CCM	43
5.2.1	Definición de las variables de entrada	43
5.2.2	Definición de las reglas del control difuso	44
5.2.3	Descripción del control difuso en MATLAB	53
5.2.4	Sintonización del control en Matlab	59
5.3	Descripción matemática del control difuso	67
5.3.1	Introducción	67
5.3.2	Descripción de las variables	68
5.3.3	Descripción de las Funciones de membresía	69
5.3.4	Descripción de las reglas	74
5.4	Descripción de la inferencia y defuzificación	74
6	Integración del sistema: control del aereador	76
6.1	Estructura del módulo aereador	76
6.1.1	El soplador	77
6.1.2	El motor	79
6.2	Control V/F para el motor de inducción	81
6.2.1	Control escalar V/F	81
6.2.2	PWM senoidal	85
6.2.3	Controlador PI difuso	87
6.3	Integración del sistema y simulación	89
6.3.1	Simulación del PI	89
6.3.2	Simulación del sistema completo	92

7	Sensor	96
7.1	Generalidades sobre el oxímetro	96
7.1.1	Descripción	96
7.1.2	Variables a medir	97
7.2	Sonda de oxígeno.	98
7.2.1	Membrana	99
7.2.2	Solución de electrolito (KCl).	99
7.2.3	Agitador	99
7.2.4	Especificaciones.	100
7.2.5	Pruebas realizadas al termistor.	100
7.3	Circuito de temperatura.	101
7.3.1	Principio de operación.	104
7.4	Circuito de oxígeno disuelto.	110
7.4.1	Principio de operación	110
7.4.2	Calibración.	113
7.5	Oxígeno Disuelto	116
7.6	Temperatura	117
8	Sistema de adquisición de datos e interfaz de visualización	118
8.1	Introducción	118
8.2	Convertidores analógico-digital (ADC)	119
8.2.1	Microcontrolador	120
8.2.2	Código	121
8.3	Programa de Visualización de datos	124
8.3.1	Código	124
8.3.2	Puerto paralelo de la computadora	128
9	Conclusiones y trabajo futuro	131
9.1	Conclusiones	131
9.2	Trabajo futuro	132

1 Introducción

1.1 Antecedentes

Desde tiempos inmemorables, el agua ha sido un recurso vital para la subsistencia de cualquier sociedad. Hoy en día debido a la gran demanda, así como a la poca disponibilidad del vital líquido, los gobiernos de diferentes países se han visto obligados a eficientar su uso, así como a promover programas de reutilización de aguas.

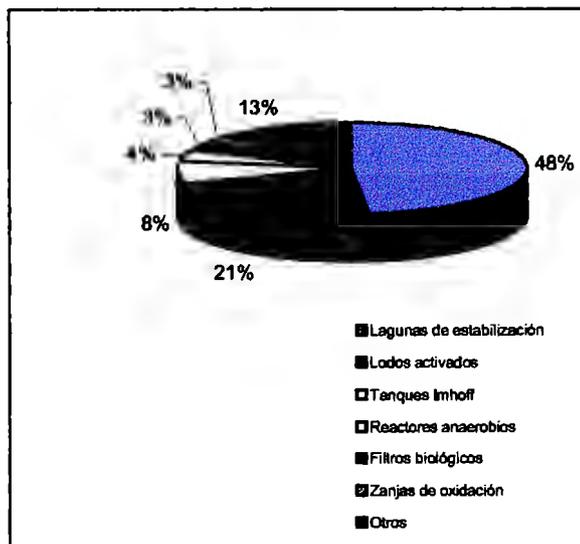
En nuestro país los centros urbanos generan 7.88 km³/año, de aguas residuales es decir 250 m³/s, de los cuales se recolectan 6.30 km³/año en la red de alcantarillado, estos tienen una demanda bioquímica de oxígeno (DBO) de 1.56 millones de toneladas; las plantas de tratamiento únicamente son capaces de tratar 0.36 millones de toneladas de DBO al año, lo que deja un déficit de 1.2 millones de toneladas de DBO.

A su vez, la industria genera 5.36 km³/año de aguas residuales es decir aguas con un requerimiento anual de 6.16 millones de toneladas de DBO, en los sistemas de tratamiento se remueven 0.80 millones de toneladas de DBO al año.

Existen diferentes métodos para tratar el agua, algunos basados en diferentes tecnologías, las más usadas en estos días son (Figura 1-1):

- Lagunas de estabilización 48%
- Lodos activados 21%
- Tanques Imhoff 8%
- Reactores anaerobios 4%
- Filtros biológicos 3%
- Zanjas de oxidación 3%
- Otros 13%

Figura 1-1. Métodos de tratamiento de agua



En el caso de la Ciudad de México, entidades federales y locales han hecho un esfuerzo conjunto para mejorar la distribución y la calidad del agua. Uno de estos esfuerzos han sido las plantas de tratamiento de aguas residuales (P.T.A.R.). Según datos de la Comisión Nacional del Agua (CNA) actualmente hay en operación 21 P.T.A.R. en el D.F. las cuales han demostrado ser insuficientes para las demandas de la metrópoli más grande del mundo. (Inventario nacional de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales CNA).

1.2 Justificación del proyecto

Tras haber revisado de manera general las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales y con más detalle una de sus implementaciones más comunes, el tratamiento por Lodos Activados, a continuación se enuncian los principales aspectos a tomar en cuenta en el proceso de operación y supervisión de una de dichas plantas. El objetivo de esto es lograr una lista de aspectos que podrían ser susceptibles de ser apoyados, mejorados u optimizados mediante la medición a distancia y que puedan ser considerados como requerimientos para una aplicación a proponer.

La operación de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales requiere de una supervisión constante, que incluye la ejecución y análisis de pruebas que deben ser llevadas a cabo por Profesional Experto y calificado con miras a garantizar su buen funcionamiento.

El Profesional Experto calificado es en gran medida costoso y muchas veces de difícil consecución.

Muchos de los sistemas de tratamiento biológico (caso los sistemas de Lodos Activados) aunque bien diseñados, no cumplen con los rendimientos esperados en una planta de tratamiento secundario, debido generalmente a deficiencias en los controles operativos de los mismos. En algunas plantas especialmente en Latinoamérica, el personal que opera los sistemas está entrenado única y exclusivamente para el manejo mecánico de los equipos así como para evaluar los procesos mediante el cálculo de las eficiencias de remoción de carga en términos de DBO y sólidos suspendidos.

1.3 Objetivos y alcances

1.3.1 Objetivos

- Diseñar e implementar un sistema de monitoreo electrónico para oxígeno disuelto y temperatura en el biorreactor de la P.T.A.R. (Planta de Tratamiento de Aguas Residuales) del ITESM CCM.
- Diseñar y validar a través de simulación el sistema de control basado en lógica difusa.

1.3.2 Alcances

- Diseño, calibración e implementación de un oxímetro y un termómetro con salida a puerto paralelo (DB-25)
- Utilización de un software de visualización de oxígeno disuelto y temperatura en el biorreactor con comunicación serial.
- Investigación, estudio y diseño de técnicas de control basadas en lógica difusa para el desarrollo y simulación de un regulador de oxígeno dentro del biorreactor.
- Investigación, estudio y simulación de un control escalar (Voltaje-Frecuencia) para regular la velocidad del motor de inducción que se encuentra acoplado al soplador.

2 Método de tratamiento de aguas residuales por lodos activados

2.1 Generalidades sobre el funcionamiento de una P.T.A.R. por lodos activados

2.1.1 Principio

El tratamiento de aguas por lodos activados es un proceso de tratamiento mediante el cual el agua residual y el lodo biológico (microorganismos) son mezclados y aireados en un tanque denominado aereador, los flóculos biológicos formados en este proceso se separan en un tanque de sedimentación. En el proceso de lodos activados, los microorganismos son completamente mezclados con la materia orgánica en el agua residual de manera que ésta les sirve de alimento.

Un aspecto relacionado con la separación de lodos es el concerniente a los flóculos biológicos de los lodos activados, estos están compuestos de bacterias heterotróficas y son el elemento principal para la purificación, se cuenta con dos importantes características en el proceso:

- Una eficiente remoción de materia orgánica.
- Una eficiente separación de sólidos.

2.1.2 Planta de tratamiento de aguas residuales genérica

Figura 2-1. Representación esquemática de la planta

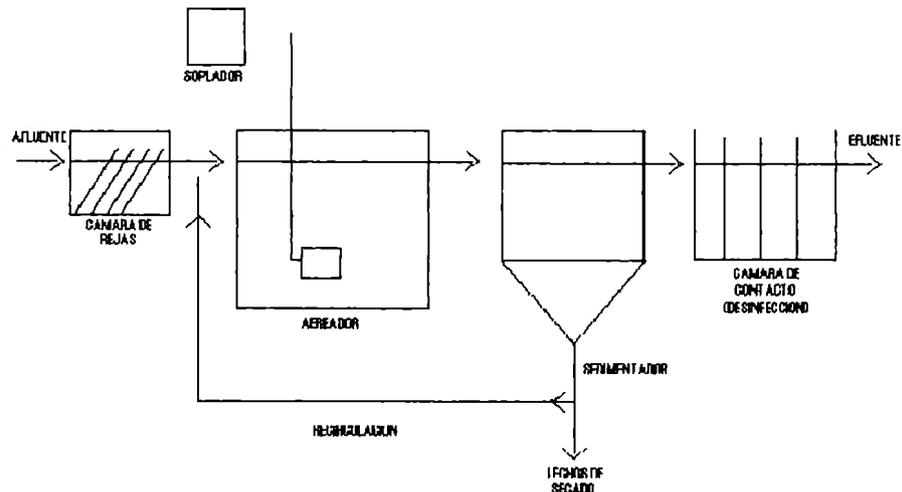


DIAGRAMA DEL PROCESO DE LODOS ACTIVADOS

Como podemos observar en el diagrama, la planta se encuentra dividida en tratamientos. Esta estructura simplificará la explicación su funcionamiento general analizando cada subsistema.

Tratamiento primario

Consiste en una serie de cribas cuya finalidad es la remoción de sólidos de gran tamaño.

Tratamiento Secundario

- **Tanque de aeración:** Estructura donde el desagüe y los microorganismos (incluyendo retorno de los lodos activados) son mezclados. Se produce una reacción biológica por efecto de O_2 en el aire.
- **Tanque sedimentador:** El desagüe mezclado procedente del tanque aerador es sedimentado para separar los sólidos suspendidos (lodos activados), obteniéndose un desagüe tratado clarificado.
- **Equipo de aireación:** Inyección de oxígeno para activar las bacterias heterotróficas.

- **Sistema de retorno de lodos:** El propósito de este subsistema es la de mantener una concentración alta de microorganismos en el tanque de aereación. Una parte de sólidos biológicos sedimentables en el tanque sedimentador son retomados al tanque de aereación. El exceso de lodos, debido al crecimiento bacteriano en el tanque de aereación, son eliminados, tratados y dispuestos.

Operación básica:

a. Pretratamiento/ Ajuste de Aguas Residuales

En algunos casos las aguas residuales deben ser acondicionadas antes de procederse con ellas en el proceso de lodos activados, esto debido a que ciertos elementos inhiben el proceso biológico, algunos de estos casos son:

- Sustancias dañinas a la activación microbiana (ej: Cl_2).
- Grandes cantidades sólidos: Usamos para esto cribas o rejas, tanque de sedimentación primaria (sólidos fácilmente sedimentables)
- Aguas residuales con valores anormales de pH lo cual implica un proceso de neutralización indispensable.
- Desagües con grandes fluctuaciones de gasto y calidad de las aguas residuales incluyendo concentración de DBO (materia orgánica total)por lo que es necesaria una etapa intermedia que es el tanque de igualación

b. Remoción de la materia orgánica en un Tanque de aereación.

Las aguas residuales crudas mezcladas con el lodo activado retornado del tanque de sedimentador final es aereado hasta obtener 2 mg/l de oxígeno disuelto o más, en este proceso una parte de materia orgánica contenida en los desagües es mineralizada y gasificada y la otra parte es asimilada como nuevas bacterias.

c. Separación sólido líquido en el Tanque de Sedimentación

Los lodos activados deben ser separados del licor mezclado provenientes del tanque de aereación este proceso se realiza en el tanque de sedimentación, concentrándolos por gravedad. La finalidad de este proceso es:

- Conseguir un efluente clarificado con un mínimo de sólidos suspendidos
- Asegurar el lodo de retorno.

d. Descarga del exceso de lodos

Con la finalidad de mantener la concentración de los lodos activados en el licor mezclado a un determinado valor, una parte de los lodos son eliminados del sistema a lechos de secado o a espesadores seguidos de filtros mecánicos (filtros prensa, de cinta etc.) para posteriormente disponer el lodo seco como residuo sólido.

2.1.3 Variaciones del proceso de lodos activados:

Estabilización por contacto: En este sistema el agua residual y los lodos activados son mezclados brevemente (20 - 30 minutos), tiempo necesario para que los microorganismos adsorban los contaminantes orgánicos en solución, pero no el necesario para que se de una asimilación de materia orgánica. El licor mezclado es sedimentado y derivado a otro tanque de aereación por un periodo de 2 a 3 horas para luego ser mezclado con el afluente ingresando al primer tanque de aereación, a este proceso se le conoce como recirculación.

Aereación por etapas: Esta modificación consiste en que el flujo de agua residual es introducida al tanque aereador por varios puntos. En los puntos de alimentación se esparce la demanda de oxígeno en el aereador resultando una mayor eficiencia de uso del oxígeno.

Aereación extendida: Su diagrama de flujo es esencialmente la misma que un sistema de mezcla completa excepto que no tiene sedimentador primario. El tiempo de retención hidráulico varía de 18 a 36 horas. Este periodo de aereación permite que las aguas residuales y lodo sean parcialmente digeridos en el tanque aereador, permitiendo su disposición sin ser necesaria una gran capacidad de digestión. Una variación del sistema de aereación extendida es la llamada zanja de oxidación.

2.2 Ejemplos de plantas de tratamiento por lodos activados

2.2.1 Planta de tratamiento de aguas residuales Aragón (DGCOH)

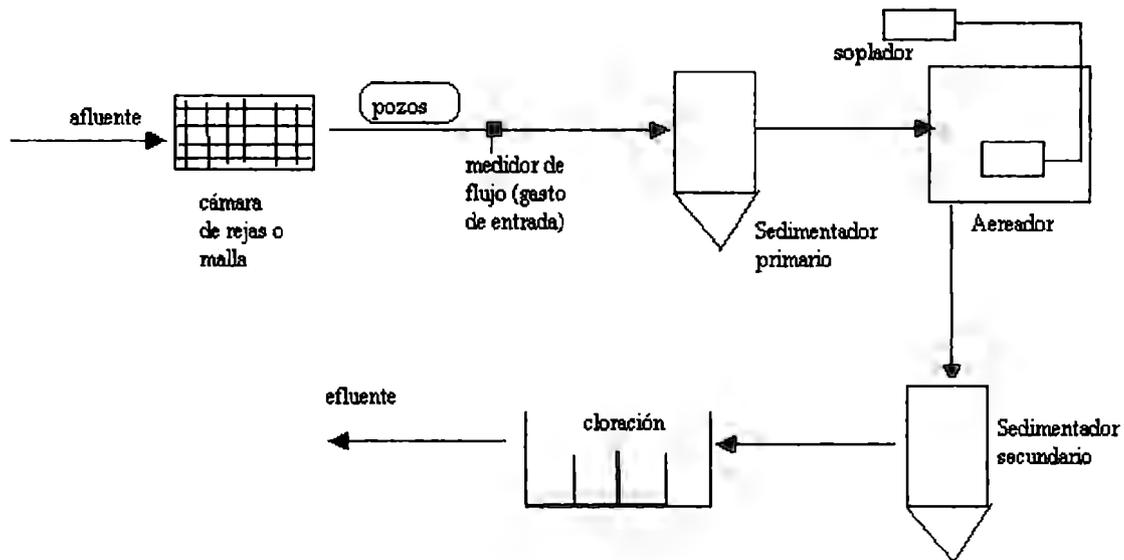


Figura 2-2. Diagrama de bloques de la planta

De igual manera describiremos cada módulo para entender su funcionamiento:

Malla o cámara de rejillas:

Se eliminan los sólidos de gran tamaño como metales, animales muertos, tablas, placas de plástico, etc. Su función primordial es evitar un desgaste en los pozos que siguen al proceso. No hay tiempo de retención.

Sedimentador primario:

Lo que se quiere en este módulo es sedimentar materiales más densos que el agua, para ello se utilizan mamparas, que son divisiones que reducen la velocidad del agua proveniente de los pozos. El tiempo de retención aquí es de una hora con treinta minutos. En todo este módulo se hace un tratamiento aerobio del agua, es decir, se regula la cantidad de materia orgánica del agua por medio de oxígeno.

Aerador (o biorreactores):

El objetivo aquí es obtener una concentración de sólidos muy pequeños. Esto se hace por medio de la formación de flóculos o conjunto de bacterias. A este conjunto de bacterias se le conoce como lodos activados, que es, el nombre que se le da a todo el proceso de tratamiento de agua de la planta. Se necesita inyectar al agua mucho aire para crear una homogeneización, de lo contrario, los flóculos se asientan en el fondo.

Se busca mantener estable la concentración de flóculos y si llegará a existir un exceso de parte de éstos, se envían al drenaje, lo cual está prohibido por las normas oficiales, ellas indican que antes de deshacerse de estos lodos deben estar completamente muertos. La concentración usual de éste parámetro es de 400ml/l de agua.

El tiempo de retención aquí es de 4 a 6 horas.

Sedimentador secundario:

Aquí se consigue la misma función que en los sedimentadores primarios, con la diferencia de que se trata de sedimentar los lodos activados. Se trata de aislar el oxígeno para que los microorganismos mueran. La deficiencia de este módulo es que no se remueven sales, ni metales ni concentraciones orgánicas.

Cloración:

Se eliminan microorganismos mediante agentes desinfectantes. Se usa cloro gas o hipoclorito de sodio.

Como podemos apreciar el funcionamiento de esta planta sigue paso a paso el proceso explicado anteriormente con la planta genérica. La única parte de la que no se tiene control es del reacondicionamiento de los lodos lo cual hace que la planta sea ecológicamente ineficiente.

2.2.2 Planta de tratamiento de aguas residuales del ITESM

Figura 2-3. Planta de tratamiento de aguas residuales del ITESM



La planta de tratamiento de aguas residuales del ITESM CCM se encarga de reciclar parte del agua que se utiliza en el campus, específicamente se recicla el agua que proviene de los baños de todos los edificios, por lo que se trata de aguas residuales sólo con sólidos biológicos, esto es, que el agua no está contaminada con químicos ni otro tipo de sustancias.

El proceso se lleva a cabo por medio de etapas, y en cada una de estas se va limpiando al agua de diferentes materiales. La secuencia no es compleja y consiste en ir "filtrando" primero los residuos de mayor tamaño, después los de mediano tamaño, y al final los residuos más pequeños.

Para dar la explicación del funcionamiento de esta planta, nos apoyaremos en fotos tomadas directamente en la planta lo cual no había sido permitido en la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DGCOH, planta Aragón). La presentación de su funcionamiento será realizado de igual manera que en los incisos anteriores, es decir por módulos:

Recolección:

Esta es la primera etapa donde toda el agua que se pretende reciclar se lleva a unos contenedores, antes de entrar a estos contenedores se lleva a cabo el primer filtrado, con una malla que detiene los sólidos de mayor tamaño. No hay tiempo de retención en esta etapa. De estos contenedores se alimentan los dos diferentes módulos de tratamiento que

existen en esta planta: El módulo Físico-químico y el módulo Biológico. Dependiendo de la cantidad de agua que se puede reciclar en cada módulo es la manera en que se van alimentando. El módulo biológico tiene un flujo de salida igual a un flujo de entrada de 4 litros por segundo y el módulo químico de 2 litros por segundo. La entrada a cada uno de estos módulos se regula por medio de válvulas.

Figura 2-4 Cribas.



Pre-tratamiento:

Tiene como función la homogeneización del agua. Este proceso se lleva a cabo por medio de sopladores que "revuelven" el agua para que tenga la misma consistencia y la densidad no se concentre en el fondo. El tiempo de retención del agua en esta etapa es nulo y de aquí se puede mandar el agua al módulo Biológico o al físico-químico.

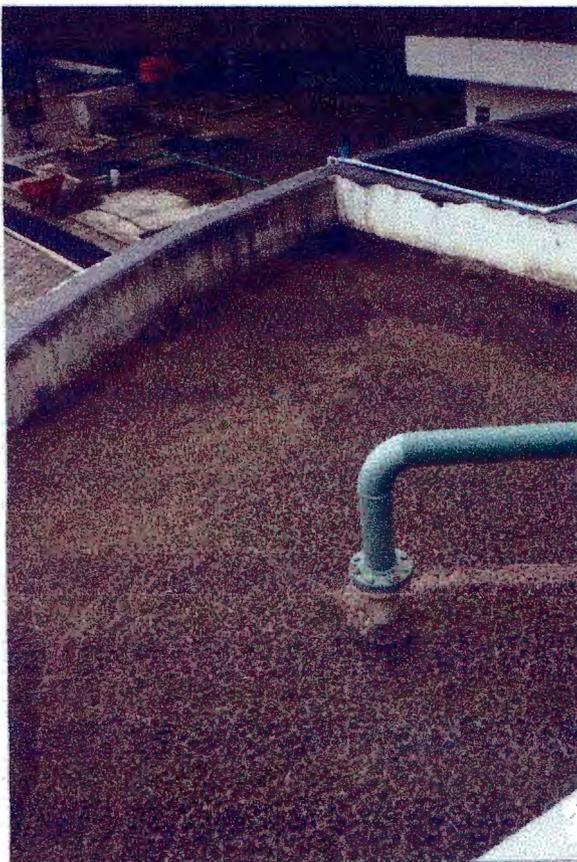
Figura 2-5. Rastras



Módulo Biológico:

En este módulo el agua llega y se somete a una segunda etapa o de aeración. En esta etapa el agua se pone en contacto con bacterias aerobias colonizadas que se alimentan de los sólidos biológicos. El agua está en constante movimiento por un determinado tiempo. Después de que las bacterias se han alimentado, se pasa a otra etapa donde el agua queda en reposo, donde las colonias de bacterias de mayor tamaño y peso se asientan en el fondo del clarificador, que es un contenedor. Los lodos, que es como se les conoce a estas colonias de bacterias se separan del clarificador y vuelven a entrar a la etapa de aeración.

Figura 2-6. Modulo biológico



El agua se lleva a un proceso de desinfección (cloro) donde se matan las bacterias que quedan. Después de este proceso el agua está lista para ser utilizada con fines de riego de jardines. El agua no cumple con las normas oficiales para ser empleada como agua potable, lo cual implica que no se puede emplear en actividades que tengan contacto directo con el cuerpo humano.

Figura 2-7. Clarificador



El tiempo de retención en este módulo es de 14-16 hrs. y se toman muestras cada 8 hrs. o tres muestras al día. Las muestras que se toman son las siguientes:

Módulo Físico químico:

La primer etapa de este módulo es el encapsulamiento de los sólidos por medio de químicos. En esta etapa el agua entra a un contenedor donde se suelta un químico, F51 en esta planta, que atrapa a las bacterias y los sólidos en flóculos que debido a su mayor densidad se asientan en el fondo del contenedor de manera que en la superficie que da el agua más limpia.

El agua de la superficie se lleva a la siguiente etapa que consiste en filtros de carbón activado los cuales se encargan de limpiar aún más el agua. El agua que se obtiene al final del módulo químico aunque se ve cristalina no es potable aún. Esta agua se utiliza para baños.

La variable más importante a controlar aquí es la cantidad de F51 que se está soltando y la eficiencia del mismo cuantificando el número de sólidos antes y después de la floculación.

No existe tiempo de retención en todo el módulo físico-químico.

El consumo diario en el ITESM es de 240 m³ de agua potable, de los cuales se reciclan aprox. 200 m³ de agua.

A veces resulta eficiente utilizar el flujo total de agua en serie tanto en el módulo biológico como en el físico-químico, lo que resulta en un flujo total de 2l/s. En fines de semana, se usa la tasa de 1.3l/s – 1.5 l/s – 1.7 l/s.

No le damos mucho énfasis a esta parte ya que nuestro proyecto se enfoca solamente al módulo biológico de esta planta. Los dos módulos pueden trabajar independientemente.

2.2.3 Planta de Suncoast en Australia

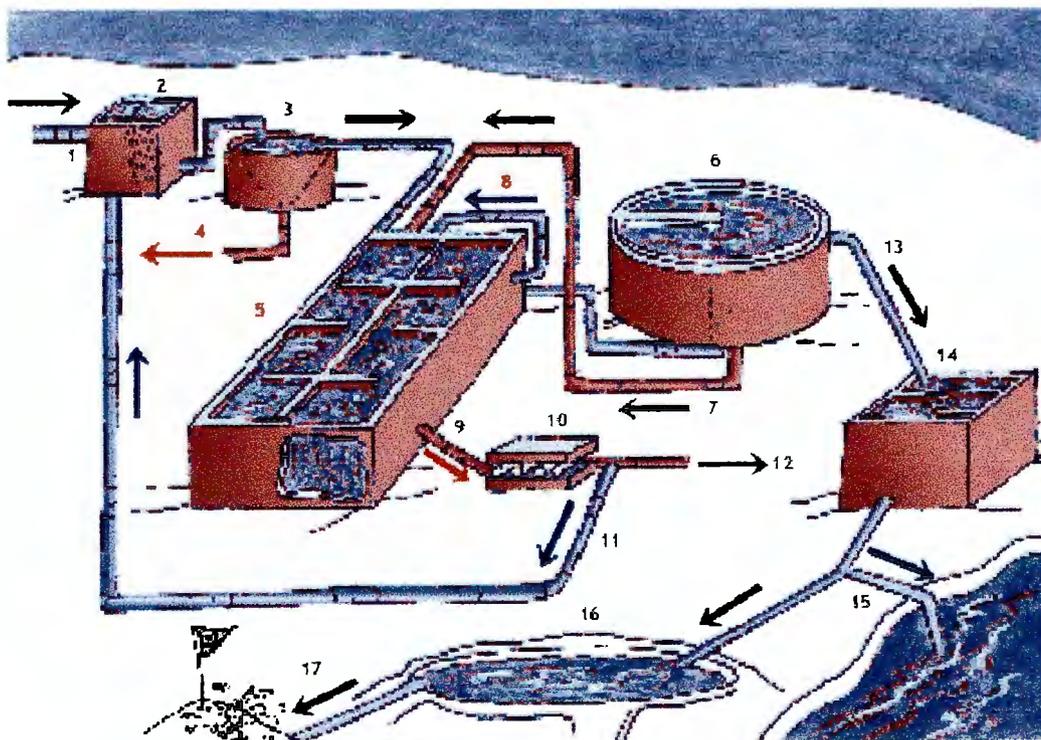
La planta de tratamiento de Suncoast fue construida en 1988 para dar un servicio a una población de 10,000 personas en la costa de Maroochy Shire con un afluente de 2.5Mlts. por día. Estudiaremos su funcionamiento por módulos como se hizo anteriormente:

Los módulos que contiene esta planta son:

- Tratamiento preliminar
- Tanque reactor biológico
- Desnitrificación
- Nitrificación y reducción orgánica
- Clarificador
- Manejo de lodos
- Manejo del efluente

Figura 2-8. Planta Suncoast en Australia

- | | | |
|------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------------------|
| 1. Incoming wastewater | 7. Return activated sludge | 13. Effluent |
| 2. Screening | 8. Recirculation line | 14. Chlorine contact tank |
| 3. Grit removal | 9. Waste activated sludge | 15. Discharge to river |
| 4. Screenings and grit to landfill | 10. Sludge dewatering belt press | 16. Effluent storage dam |
| 5. Biological reactor tanks | 11. Filtrate | 17. Irrigation of golf course and sports complex |
| 6. Clarifier | 12. Biosolid re-use | |



a) Tratamiento preliminar:

Consiste en filtros físicos, rejillas y filtros de arena, que impiden el acceso de sólidos grandes. La rejilla también tiene la función de detener un poco el flujo del agua que va entrando a la planta para que el afluente no sea mayor al permitido. Por otro lado también hay una bomba que permite aumentar el afluente en caso de que este no posea la presión necesaria.

b) Tanque reactor biológico:

Las aguas crudas entran al reactor biológico donde circulan en contacto con los lodos activados que provienen del clarificador. Estos lodos contienen millones de bacterias que bajo condiciones propicias y alimentación pueden degradar la materia orgánica.

c) Desnitrificación:

Las bacterias en contacto con el agua tienen una apariencia turbida y café y se le denomina licor. En la primera parte del reactor el agua pasa por pequeños mezcladores que juntan lentamente el agua con las bacterias sin aereación. El licor en esta fase es anóxico debido a que contiene niveles bajos de oxígeno disuelto, lo que no quiere decir que no haya oxígeno, ya que este está presente en forma de iones.

Para que las bacterias continúen su crecimiento emplean el oxígeno de los iones de Nitratos (NO_3), en este proceso se libera nitrógeno a la atmósfera (desnitrificación) y se ve como burbujas en el licor.

d) Nitrificación y reducción orgánica:

El licor pasa a través de un segundo tanque que provee de oxígeno a la mezcla para hacer aerobio el proceso. El oxígeno que se inyecta a la mezcla es por medio de aereadores que están controlados por un sistema de sensores de oxígeno que determinan la velocidad de los aereadores y la cantidad de oxígeno óptima. En este medio se desarrollan diversos tipos de bacterias, algunas convierten amoníaco en nitritos y luego en nitratos (nitrificación) y otros convierten carbón orgánico en dióxido de carbono y agua.

Al final de este segundo tanque parte de los lodos se van al clarificador y el resto regresa al primer tanque donde se mezcla con el agua del influente.

e) Clarificador

En este tanque los lodos activados se sedimentan y se remueven lentamente del fondo para ser llevados al biorreactor. El efluente de este tanque es agua con niveles muy bajos de materia orgánica.

f) Manejo de lodos

Para mantener constante la cantidad de lodos activados, parte se regresa al biorreactor por medio de bombas y otra parte se saca del proceso se secan. Los lodos permanecen un promedio de 10 días en circulación dentro del proceso, después de estos 10 días los

lodos son de buena calidad y relativamente inofensivos de modo que se pueden poner a secar sin necesidad de otro tipo de procesos.

g) Manejo del efluente

El agua que sale del clarificador es sometida a un proceso de clorificación, después esta agua se descarga por medio de pipas al río Maroochy. En épocas de sequía esta agua se emplea para la irrigación de un campo de golf y de complejos deportivos.

Esta planta está equipada con controladores automáticos y alertas que avisan a los operadores de cualquier problema que pudiera surgir. Anteriormente se tenía el problema de la existencia de fósforo en el efluente sin embargo este problema se solucionó con un desviador en el tanque primario.

3 Introducción al funcionamiento bioquímico de una P.T.A.R. por lodos activados

3.1 Contaminantes de importancia dentro del agua residual

En las aguas residuales domésticas (ARD) los principales contaminantes son la materia orgánica biodegradable, bacterias, nutrientes, NH_4 , tóxicos, detergentes y sólidos suspendidos generando impactos en la salud humana y en el hábitat acuático.

Entre los contaminantes de importancia en las aguas residuales industriales (ARI) podemos enumerar la materia orgánica total expresada, sólidos suspendidos y disueltos y muchos tóxicos de compuestos sintéticos vertidos diariamente a las corrientes de agua y su acción sobre los organismos humanos, la flora y la fauna acuática dependen de la concentración del componente en el residuo, de la capacidad de dilución del agua receptora, de la toxicidad específica sobre el ser humano y de la susceptibilidad individual.

Una evaluación real de la toxicidad de ciertas sustancias sobre los organismos acuáticos y sobre los seres humanos demanda relativamente largos períodos de exposición algunas veces los síntomas son agudos. En otros casos cuando el tóxico es acumulativo la dosis que separadamente sería inofensiva, con el transcurso del tiempo puede acarrear serias consecuencias en los organismos vivos por lo que deben ser tratados.

Tabla 3-1 Principales constituyentes de importancia en el tratamiento del agua residual

CONTAMINANTES	RAZÓN DE LA IMPORTANCIA
Sólidos en suspensión	Los sólidos en suspensión pueden dar lugar al desarrollo de depósitos de fango y de condiciones anaerobias cuando se vierte agua residual sin tratar al entorno acuático.
Materia orgánica Biodegradable	Compuesta principalmente por proteínas, carbohidratos, grasas animales, la materia orgánica biodegradable se mide, en la mayoría de las ocasiones, en función de la DBO (demanda bioquímica de oxígeno) y de la DQO (demanda química de oxígeno). Si se descargan al entorno son tratar su estabilización biológica puede llevar al agotamiento de los recursos naturales de oxígeno y la desarrollo de condiciones sépticas.
Patógenos	Pueden transmitir enfermedades contagiosas por medio de los organismos patógenos presentes en el agua residual.
Nutrientes	Tanto el nitrógeno como el fósforo, junto con el carbono, son nutrientes esenciales para el crecimiento. Cuando se vierten al entorno acuático estos nutrientes pueden favorecer el crecimiento de una vida acuática no deseada. Cundo se vierten al terreno en cantidades excesivas, también pueden provocar la contaminación del agua subterránea.
Contaminantes Prioritarios	Son compuestos orgánicos o inorgánicos determinados con base en su carcinogenicidad, mutagenicidad, teratogenicidad o toxicidad aguda conocida o sospechada. Muchos de estos compuestos se hallan presentes en el agua residual.
Materia orgánica Refractaria	Esta materia orgánica tiende a resistir los métodos convencionales de tratamiento. Ejemplo típicos son los agentes tensoactivos, lo fenoles y los pesticidas agrícolas.
Metales pesados	Los metales pesados son, frecuentemente, añadidos al agua residual en el curso de ciertas actividades comerciales e industriales y puede ser necesario eliminarlos si se pretende reutilizar el agua residual.
Sólidos inorgánicos Disueltos	Los constituyentes inorgánicos tales como el calcio, sodio y los sulfatos se añaden al agua de suministro como consecuencia del uso del agua, y es posible que se

	deban eliminar si se va a reutilizar el agua residual.
--	--------------------------------------------------------

3.2 Reacción básica de oxidación de la materia orgánica

Para poder conocer a grandes rasgos lo que ocurre dentro del biorreactor durante el proceso de remoción de la materia orgánica es primordial referirnos a la ecuación principal del proceso de oxidación de ésta.

Puesto que los elementos que degradan la materia orgánica son bacterias aerobias, éstas necesitan de alimento y oxígeno para sobrevivir y reproducirse. Estas dos variables serán las que interactúen dentro de la reacción:



La reacción de digestión aerobia nos dará a la salida dióxido de carbono, agua, y nitratos, así como un excedente de oxígeno cuando esta reacción se efectúa en su totalidad.

El balance de la ecuación depende de parámetros de diseño de la planta en particular, tales como la composición del afluente, el tipo de bacterias usadas dentro del proceso, dimensiones del biorreactor entre otras. Algunos de estos parámetros serán explicados a continuación.

3.3 Bacterias dentro del proceso

3.3.1 Clasificación

Las bacterias juegan un rol preponderante en el tratamiento biológico, son clasificadas de acuerdo a sus características bioquímicas

a) Clasificación por fuente de energía y carbón:

Tabla 3-2. Clasificación por fuente de energía y carbón

CLASIFICACION	FUENTE DE ENERGIA	FUENTE DE CARBON
AUTOTROFICAS: Fotosintéticas Quimiosintéticas	Luz Reacción Oxidación-Reducción Inorgánica	CO ₂ CO ₂
HETEROTROFICAS	Reacción Oxidación-Reducción Orgánica	Carbón Orgánico

b) Clasificación por su forma de vida

Son agrupados en dos categorías:

- 1) De crecimiento suspendido, con existencia de flóculos orgánicos (Lodos Activados).
- 2) De crecimiento adherido donde el crecimiento bacteriano se realiza en un medio de apoyo (piedras, medio artificial PVC). Utilizado en procesos con filtros percoladores.

c) Clasificación por uso de oxígeno

Organismos clasificados de acuerdo a su capacidad de utilización de oxígeno:

Los organismos aeróbicos existen solo cuando existe una fuente de oxígeno molecular.

Organismos anaeróbicos cuya existencia esta condicionada a la ausencia de oxígeno.

Organismos facultativos tiene la capacidad de sobrevivir con o sin oxígeno.

3.3.2 Otros microorganismos

Estos son animales, plantas y protistas, en su conjunto comparados con las bacterias casi no contribuyen en el proceso de purificación, pero dado que por su tamaño son más fácilmente identificables, nos sirven como organismos indicadores en el control y manejo del proceso de lodos activados.

3.4 Principales parámetros dentro del proceso de lodos activados

Las variables que recomienda monitorear y controlar la ASCE (American Society Of Civil Engineers) y de la AWWA (American Water Works Association) en una P.T.A.R. se clasifican de la siguiente manera:

3.4.1 Composición (PH, turbidez):

Los sensores de PH reportan un valor de la acidez o de la alcalinidad que varía entre 1 y 14. El número de ph es el logaritmo negativo de un ion de hidrógeno concentrado en una solución. Los instrumentos utilizan dos electrodos y un sensor de temperatura: Electrodo de ph, electrodo de referencia, sensor de compensación de temperatura. El control de ph es importante en el control de la coagulación y la corrosión.

La turbidez indica la cantidad de sólidos en suspensión en un fluido y es por lo tanto el indicador más efectivo en el tratamiento de aguas. La medida depende de un haz de luz que se proyecta sobre una muestra del fluido. Dependiendo de la atenuación del haz se reportan diferentes valores de turbidez. Las unidades empleadas para la medición de la turbidez han variado con el tiempo y con los criterios: JTU (Jackson Turbidity Unit), FTU (Formazin Turbidity Unit), NTU (Nephelometric Turbidity Unit), JCU (Jackson Candle Unit). La precisión de la medida depende en gran parte de colores disueltos en el agua o de burbujas en la muestra.

3.4.2 Físicos (Flujo y nivel):

El flujo es la variable más importante a medir en una planta de tratamiento y por consiguiente hay muchas técnicas de medición. Los sensores de presión diferencial son los más empleados y funcionan por medio de la constricción del flujo, con lo que se aumenta la velocidad del flujo. Lo que se mide es el cambio de presión. Estos sensores no tienen partes móviles y requieren muy poco mantenimiento.

El nivel es una medida muy importante en una P.T.A.R.. Hay principalmente tres métodos empleados: por flotador, unidad de burbujeo y de tipo ultrasónico. Los primeros a pesar de su simplicidad requieren de mantenimiento continuo. Los ultrasónicos funcionan con un emisor-receptor que genera un pulso acústico perpendicular al nivel del agua, dependiendo de la velocidad del sonido a través del agua se reporta el valor del nivel.

3.4.3 Mecánicos (velocidad de las bombas y estado de las válvulas):

Para conocer la velocidad de las bombas se pueden emplear velocímetros magnéticos, o conmutadores. Los conmutadores son discos perforados por los que pasa un haz de luz y dependiendo la frecuencia del haz de luz se puede conocer la velocidad del motor. Estos sensores son efectivos para grandes motores que funcionan a altas velocidades, el inconveniente es que son caros. El estado de las válvulas se puede hacer mediante muchos métodos, el más común empleado es por medio de circuitos on/off que mandan señales que permite identificar el estado de la válvulas.

3.4.4 Químicos (tasas de dosificación):

Para conocer la cantidad de materiales químicos que hay que dosificar, es necesario medir variables químicas. Una de las etapas más importantes es la cloración, ya que el cloro es el químico desinfectante más empleado en el tratamiento de aguas. Un sensor de cloro permite saber qué tasa hay que dosificar. Los métodos para medir el cloro son dos: el colorimétrico y amperométrico. La colorimetría consiste en aplicar un agente químico que cambia el color de la muestra y dependiendo de la coloración se puede saber qué cantidad de cloro hay. El análisis amperométrico funciona con una muestra de cloro almacenada para medir su PH, si es necesario, antes de que los electrodos generen una corriente proporcional al cloro presente en la muestra. La turbidez y el color pueden afectar a la colorimetría, sin embargo el análisis amperométrico es más caro.

3.4.5 Eficiencia (potencia empleada):

Para medir la eficiencia de la planta son necesarios sensores de voltaje, de potencia y de corriente. El costo de la energía eléctrica es alto pero con un buen monitoreo se puede lograr un manejo eficiente. Hay que tomar en cuenta que los motores de la planta afectan el factor de potencia, por lo que hay que tomar las medidas respectivas para corregir esto.

Importancia de la materia orgánica dentro del proceso de tratamiento del agua

La mayoría de la materia orgánica que contamina el agua procede de desechos de alimentos, de aguas negras domésticas y de fábricas y es descompuesta por bacterias, protozoarios y diversos organismos mayores. Ese proceso de descomposición ocurre tanto en el agua como en la tierra y se lleva a cabo mediante reacciones químicas que requieren oxígeno para transformar sustancias ricas en energía en sustancias pobres en energía. El oxígeno disuelto en el agua puede ser consumido por la fauna acuática a una velocidad mayor a la que es reemplazado desde la atmósfera, lo que ocasiona que los organismos acuáticos compitan por el oxígeno y en consecuencia se vea afectada la distribución de la vida acuática.

Anteriormente se presentó el esquema de una planta de tratamiento por módulos, estudiando este modelo y según el manual Water Treatment Plant Design de la ASCE y AWWA encontramos que el punto clave del proceso de lodos activado es la degradación de la materia orgánica que se lleva a cabo en el biorreactor.

3.5 Variables características del proceso de lodos activados

3.5.1 Compuestos químicos de interés y su clasificación

Resulta de suma importancia la determinación de las concentraciones de los compuestos presentes en las aguas residuales y naturales como se pudo ver en la tabla 1.1. Para medir la calidad de afluente debemos medir la cantidad de ciertos componentes puesto que pueden afectar los usos del agua; entre los más importantes podemos mencionar el pH, alcalinidad, los cloruros, el nitrógeno(N) y el fósforo (P).

Algunos compuestos tóxicos inorgánicos son de gran importancia en el tratamiento y vertido de las aguas residuales; muchos de ellos están clasificados como contaminantes prioritarios: El Cobre (Cu), la Plata (Ag.), el Plomo (Pb), el Arsénico(As), y el Boro (Br), son tóxicos en mayor o menor grado para los microorganismos, por lo cual deben ser considerados en los proyectos de tratamientos biológicos.

Muchos metales pesados son catalogados como contaminantes prioritarios entre ellos se encuentran : El Níquel(Ni), el Manganeso(Mn), el Cromo (Cr), el Cadmio (Cd), el Zinc (Zn), el Hierro (Fe), y el Mercurio (Hg), debido a su gran toxicidad pueden interferir con gran número de los usos del agua.

Los gases que se encuentran con mayor frecuencia en las aguas residuales son: El Nitrógeno (N₂), el Oxígeno (O₂), el Dióxido de carbono (CO₂), el Sulfuro de Hidrógeno (H₂S), el Amoníaco (NH₃), y el Metano(CH₄).

Los principales organismos biológicos presentes en las aguas residuales son las bacterias, las algas, los hongos, protozoos, virus y organismos patógenos. Estos últimos son los que son degradados por el proceso de lodos activados. Las bacterias contenidas en éstos se alimentan de la materia orgánica contenida en el agua degradando así la cantidad de materia orgánica disuelta en el afluente. Para el ciclo de vida de estas bacterias se necesitan dos cosas, alimento y oxígeno de lo cual se derivan las variables que presentaremos a continuación.

3.6 Parámetros de importancia en el módulo biológico

Dado que el 40 por ciento de la contaminación en las aguas es materia orgánica, los parámetros que indican la cantidad de materia orgánica son muy importantes. En el caso del tratamiento por lodos activados sólo se remueven contaminantes orgánicos a través de las bacterias que se alimentan de ellos.

El saber la cantidad de materia orgánica ayuda a hacer más eficiente el proceso de tratamiento ya que con este dato se puede saber si la población de lodos activados puede degradar la cantidad de materia orgánica. Si hay mucha materia orgánica, la población de lodos debe ser grande, ya que si durante el tiempo de retención en los biorreactores no se degradan los contaminantes orgánicos el agua que se obtiene a la salida tiene altos índices de contaminación y el proceso no está funcionando adecuadamente.

Mientras mayor es la población y la cantidad de materia orgánica, también es necesario inyectar más oxígeno a los biorreactores para que las bacterias aerobias que forman los lodos puedan realizar su ciclo eficientemente.

Existen tres métodos principales para medir la cantidad de materia orgánica en el agua:

La medida de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO)

La de la demanda química de oxígeno (DQO).

La de la cantidad total de carbono (COT)

Todos los métodos se basan en la valoración de la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar diferentes fracciones de la materia orgánica presente en el agua.

3.6.1 Demanda bioquímica de oxígeno: (DBO)

La determinación de la DBO nos da la concentración de oxígeno disuelto consumido por los microorganismos; presentes en el agua o añadidos a ella para efectuar la medida de este parámetro; durante la oxidación de toda la materia orgánica presente en la muestra de agua. Su valor debe ser inferior a 8 mg/L.

La DBO puede descomponerse en dos factores:

La demanda de oxígeno para la oxidación realizada por los microorganismos quimioheterotrofos (DOH)

El oxígeno consumido en las oxidaciones de los quimioautotrofos nitrificantes (bacterias que oxidarán el NH_4 para obtener energía, DON).

La DOH se mide añadiendo la muestra de agua a una solución tampón que contiene las sales inorgánicas necesarias para el crecimiento de los microorganismos y que está saturada de O_2 . La muestra se incuba en estas condiciones durante cinco días a 20°C en la oscuridad. Las concentraciones de oxígeno se miden utilizando un electrodo de oxígeno. Es necesario añadir al experimento un inhibidor de la nitrificación. El cálculo de la DOH se hace según la fórmula:

$$\text{COH (mg/L)} = (\text{D1-D5})/\text{P}$$

donde D1 y D5 son las concentraciones de oxígeno en la muestra el primero y el quinto día y P el coeficiente de dilución de la muestra.

Para realizar esta medida se necesita una población mixta de microorganismos; si esta no es muy abundante puede suplementarse con un inóculo destinado a la degradación del material orgánico en el tiempo requerido.

El valor de la DOH comprende todas las transformaciones oxidativas de la materia orgánica biodegradable:

comp. orgánicos + O_2 + bacterias \rightarrow biomasa bacteriana + CO_2 + NH_4 + H_2O

biomasa bacteriana + O_2 + protozoos \rightarrow biomasa de protozoos + CO_2

El rendimiento de la conversión de la biomasa bacteriana en la de protozoos es de 0.78 mg protozoos / mg bacterias.

La DON es la cantidad de oxígeno consumida por los microorganismos nitrificantes que oxidan el NH_4 como fuente de energía. En general, el consumo viene a ser de 4.57 gr O_2 por gr de NH_4 consumido; pero parte de este nitrógeno no se oxida a NO_2^- o a NO_3^- sino que se incorpora a las bacterias, por lo que el factor de corrección para los cálculos es de 4.33:

$$\text{DON} = (\text{Ndisponible} - \text{Nasimilado}) \times 4.33$$

La DON es la causante de muchos altos valores de demanda de oxígeno en aguas con bajo contenido de materia orgánica: en aguas ricas en NH_4 la actividad de las bacterias nitrificantes puede consumir entre el 25 y el 85% del total del oxígeno consumido.

Para distinguir entre la DOH y la DON se emplean inhibidores de la nitrificación que no afectan al consumo heterótrofo de materia orgánica. Un inhibidor de este tipo es la 2-cloro-6(tricloro-metil)-piridina.

3.6.2 Demanda química de oxígeno: (DQO)

La demanda de química de oxígeno (DQO) se utiliza como medida del equivalente del oxígeno del contenido de la materia orgánica en una muestra que sea susceptible a la oxidación por un oxidante químico fuerte. Para las muestras de una fuente específica, la

DQO puede ser relacionado empíricamente con la DBO, el carbón orgánico, o la materia orgánica. La prueba es útil para supervisar y el control después de que se haya establecido una correlación. Para las aguas domésticas, la DQO es del orden de 250 a 1000 mg O₂ por litro, y la relación DBO/DQO oscila entre 0.4 y 0.8. Las aguas estabilizadas biológicamente tienen una relación DBO/DQO=0.12.

Una mezcla que hierva de oxidantes y de ácidos fuertes oxida la mayoría de los tipos de materia orgánica. Entre varios procedimientos usando diversos oxidantes para la determinación del DQO, el método del reflujo del bicromato se prefiere debido a la capacidad que oxida superior del bicromato del potasio (K₂Cr₂O₇), de la aplicabilidad a una variedad amplia de muestras, y de la facilidad de la manipulación. La oxidación de los compuestos más orgánicos de (K₂Cr₂O₇) es 95 a 100% del valor teórico aunque algunas limitaciones para medir DQO e interferencias han sido notadas.

La determinación de la DQO puede ser hecha usando dos diferentes procedimientos:

el procedimiento de reflujo abierto (open reflux)
el procedimiento de reflujo cerrado (closed reflux)

Ambos procedimientos son exactos para valores de DQO > 50 mg O₂/L pero debajo de este rango la exactitud disminuye.

El método de reflujo abierto es conveniente para una amplia variedad de desechos donde se prefiere muestras de mayor tamaño. Los métodos de reflujo cerrado son más económicos en términos del reactivo usado, pero requieren la homogeneización de las muestras que contienen los sólidos suspendidos para obtener resultados reproducibles.

Método de reflujo abierto

Una muestra es digerida con reflujo, en una solución fuertemente ácida con un exceso conocido de bicromato del potasio (K₂Cr₂O₇). Después de la digestión, el (K₂Cr₂O₇) no reducido restante se titula con una solución ferrosa estandarizada de sulfato del amonio para determinar la cantidad de (K₂Cr₂O₇) consumido. La materia orgánica oxidable se calcula en términos del equivalente de oxígeno.

Las especies inorgánicas reducidas tales como hierro ferroso, sulfuro, manganeso manganoso, etc., se oxidan significativamente bajo estas condiciones de prueba. Para las muestras que contienen niveles significativos de estos elementos, la oxidación estequiométrica puede ser asumida para una concentración inicial conocida del elemento que interfiere y algunas correcciones pueden ser hechas al valor de la DQO obtenido. Estas correcciones tienen que ser elaboradas con cuidado cuando se manejan aguas ricas en estos elementos como aguas de minas o procedente de algunas industrias.

El método de reflujo cerrado

El método de reflujo cerrado, además de medir la DQO para materia orgánica no volátil, este método permite la medición de compuestos orgánicos volátiles. La materia orgánica volátil se oxidan en mayor proporción en un sistema cerrado debido a un contacto más largo con el oxidante. Este método necesita tubos de cultivo especial con casquillos de TFE hechos totalmente de materiales resistentes a altas temperaturas y presión para medir la DQO. La determinación final de la DQO se podía hacer por la titulación usando la

solución ferrosa estandarizada de sulfato de amonio o por el espectrofotómetro fijado en la longitud de onda de 600 nm.

3.6.3 Carbono orgánico total: (COT)

El carbono orgánico en aguas residuales se compone de una variedad de compuestos orgánicos en varios estados de oxidación. Algunos de estos compuestos del carbón se pueden oxidar en mayor nivel por procesos biológicos o químicos, y la DBO y DQO pueden ser utilizados para caracterizar estas fracciones. Pero la presencia de carbono orgánico que no responde a estas pruebas las hace inadecuadas para medir carbono orgánico total. El carbono orgánico total (COT) es una expresión más conveniente y más directa del contenido orgánico total que la DBO o la BQO, pero no proporciona la misma clase de información.

La determinación del COT es de gran importancia en el tratamiento de aguas, particularmente si se tiene en uso de agentes oxidantes fuertes, como el dióxido de ozono y la clorina. Este parámetro es de gran importancia dentro de la industria electrónica y farmacéutica, donde incluso rastros de concentraciones de compuestos orgánicos pueden degradar la capacidad de intercambio iónico, sirviendo como fuente de nutrientes para el crecimiento biológico, o sean perjudiciales al proceso para el cual se está utilizando el agua.

Si una relación empírica repetible se establece entre el COT y la DBO o la DQO, entonces el COT se puede utilizar para estimar la DBO o la DQO. Esta relación se debe establecer independientemente para cada conjunto matricial de condiciones, tales como varios puntos en el proceso del tratamiento.

El COT no depende del estado de oxidación de la materia orgánica y no nos da idea de otros elementos orgánicos, tales como el nitrógeno y el hidrógeno, y de materia inorgánica que puede contribuir a la demanda del oxígeno medida la DBO y la DQO. El COT no puede sustituir la prueba estas dos pruebas.

Para poder determinar la cantidad de carbono orgánico, se deben analizar y convertir las moléculas orgánicas a una sola forma molecular (es decir CO_2) la cual se pueda medir cuantitativamente. Los métodos de COT utilizan calor y oxígeno, irradiación ultravioleta, oxidantes químicos o combinaciones estos elementos, para convertir el carbono orgánico en bióxido de carbono (CO_2). El CO_2 puede ser medido directamente por un analizador infrarrojo no-dispersivo. También, puede ser reducido a metano y ser medido con un detector de ionización de flama, o se puede titular químicamente.

El carbono total (TC) en el agua existe generalmente en varias fracciones. Dependiendo del interés que se tenga sobre cada fracción podría ser analizado pero un tratamiento previo apropiado de las muestras tiene que ser hecho para dividir la fracción del TC definidas como:

carbono inorgánico (IC) es decir el carbonato, el bicarbonato, y el CO_2 disuelto;
carbono orgánico total (COT) es decir que todos los átomos de carbono con enlaces covalentes en moléculas orgánicas;

carbono orgánico disuelto (DOC) es decir la fracción del COT que pasa a través de un filtro de 0.45 μm por-día.;

carbono orgánico en partículas (POC) también llamado carbono orgánico no-disuelto, la fracción del COT conservada por un filtro de 0,45 milímetros;

carbono orgánico volátil (VOC) también llamado carbono orgánico purgable, la fracción del COT quitada de una solución acuosa por gas bajo condiciones especificadas,

carbono orgánico no-purgable (NPOC) es decir la fracción de COT no quitada por el gas.

$$\text{TC} = \text{TOC} + \text{IC}$$

$$\text{TOC} = \text{DOC} + \text{POC} + \text{VOC}$$

En la mayoría de las muestras de agua, la fracción del IC es muchas veces mayor a la fracción del TOC debido a la presencia de los bicarbonatos (HCO_3^-). Eliminar o que compensar interferencias del IC requiere de determinaciones múltiples para medir el COT verdadero.

Los métodos usados en la medición del COT son:

Combustión - el método infrarrojo

Método de oxidación por Persulfato-Ultravioleta

El método wet-oxydation

El método por combustión-infrarrojo es convenientes para las muestras con COT > 1 mg/l pero para concentraciones más bajas, la utilización del método de oxidación por Persulfato-Ultravioleta o el método wet-oxydation es preferible.

4 Alternativas de control de la materia orgánica

4.1 Condiciones para la eficiencia del proceso de tratamiento de aguas

De la reacción química expuesta en el capítulo anterior se derivan las principales condiciones para el funcionamiento óptimo del proceso de lodos activados.

Para que el proceso sea eficiente debe existir un equilibrio entre la cantidad de bacterias, la cantidad de materia orgánica y la cantidad de oxígeno inyectado al biorreactor, ya que estas dos últimas determinan el metabolismo de las bacterias. Los principales casos que pueden darse son:

Cuando hay poca materia orgánica y hay poco oxígeno: Aparece la competencia entre organismos lo cual diezma la población de los lodos y hace menos eficiente el proceso ya que además hay poco oxígeno y el metabolismo de las bacterias no es óptimo.

Cuando hay mucha materia orgánica y hay poco oxígeno: Las bacterias no pueden metabolizar toda la materia orgánica porque no son suficientes y porque no tienen la cantidad de oxígeno necesaria.

Cuando hay mucha materia orgánica y mucho oxígeno: Las colonias de bacterias se reproducen y por contar con un medio apropiado se puede alcanzar el equilibrio.

La materia orgánica depende del afluente y no se tiene control sobre éste. El número de bacterias, a su vez, depende de las cantidades de oxígeno y de materia orgánica, por lo que la única manera de alcanzar el equilibrio es controlar la cantidad de oxígeno.

Pudimos observar de la ecuación de oxidación de la materia orgánica, que cuando el proceso se lleva a cabo adecuadamente tenemos un excedente de oxígeno que se mide

como oxígeno disuelto dentro del tanque. Manteniendo este excedente de oxígeno constante, se está garantizando que la reacción completa se efectúe correctamente.

Por factores de diseño el oxígeno disuelto se mantendrá en 2ppm. Esto se debe a que a tasas mayores de oxígeno disuelto, los flóculos no se forman de manera adecuada, lo cual se traduce en una mala sedimentación de los lodos en el clarificador. A tasas menores, no se asegura una buena digestión de las bacterias lo cual repercute directamente en la eficiencia del proceso.

Se tienen entonces dos alternativas para determinar la cantidad de oxígeno necesaria para alcanzar este punto de equilibrio. La primera sería basada en la cantidad de materia orgánica del afluente y la otra basada en la cantidad de oxígeno disuelto en el tanque.

4.2 Sensores

Para poder implementar dicho control se necesitaría censar alguna de las dos variables presentadas anteriormente. A continuación se muestran algunos métodos de medición para sensores comerciales.

4.2.1 Principales métodos de medición usados por DBO-metros comerciales

Una sonda de oxígeno consta en su forma más sencilla de un electrodo colector y un contraelectrodo. Ambos electrodos se encuentran en un sistema electrolito separado de la muestra por una membrana permeable a los gases.

4.2.1.1 Medición electroquímica

El electrodo colector reduce la molécula de oxígeno a iones. Durante esta reacción electroquímica fluye corriente del contraelectrodo al electrodo colector. Mientras más oxígeno contiene la muestra, mayor es la señal de corriente. La sonda de oxígeno calcula el grado de concentración de oxígeno de la muestra en base a esa señal y a una función de solubilidad.

4.2.1.2 Medición por dilución

El valor de la DBO se obtiene de la diferencia de 2 mediciones de oxígeno disuelto mediante una sonda de oxígeno, antes y después de un período de incubación de 5 días. Este método está reconocido oficialmente.

4.2.1.3 Medición por autocontrol

En la medición de DBO por autocontrol, la disminución del oxígeno produce una modificación definida de la presión que se mide mediante un sensor de presión. Este

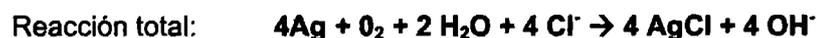
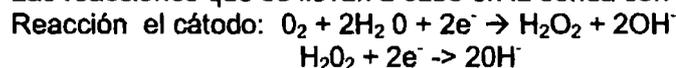
método de determinación es muy fácil de efectuar y se considera como el método más práctico.

4.2.2 Oxímetro

En operación, la sonda es puesta en una muestra. El oxígeno de la muestra se difunde a través de la membrana encargada de separar dicha muestra y la celda polarográfica interna. El oxígeno difundido es reducido electroquímicamente en la celda, resultando en un flujo de corriente proporcional a la presión parcial de oxígeno del agua.

El principio básico de la polarografía se basa en que cuando un electrodo de metal noble como oro o platino se hace ligeramente negativo con respecto a un electrodo de referencia como AgAgCl en una solución KCL neutra, el oxígeno disuelto en el líquido es reducido en la superficie del metal noble.

Las reacciones que se llevan a cabo en la sonda son reacciones de oxido-reducción:



4.3 Alternativas para la regulación del oxígeno en el biorreactor

4.3.1 Controlar los tiempos de retención:

Esta propuesta consiste en controlar los tiempos de retención por medio de válvulas que regulan el gasto en las diferentes etapas del proceso de tratamiento del agua. Controlando la cantidad de agua en cada parte del proceso podemos limitar la cantidad de materia orgánica en cada etapa, incluyendo en el biorreactor donde dependiendo del oxígeno que se inyecta se introduce determinada cantidad de materia orgánica.

Específicamente podríamos controlar la cantidad de agua que está en el biorreactor, de manera que si hay pocos organismos y el oxígeno no es suficiente para degradar la materia orgánica podemos alargar el tiempo del agua en el biorreactor para darle tiempo a los organismos de que asimilen la materia orgánica. El tiempo de retención puede variarse cerrando las válvulas de entrada y de salida del biorreactor.

Esta opción no es viable porque la planta está diseñada para trabajar a tiempos de retención específicos. Además el agua que se dosifica en el biorreactor debe almacenarse en algún lugar, mismo que no está contemplado.

4.3.2 Controlar el número de difusores y su distribución dentro del biorreactor

El aereador consiste en un motor que hace girar las propelas de un soplador. Este soplador a su vez toma aire del medio ambiente y lo impulsa a través de tubos perforados que recorren el biorreactor por adentro hasta el fondo del tanque (ver figura). Las perforaciones en los tubos a distintas profundidades permiten una aereación homogénea de la mezcla de lodos y agua residual. Controlar esas válvulas, abrir unas y cerrar otras, nos dan la posibilidad de controlar la cantidad de oxígeno en el biorreactor.

Esta opción no es recomendable puesto que el papel de los orificios es también mantener la mezcla homogénea; abrir algunas válvulas y cerrar otras implica que los lodos se concentren en zonas específicas del estanque formando flóculos y haciendo menos eficiente el proceso.

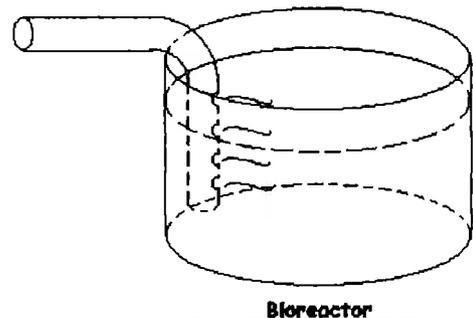


Figura 4-1 Biorreactor

4.3.3 Controlar la mezcla de aire que se inyecta al biorreactor

La mezcla que inyecta el aereador al biorreactor puede enriquecerse con oxígeno.

La propuesta consiste en colocar un tanque de oxígeno con un dosificador justo donde el aereador toma el aire. Dependiendo de la cantidad de materia orgánica y de organismos se puede inyectar el oxígeno necesario.

La ventaja de esta propuesta es que no es necesario controlar la velocidad del motor sin embargo ésta opción es peligrosa y poco costeable ya que habría que tener adicionalmente un tanque de oxígeno que implica un costo extra, además el oxígeno es altamente inflamable por lo que habría que implementar medidas de seguridad a las ya existentes.

4.3.4 Controlar la recirculación de lodos en el biorreactor

Otra propuesta consiste en controlar la población de microorganismos. Esto se llevaría a cabo controlando la cantidad de lodos que se regresan al biorreactor. Recordando que los lodos pasan después del biorreactor al tanque de sedimentación donde se acumulan en el fondo y se regresan al biorreactor, se podría limitar la cantidad de lodos que se regresan mandándolos fuera del sistema.

Esta opción es de respuesta muy larga ya que en caso de necesitar muchas bacterias para la degradación de una alta taza de materia orgánica se tendría que esperar a que se reprodujeran las colonias y el agua del efluente tendría mayor contaminación.

4.3.5 Controlar la cantidad de aire inyectado variando la velocidad del aereador

El motor y el aereador son los encargados de proporcionar la cantidad de oxígeno a las colonias de bacterias que forman los lodos activados. Controlar la velocidad del motor es otra opción para el control de la planta ya que implica regular la cantidad de oxígeno que se introduce al biorreactor.

Es importante mencionar que el aereador inyecta aire y que las bacterias sólo pueden aprovechar el 21% de oxígeno que contiene el aire. Sin embargo el control del oxígeno a través del motor es una solución directa y ya empleada por plantas en otras partes del mundo.

Después de evaluar las diferentes opciones explicadas anteriormente se llegó a la conclusión que esta última opción es la más viable. La planta no tiene que ser modificada ya que el control del aereador se anexa a la entrada del mismo. Este control, además de permitirnos mejorar el funcionamiento del biorreactor, nos permite ahorro de energía ya que el régimen de trabajo del motor puede ser disminuido reduciendo así el consumo de

energía eléctrica lo cual se verá reflejado inmediatamente en la demanda facturable de la P.T.A.R..

4.4 Opciones de control

Para conocer la cantidad de oxígeno que debe inyectar el aereador en el biorreactor es necesario saber cuánto oxígeno requieren los lodos activados para degradar la cantidad de materia orgánica que está llegando al módulo. El control de la velocidad del motor implica saber cuánto oxígeno es inyectado por el soplador a velocidades específicas del motor y qué cantidad de oxígeno es necesaria para que los microorganismos degraden la materia orgánica. Una opción para encontrar dicha relación es conocer o diseñar el modelo matemático de la planta, esto es el conjunto de ecuaciones que describan el comportamiento y relación de las diferentes variables, para después realizar un análisis y posteriormente síntesis.

Otra manera de controlar el aereador es por medio de la identificación de la planta, para esto es necesario aplicar diferentes entradas al sistema y estudiar la salida. Para realizar la identificación no se requiere el modelo matemático, sin embargo se necesita equipo para aplicar y censar las entradas y salidas.

Alternativamente y quizá la opción más viable es diseñar un control difuso, mismo que se fundamenta en los conocimientos de un experto, en este caso un operador experto de la P.T.A.R., y con el cual no se requiere ni del modelo matemático ni de todo el equipo para realizar la identificación de la planta.

4.4.1 Modelo Matemático de una P.T.A.R. por lodos activados.

Para entender y controlar sistemas complejos, es necesario obtener un modelo matemático cuantitativo de dichos sistemas. El modelo matemático nos ayuda al análisis de las relaciones existentes entre variables, y en procesos naturales el conjunto de ecuaciones que describen el sistema puede ser muy complejo. En el caso del modelo matemático de una planta de tratamiento de aguas residuales por el método de lodos activados, que se presenta a continuación, es necesario mencionar que se trata de un modelo que se emplea para el diseño de una P.T.A.R. y en el cual se asumen ciertas condiciones y parámetros. Entre las condiciones que se asumen están la composición del caudal de entrada o afluente permanece constante, así como la temperatura se considera constante y se fija en un promedio dependiendo de la región geográfica y el clima donde se encuentra la planta.

4.4.1.1 Descripción del modelo matemático.

Para diseñar un control por medio del modelo de la planta es necesario conocer primero un modelo del reactor, en este caso continuo, y considerando sólo los parámetros biocinéticos correspondientes a la demanda de oxígeno así como la producción neta de MLVSS (Sólidos Suspendedos Volátiles del Licor Mezclado). A continuación se propone un modelo general de una planta de tratamiento con sus etapas y variables respectivas,

posteriormente se llega al modelo de un reactor continuo y al análisis de los parámetros biocinéticos antes mencionados.

En la figura 4-2, se muestra un modelo matemático de una P.T.A.R. de lodos activados convencional. En él se pueden observar los distintos módulos y variables que componen el sistema.

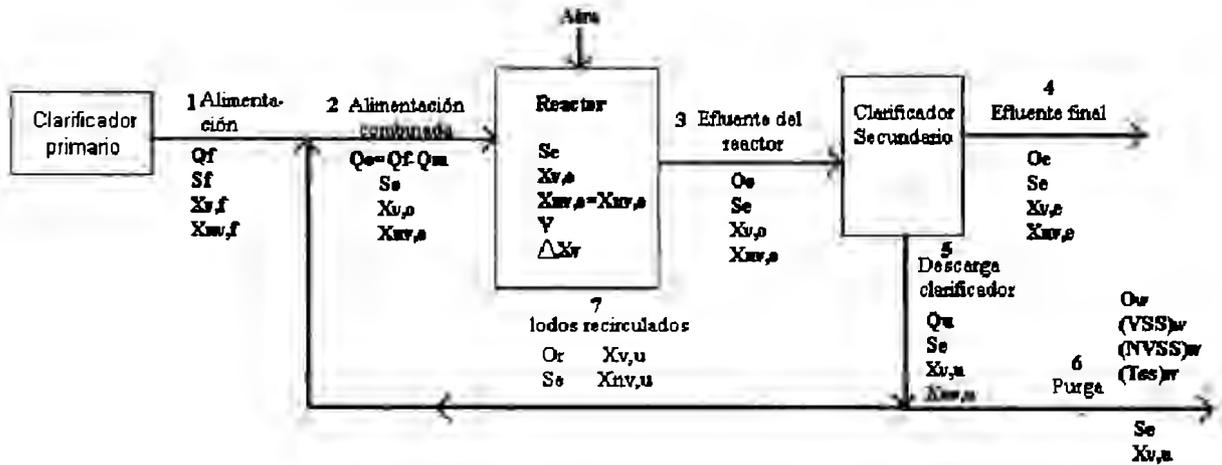


Figura 4-1 Proceso convencional de lodos activados

El primer módulo es el clarificador primario, que consiste en un estanque a donde llegan las aguas crudas después de ser filtradas por grandes cribas, y chocan con mamparas que detienen la intensidad del flujo. El agua cruza el clarificador muy lentamente debido a la inclinación del módulo, y en el recorrido los grandes sólidos se sedimentan en el fondo del clarificador. Un sistema de rastras es el encargado de remover estos sólidos para que no comiencen procesos anaerobios en el fondo del clarificador. Las variables que intervienen aquí son:

- Qf:** Caudal de alimentación inicial, a la salida del clarificador primario en m^3/s
- Sf:** DBO soluble en la alimentación, a la salida del clarificador primario en mg/l
- Xv,f:** Sólidos suspendidos volátiles en la alimentación, a la salida del clarificador primario en mg/l
- Xnv,f:** Sólidos suspendidos no volátiles en la alimentación, a la salida del clarificador primario en mg/l

Después se lleva a cabo la mezcla del caudal de alimentación, o a la salida del clarificador primario, con los lodos activados que se recirculan al reactor, lo que produce nuevas variables:

- Qo:** Caudal de alimentación combinada del afluente del reactor en m^3/s
- So:** DBO soluble de alimentación combinada en el afluente del reactor en mg/l

X_{v,o}: Sólidos suspendidos volátiles en la alimentación combinada en el afluente del reactor en mg/l

X_{nv,o}: Sólidos suspendidos no volátiles en la alimentación combinada en el afluente del reactor en mg/l

Este caudal combinado de agua con lodo activado, o también licor mezclado, se introduce al reactor en el cual se llevan a cabo los procesos de metabolismo celular, metabolismo energético y respiración endógena; procesos por los cuales se asimila la materia orgánica. Para que se lleven a cabo estos procesos es necesario inyectar aire por dos razones. La primera es porque los microorganismos son aerobios, por lo que requieren de oxígeno para llevar a cabo sus funciones vitales; a segunda razón es para mantener el licor como una mezcla homogénea, ya que los microorganismos tienden a sedimentarse, y con la presencia del burbujeo se mantienen en contacto con todo el licor y pueden degradar mejor el sustrato de toda el agua. Las principales variables del modelo son:

S_e: DBO soluble del efluente en mg/l

X_{v,o}: Sólidos volátiles en suspensión en la alimentación combinada en el reactor en mg/l

X_{nv,o}: Sólidos suspendidos no volátiles en la alimentación combinada en el reactor en mg/l

V: Volumen del reactor m³

ΔX_v: Producción de lodos en Kg/d

A la salida del reactor biológico, el licor mezclado ya no cuenta con aereación por lo que cambian sus variables:

Q_o: Caudal del efluente del reactor en m³/s

S_e: DBO soluble de efluente en mg/l

X_{v,o}: Sólidos suspendidos volátiles en la alimentación combinada en el efluente del reactor en mg/l

X_{nv,o}: Sólidos suspendidos no volátiles en la alimentación combinada en el efluente del reactor en mg/l

El clarificador secundario es un módulo similar al clarificador primario, sólo que aquí se sedimentan los lodos activados y que da en la superficie un agua con una menor cantidad de materia orgánica, incluso se puede ver clara el agua a la salida de este módulo. Las rastras se encargan de remover los lodos que se sedimentan y los recirculan al reactor.

Las variables que intervienen a la salida del clarificador secundario son:

Q_e: Caudal del efluente final en m³/s

S_e: DBO soluble de efluente final en mg/l

X_{v,e}: Sólidos suspendidos volátiles en el efluente final en mg/l

X_{nv,e}: Sólidos suspendidos no volátiles en el efluente final en mg/l

Para la recirculación de lodos, se consideran las siguientes variables:

Q_u: Descarga de lodos del clarificador secundario en m³/s

S_e: DBO soluble de efluente final en mg/l

$X_{v,u}$: Sólidos suspendidos volátiles en la descarga de lodos del clarificador secundario en mg/l

$X_{nv,u}$: Sólidos suspendidos no volátiles en la descarga de lodos del clarificador secundario en mg/l

Q_r : Caudal de lodos recirculados en m^3/s

4.4.1.2 Modelo del Reactor continuo

Se considera un reactor biológico continuo que opera bajo régimen estacionario y mezcla completa. Ver fig.4-3.

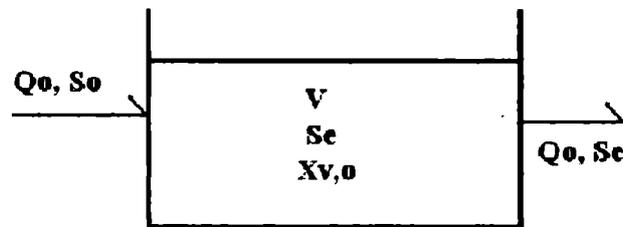
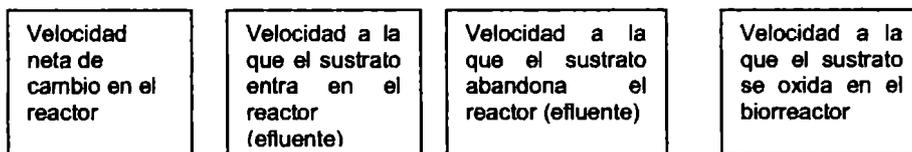


Figura 4-2 Diagrama simplificado del reactor continuo

El balance de materia del sustrato que entra y sale del reactor se puede escribir así:



Las condiciones que se pueden aplicar a la ecuación anterior son:

1. Bajo régimen estacionario, con lo que se puede eliminar el primer miembro de la ecuación, dado que la concentración de sustrato en el reactor permanece constante.
2. La velocidad del consumo del sustrato causada por los microorganismos está definida por: dS/dt siendo intrínsecamente negativa.

Velocidad a la que el sustrato se oxida en el reactor	$= (dS/dt)_a V$
-------------------------------------------------------	-----------------

3. Los términos restantes del lado derecho de la ecuación se definen como:

$$\boxed{\text{Velocidad a la que el sustrato entra en el reactor (efluente)}} = Q_0 S_0$$

$$\boxed{\text{Velocidad a la que el sustrato abandona el reactor (efluente)}} = Q_0 S_e$$

Aplicando las condiciones:

$$Q_0 S_0 - Q_0 S_e - (dS/dt)_a V = 0$$

$$\text{De donde } (dS/dt)_a = Q_0(S_0 - S_e)/V$$

Generalmente la velocidad de consumo del sustrato se expresa por la unidad de MLVSS (Sólidos Suspendedos Volátiles en el Licor Mezclado) y se expresa por q , de modo que la ecuación queda:

$$q = - (1/X_{v,a}) * (dS/dt)_a = (1/X_{v,a}) * (dS/dt)_a$$

Definiendo el tiempo de residencia hidráulico en el reactor $t_h = (V/Q_0)$ y sustituyendo queda:

$$q = (1/X_{v,a}) * (dS/dt)_a = (S_0 - S_e) / (t_h * X_{v,a})$$

Si se define el modelo cinético que se empleará para $(dS/dt)_a$ como de primer orden, se puede expresar así:

$$(dS/dt)_a = K S_e$$

Cabe mencionar que esta suposición es válida cuando la concentración de sustrato es baja, que es el caso del reactor biológico del la P.T.A.R. del ITESM CCM. Con esta consideración la ecuación queda:

$$q = (1/X_{v,a}) K S_e = (S_0 - S_e) / X_{v,a} t_h$$

Debido a que la concentración de MLVSS en equilibrio $(X_{v,a})$ viene fijada por una operación constante del reactor continuo, la relación $K/X_{v,a}$ es constante y se puede denotar por k .

$$q = (S_0 - S_e) / X_{v,a} t_h = k S_e$$

En el caso de que existiera DBO residual (materia no biodegradable) la ecuación cambia:

$$q = (S_0 - S_e) / X_{v,a} t_h = k(S_e - S_h)$$

Conocer q es importante porque nos dice a qué velocidad se está consumiendo la materia orgánica lo cual tiene una repercusión directa en la demanda de oxígeno, y en este caso, del aumento o disminución de la velocidad del motor.

4.4.1.3 Parámetros cinéticos correspondientes a la demanda de oxígeno y producción neta de MLVSS

Para conocer los parámetros cinéticos correspondientes a la demanda de oxígeno y producción neta de MLVSS se puede seguir el procedimiento propuesto por Eckenfelder [3]. Este consiste en analizar el mecanismo básico de la degradación aerobia de los sustratos que consiste dos procesos que se llevan a cabo dentro del reactor:

El metabolismo celular: Parte del sustrato se consume como alimento por los microorganismos y se utiliza para sintetizar nuevas células de microorganismos, lo que lleva a un aumento de la biomasa.

El metabolismo energético: El sustrato restante se oxida, produciéndose CO_2 y H_2O , por los microorganismos para producir energía y llevar a cabo sus funciones vitales. Después de que se consume en su totalidad la materia orgánica los organismos entran en una fase de **respiración endógena** para continuar sus funciones energéticas y de mantenimiento en la cual los organismos comienzan a alimentarse entre sí. Esto provoca una disminución de la biomasa.

Para modelar los procesos de metabolismo de los microorganismos es necesario definir los siguientes parámetros:

Y: Parámetro de metabolismo celular. Es la fracción de sustrato consumido que se utiliza para la síntesis celular debido a la proporcionalidad entre consumo de sustrato y la DBO y DQO utilizadas para la síntesis de nuevas células. Se calcula como: Kg de sustrato consumidos para la síntesis/ Kg totales de sustrato total consumido. Es un parámetro adimensional.

a: Metabolismo energético mediante oxidación de sustrato. Se define como la cantidad (Kg) de sustrato consumido utilizado para el metabolismo energético entre a cantidad (Kg) de sustrato consumido total.

$$Y+a=1$$

Y: Metabolismo celular. Son los Kg de MLVSS producidos entre los Kg de sustrato total consumido. Y representa producción de lodo biológico por Kg consumido del sustrato total.

Para modelar la respiración endógena se definen los siguientes parámetros:

Kd: Coeficiente de descomposición microbiana. Es la fracción de MLVSS por unidad de tiempo oxidada durante el proceso de respiración endógena. Sus dimensiones son t^{-1}

b: Es la cantidad de oxígeno utilizada para por día por Kg de MLVSS en el reactor al momento de la respiración endógena.

A partir de los parámetros anteriores se puede definir la cantidad de MLVSS en el tanque en cualquier momento como:

$\text{Kg MLVSS en el reactor} = X_{v,a} V$

Y el número de kilogramos de MLVSS oxidados por día = $K_d X_{v,a} V$

Para determinar el consumo de oxígeno es necesario saber qué cantidad de oxígeno se requiere para la oxidación del sustrato y para la respiración endógena. *El oxígeno requerido para oxidar el sustrato* (materia orgánica) es:

$$\text{Kg de O}_2/\text{d} = 86.4 a(\text{SrQo}) \quad \text{para energía}$$

La cantidad de oxígeno por día en Kg es igual a 86.4 veces el producto del parámetro a , Sustrato total consumido ($\text{Sr}=\text{So}-\text{Se}$) y el caudal de alimentación combinada del afluente del reactor (Qo). El factor de 86.4 surge para que el resultado esté expresado en Kg de Oxígeno por día.

El oxígeno requerido en la respiración endógena es:

$$\text{Kg de O}_2/\text{d} = a(\text{So}-\text{Se})\text{Qo} + bX_{v,a}V = a\text{SrQo} + bX_{v,a}V$$

Para la obtención de la ecuación anterior se hacen varias consideraciones, entre ellas se supone que la fórmula química de los Sólidos suspendidos volátiles (VSS) es la lactosa $\text{C}_5\text{H}_7\text{NO}_2$. En el caso del P.T.A.R. del ITESM un análisis realizado por el Dpto. de Química [10] nos dice que la composición promedio de los residuos sólidos emitidos es de: C 44%, N 5.91%, O 42.5% y N 0.73%, lo que produce la siguiente molécula:

$\text{C}_{16.8}\text{H}_{27}\text{N}_{0.24}$ lo cual produce una reacción muy distinta a la propuesta por Eckenfelder. Esto cambia la ecuación del oxígeno requerido en la respiración endógena.

4.4.1.4 Problemática de emplear el modelo matemático de la P.T.A.R.

Encontrar el modelo del consumo de oxígeno de la P.T.A.R. del ITESM CCM no es una solución viable por varias razones. La principal de ellas es que se requieren factores de diseño muy específicos con los cuales no se cuenta y con los que no se es posible contar, ya que la empresa Belco México S.A. de C.V., encargada del diseño y construcción de la P.T.A.R., ya no existe. Entre los datos de diseño que se requieren se encuentran \bar{Y} , a , Y , b y K_d .

Los modelos que se encuentran en los libros y tesis no se pueden aplicar porque todos describen el proceso convencional de lodos activados; la P.T.A.R. del CCM funciona por aereación extendida, que consiste en extender el tiempo del licor mezclado dentro del reactor biológico. Lo que lleva a otras ecuaciones.

Otra desventaja de buscar el modelo matemático de la planta es que en vista de que no se pueden conseguir los datos de diseño (entre ellos se encuentran \bar{Y} , a , Y , b y K_d) se

tendría que realizar un estudio químico biológico del licor mezclado; dicho estudio está completamente fuera de las posibilidades de este proyecto, ya que ni siquiera se cuenta con el equipo necesario para realizar el estudio.

Otro problema es que la composición promedio de los residuos sólidos es muy distinta a la considerada en el análisis de los parámetros (lactosa) lo cual cambia factores importantes en el desarrollo del modelo.

4.4.2 Identificación de la planta

Identificar un sistema consiste en aplicar estímulos a la planta y analizar la respuesta. En el caso de la P.T.A.R. se deberían hacer cambios en el control de la velocidad del motor para ver cómo afectan estas variaciones a la cantidad de oxígeno disuelto dentro del reactor biológico.

4.4.2.1 Parámetros de identificación

Específicamente habría que analizar la manera en que se está llevando a cabo el metabolismo energético, celular y la respiración endógena. Hay que aclarar que no sólo se trata de saber cuánto oxígeno hay en el reactor, sino conocer cómo se está empleando ese oxígeno. Esto se aclara ya que cuando se inyecta oxígeno a un fluido se crea una capa entre las burbujas y el líquido que puede variar por diversos factores. Para saber de qué manera se está mezclando el oxígeno con el licor es preciso calcular el coeficiente de transferencia de oxígeno. Con este coeficiente se puede calcular un factor de corrección, mismo que es afectado por variables como:

1. Temperatura del licor mezclado
2. Naturaleza de los componentes orgánicos y minerales disueltos
3. Características del equipo de aereación
4. Intensidad de la mezcla del agua residual con los lodos activados
5. La profundidad del líquido y la geometría del módulo de aereación

Los puntos 3, 4 y 5 permanecen constantes, sin embargo el 1 y 2 son variables de entrada que van a afectar la salida del sistema. En resumen la variable de salida sería la cantidad de materia que se asimiló en el reactor variando la velocidad del motor, la temperatura y la naturaleza del licor mezclado.

4.4.2.2 Desventajas de la identificación de la P.T.A.R.

La principal desventaja de la identificación en una P.T.A.R. es que para variar las entradas son necesarios dispositivos entre los que se encuentran uno que varíe la velocidad del motor, otro que cambie la temperatura del licor mezclado en el biorreactor y uno más que cambie la constitución del licor mezclado.

El control del motor es una etapa del proyecto que se está realizando, por lo que esta no implicaría un gran inconveniente, sin embargo para variar la temperatura dentro del

reactor tendría que contarse con un equipo que modifique la temperatura, lo cual no es costeable debido al elevado precio que representaría calentar y enfriar los miles de litros de licor mezclado que caben dentro de los 340 m² que son la capacidad del reactor. Una manera de evitar esto sería realizar las pruebas y en lugar de variar artificialmente la temperatura, depender de las condiciones climáticas, lo cual queda fuera de los alcances del proyecto por la falta de tiempo (habría que realizar pruebas durante todo el año).

En cuanto a la composición del licor mezclado, no se tendría mayor problema ya que el agua que llega a la planta es doméstica, y se han realizado investigaciones que permiten mantener esta variable como una constante.

El otro problema importante que se presenta es que la salida del sistema a identificar sería muy difícil de medir, ya que la cantidad de materia orgánica que se asimila se conoce a través de un indicador conocido como DBO, el cual tarda 5 días en obtenerse en el laboratorio, y los equipos que miden de 5 a 25 minutos son sensores que cuestan alrededor de 18 000 dls (el DBOmetro). Otra opción es la renta de este sensor, el problema es que la compañía que lo maneja en México sólo lo trabaja sobre pedido y no es posible para ellos pedir uno para rentarlo al proyecto.

4.4.3 Control Difuso

4.4.3.1 ¿Qué es el control difuso?

Los sistemas difusos, encargados de aproximar funciones, pueden ser aproximadores universales si emplean suficientes reglas difusas. De este modo los sistemas difusos pueden modelar casi cualquier función continua, y su calidad de aproximación depende de la calidad de las reglas.

La lógica difusa es una teoría lingüística que modela el razonamiento humano, el sentido común y reglas empíricas. Un sistema difuso es un conjunto de reglas *si-entonces* que asignan valores de entrada con valores de salida. Este conjunto de reglas se conforma de palabras que forman frases, que a su vez integran párrafos. El quitar, poner o cambiar reglas sintoniza el sistema difuso, así como el cambiar, proponer o eliminar palabras y frases de un párrafo, expresan de diferente manera una idea. Hay diversas formas de obtener las reglas, una es a partir del conocimiento de un experto, otra a partir de algoritmos adaptativos y una tercera manera puede ser a partir del análisis de la planta.

En contraste con la lógica booleana; que sólo asigna valores de 1 ó 0, verdadero ó falso; la lógica difusa asigna diferentes valores entre cero y uno de acuerdo a funciones que se definen previamente y que permiten obtener resultados más cercanos a lo de la realidad donde seguido se presentan situaciones que no se pueden calificar como dos extremos, sino con gran variedad de valores intermedios o tonalidades.

4.4.3.2 Conceptos y etapas del control difuso

Para seguir hablando del control difuso es necesario definir algunos conceptos:

Conjunto no nítido o función de membresía: Es aquél que no tiene bien definidos sus elementos y pueden tener pertenencia diferente de 1. Esto es contrario a un conjunto nítido donde sus elementos tienen pertenencia total.

Grado de permanencia: Valor difuso asignado a un valor real durante la fusificación.

Universo de discurso: Rango de valores reales que se van a fusificar.

Este control se realiza mediante tres etapas:

Fuzificación: Mapear la entrada observada, o real, con los valores difusos. Pasar del universo de discurso al grado de permanencia.

Evaluación de reglas: Decisión lógica que determina por inferencia la salida difusa correspondiente a una entrada difusa. Se deben especificar en el modelo qué operadores de implicación, conjunción, y agregación se van a emplear.

Defuzificación: Este paso produce una salida no difusa, es pasar del valor difuso inferido a un valor del universo de discurso. Por lo general se emplea uno de los siguientes métodos: Centro de área (COA), Máximo criterio o Media de máximo

4.4.3.3 Ventajas y Desventajas del control difuso

El control difuso tiene la ventaja de poder controlar sistemas no lineales y multivariables sin un modelo matemático de la planta. Esto gracias al conjunto de reglas que surgen de la experiencia. En este caso de un experto operador de la planta. A partir de la información que nos proporciona se crean reglas con las variables de entrada, en este caso la cantidad de oxígeno disuelto y la temperatura, y dependiendo de variables lingüísticas y la asignación de diferentes estados lógicos se calcula una salida del sistema; la velocidad del motor.

Esta opción es la más realizable ya que no se requiere un modelo matemático ni costosos sensores (DBOmetro). A partir de la experiencia de un operador se puede crear una serie de condiciones lógicas (reglas) que, dependiendo de la cantidad de oxígeno y de la temperatura, producirán una determinada velocidad en el motor.

5 Control de la P.T.A.R del ITESM CCM

5.1 Planteamiento del problema

El punto crítico y fundamental en una P.T.A.R que funciona por el método de *lodos activados por aereación extendida* se encuentra en el reactor biológico, ya que es en este módulo donde se lleva a cabo la absorción, adsorción y síntesis de la materia orgánica a través de las colonias de organismos que componen los lodos activados. Para que se lleven a cabo estos procesos con eficiencia es necesario que exista una cantidad específica de oxígeno disuelto en el módulo, misma que es introducida por el aereador. Un objetivo de este proyecto es controlar la cantidad de oxígeno en el reactor biológico por medio del control de la velocidad del motor que se encarga de alimentar el soplador que a su vez inyecta el aire (y oxígeno) al licor mezclado.

5.2 Aplicación del control difuso en la P.T.A.R del ITESM CCM

5.2.1 Definición de las variables de entrada

En el caso de la planta de Tratamiento hay que recordar que lo que se desea controlar es la cantidad de oxígeno, o la velocidad del soplador, y para conocer dicha cantidad que se debe introducir al reactor biológico es necesario saber que el metabolismo celular u el metabolismo energético se están llevando a cabo. Como estos procesos se llevan a cabo al mismo tiempo, la reacción que describe estos fenómenos es la siguiente:



En esta ecuación se muestra la reacción que se lleva a cabo en el licor mezclado, en la que COHNS (materia orgánica), y nutrientes en presencia de oxígeno son convertidos por microorganismos en nuevos microbios, dióxido de carbono, agua y energía. El último término de la ecuación es de vital importancia ya que es un excedente de oxígeno. Por

parámetros de diseño, para la P.T.A.R del CCM este excedente es de 2 ppm (partes por millón). Mientras este excedente de oxígeno permanezca en 2 ppm quiere decir que la reacción se está llevando a cabo normalmente, o como debiera. Cuando este excedente es menor a 2 quiere decir que hace falta oxígeno para que los fenómenos de la reacción se lleven a cabo. Cuando la cantidad de oxígeno disuelto (excedente de Oxígeno) es mayor a 2 ppm, quiere decir que hay oxígeno de más, que no se está empleando y se está desperdiciando. Este tercer y último caso es el de un soplador que está inyectando demasiado oxígeno, lo cual no repercute en la reacción, sin embargo implica un mayor consumo de energía ya que no es necesario que el soplador inyecte tanto oxígeno.

Con estos conceptos de oxígeno disuelto y excedente de oxígeno disuelto, se puede saber qué cantidad de oxígeno es necesaria inyectar en el reactor biológico. Conociendo el oxígeno disuelto en el reactor biológico en ppm, y comparándolo con el valor deseado (dos) se puede aumentar o disminuir la velocidad del motor que regula la velocidad del soplador y la cantidad de oxígeno.

Algunos factores que intervienen en el incremento o decremento del oxígeno disuelto son la presión, la temperatura y el flujo. En el caso de la P.T.A.R del CCM la presión puede considerarse constante ya que es la presión de la ciudad de México, sin embargo la temperatura y el flujo pueden variar y repercutir de gran manera en la cantidad de oxígeno disuelto.

Del análisis anterior se puede concluir que las variables de entrada para el sistema de control sean la cantidad del oxígeno disuelto, la temperatura y el flujo de entrada en la planta.

5.2.2 Definición de las reglas del control difuso

Como se mencionó anteriormente hay muchas maneras de obtener estas reglas, para este caso sólo se emplean dos de ellas: A través del análisis de datos y a través de un experto.

Un problema que se puede tener con los sistemas difusos es que si las reglas son no óptimas, se tendrá como resultado un sistema no óptimo. O dicho de otra manera la definición de las reglas es la parte más importante de un sistema difuso. Por lo anterior se hicieron varias versiones de las reglas, obtenidas todas ellas de distintas fuentes. La primera que se muestra se obtuvo de un artículo de la IEE en la que se propone automatizar una P.T.A.R de lodos activados, y en la que se incluyen otros procesos como la recirculación de lodos. En este conjunto de reglas se presentan primero las reglas que repercuten en la aereación de la planta, así como las etiquetas de cada término.

5.2.2.1 Conjunto de Reglas para el control difuso de una P.T.A.R basado en el artículo de R. M. Tong, M. B. Beck y A. Lattens "Fuzzy control of the activated sludge waste water treatment process"

Variables de Entrada:

- DBO_eE:** Demanda bioquímica de oxígeno en el efluente.
- SSE:** Sólidos suspendidos en el efluente.
- SSLM:** Sólidos suspendidos en el licor mezclado (a la salida del tanque aerador).
- SSLR:** Sólidos suspendidos en los lodos de recirculación.
- ANE:** Amonia-Nitrógeno en el efluente.
- MLA:** Medida de lodo abultado
- ODT:** Oxígeno disuelto en el tanque biológico

Variable de salida:

Δ ODT: Cambio en el oxígeno disuelto del tanque biológico.

Etiquetas:

- P:** Poco
- R:** Regular
- M:** Mucho
- PN:** Poco negativo
- MN:** Mucho negativo
- PP:** Poco positivo
- MP:** Mucho positivo
- I:** Indicador de que hay lodo abultado

No. regla	DBO _e E	SSE	SSLM	SSLR	ANE	MLA	ODT	Δ ODT
1	P	P	R	R	P		M	MN
2		M				I		PN
3		R				I		MN
4		M			R			PP
5		P			M			MN

Reglas

1) Si la Demanda bioquímica de oxígeno en el efluente es Poca, y los Sólidos suspendidos en el efluente son Muchos, y los Sólidos suspendidos en el licor mezclado son Regular, y los Sólidos suspendidos en los lodos de recirculación son Regular, y el Amonia-Nitrógeno en el efluente es Poco, y el Oxígeno disuelto en el tanque biológico es Mucho; entonces el Cambio en el oxígeno disuelto del tanque biológico es Mucho y negativo.

2) Si los Sólidos suspendidos en el efluente son Muchos, y la Medida de lodo abultado está indicada; entonces el Cambio en el oxígeno disuelto del tanque biológico es Poco y negativo.

3) Si los **Sólidos suspendidos en el efluente** son *Regular*, y la **Medida de lodo abultado** está *indicada*; entonces el **Cambio en el oxígeno disuelto del tanque biológico** es *Mucho y negativo*.

4) Si los **Sólidos suspendidos en el efluente** son *muchos*, y el **Amonia-Nitrógeno en el efluente** es *Regular*; entonces el **Cambio en el oxígeno disuelto del tanque biológico** es *Poco y positivo*.

5) Si los **Sólidos suspendidos en el efluente** son *pocos*, y el **Amonia-Nitrógeno en el efluente** es *Mucho*; entonces el **Cambio en el oxígeno disuelto del tanque biológico** es *Mucho y Negativo*.

Nota: El cambio en el oxígeno disuelto en el tanque biológico se realiza por medio del cambio en la velocidad del motor que alimenta el aereador.

En caso de contar con una segunda variable de salida, esta sería el cambio en el Flujo del Lodo Activado de Desecho (Δ FLAD). Esta decisión se toma debido a que es esta salida una de las que afectan más el funcionamiento de la planta. El contar con esta segunda variable de entrada implica considerar variables de entrada adicionales.

Variables de entrada:

DBO_e: Demanda bioquímica de oxígeno en el efluente.

SSE: Sólidos suspendidos en el efluente.

SSLM: Sólidos suspendidos en el licor mezclado (a la salida del tanque aereador).

SSLR: Sólidos suspendidos en los lodos de recirculación.

ANE: Amonia-Nitrógeno en el efluente.

MLA: Medida de lodo abultado

MLL: Medida del levantamiento del lodo.

ODT: Oxígeno disuelto en el tanque biológico.

FLAD: Flujo del Lodo Activado de Desecho.

Variables de salida;

Δ FLAD: Cambio en el Flujo del Lodo Activado de Desecho.

Etiquetas:

P: Poco

R: Regular

M: Mucho

PN: Poco negativo

MN: Mucho negativo

PP: Poco positivo

MP: Mucho positivo

mP: muy poco

I: Indicador de que hay lodo abultado o creciente

Regla	5.2.2.1.	SSE	SSLM	SSLR	ANE	MLA	MLL	ODT	FLAD	Δ FLAD
1	P	P	R	R	P				P	PP
2	P	P	R	R	P				M	PN
3		R					I			PP
4		M					I			MP
5		P			R					PN
6		P			M					MN
7		M								MP
8		P								PN
9		mP								MN
10	R	P			P					PN
11	M	P			P					MN

A partir de las reglas anteriores es imposible diseñar el control ya que no se conoce el universo de discusión ni el rango de cada etiqueta. Por esta razón se acudió con el experto de la P.T.A.R del ITSM CCM.

5.2.2.2 Diseño de Reglas para el control difuso de una P.T.A.R basado en el experto operador del ITESM CCM.

Variables de entrada:

CE: Cantidad de espuma.

OD: Oxígeno disuelto.

FE: Flujo de entrada.

Variable de salida

PV: Presión en las válvulas.

Etiquetas.

Na: Nada.

B: Bajo.

R: Regular.

A: Alto.

5.2.2.2.1 No. de regla	CE	OD	FE	PV
1	A	R		B
3		B	A	A
4	Na	R	R	R

Reglas

- 1) Si la Cantidad de espuma es Alta, y el Oxígeno Disuelto es Regular, entonces la Presión en las Válvulas es Baja.
- 2) Si Oxígeno Disuelto es Bajo, y el Flujo de Entrada es Alto; entonces la Presión en las Válvulas es Alta.
- 3) Si la Cantidad de Espuma es Nada, y el Oxígeno Disuelto es Regular, y el Flujo de Entrada es Regular, entonces la Presión en las Válvulas es Regular.

Valores de etiquetas:

Cantidad de espuma (en cm)

Nada	CE = 0
Bajo	CE < 10
Regular	10 < CE < 15
Alto	CE > 15

Oxígeno Disuelto (en partes por millón ppm)

Bajo	OD < 2
Regular	OD = 2
Alto	OD > 2

Flujo de entrada (en litros por segundo lps)

Bajo	FE < 1.8
Regular	1.8 < FE < 2.5
Alto	FE > 2.5

Presión en válvulas (Cubic feet per meter)

Bajo	0.35 < PV < 0.38
Regular	0.38 < PV < 0.40
Alto	PV > 0.40

Como se puede ver en este conjunto de reglas aparece como variable de entrada la cantidad de espuma, así como en el conjunto de reglas del artículo. La solución que se tomó fue consultar a un experto en plantas de tratamiento de aguas residuales. El experto que se consultó es el Ingeniero Químico René Lara, con estudios en ingeniería ambiental. El Ing. René Lara es diseñador de plantas de tratamiento de lodos activados (entre otras) y parte del comité certificador de ISO 14000 para plantas de tratamiento. Actualmente labora en el Departamento de Ingeniería Química y alimentos de la UDLA.

El experto de la UDLA propuso no tomar en cuenta la cantidad de espuma por tratarse de una medida ambigua, ya que puede tratarse de espuma creada por algún detergente, además de ser un parámetro difícil de medir. Las reglas que propuso el experto de la UDLA con las etiquetas y rangos definidos por el experto del ITESM CCM se presentan a continuación.

5.2.2.3 Diseño de Reglas para el control difuso de una P.T.A.R basado en el experto M. en C. René Lara (Dpto. de Ingeniería Química y Alimentos, UDLA).

Implementar las reglas tal como habían sido descritas por el experto de la UDLA era imposible, ya que en realidad se estaban manejando dos variables de salida como una. Las reglas indicaban si había un aumento o disminución, pero también establecían niveles de velocidad. Por ejemplo:

Si el Oxígeno Disuelto es Muy Bajo entonces la velocidad del Motor es Alta.

En la regla anterior se propone como salida un valor de velocidad, que en este caso es alta, y se trata de un valor del 100% de la velocidad del motor en su región de trabajo. La variable de salida es la velocidad del motor. Por otro lado se tienen reglas como por ejemplo:

Si el Oxígeno Disuelto es Regular; entonces la velocidad del Motor es Permanecer en nivel.

En esta última regla no se dice cual debe ser la velocidad del motor directamente, y en cambio se refiere a otra variable de salida: El cambio en la velocidad. Para entender mejor esto a continuación se analiza la siguiente regla:

Si el Oxígeno Disuelto es Excesivo; entonces la velocidad del Motor es Disminuir un nivel.

En la regla anterior se tiene como consecuencia la disminución de un nivel en la velocidad del motor, sin embargo no se sabe en que velocidad está el motor, por lo que es imposible saber el valor de la velocidad disminuyendo en un nivel su valor.

El problema parece algo complejo, sin embargo recordando que el motor está controlado por medio de una estrategia de V/F, el valor de la velocidad es un valor que se puede conocer a partir de la frecuencia sincrónica. Por lo anterior se hizo una adaptación del control del experto de la UDLA y se llegó al diseño de control difuso que se rige por 24 reglas principales y se adiciona una nueva variable: La velocidad del motor. El control se muestra a continuación.

Variables de entrada:

Q: Flujo de entrada.

OD: Oxígeno disuelto.

T: Temperatura del licor.

Wa: Velocidad actual del motor

Variable de salida

Wd: Velocidad deseada del motor.

Etiquetas.

MB: Muy bajo.
B: Bajo.
R: Regular.
A: Alto.
MA: Muy Alto

Tabla 5-1 Reglas de control difuso

No. de regla	T	OD	Q	Wa	Wd
1		MB			MA
2	A	B	A		MA
3		B	A	MB	B
4		B	A	B	R
5		B	A	R	A
6		B	A	A	MA
7	A	B		MB	B
8	A	B		B	R
9	A	B		R	A
10	A	B		A	MA
11	B	B	B		A
12		R		MB	MB
13		R		B	B
14		R		R	R
15		R		A	A
16		R		MA	MA
17		A		B	MB
18		A		R	B
19		A		A	R
20		A		MA	A
21		MA		MA	R
22		MA		A	B
23		MA		R	MB
24		MA		B	MB

Valores de etiquetas:

Flujo de entrada (lps)

Bajo $Q < 3$
 Regular $Q = 3$
 Alto $Q > 3$

Oxígeno Disuelto (en partes por millón ppm)

Muy Bajo $0 < OD < 0.5$
 Bajo $0.5 < OD < 1.5$
 Regular $1.5 < OD < 2.2$
 Alto $2.2 < OD > 5$

Muy Alto OD>5

Temperatura (en °C)

Bajo	$T < 10$
Regular	$10 < T < 20$
Alto	$T > 20$

Velocidad del motor (En porcentaje de la región de operación)

MB	W = 20%
B	W = 40%
R	W = 60%
A	W = 80%
MA	W = 100%

5.2.3 Descripción del control difuso en MATLAB

Con las reglas y etiquetas anteriores se diseñó el modelo de control difuso en Matlab. A continuación se muestra el diagrama.

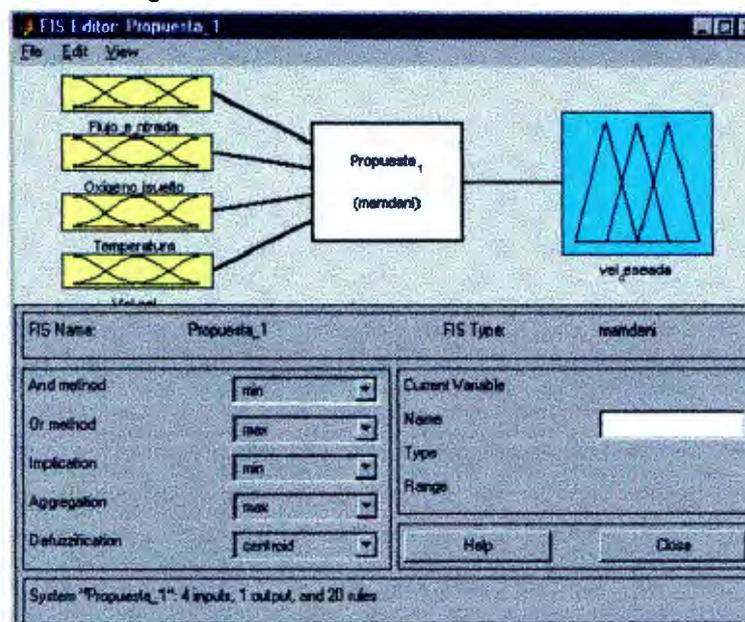


Figura 5-1 Modelo difuso

El sistema de control tiene cuatro variables de entrada y una de salida. El método de inferencia es el de min/max y la defuzificación se hace por el método del centroide. Las variables de entrada se muestran a continuación junto con sus funciones de membresía y sus límites.

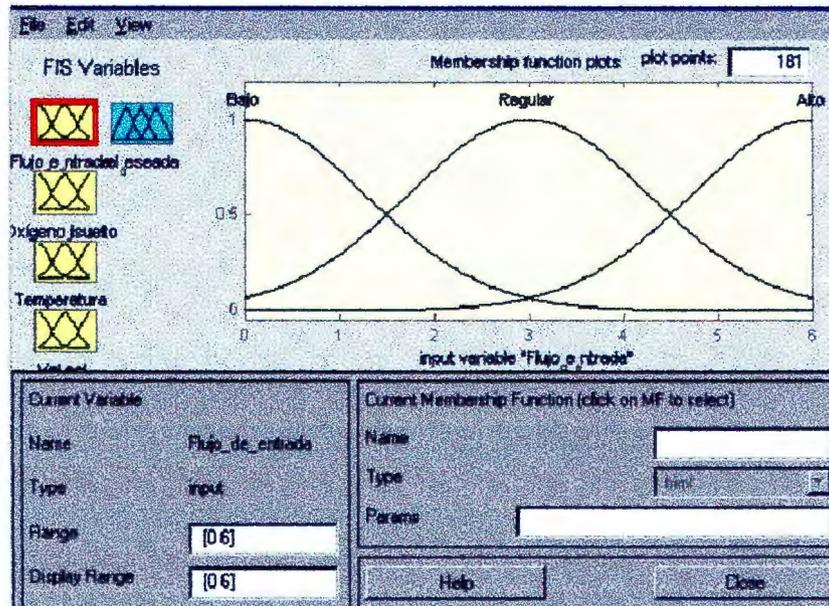


Figura 5-2 Flujo de entrada

En la imagen 5-2, aparece la variable Flujo_de_entrada con sus tres funciones de membresía tipo gaussmf. Y con sus máximos en Bajo = 0; Regular = 3 y Alto = 6. El Universo de discurso varía entre 0 y 6 que son los valores reales del flujo de entrada que puede ser cero cuando no hay flujo de entrada y seis que es la capacidad máxima de la planta. Cabe mencionar que debido a la certificación ISO 14000, la planta no debe trabajar a más de 4 lps como flujo de entrada, sin embargo se deja como máximo seis debido a que esto puede cambiar en un futuro.

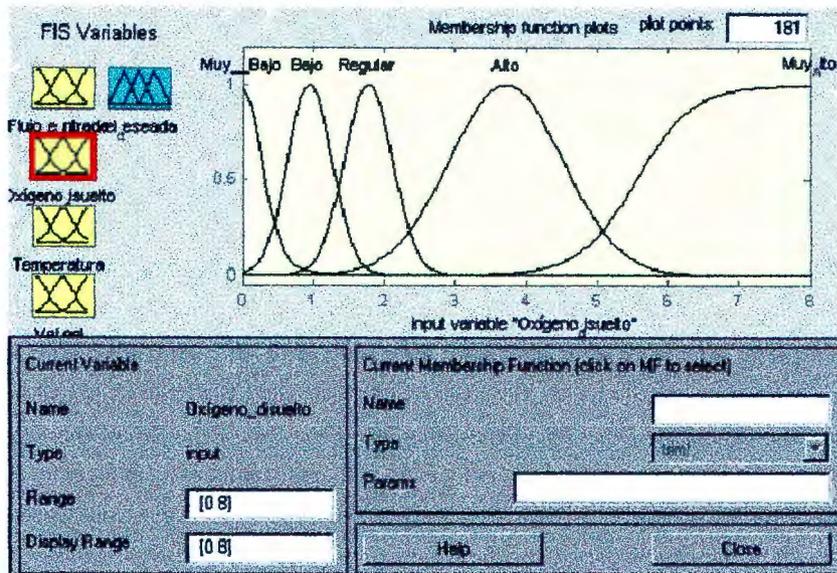


Figura 5-2 Funciones Gaussianas

En la imagen 5-3 se muestran las funciones tipo gauss. Del Oxígeno disuelto, así como Universo de discurso: 0 a 8. Como se muestra en la gráfica, un valor muy bajo de OD corresponde de 0 a 0.5, mientras que uno bajo a un máximo de 1. La función regular asigna a mediciones de OD de 1.5 a 2.3 con un valor difuso alto cercano a 1.8. Arriba de dos, está la función de OD alto que asigna valores entre 2.3 y 5, mientras que arriba de 5 se asigna una etiqueta de muy alto. El OD no debe pasar de 2.5, sin embargo las mediciones registradas en la planta muestran valores de hasta 7, por lo que hay que extender el universo de discurso aunque durante el funcionamiento del control estos valores no se alcancen.

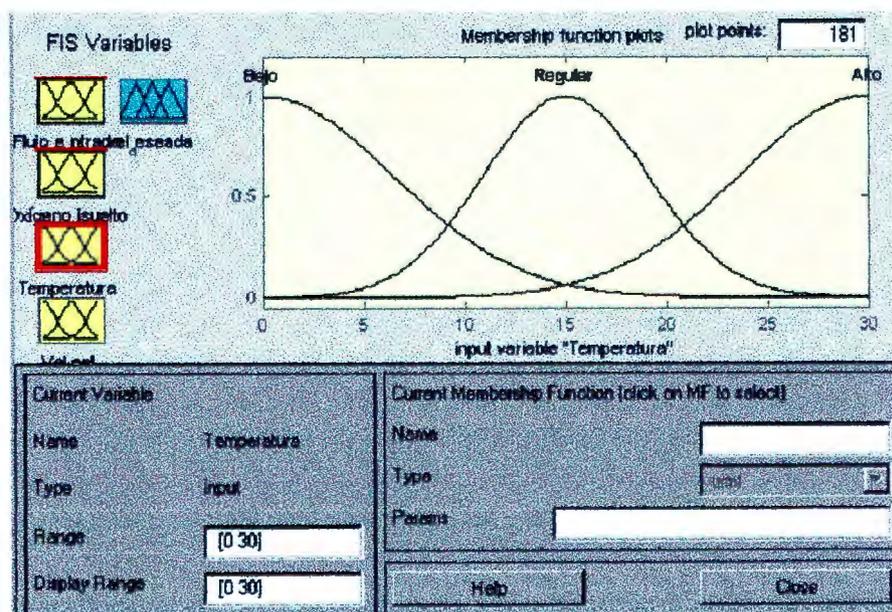


Figura 5-3 Temperatura

La temperatura se muestra en la imagen 5-4 se ve la variable de entrada Temperatura, esta con un universo de discurso de 0 a 30°C y con 3 funciones de membresía: Bajo, regular y alto; que asignan los máximos valores difusos a 0 15 y 30°C respectivamente.

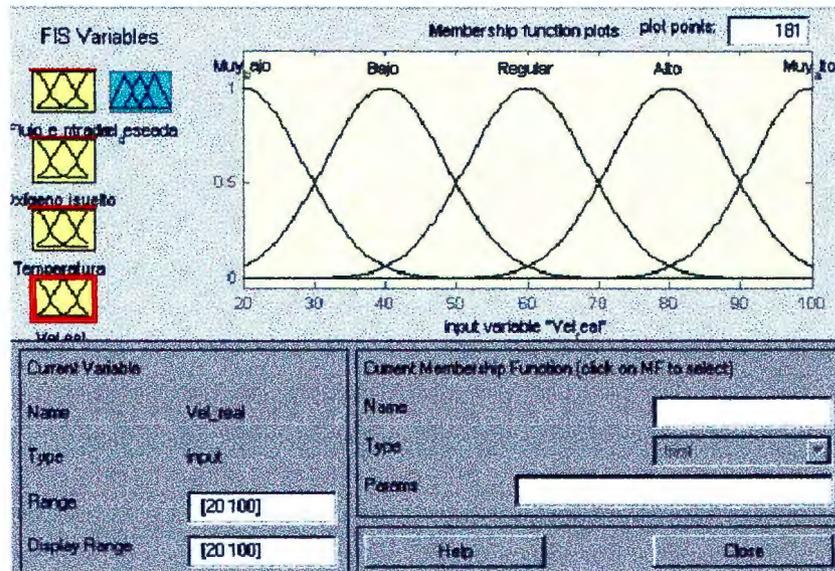


Figura 5-4 Velocidad real

La velocidad actual del motor se muestra en la Imagen 5-5, y tiene un universo de discurso que va de 20 a 100, y se refiere al porcentaje de la velocidad en la región de operación del motor. Aquí se asignaron 5 funciones de membresía que van desde muy bajo (20%), hasta muy alto(100%), pasando por bajo(40%), regular(60%) y alto (80%).

La variable de salida del sistema se muestra en la figura 5-6, en ella se puede ver un universo de discurso de hasta 100%, que es la máxima velocidad del motor en su región de operación estable. Esta variable tiene 5 funciones de membresía tipo trimf con valores difusos máximos en: Muy bajo(0%), Bajo(25%), Regular(50%), Alto(75%) y Muy Alto (100%)

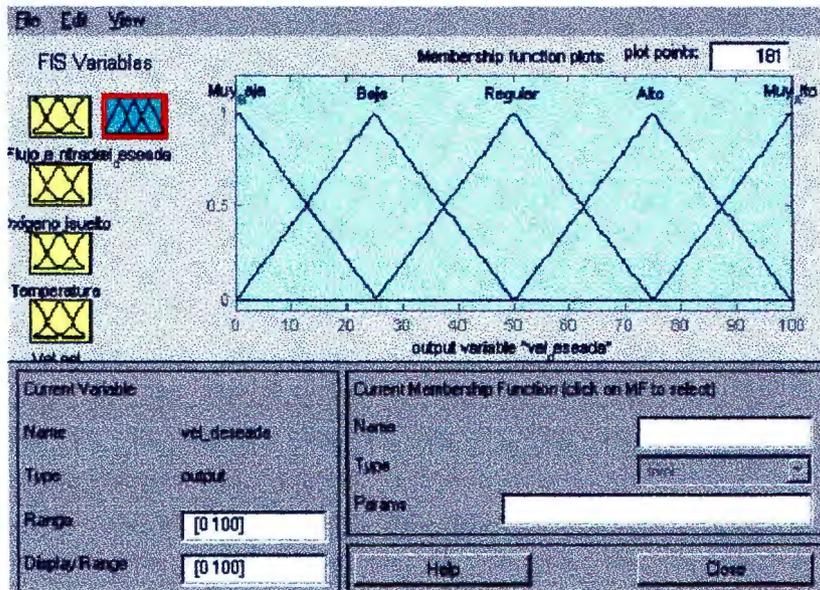


Figura 5-6 Funciones de membresia

El modelo empleado en simulink para la prueba del sistema se muestra en la figura fuzz1

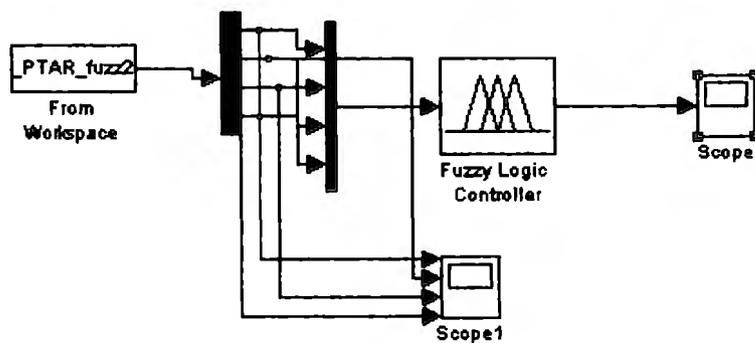


Figura 5-5 Modelo en Simulink

En el modelo anterior se introducen los datos de las variables de entrada capturados en una hoja de cálculo y pasan por un demux para luego multiplexarse de nuevo y alimentar el sistema de control difuso. A la salida, así como entre el DEMUX y el MUX se colocaron visualizadores para observar las variables de entrada y la salida del sistema de control de lógica difusa.

5.2.4 Sintonización del control en Matlab

Para ajustar las formas y valores de las funciones de membresía y obtener un control óptimo se realizaron dos tipos de ajuste. Uno por el análisis del error y el otro con la ayuda del experto de la UDLA.

5.2.4.1 Análisis de Estabilidad del error

Es importante saber cómo va a responder el sistema, ya que aunque la medición de la temperatura, del oxígeno y del valor actual de la velocidad del motor se pueden hacer en línea (muestras instantáneas) en general, la variable de Oxígeno disuelto es una variable denominada como "lenta", esto debido a que un cambio en la velocidad del motor no se reflejará instantáneamente en la cantidad de oxígeno, mismo valor que puede tardar hasta 5 minutos para estabilizarse. Para entender cómo respondería el sistema se hizo el siguiente análisis.

Este análisis se enfoca en lo que pasaría si el sistema tomaran muestras en línea en un corto periodo de tiempo (cercano a uno o cinco segundos) de muestreo. En este caso se pueden considerar como constantes, debido a la lentitud de su respuesta, a la temperatura en el reactor biológico, y al oxígeno disuelto. Dicho de otra manera sólo nos importa saber lo que ocurre durante la estabilización de la velocidad. Para este análisis se introdujo un vector de entrada al control difuso. Dicho vector está compuesto por valores reales de la planta: $\langle T=15^{\circ}\text{C}; Q=2.8\text{ lps}; OD=6.4; W_r = 100\text{rpm (máxima carga)} \rangle$
La salida del control retroalimenta el valor real lo que permite hacer un análisis del error (velocidad deseada - velocidad real). Se introdujeron los datos de la tabla 5-1.

Tabla 5-2 Velocidad deseada- Velocidad Real

t(s)	T(°C)	Q(lps)	OD(ppm)	Wr(%rad/s)	Wd(%rad/s)	Error
1	15	2.7	6.4	100	58.4	-41.6
2	15	2.7	6.4	58.4	28.5	-29.9
3	15	2.7	6.4	28.5	34.2	5.7
4	15	2.7	6.4	34.2	35.1	0.9
5	15	2.7	6.4	35.1	34	-1.1
6	15	2.7	6.4	34	35.3	1.3
7	15	2.7	6.4	35.3	33.8	-1.5
8	15	2.7	6.4	33.8	35.6	1.8
9	15	2.7	6.4	35.6	33.5	-2.1
10	15	2.7	6.4	33.5	36.1	2.6
11	15	2.7	6.4	36.1	33	-3.1
12	15	2.7	6.4	33	36.9	3.9
13	15	2.7	6.4	36.9	32.3	-4.6
14	15	2.7	6.4	32.3	38.1	5.8
15	15	2.7	6.4	38.1	31.6	-6.5
16	15	2.7	6.4	31.6	39.5	7.9
17	15	2.7	6.4	39.5	31	-8.5
18	15	2.7	6.4	31	38.5	7.5
19	15	2.7	6.4	38.5	31.4	-7.1
20	15	2.7	6.4	31.4	39.3	7.9
21	15	2.7	6.4	39.3	31	-8.3
22	15	2.7	6.4	31	38.5	7.5
23	15	2.7	6.4	38.5	31.4	-7.1
24	15	2.7	6.4	31.4	39.3	7.9
25	15	2.7	6.4	39.3	31	-8.3
26	15	2.7	6.4	31	38.5	7.5
27	15	2.7	6.4	38.5	31.4	-7.1
28	15	2.7	6.4	31.4	39.3	7.9
29	15	2.7	6.4	39.3	31	-8.3
30	15	2.7	6.4	31	38.5	7.5
31	15	2.7	6.4	38.5	31.4	-7.1
32	15	2.7	6.4	31.4	39.3	7.9
33	15	2.7	6.4	39.3	31	-8.3
34	15	2.7	6.4	31	38.5	7.5
35	15	2.7	6.4	38.5	31.4	-7.1
36	15	2.7	6.4	31.4	39.3	7.9
37	15	2.7	6.4	39.3	31	-8.3
38	15	2.7	6.4	31	38.5	7.5
39	15	2.7	6.4	38.5	31.4	-7.1
40	15	2.7	6.4	31.4	39.3	7.9
41	15	2.7	6.4	39.3	31	-8.3
42	15	2.7	6.4	31	38.5	7.5
43	15	2.7	6.4	38.5	31.4	-7.1
44	15	2.7	6.4	31.4	39.3	7.9
45	15	2.7	6.4	39.3	31	-8.3

46	15	2.7	6.4	31	38.5	7.5
47	15	2.7	6.4	38.5	31.4	-7.1
48	15	2.7	6.4	31.4	39.3	7.9
49	15	2.7	6.4	39.3	31	-8.3

Como se puede ver los últimos valores se repiten a partir de t=19. La gráfica tiene la siguiente forma.

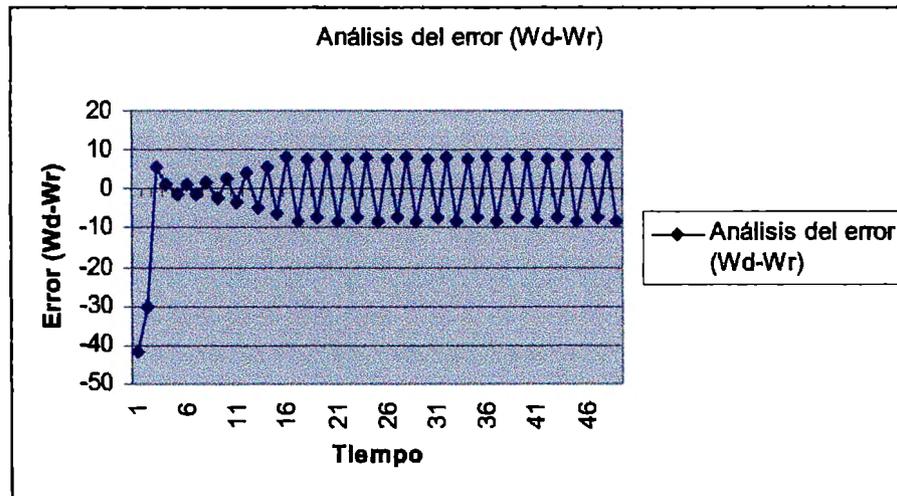


Figura 5-6 Análisis del error

En la gráfica se puede ver que el sistema tiene una respuesta rápida y el error disminuye y se acerca a cero, sin embargo después aumenta y se queda en una banda de $\pm 10\%$. Este error puede ser un poco grande, así que para reducirlo se pueden ajustar las funciones de membresía de la variable velocidad real. Los cambios se muestran en la Figura 5-8.

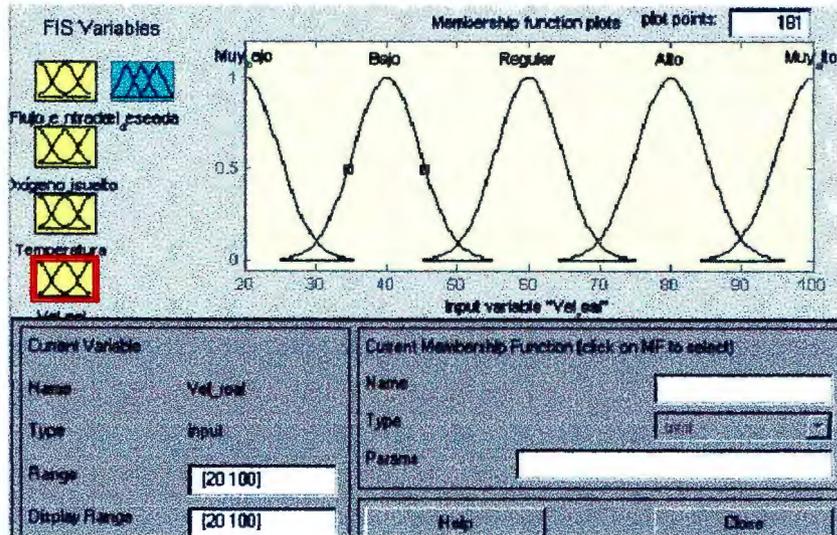


Figura 5-7 Funciones de membresía ajustadas

Lo único que se hizo fue reducir el ancho de las funciones de membresía. La respuesta fue mejor y al introducir el mismo vector de entrada al control se tubo la respuesta mostrada en la tabla 5-3

Tabla 5-3 Respuesta después del ajuste

t(s)	T(°C)	Q(lps)	OD(ppm)	Wr(%rad/s)	Wd(%rad/s)	Error
1	15	2.7	6.4	100	60.1	-39.9
2	15	2.7	6.4	60.1	26.8	-33.3
3	15	2.7	6.4	26.8	30	3.2
4	15	2.7	6.4	30	30	0
5	15	2.7	6.4	30	30	0
6	15	2.7	6.4	30	30	0
7	15	2.7	6.4	30	30	0

La gráfica del error se muestra en la figura 5-8. Como se puede ver, el error converge a cero rápidamente lo que implica mandar al motor una señal de velocidad que no varía; por ello se considera más estable.

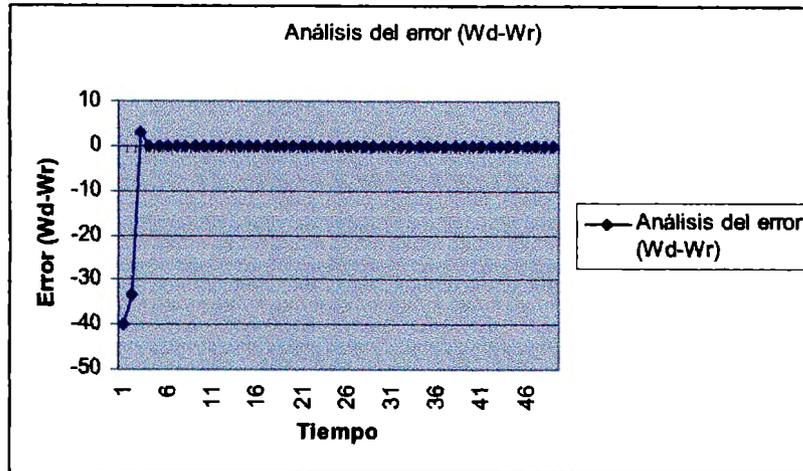


Figura 5-8 Análisis del error después de sintonizar

Una vez realizados estos análisis, es necesario validarlos mediante el apoyo de expertos, por lo que a continuación se presentan las propuestas de ellos.

5.2.4.2 Análisis con el experto de la UDLA

El sistema se probó con condiciones propuestas por el experto MC. René Lara (UDLA). Los resultados fueron positivos. De las 225 posibilidades se analizaron sólo las que el experto consideró más importantes ya que hay algunas condiciones que se cumplirían en muy difíciles circunstancias. El sistema respondió de manera esperada a cada caso que el experto propuso y la única mejora que el experto mencionó fue que el sistema diera más importancia al oxígeno disuelto que a la temperatura. Que los cambios en la temperatura no influyeran tanto.

Esto se logró ampliando el universo de discurso de las funciones de membresía de la variable de entrada temperatura.

Al evaluar las condiciones de velocidad máxima y mínima se observó que estas eran de 90 y 20% respectivamente. La medida que se tomó fue la de ampliar el universo de discurso de la variable de entrada *velocidad real* desde 0 hasta 100% al igual que con la variable de salida de *velocidad deseada*. Además se ajustaron las formas de las funciones de membresía haciéndolas un poco más angostas en la variable de salida de *velocidad deseada*. Las funciones quedaron como se muestra en la figura 5-9.

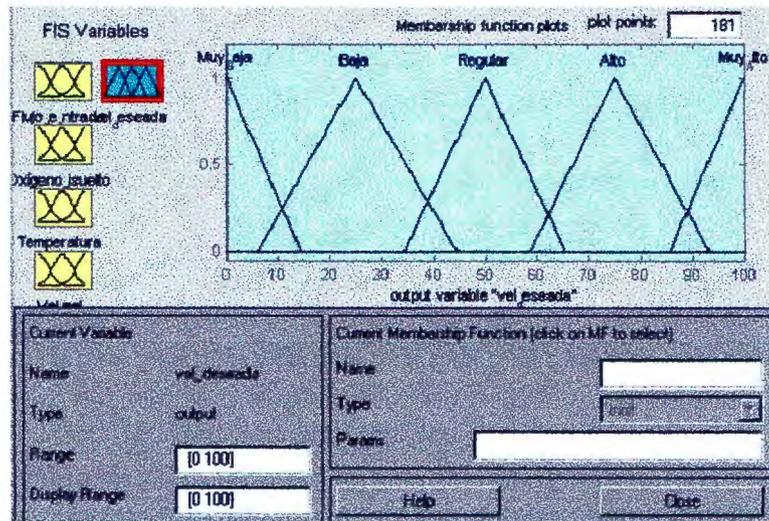


Figura 5-9 Modificaciones en las funciones

Como se puede ver en la figura 5-10 las funciones de membresía se hicieron más angostas. Después de estos cambios las velocidades máximas y mínimas de salida fueron 94.6 y 4.56% respectivamente.

Las superficies creadas evaluando diferentes valores para el oxígeno disuelto y la temperatura se pueden ver a continuación en la imagen 5-11.

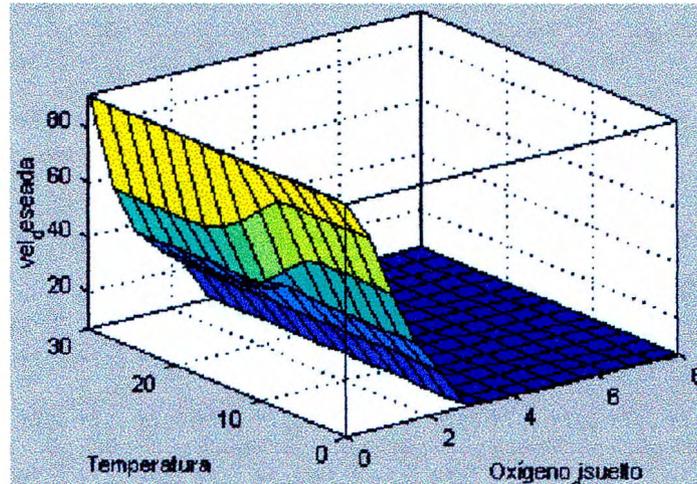


Figura 5-10 O₂, Velocidad y Temperatura

En la gráfica de la imagen 5-11 se puede observar cual será la salida (velocidad deseada) al variar el oxígeno disuelto y la temperatura. Se puede analizar que para un oxígeno disuelto mayor a 3, la temperatura no importa de cuanto sea, la velocidad deseada será casi cero. Para oxígenos disueltos menores a 3 se puede ver que la temperatura afecta la velocidad deseada, siendo ésta menor si la temperatura es baja y viceversa. Dicho de otra manera a temperaturas altas la pendiente de la superficie es mayor por lo que la velocidad de salida será mayor. Esto es consistente con lo expresado por el experto (reglas de la 7 a la 11).

Algo similar se puede ver en la Imagen 5-12, en la que cuando el oxígeno disuelto es bajo, el aumento del flujo de entrada debe implicar un aumento en la velocidad del motor (reglas de la 3 a la 6).

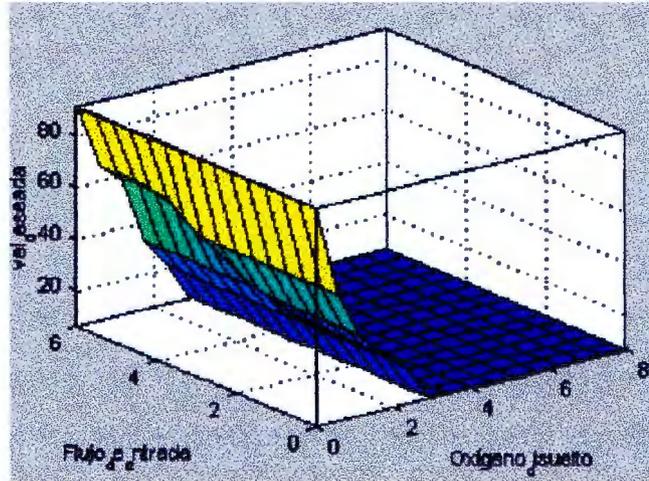


Figura 5-13 O₂, Flujo de entrada y Velocidad deseada

Finalmente en la imagen 5-13 se puede observar que cómo aumenta la velocidad deseada respecto a los cambios del oxígeno disuelto y la velocidad real. Cuando el oxígeno disuelto es muy alto o alto, la velocidad deseada tiende a disminuir. Para oxígenos disueltos normales la velocidad deseada tiende a ser la velocidad real y para oxígenos disueltos bajos o muy bajos la velocidad deseada aumenta gradualmente: Para oxígenos disueltos muy bajos la velocidad deseada aumenta más rápidamente que para oxígenos disueltos bajos.

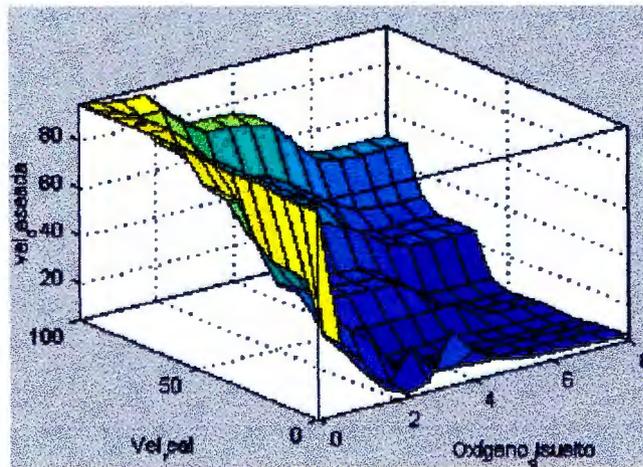


Figura 5-11 O₂, Velocidad real, Velocidad deseada

5.3 Descripción matemática del control difuso

5.3.1 Introducción

El control difuso empleado en este sistema de control se conoce como un mamdani min-max. Es Mamdani por la forma en que se expresan sus reglas:

$$\text{If } X = A \text{ then } Y = C.$$

Es min-max por ser estos los operadores que emplea para realizar la inferencia y ponderación de las reglas. El modelo estándar de control difuso es el SAM (Standard Additive Model) y se presenta en la figura 5.14. A partir de este modelo se puede entender el funcionamiento y la nomenclatura empleada para describir el control difuso de este proyecto.

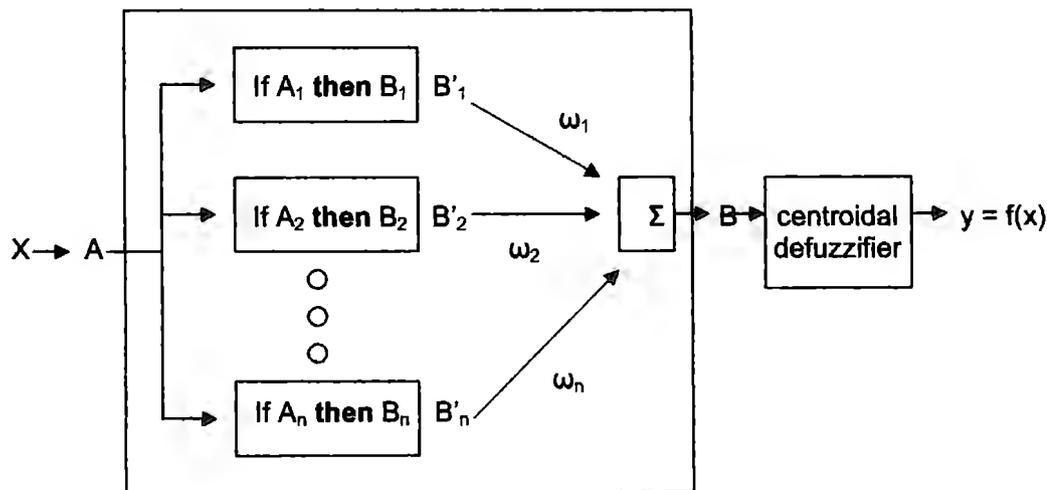


Figura 5-12

Si se emplea un COA (centroid of area) a la salida y además, como es el caso $\omega_1 = \omega_2 = \dots = \omega_n = 1$.

$$f(x) = \frac{\sum_{j=1}^m a_j(x) V_j C_j}{\sum_{j=1}^m a_j(x) V_j}$$

Donde $a_j : R^n \rightarrow [0, 1]$ función de membresía
 V_j : Volumen
 C_j : Centroide

El operador **min** (empleado como **AND** en este caso particular) se define:

Sea un vector de entrada X y una función de membresía a_j

$$X = X_1, X_2, \dots, X_n$$

$$a_j(x) = a_j^1(x_1) \wedge a_j^2(x_2) \wedge \dots \wedge a_j^n(x_n)$$

$$\min[a_j^1(x_1), a_j^2(x_2), \dots, a_j^n(x_n)]$$

El resultado es el menor elemento dentro del corchete.

El operador \max (empleado como **OR** en este caso particular) surge del principio de extensión que se enuncia de la siguiente manera:

$Y = f(x)$ se puede convertir en $B = f(A)$ si se cumple que:

$$A \subset x$$

$$B \subset y$$

Del teorema anterior se tiene:

$$B = \bigcup_{j=1}^m B_j^I = \bigcup_{j=1}^m a_j(x) B_j$$

Sea un conjunto de valores:

$$\max(B_1^I, B_2^I, \dots, B_n^I)$$

El resultado de esta operación es la B'_n de mayor valor.

5.3.2 Descripción de las variables

Variables de entrada $[x_n]$

Oxígeno Disuelto (OD) = x_1

Velocidad real (ω_r) = x_2

Temperatura (T) = x_3

Flujo (Q) = x_4

Variable de Salida

Velocidad (ω_r) = Y

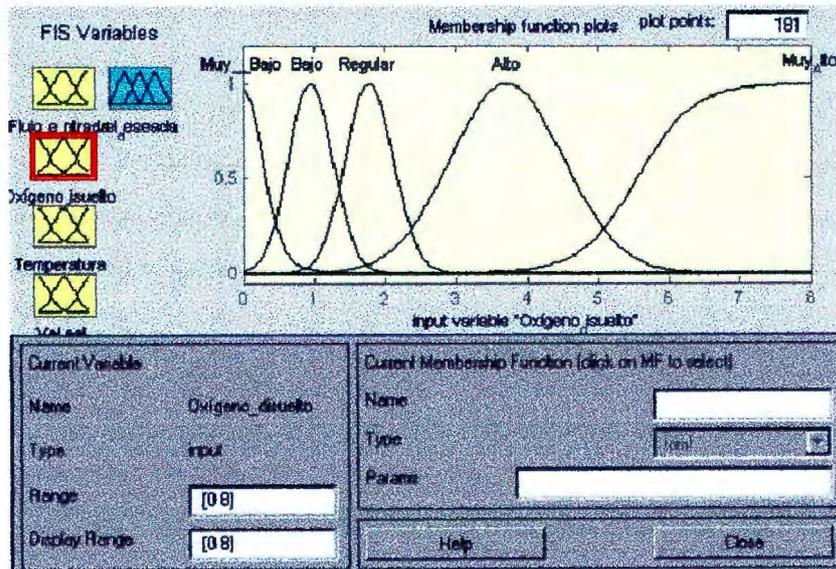
5.3.3 Descripción de las Funciones de membresía

Las funciones de membresía se definen de la siguiente manera:

$$a_j^i(x_i) = S_j^i \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x_i - \bar{x}_i^j}{\sigma_i^j} \right)^2 \right]$$

S_j^i = cte. De escalamiento entre 0 y 1
 \bar{x}_i^j = media
 σ_i^j = desviación estándar

Oxígeno Disuelto [X_1]



Muy Bajo:

$$a_1^1(x_1) = \left\{ \begin{array}{l} S_1^1 \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x_1}{0.3} \right)^2 \right] \rightarrow x > 0 \\ 0 \rightarrow x < 0 \end{array} \right\}$$

Bajo:

$$a_2^1(x_1) = S_1^2 \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x_1 - 1}{0.3}\right)^2\right]$$

Regular:

$$a_3^1(x_1) = S_1^3 \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x_1 - 2}{0.4}\right)^2\right]$$

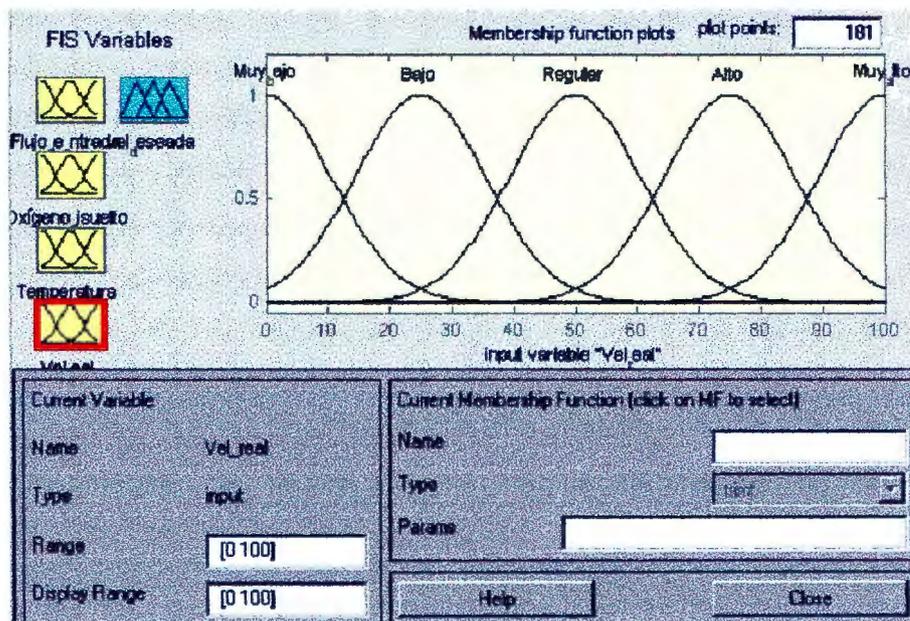
Alto:

$$a_4^1(x_1) = S_1^4 \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x_1 - 3.8}{1}\right)^2\right]$$

Muy Alto:

$$a_5^1(x_1) = \begin{cases} S_1^5 \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x_i - 6.5}{1.3}\right)^2\right] \rightarrow x < 6.5 \\ 1 \rightarrow x > 6.5 \end{cases}$$

Velocidad real (w_r)



Muy Bajo

$$a_1^2(x_2) = \begin{cases} S_2^1 \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x_2}{7}\right)^2\right] \rightarrow x > 0 \\ 0 \rightarrow x < 0 \end{cases}$$

Bajo

$$a_2^2(x_2) = S_2^2 \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x_2 - 25}{7}\right)^2\right]$$

Regular

$$a_3^2(x_2) = S_2^3 \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x_2 - 50}{7}\right)^2\right]$$

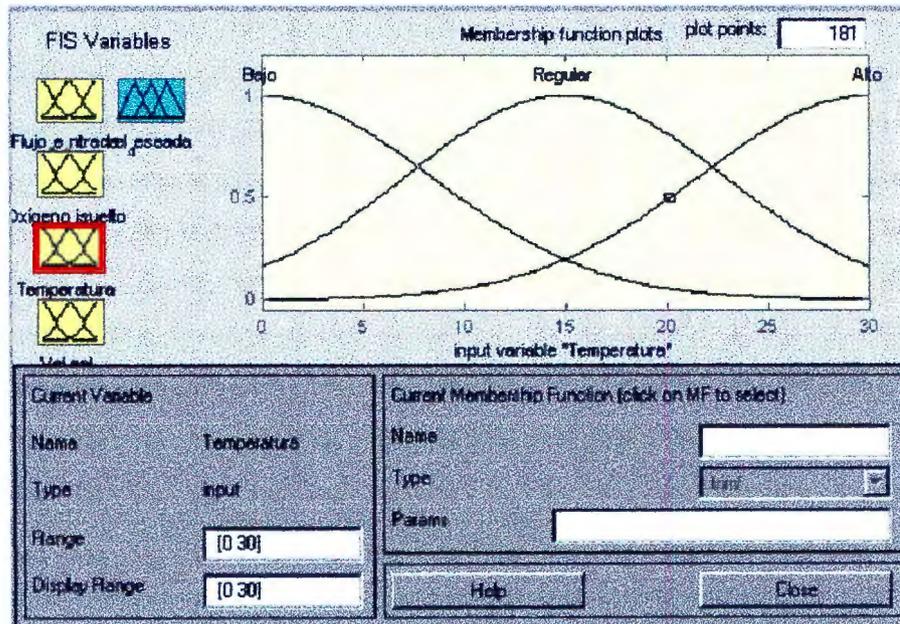
Alto

$$a_4^2(x_2) = S_2^4 \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x_2 - 75}{7}\right)^2\right]$$

Muy Alto

$$a_5^2(x_2) = \begin{cases} S_2^5 \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x_2 - 100}{7}\right)^2\right] \rightarrow x < 100 \\ 1 \rightarrow x > 100 \end{cases}$$

Temperatura (T)



Bajo

$$a_1^3(x_3) = \begin{cases} S_3^1 \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x_3}{10}\right)^2\right] \rightarrow x > 0 \\ 0 \rightarrow x < 0 \end{cases}$$

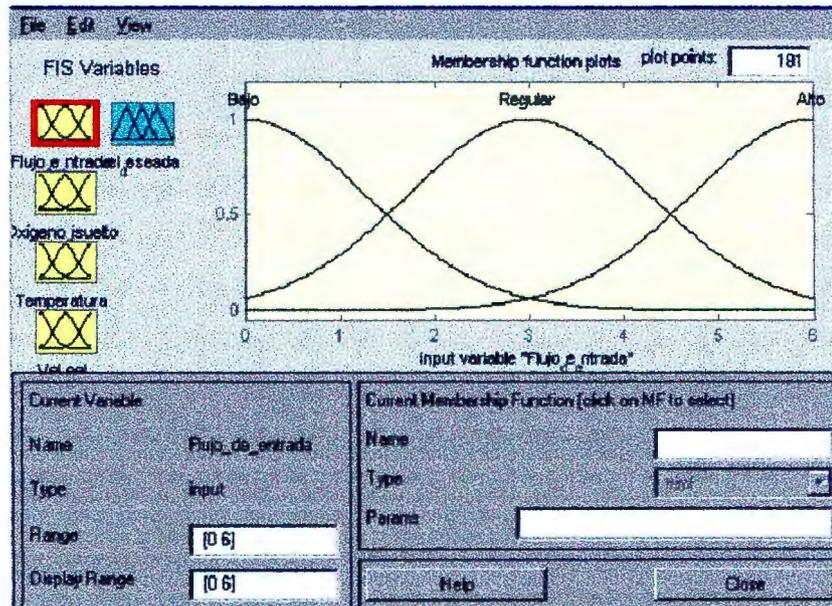
Regular

$$a_2^3(x_3) = S_2^2 \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x_3 - 15}{13}\right)^2\right]$$

Alto

$$a_3^3(x_3) = \begin{cases} S_3^3 \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x_3 - 30}{10}\right)^2\right] \rightarrow x < 30 \\ 1 \rightarrow x > 30 \end{cases}$$

Flujo (Q)



Bajo

$$a_1^4(x_4) = \begin{cases} S_4^1 \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x_4}{1.5}\right)^2\right] \rightarrow x > 0 \\ 0 \rightarrow x < 0 \end{cases}$$

Regular

$$a_2^4(x_4) = S_4^2 \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x_4 - 3}{1.5}\right)^2\right]$$

Alto

$$a_3^4(x_4) = \begin{cases} S_4^3 \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x_4 - 6}{1.5}\right)^2\right] \rightarrow x < 6 \\ 1 \rightarrow x > 6 \end{cases}$$

5.3.4 Descripción de las reglas

Hay que recordar que con referencia en el modelo SAM, en este caso:

$$\omega_1 = \omega_2 = \dots = \omega_n = 1.$$

1. If	OD = MB	then	Wd = MA
2. If	(T = A) ^ (OD = B) ^ (Q = A)	then	Wd = MA
3. If	(OD = B) ^ (Q = A) ^ (Wa = MB)	then	Wd = B
4. If	(OD = B) ^ (Q = A) ^ (Wa = B)	then	Wd = R
5. If	(OD = B) ^ (Q = A) ^ (Wa = R)	then	Wd = A
6. If	(OD = B) ^ (Q = A) ^ (Wa = A)	then	Wd = MA
7. If	(T = A) ^ (OD = B) ^ (Wa = MB)	then	Wd = B
8. If	(T = A) ^ (OD = B) ^ (Wa = B)	then	Wd = R
9. If	(T = A) ^ (OD = B) ^ (Wa = R)	then	Wd = A
10. If	(T = A) ^ (OD = B) ^ (Wa = A)	then	Wd = MA
11. If	(T = B) ^ (OD = B) ^ (Q = B)	then	Wd = A
12. If	(OD = R) ^ (Wa = MB)	then	Wd = MB
13. If	(OD = R) ^ (Wa = B)	then	Wd = B
14. If	(OD = R) ^ (Wa = R)	then	Wd = R
15. If	(OD = R) ^ (Wa = A)	then	Wd = A
16. If	(OD = R) ^ (Wa = MA)	then	Wd = MA
17. If	(OD = A) ^ (Wa = B)	then	Wd = MB
18. If	(OD = A) ^ (Wa = R)	then	Wd = B
19. If	(OD = A) ^ (Wa = A)	then	Wd = R
20. If	(OD = A) ^ (Wa = MA)	then	Wd = A
21. If	(OD = MA) ^ (Wa = MA)	then	Wd = R
22. If	(OD = MA) ^ (Wa = A)	then	Wd = B
23. If	(OD = MA) ^ (Wa = R)	then	Wd = MB
24. If	(OD = MA) ^ (Wa = B)	then	Wd = MB

5.4 Descripción de la inferencia y defuzificación

Para un MAMDANI MAX-MIN, la salida se calcula con tres principales pasos:

Primero se realiza la inferencia en cada regla por medio del operador MIN. Esto da como resultado el valor difuso más pequeño entre las variables de cada regla.

$$\min[a_j^1(x_1), a_j^2(x_2), \dots, a_j^n(x_n)]$$

En segundo lugar se emplea un operador MAX entre las reglas. Después de aplicar este operador se tiene como resultado el mayor de entre las reglas, después de haber aplicado el MIN a cada regla.

$$B = \max[\min[a_j^1(x_1), a_j^2(x_2), \dots, a_j^n(x_n)]]$$

En tercer lugar se calcula el centroide del área del valor obtenido.

f(x) = Centroide (B)

6 Integración del sistema: control del aereador

6.1 Estructura del módulo aereador

El aereador se compone de dos partes: un motor que hace girar al soplador y el soplador que es encargado de inyectar aire al biorreactor. El aereador se muestra en la figura 6-1.



Figura 6-1. Aereador

Para poder desarrollar un sistema de control se deben conocer los elementos que conforman el aereador.

6.1.1 El soplador

Se trabaja con un soplador Sutorbilt de las Series California F vertical (Figura 6-2). El soplador actúa como carga del motor que se pretende controlar.



Figura 6-2

Algunas de las ventajas que interesan de este elemento son:

- Esta diseñado para trabajar bajo condiciones de presión variable.
- Por cada revolución de las propelas se puede cuantificar la cantidad de aire que se inyecta.
- Si opera a presión y velocidad constante; el soplador inyecta una cantidad constante de aire.
- Si se incrementa la velocidad del soplador en condiciones de presión constante, incrementa el volumen de aire inyectado en una cantidad igual al producto del desplazamiento del soplador y el número de revoluciones.

El soplador Sutorbilt tiene dos figuras con 8 propelas cada una que giran en sentidos opuestos. Al pasar cada lóbulo de la propela por la entrada del soplador, inyecta una cantidad de aire igual a un cuarto del desplazamiento del soplador. Esta inyección de aire ocurre cuatro veces por revolución, impulsando el aire a la salida del soplador. La posición de las propelas se controla de manera que se pueda mantener la temporización, que es muy importante para la eficiencia volumétrica del soplador rotacional positivo.

La estructura interna del soplador (Figura 6-3) permite variar su velocidad sin causar daños en éste.

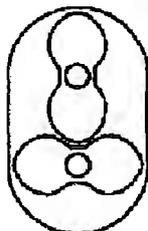
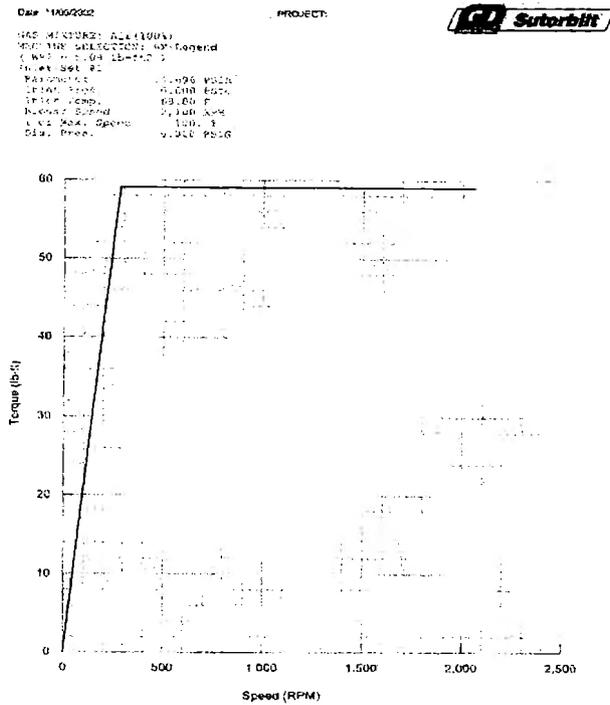
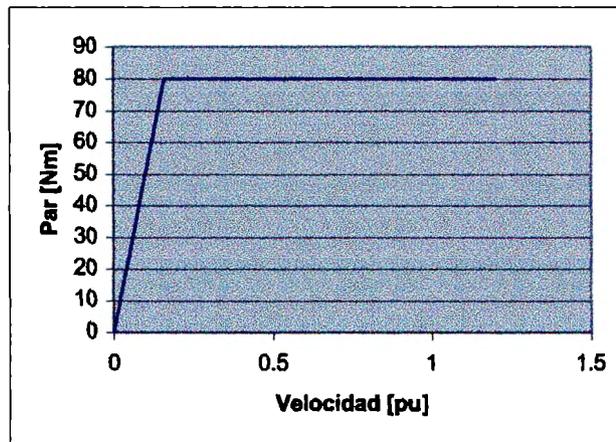


Figura 6-3. Estructura interna del soplador

Una característica importante que se tiene que mencionar es la característica de par contra velocidad. La curva proporcionada por el fabricante se muestra en la Figura 6-4 (a). Para fines de simulación, las unidades de la curva se pasarán a pu para la velocidad dividiendo entre 1773rpm y a Nm para el par multiplicando por 1.356 (Figura 6-5 (b)). Como podemos observar en la curva la relación entre par y velocidad es constante.



(a)



(b)

Figura 6-4 Característica de par contra velocidad del soplador

6.1.2 El motor



Figura 6-5

El motor que opera en la planta es un motor de jaula de ardilla marca IEM (Figura 6-5) con las siguientes características:

Tensión: 220 V
Corriente: 66 A
Número de fases: 3
Número de polos: 4
R.P.M. (al 100% de carga): 1773
Factor de Servicio: 1.00
Conexión de los devanados: Delta

Este motor es bidireccional e idóneo para trabajar con cargas como sopladores. La característica de par contra velocidad se muestra en un anexo.

Para poder realizar una simulación de éste se necesitan conocer los parámetros del motor:

Slip nom.= 1.14 %
Par (nom.)= 73.79 lbs-pie.

$Wk^2(\text{Motor})= 4.21 \text{ lbs-pie}^2$

$R_s= 0.153$

$R_r= 0.0098$

$X_{ls}=0.0536$

$X_{lr}=0.0955$

$X_m= 2.023$

Const. de tiempo(cort. circ.)= 0.0437

Se utiliza un modelo dinámico de motor de inducción en marco estacionario D-Q (Figura 6-6) para poder simular el sistema. Se requiere este modelo para poder analizar la respuesta dinámica del motor de inducción.

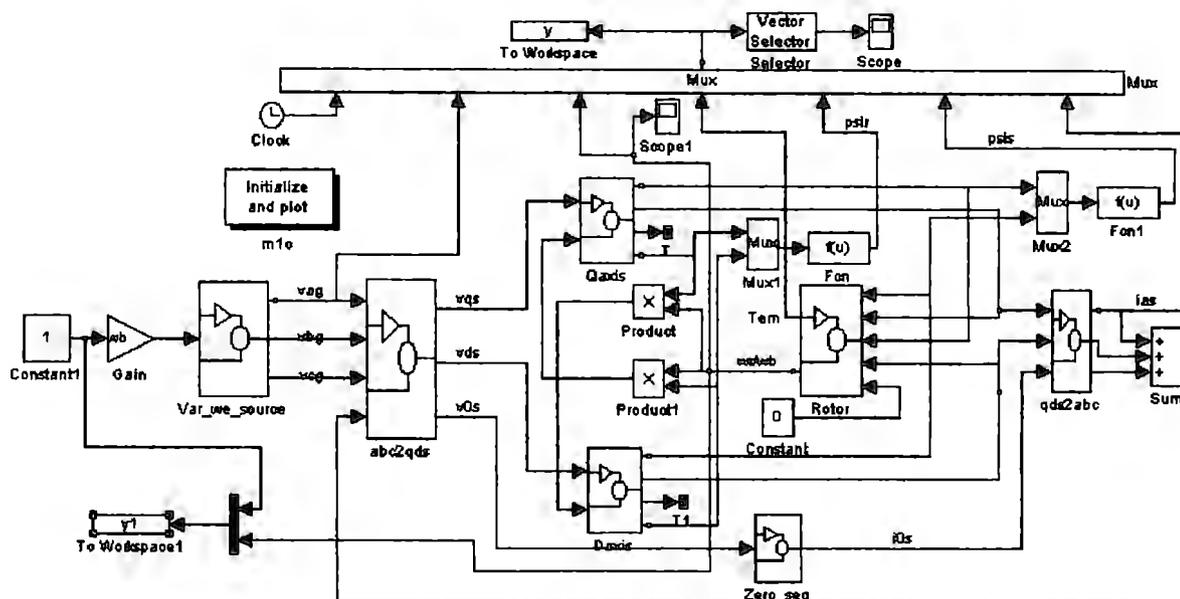


Figura 6-6. Modelo dinámico del motor de inducción

Para poder observar la respuesta del motor, probamos el modelo con condiciones nominales (377 rad/s que equivale a 60Hz). La respuesta obtenida se muestra en la Figura 6-7.

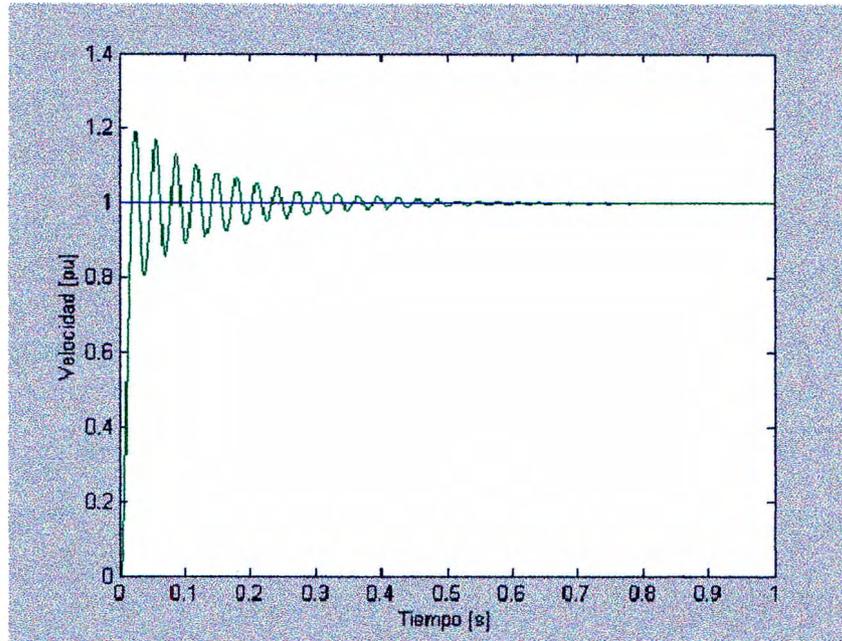


Figura 6-7. repuesta del modelo bajo condiciones nominales

6.2 Control V/F para el motor de inducción

6.2.1 Control escalar V/F

El control voltaje frecuencia se deriva del circuito equivalente del motor de inducción (Figura 6-8) ya que es una estrategia de control para estado permanente.

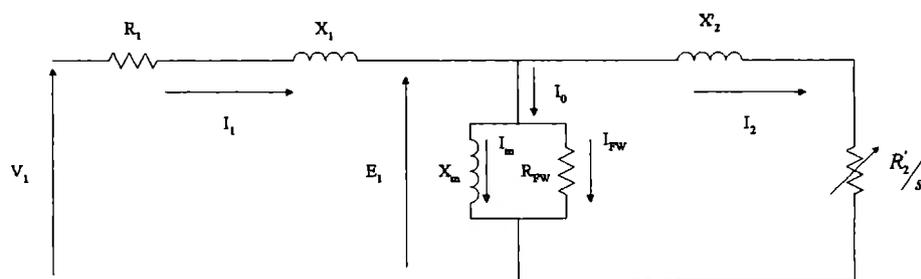


Figura 6-8. Circuito equivalente por fase del motor de inducción

De aquí se deducen las ecuaciones siguientes:

Considerando que el air gap es representado por la resistencia variable R_2/s , podemos deducir una ecuación para la corriente I_2 :

$$I_2 = \frac{E_1}{\sqrt{X_2^2 \times (R_2/s)^2}} \quad (6.1)$$

Sabemos que:

$$E1 = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} \times \Phi \text{ max} \quad (6.2)$$

De la ecuación de potencia deducimos:

$$Tm = \frac{Pag}{\omega s} = \frac{3 \times I2^2 \times R2/s}{\omega s} \quad (6.3)$$

El factor de tres se debe a que debemos considerar las tres fases del circuito. Reemplazando (3) en (1) y (1) en (3) obtenemos la siguiente ecuación:

$$Tm = \frac{\frac{3 \times (2\pi f)^2}{2} \times \frac{\Phi \text{ max}^2}{X2^2 + (R2/s)^2} \times \frac{R2}{s}}{\omega s} \quad (6.4)$$

Para simplificar la expresión del par falta reemplazar ωs por su valor es decir $2\pi f$. Así obtenemos lo siguiente:

$$Tm = 3\pi f \times \frac{\Phi \text{ max}^2}{X2^2 + (R2/s)^2} \times \frac{R2}{s} \quad (6.5)$$

De la ecuación (4) podemos observar que el par máximo desarrollado por el motor es proporcional al cuadrado del flujo. Es decir:

$$Tm = K\Phi \text{ max}^2 \quad (6.6)$$

En la ecuación (2), por lo tanto podemos despejar $E1/f$ y considerar que esta relación es proporcional al flujo (que vimos que influye directamente en el par):

$$\frac{E1}{f} = K\Phi \text{ max} \quad (6.7)$$

Del circuito equivalente mostrado anteriormente consideramos la primer malla:

$$V_1 = I_1(R_1 + jX_1) + E_1 \quad (6.8)$$

Para frecuencias altas (mayores a 1Hz) podemos despreciar la caída de voltaje generada por la resistencia y el inductor por lo que tenemos:

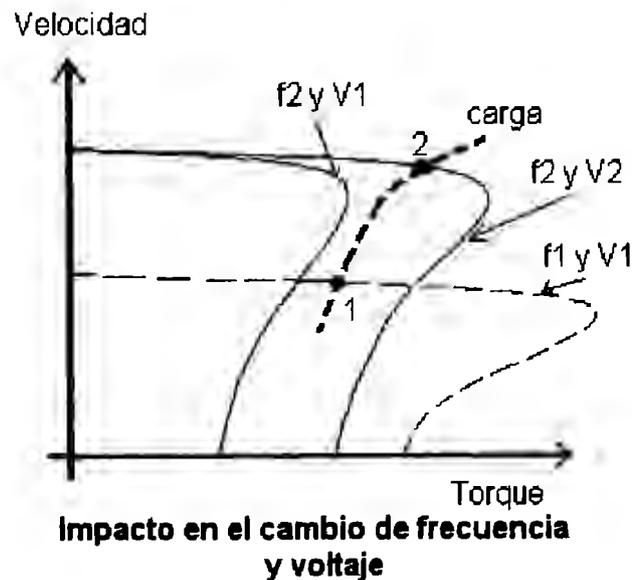
$$V \approx E1 \quad (6.9)$$

El control por V/f presenta diversas ventajas:

- Para frecuencias mayores a 1Hz es un control eficiente. (El motor de la planta siempre trabaja por encima de esta frecuencia).
- Esta técnica de control es bastante confiable en lazo abierto si se conoce la característica mecánica de la carga.
- El control es continuo, no se escalonan valores para en rangos de velocidades del motor, y esto lo hace más preciso.
- Este control se puede implementar sin necesidad de modificar el número de polos del motor.

La técnica de control de motores de inducción se fundamenta en dos características importantes(Figura 6-9):

- Cuando aumenta la frecuencia en el voltaje de entrada, aumenta la velocidad y reduce el par máximo del motor.
- El incremento del voltaje produce un incremento en el par máximo del motor.



A partir de estas dos características se puede diseñar un control para el cual la velocidad aumente mientras el par permanece constante (Figura 6-10).

Figura 6-9. Efecto de voltaje y corriente en el motor de inducción

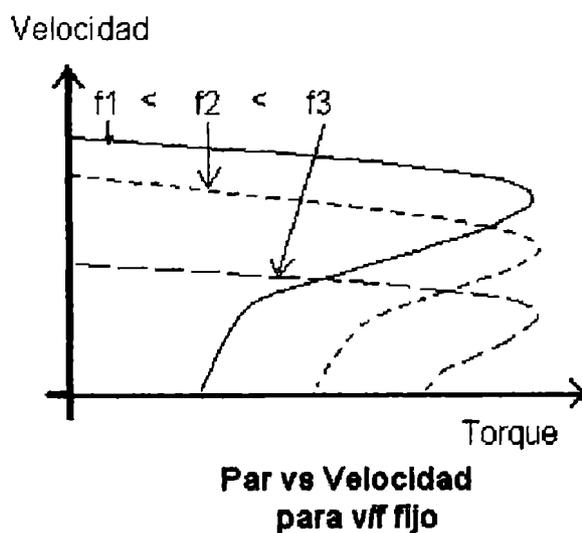


Figura 6-10 Conservación de par máximo constante a velocidad variable

Cuando un motor de inducción se controla cambiando el voltaje, ya sea por técnicas de control de voltaje o de v/f, hay que tener siempre la precaución de no incrementar la magnitud del voltaje más que los valores nominales, que en el caso del motor IEM es de 220 V. Voltajes muy grandes pueden dañar daños instantáneos al aislante del devanado

del motor, causando cortos y fallas internas. Se recomienda que el voltaje siempre esté por debajo del 110% del valor especificado por el fabricante. Para el motor IEM de la PTAR del ITESM CCM, el voltaje no debe sobrepasar los 240 V.

6.2.2 PWM senoidal

Como se vio anteriormente, para realizar un control escalar V/f se tiene que variar la frecuencia de la línea. Se utiliza un inversor (convertidor de DC a AC).

Para darle al dispositivo los pulsos de disparo, escogemos utilizar una técnica de PWM senoidal.

El funcionamiento básico de este tipo de modulación consta primeramente en la generación de una carrier fija, típicamente una señal diente de sierra, y una señal de referencia (Figura 6-11). Al realizar la comparación entre la carrier y la referencia se generan pulsos los cuales dispararán los semiconductores del inversor. La resultante a la salida será una señal compuerta de pulsos pero cuya fundamental será una senoidal de frecuencia igual a la señal de referencia. Lo que se logra a través de esto es sintetizar una señal senoidal con una serie de pulsos.

Para simular este elemento se desarrolla el esquema de modulación PWM (Figura 6-11) en Matlab y se simula con el modelo de motor de inducción de Powerlib Matlab.

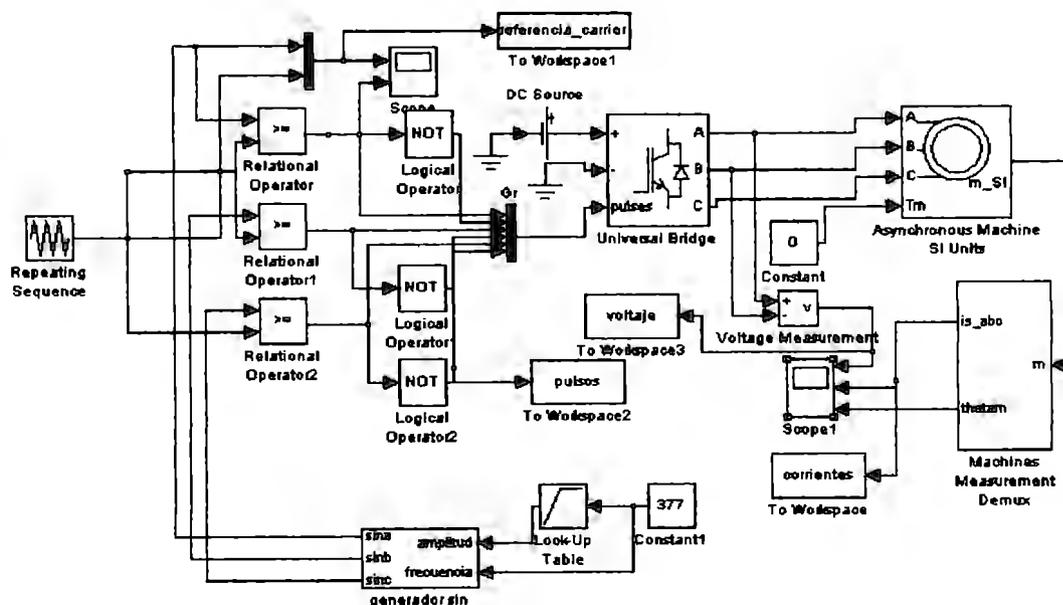


Figura 6-11 PWM senoidal

Las pruebas se realizan con una señal de entrada de 377 rad/s que equivale a la frecuencia nominal del motor (60Hz).

Lo que podemos observar es que con una señal de referencia de 60 Hz, el voltaje de línea tiene una componente periódica de misma frecuencia que la referencia, y para el motor obtenemos las corrientes desfasadas 120 grados a la misma frecuencia.

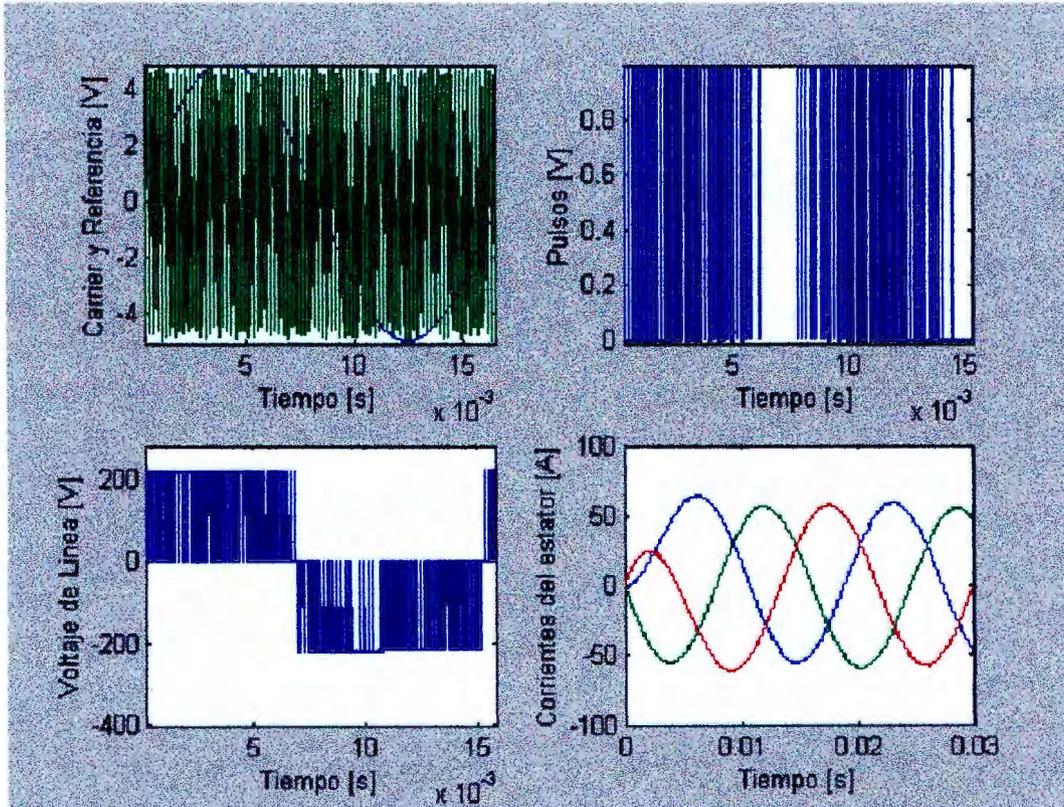


Figura 6-12 generación de PWM y resultados

Variando en la frecuencia de la senoidal que es la señal de referencia, variaremos la frecuencia de los pulsos y variando su amplitud variaremos el ancho de los pulsos lo cual aumentará o disminuirá el voltaje y la frecuencia de la señal de salida del convertidor estático de frecuencia.

6.2.3 Controlador PI difuso

Se propone un lazo cerrado a través de un controlador difuso tipo PI que se muestra en la Figura 6-13.

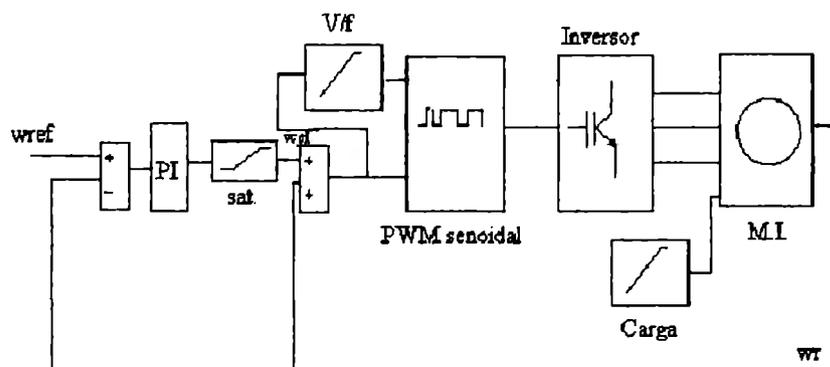


Figura 6-13 Control V/F en lazo cerrado

El control difuso PI del motor es del tipo Takagi-Sugeno, y empleamos un modelo propuesto por Passino. Este modelo consiste en introducir algunas variables dentro del polinomio de ponderación para el valor difuso. En el capítulo 4 se explicó la estructura lingüística de las reglas. Para el control tipo Sugeno la estructura cambia y es de la forma:

Si A entonces $f(x)$

La regla dice que si se cumple una condición, entonces se debe actuar conforme a un polinomio $f(x)$ de la forma:

$$f(x) = k_1X_1 + k_2X_2 + \dots + k_nX_n$$

Donde las K son ganancias que se ajustan de manera experimental y X son variables de entrada que se consideran para la salida.

Para este controlador PI, se tienen como variables de entrada el error y la integral del error. En nuestro esquema sólo se fuzifica la entrada del error. La variable de integral del error se considera dentro de los polinomios.

Las etiquetas empleadas para fuzificar el error son positivo, cero y negativo. La salida difusa de la etiqueta positivo se pondera por un polinomio de la forma:

$$u = K_1e(t) + K_2 \int e(t) + K_3$$

Y así se tiene un polinomio para cada salida de las tres etiquetas, positivo, cero y negativo. La salida del control se calcula como la suma ponderada de la salida del producto de la fusificación por el polinomio entre la suma de la fusificación.

Después de ajustar las ganancias de los polinomios, se validó a través de simulación (Figura 6-13) el controlador difuso para el motor el cual puede operar en varios puntos de operación.

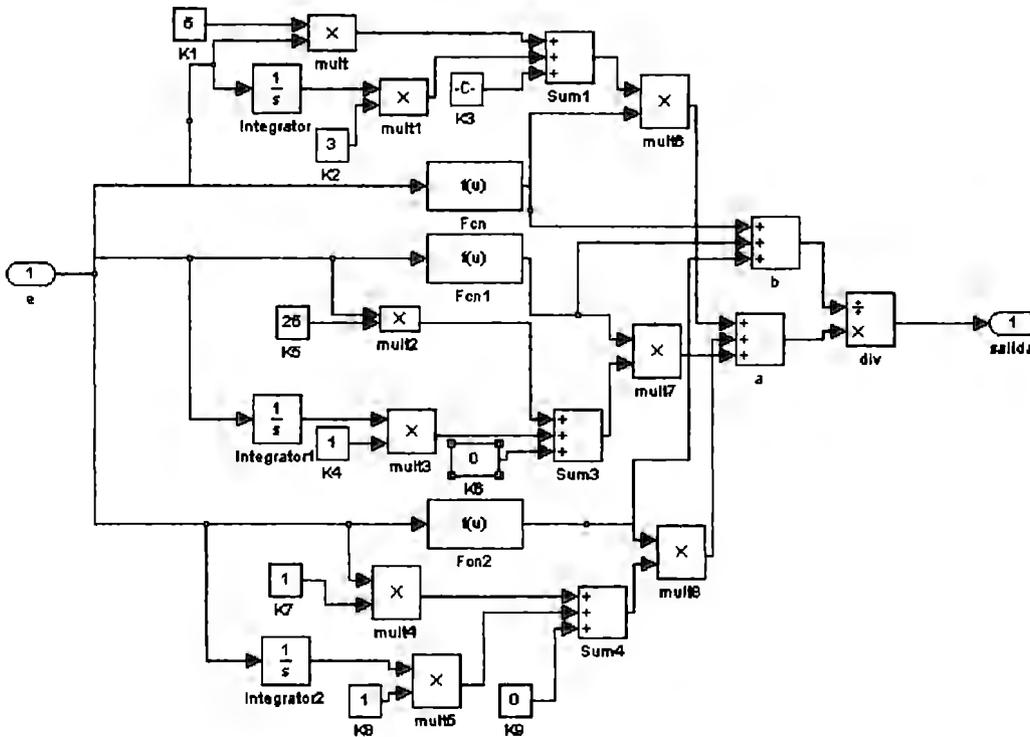


Figura 6-14 Controlador PI difuso

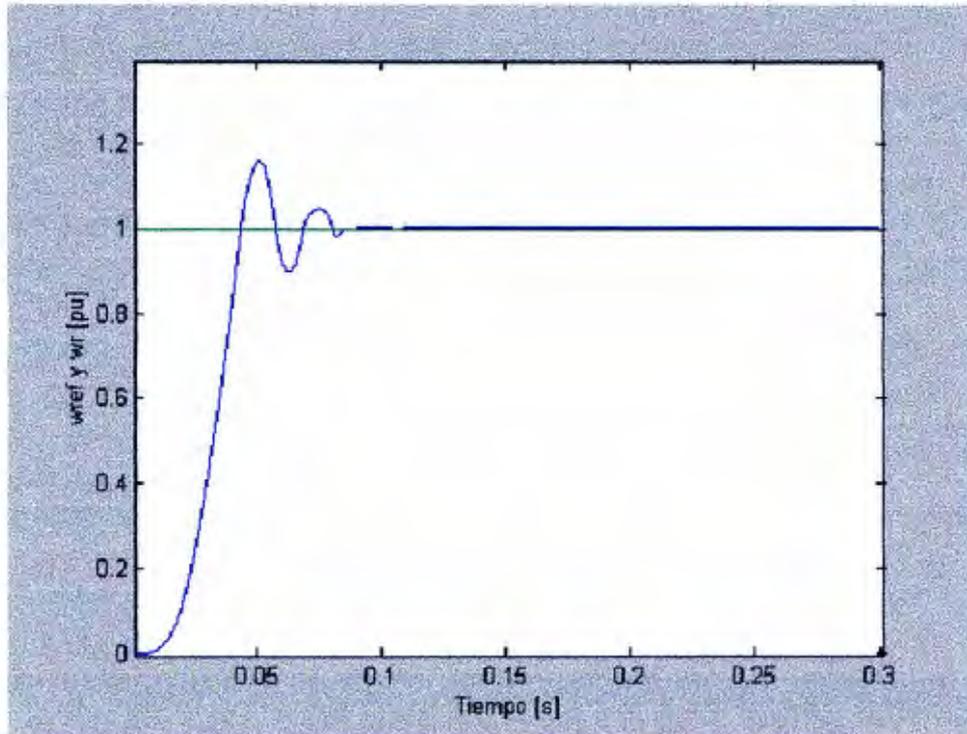


Figura 6-16 Respuesta a velocidad nominal

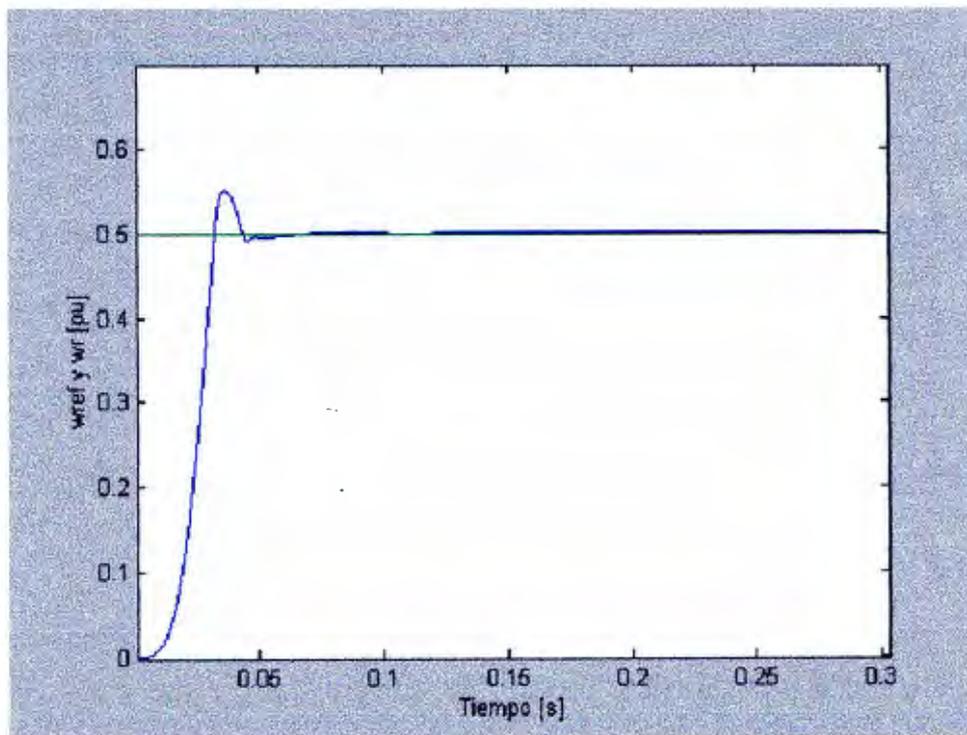


Figura 6-17 Respuesta del motor a 0.5pu

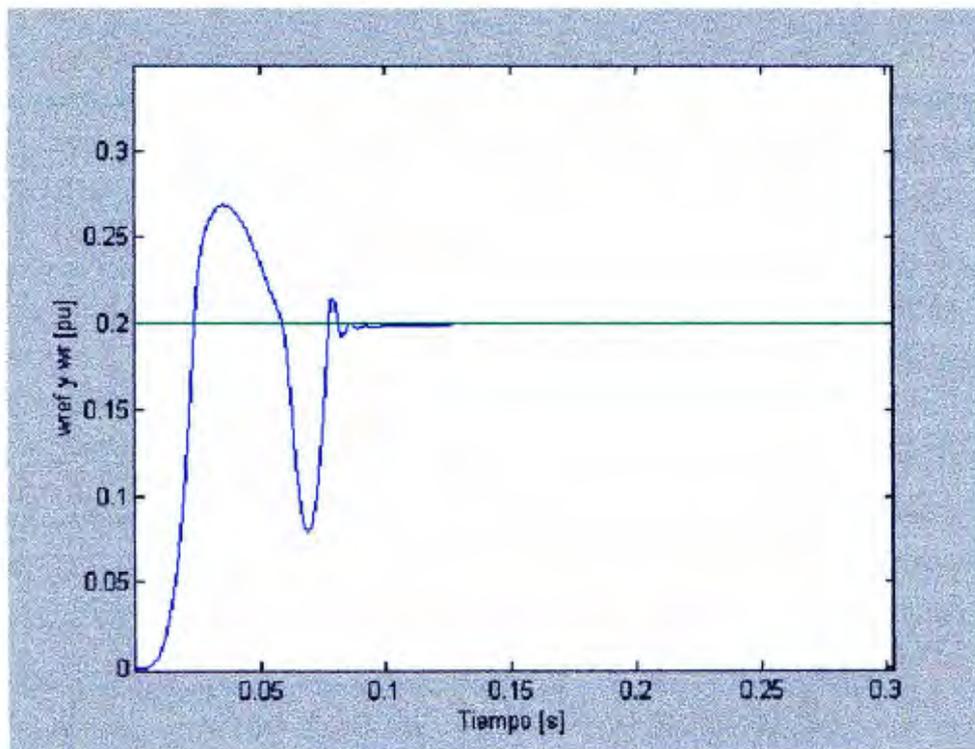


Figura 6-18 respuesta del motor a 0.2pu

En éste último caso (Figura 6-18), la respuesta del motor no es tan buena. Esto se debe problemas en bajas velocidades del control V/F. A bajas frecuencias de operación, no se valida la ecuación 6.9. Para bajas velocidades se tiene que compensar el voltaje y esto repercute en la respuesta.

6.3.2 Simulación del sistema completo

Para simular el sistema en conjunto (Figura 6-19), se utilizan una serie de datos reales proporcionados por la PTAR del ITESM. La relación V/f se determina con la carga del motor en este caso el soplador. Puesto que este actúa como un ventilador, la relación voltaje frecuencia es lineal.

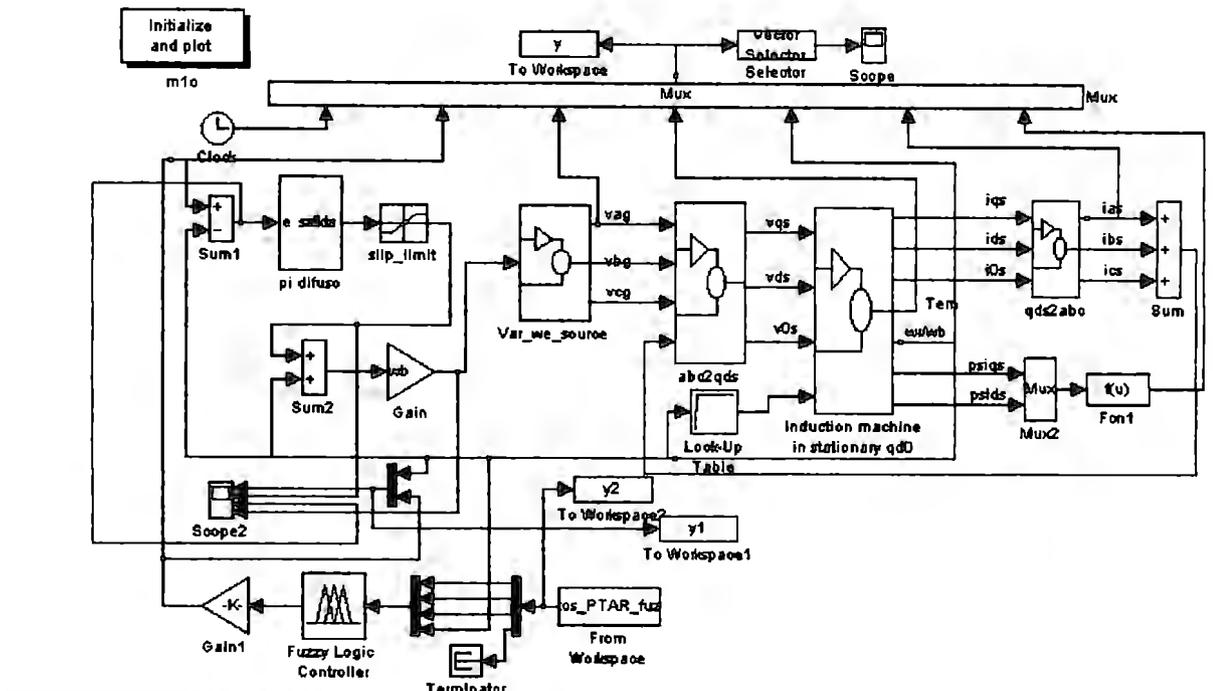


Figura 6-19 Esquema del control integrado

Los datos de entrada oxígeno disuelto, flujo y temperatura (Figuras 6-20 a 22). Los datos fueron tomados periódicamente cada 6 horas, la tabla capturada consta de 150 datos. Para fines de simulación, se aceleró el tiempo de muestreo en Matlab a 0.1s para poder observar variaciones en el sistema. A la salida obtenemos una referencia de velocidad para el motor (Figura 6-23). Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 6-24. Como podemos ver la velocidad del motor sigue la referencia. En estas condiciones el motor opera a 30% de su velocidad nominal lo que se traduciría en un ahorro de energía y menor desgaste del motor. Pero tenemos que recordar que, como no se cuenta con el comportamiento del oxígeno en el biorreactor, puede que en realidad el motor trabaje a una velocidad promedio un poco en la realidad.

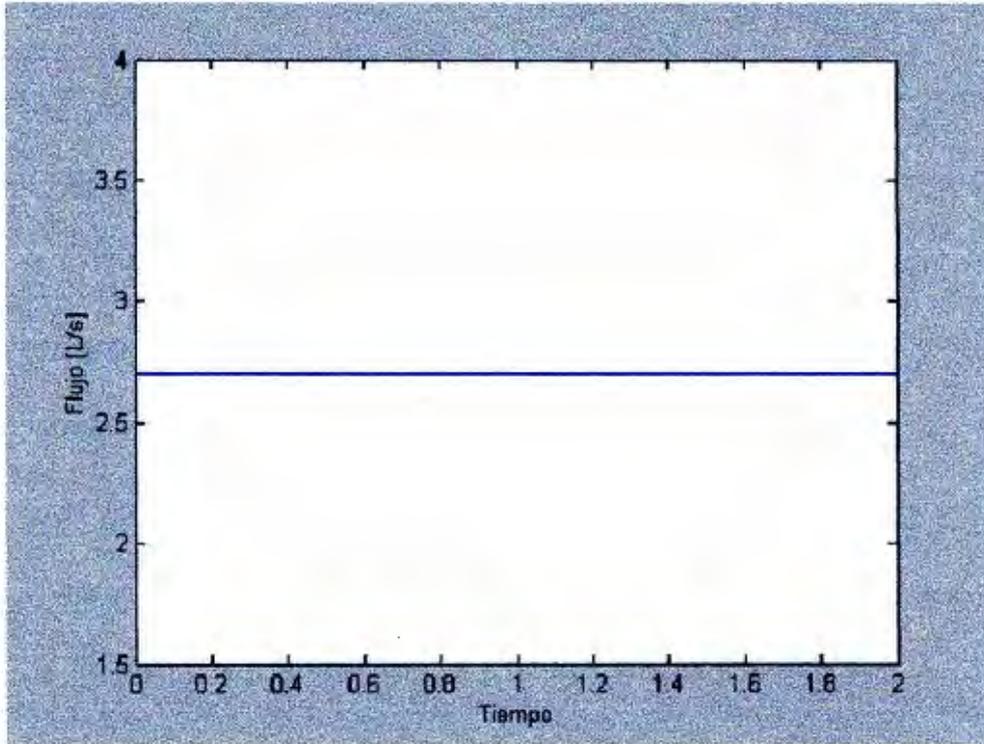


Figura 6-20 Flujo

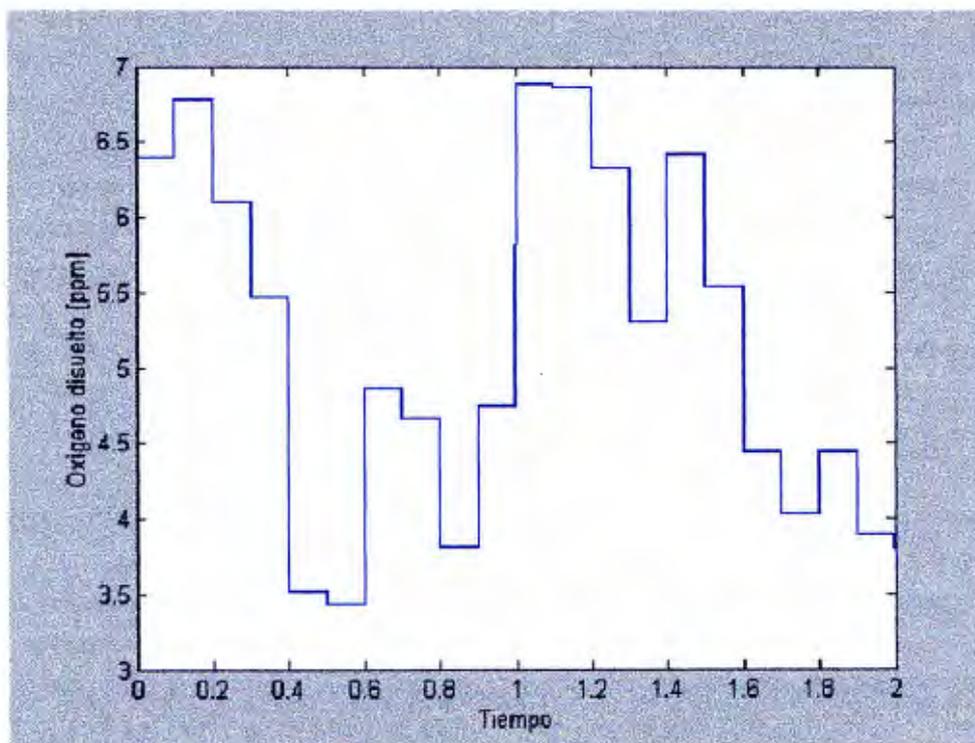


Figura 6-21 Oxígeno disuelto

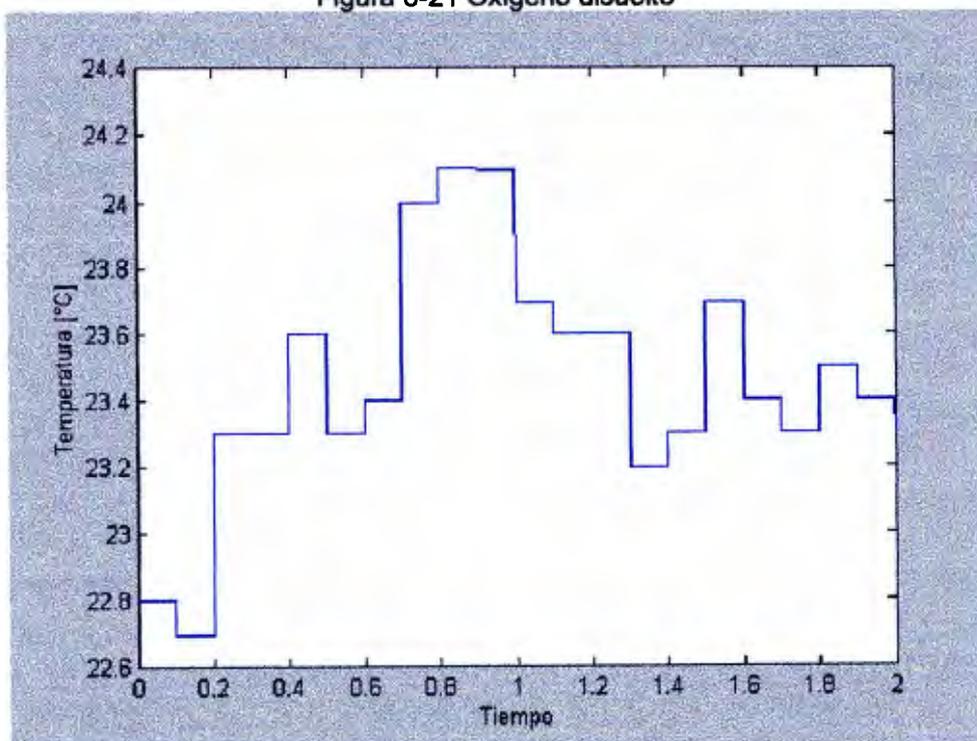


Figura 6-22 Temperatura

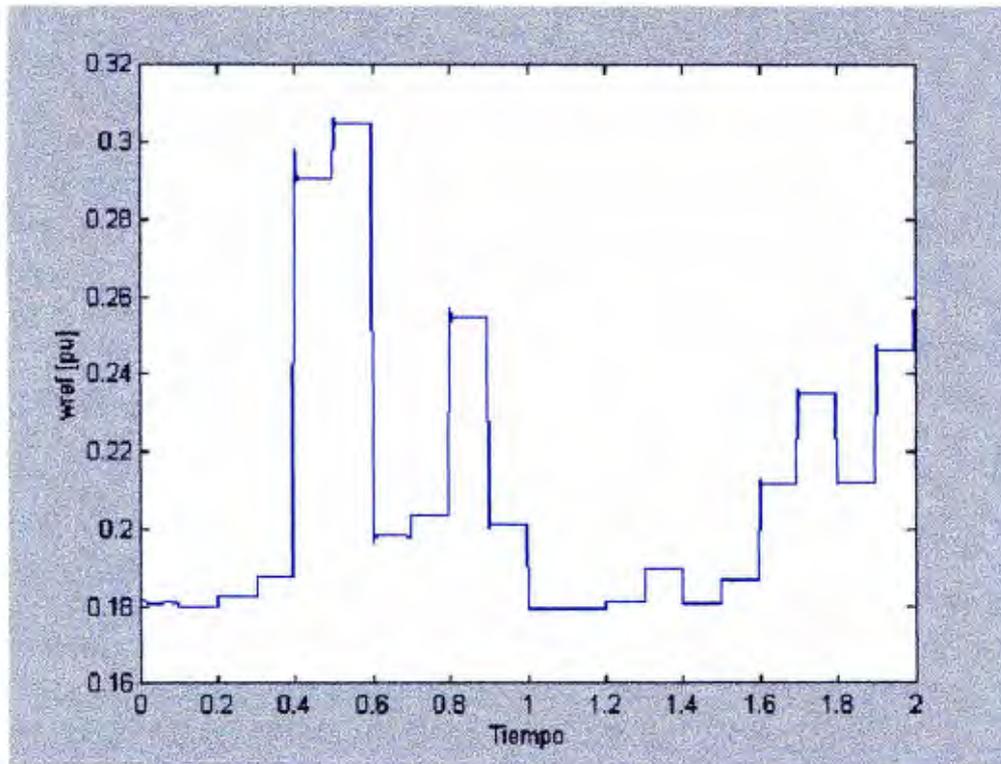


Figura 6-23 Salida del controlador de la planta: velocidad de referencia

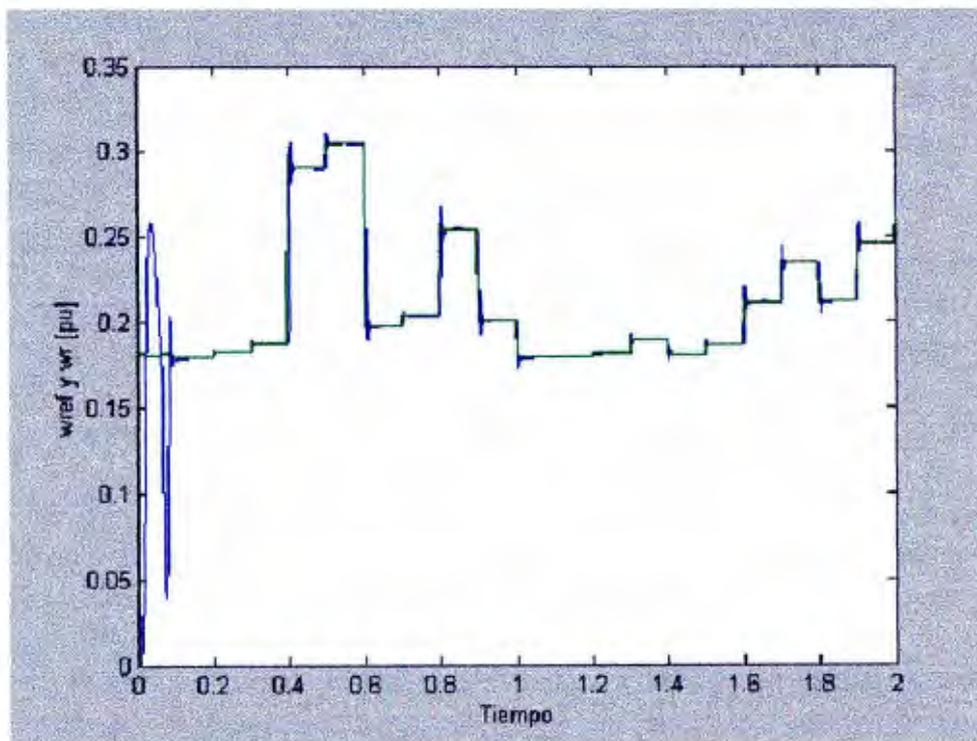


Figura 6-24 Respuesta del motor a la referencia

7 Sensor

7.1 Generalidades sobre el oxímetro

7.1.1 Descripción

La función principal que tiene un oxímetro es medir tanto la concentración de oxígeno disuelto (O.D.) como el valor de temperatura presente en agua normal o en agua residual.

Un oxímetro, en su forma más general, consta de un sensor (sonda de oxígeno) y de un circuito eléctrico encargado de amplificar una señal proveniente del sensor. Cuando se aplica un voltaje de polarización en las terminales del sensor, oxígeno que previamente ha atravesado una membrana situada en el extremo de éste, reacciona en el cátodo, causando así, que una corriente fluya. Más tarde, ésta corriente será amplificada. El sensor responde a la presión parcial de oxígeno en la muestra.

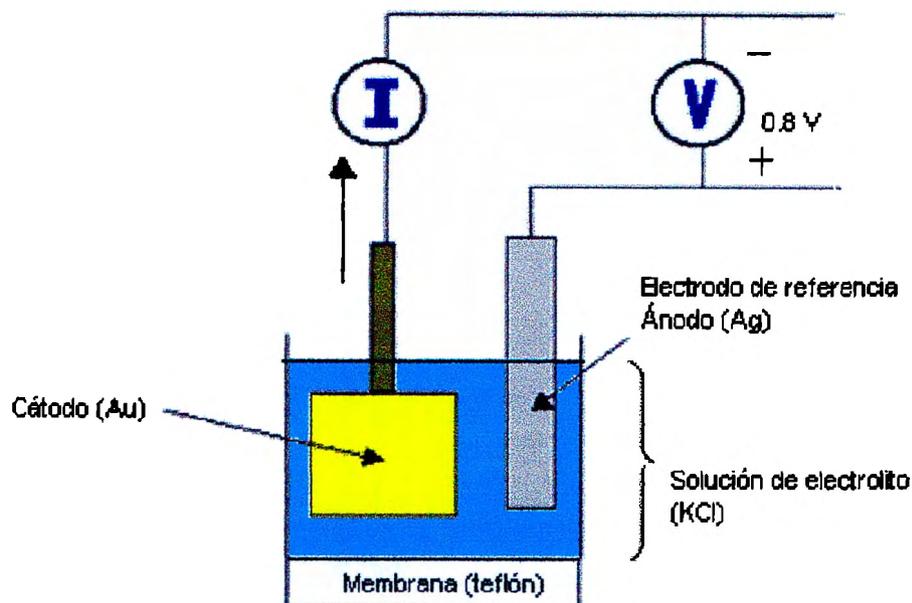


Figura 7-1 . Sensor de oxígeno disuelto (Celda electrolítica)

En operación, el sensor se deposita en una muestra de agua. El oxígeno presente en ésta se propaga a través de una membrana que separa a la muestra de la celda polarográfica interna de la sonda de oxígeno. La membrana permite el paso de oxígeno a una velocidad proporcional a la diferencia de presión en ella. El oxígeno propagado es reducido electroquímicamente (consumido) en la celda, produciendo así, un flujo de corriente proporcional a la presión parcial de oxígeno en la muestra. Como el oxígeno es consumido rápidamente en el cátodo, se puede asumir que la presión parcial de oxígeno en la membrana es cero. Por esto, la fuerza causante que hace que el oxígeno se difunda por la membrana es proporcional a la presión absoluta de oxígeno fuera de la membrana. Si la presión de oxígeno se incrementa, más oxígeno fluye a través de la membrana y más corriente entrega el sensor. Una presión más baja resulta en una menor corriente.

7.1.2 Variables a medir

Oxígeno disuelto (O.D.). Corresponde al valor de la saturación de oxígeno llevado a cabo por los microorganismos en el agua. El oxígeno disuelto se indica en mg/l (1 mg/l \approx 1 ppm)

Se puede entender también como oxígeno disuelto, a la cantidad de oxígeno libre disuelto en agua para la disposición de organismos acuáticos aerobios.

En una PTAR, para mantener viva la población aerobia, se debe introducir oxígeno al tanque de lodos. La variación temporal de la demanda de oxígeno en el sistema, hace

que también se tenga una variación en la cantidad de oxígeno alimentado para mantener así éste último en sus valores deseados.

La actividad bacteriana se ve modificada dependiendo de la temperatura. Así en climas calurosos, la actividad de los microorganismos aumenta, por lo que se requiere mayor cantidad de oxígeno a suministrar.

Temperatura. Corresponde al valor de la temperatura del agua en donde se realiza la oxidación por medio de los microorganismos presentes. Se indica en °C desde -5°C a +45°C.

7.2 Sonda de oxígeno.

Una vez atravesada la membrana, el oxígeno es reducido a un potencial aplicado de -0.8 V referenciado con respecto al electrodo plateado. La reducción de corriente en el cátodo es directamente proporcional a la presión parcial de oxígeno en el líquido (expresado como % de aire en saturación) que es también proporcional a la concentración de oxígeno disuelto (en mg/L) a una temperatura en particular. Así pues, una misma presión parcial de oxígeno (% aire en saturación) en líquido, da como resultado diferentes concentraciones de oxígeno disuelto (mg/L) a distintas temperaturas por la diferencia en solubilidad del oxígeno a diferentes temperaturas.

Sin embargo, el flujo de oxígeno hacia dentro del sensor es un proceso afectado por la temperatura. Esto resultaría en grandes cambios de la señal de salida del amplificador si no se contara de una compensación llevada a cabo por un termistor (built-in-thermistor). El termistor consiste de un semiconductor con coeficiente de temperatura negativo. Así, mientras la temperatura aumenta, la resistencia del termistor disminuye, cambiando la ganancia del amplificador.

Las reacciones que se llevan a cabo dentro de la sonda, son las siguientes:

Reacción en el cátodo: $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightleftharpoons 4OH^-$

Reacción en el ánodo: $Ag + Cl^- \rightleftharpoons AgCl$

Reacción total: $4Ag + O_2 + 2 H_2O + 4 Cl^- \rightarrow 4 AgCl + 4 OH^-$

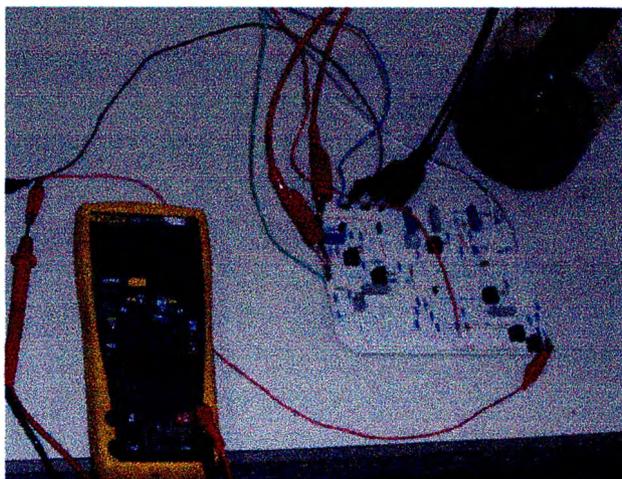


Figura 7-2 Sonda de oxígeno en la parte superior derecha

La sonda es de tipo voltámetrica (polarográfica) marca YSI modelo 5730.

7.2.1 Membrana

Una membrana de oxígeno permeable cubre una celda electrolítica consistiendo ésta en cátodo y ánodo. Ésta membrana actúa como una barrera de difusión y de aislamiento previniendo al cátodo por impurezas del ambiente que lo rodea. El cátodo es de oro, y el ánodo es el electrodo de plata que completa la celda electrolítica y funciona como el electrodo de referencia.

Están hechas de teflón y el propósito de usarlas consiste en aislar el contenido de la sonda del ambiente que la rodea, favorecer la permeabilidad de oxígeno y de otros gases a través de ella y por consiguiente, aumentar también la señal de corriente enviada. Por lo tanto, tiene que ver con la velocidad del tiempo de respuesta. Es ideal que la membrana se reemplace cada dos semanas de operación, o bien, cuando se presente un burbuja dentro de ella o si ésta se encuentra dañada. El proceso de instalación de la membrana se detalla en el anexo.

7.2.2 Solución de electrolito (KCl).

Tiene dos funciones principales:

1. Suplementar el cloro (Cl^-) al ánodo/electrodo de referencia para que se lleve a cabo la reacción de reducción de oxígeno en el cátodo.
2. Proveer la conducción iónica de electricidad dentro de la celda, especialmente en la capa delgada que existe entre el cátodo y la membrana.

7.2.3 Agitador

Un agitador está incorporado al cuerpo de la sonda 5730. El propósito de usarlo es crear una mezcla homogénea de agua alrededor de la membrana y así obtener una medición fiel de temperatura y oxígeno disuelto.

7.2.4 Especificaciones.

Cátodo: Oro

Ánodo: Plata

Tipo de membranas: YSI 5731

Electrolito utilizado: KCL con Kodak Photo-Flo

Precisión de oxígeno disuelto: 0.01 mg/L

Rango de temperatura de operación: 15° a 35°C

Sensibilidad de temperatura: Cuando se mide oxígeno, la corriente de salida de la sonda se incrementa aproximadamente 3.5% por 1°C de incremento en temperatura. El circuito automáticamente compensa este efecto. Sin embargo, la sonda se debe calibrar a una temperatura lo más cercana posible a la temperatura en la cual se realizarán las mediciones.

Precisión del sensor de temperatura.: 0.01°C

Compensación de presión: Efectiva al 0.5% de lectura con presiones de 100 psi (230 pies sobre el nivel del mar)

Voltaje de polarización: 0.8 volts nominal

Corriente de la sonda: Aire a 30°C, 19 microamperes nominal

Nitrogeno a 30°C, 15 microamperes o menos.

Tiempo de respuesta: El 90% de las veces, responde en 10 segundos a una temperatura de 30°C. Éste valor depende del tipo de membrana con que se trabaje.

El cuidado y mantenimiento de la sonda se muestra en un anexo.

7.2.5 Pruebas realizadas al termistor.

Debido a que la propiedad de la sonda es producto de un préstamo realizado por la P.T.A.R. del ITESM CCM, se realizaron pruebas con ésta para comprobar su buen funcionamiento.

Para asegurar el buen funcionamiento del circuito de temperatura, tratado más adelante, se hicieron pruebas a un termistor localizado en el extremo inferior de la sonda y en contacto directo con la muestra de agua a medir. Se comparó la medición de éste con un termómetro digital y con un termómetro de termoacoplamiento, resultando los siguientes valores:

Tabla 7-1 Pruebas realizadas al termistor

Termómetro digital (°C)	Termómetro de termoacoplamiento (°C)	Termistor (°C)
0	2	1.8
19	19	19.8
21	21	21
23	23	23.7
25	24	25.9
28	28	30.1
31	31	32.5
32	32	33.5

Resultados que resultan muy satisfactorios pues es mayor porcentaje de error es de 4.7 si es que existe error. Con esto comprobamos el buen funcionamiento del termistor contenido en la sonda y proseguimos a utilizarlo en futuras aplicaciones.

7.3 Circuito de temperatura.

La sonda tiene incorporado un termistor, que es, como su nombre lo indica, una resistencia sensible a la temperatura, esto es, su resistencia entre terminales está relacionada con la temperatura de su encapsulado. Mientras la temperatura del encapsulado aumenta, la resistencia del termistor se reduce y viceversa, cambiando así la ganancia del amplificador que se explicará más tarde.

A continuación se presenta una tabla que relaciona la temperatura con la resistencia del termistor:

Resistencia fuera del agua: 2.533k Ω

Resistencia mojada: 3.005k Ω

Tabla 7-2 Temperatura contra resistencia del termistor

Temperatura del agua (°C)	Resistencia (k Ω)
-1	6.75
0	6.36
1	4.4
2	4.85
3	5.26
4	4.85
5	5
6	4.67

7	4.99
8	4.8
9	4.64
10	4.26
11	3.87
12	4.04
13	3.85
14	4.02
15	3.487
16	3.3
17	2.994
18	3.031
19	2.796
20	2.881
21	2.448
22	2.273
23	2.328
24	2.16
25	1.999
26	2.023
27	1.837
28	1.82
29	2
30	1.564
31	1.501
32	1.55
33	1.438
35	1.387

Y al graficar éstos datos, se obtiene la siguiente gráfica, que corresponde a un termistor con coeficiente de temperatura negativo.

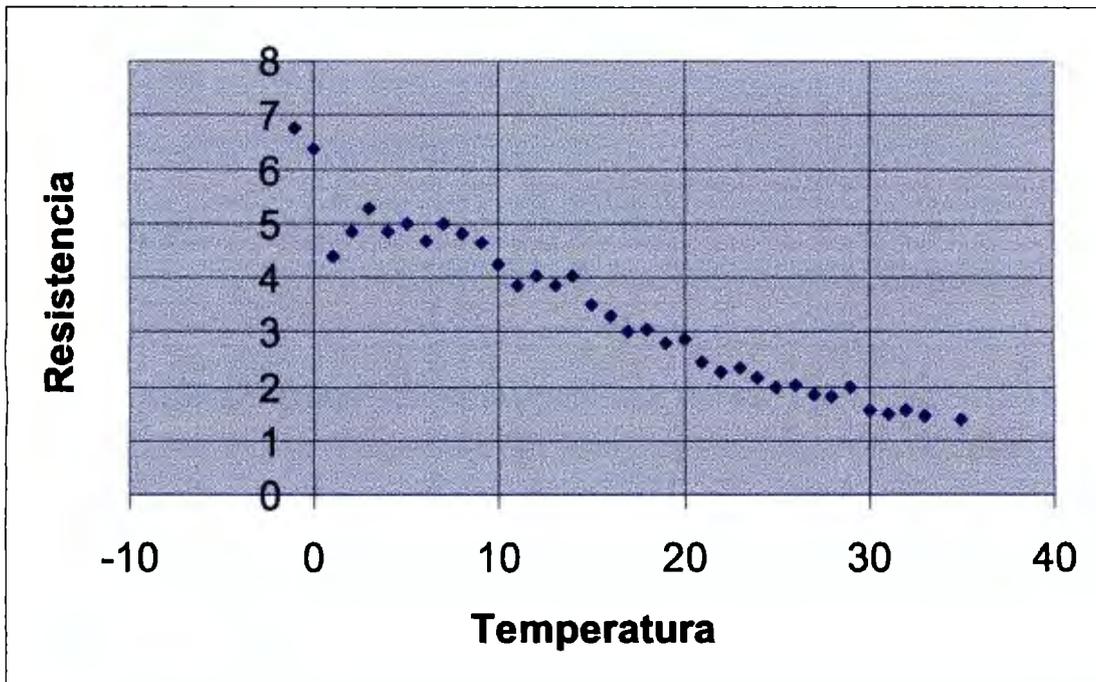


Figura 7-3 Temperatura contra resistencia

De la Fig. 4.4 se puede observar un comportamiento casi lineal pero con algunas dispersiones entre -1°C y 10°C y entre 30°C y 35°C . Por ello, se decidió seleccionar el rango que va desde 10°C a 30°C en donde se presenta un comportamiento más lineal y así poder obtener una ecuación de la recta. Esto se representa en la siguiente figura.

*El rango de temperatura del agua residual dentro del biorreactor de la PTAR del ITESM CCM durante las distintas temporadas del año es de 6°C (de 17°C a 23°C); rango en donde la curva presenta un comportamiento todavía más lineal.

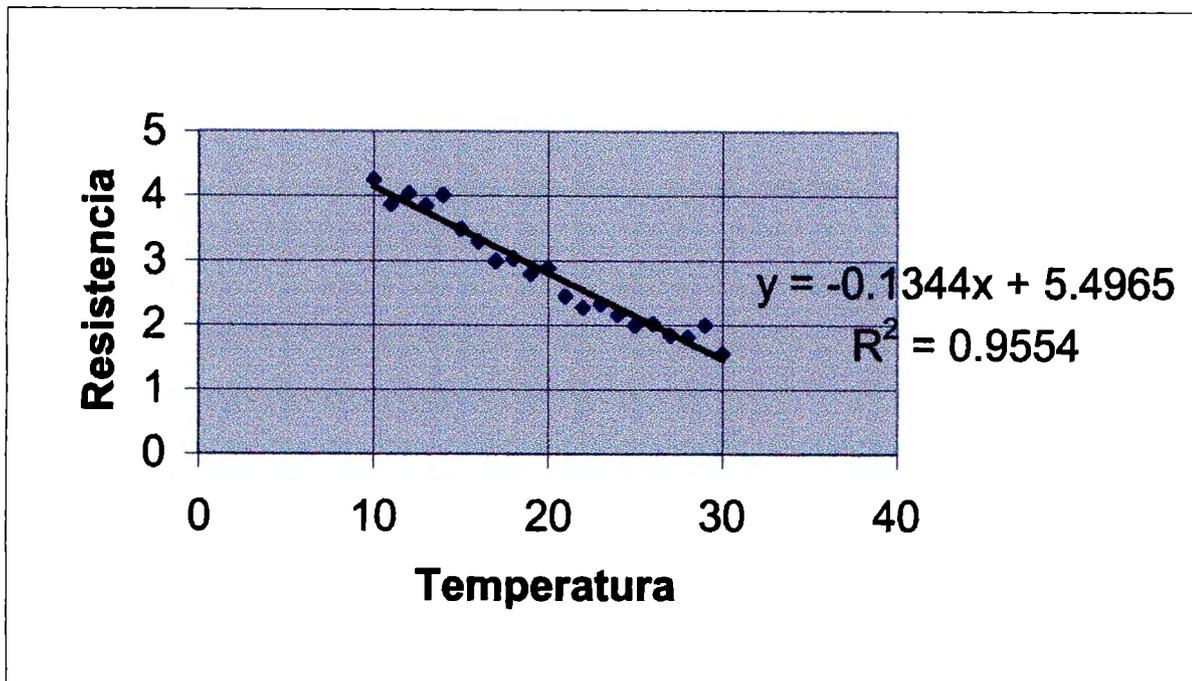


Figura 7-4 Linealidad de la relación

Así, la ecuación que representa la dependencia de la resistencia del termistor a la temperatura es $R = -0.1344k T + 5.4965k [\Omega]$... (1)

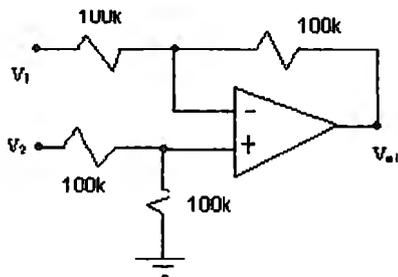
Por cuestiones de diseño, al elegir arbitrariamente una temperatura de 15°C y sustituyendo este valor en la ecuación (1), se obtiene $R = 3.4805k\Omega$. Se elegirá una equivalencia de 10mV por cada °C y antes de la última etapa de amplificación. Después de ésta, se dispondrá de 0.1 V (100 mV) por °C. A continuación se aclararán éstos parámetros de diseño elegidos.

7.3.1 Principio de operación.

El circuito de temperatura está integrado por distintas etapas amplificadoras. Un voltaje de alimentación ($V_{cc} = 15 \text{ V}$) está encargado de polarizar un diodo de referencia de bajo voltaje LM385 para posteriormente hacer uso de dos regulaciones de voltaje (1 V y 150 mV). Las salidas de éstas regulaciones se utilizan como señales no inversoras para dos configuraciones en búfer. La salida de una de ellas se procede a una amplificación diferencial unitaria conformada a su vez por dos amplificaciones no inversoras, y cuya salida se amplifica nuevamente, de forma unitaria, y conjuntamente con la señal proveniente de la salida del búfer restante. Se dispone entonces de un voltaje de salida V_o . Se trabaja con configuraciones básicas de amplificadores operacionales como son: circuito no inversor, circuito inversor y circuito diferencial o restador.

La equivalencia usada es de 0.1 V por cada °C y el dispositivo encargado en sensar la temperatura dentro del biorreactor es el termistor ubicado en la sonda de oxígeno.

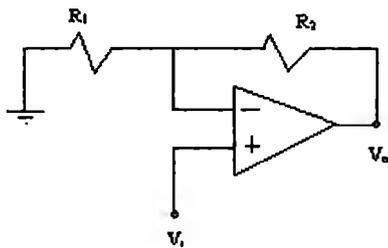
7.3.1.1 Configuración diferencial.



Del que se obtiene, mediante análisis básico de electrónica y circuitos eléctricos:

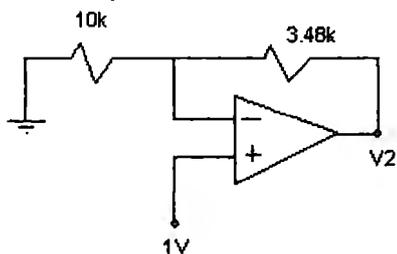
$$V_{o1} = (100k\Omega / 100k\Omega) (V_2 - V_1) = (V_2 - V_1)$$

7.3.1.2 Configuración no inversora.



De donde $V_o = (1 + R_2 / R_1) V_i$

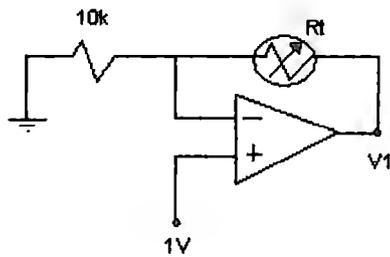
Sacando provecho de esto, el diseño propuesto usa:



Nótese el uso de 3.48k Ω obtenido previamente de una sustitución en la Ec. (1)

$$V_2 = (1 + 3.48k / 10k) = 1.348 V$$

y



en donde $V_1 = (1 + R_T / 10k) 1$
 R_T - Resistencia del termistor.

7.3.1.3 Reguladores de voltaje.

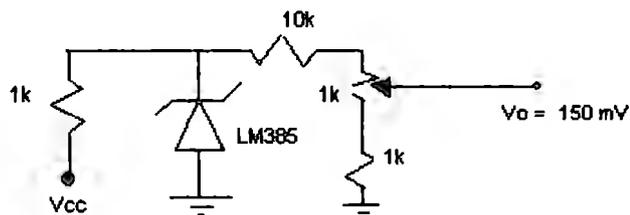
La finalidad de utilizar reguladores de voltaje es controlar la cantidad en que cambia el voltaje de salida sobre un rango de operación del circuito.

El voltaje proporcionado en la salida bajo condiciones sin carga (sin consumo de corriente de la fuente) se reduce cuando la carga consume corriente de la alimentación (bajo carga). La cantidad en que cambia el voltaje entre las condiciones de sin carga y con carga se describe por una factor llamado regulación de voltaje:

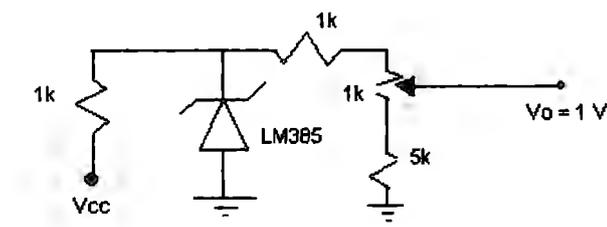
$$R.V. = (\text{voltaje sin carga} - \text{voltaje a plena carga}) / \text{voltaje a plena carga}$$

$$\%R.V. = ((V_{NL} - V_{FL}) / V_{FL}) * 100$$

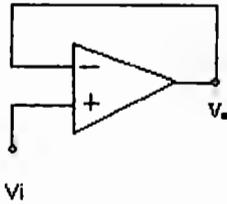
Un regulador de voltaje usado para entregar un voltaje de salida de 150 mV se ilustra como sigue:



Y para entregar un voltaje de 1 V:



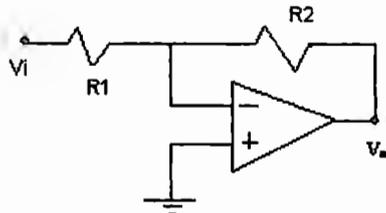
7.3.1.4 Búfer.



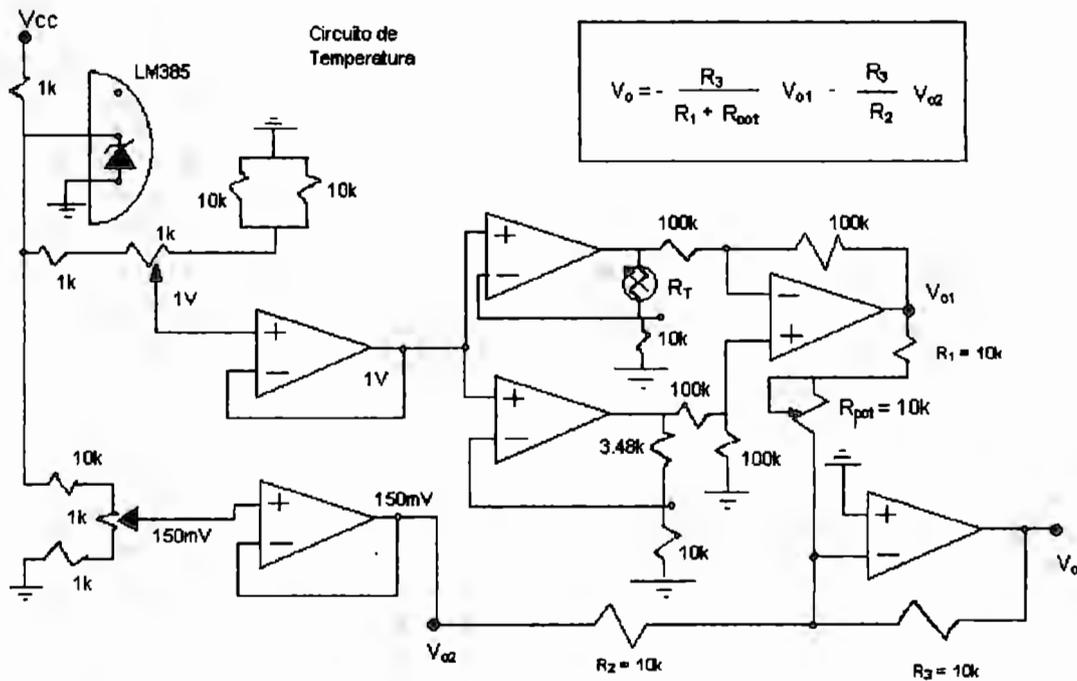
$$V_o = V_i$$

7.3.1.5 Configuración inversora.

$$V_o = - (R_2 / R_1) V_i$$



7.3.1.6 Circuito general.



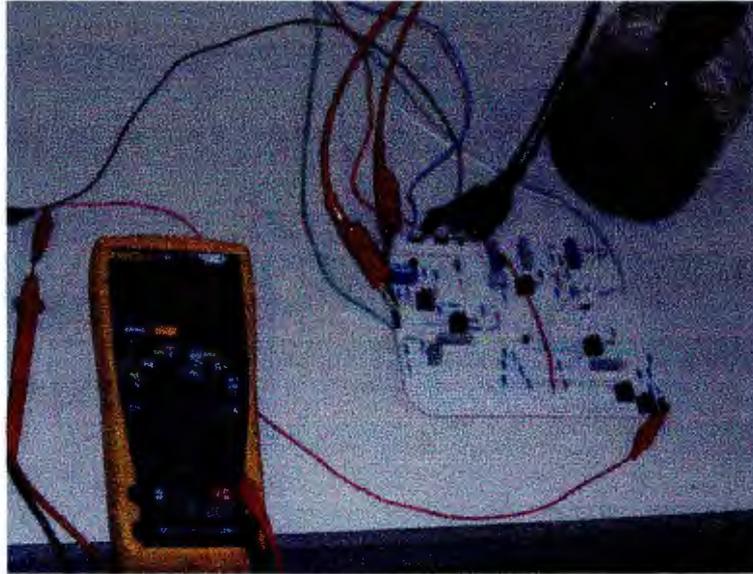


Figura 7-5 Circuito de oxígeno disuelto

Al utilizar cada una de las configuraciones anteriores y si se analiza por etapas, se llega a:

$$V_o = - \frac{R_3}{R_1 + R_{pot}} V_{o1} - \frac{R_3}{R_2} V_{o2}$$

..... Ec. (2)

a su vez $V_{o1} = (V_2 - V_1) = (1.348 - V_1)$
 y en donde es constante $V_{o2} = 150\text{mV}$; además $V_1 \propto R_T$

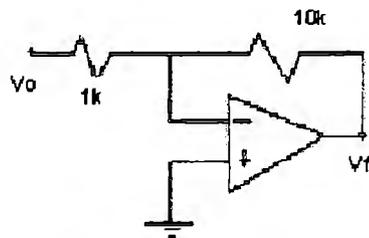
Al sustituir en (2):

$$V_o = - (10k) / (10k + R_{pot}) * (100k / 100K) (1.348 - V_1) - (10k) / (10k) (150\text{ mV})$$

$$= - (10k) / (10k + R_{pot}) (1.348 - V_1) - 150\text{mV}$$

se puede entonces comprender la relación existente entre 1.348 V y 150 mV. Por esto es que se elige una proporción de 10mV/ °C.

7.3.1.7 Etapa amplificadora final.



Por último se utiliza una configuración no inversora cuya ganancia $G = 10 = 10k / 1k$ para obtener una relación de $0.1 \text{ V} / ^\circ\text{C} = 100 \text{ mV} / ^\circ\text{C}$.

* Todas las resistencias utilizadas fueron de precisión (1 %); se utilizó además un LM385 ($z = 1.2$); 3 potenciómetros (dos de 1k y uno de 10k); 2 C.I. TL074CN de texas instruments y un Op-amp LF411CN de national). $V_{cc} = 15\text{V} = -V_{ee}$

7.4 Circuito de oxígeno disuelto.

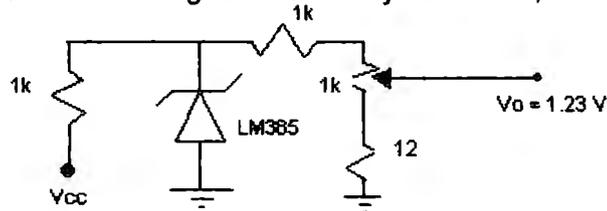
7.4.1 Principio de operación

El circuito de oxígeno disuelto está conformado por una consecución de etapas amplificadores. Un voltaje de alimentación ($V_{cc} = 15 \text{ V}$) está encargado de polarizar un LM385 y así, obtener una regulación de voltaje de 1.23V. Después se hace uso de un divisor de voltaje y posteriormente una configuración en búfer. La salida de éste se encarga de polarizar la sonda de oxígeno mediante un arreglo I-V. Más tarde se usa una amplificación V-I con el propósito de obtener una corriente en pro de una compensación de temperatura y así obtener el valor de de oxígeno disuelto deseado.

* Nota: Se debe ajustar el Pot_{cero} hasta obtener una lectura de **0.00**. Se debe también, esperar 15 minutos para que la sonda se estabilice. Si se llegara a cortar la alimentación al circuito, también es necesario una pequeña espera.

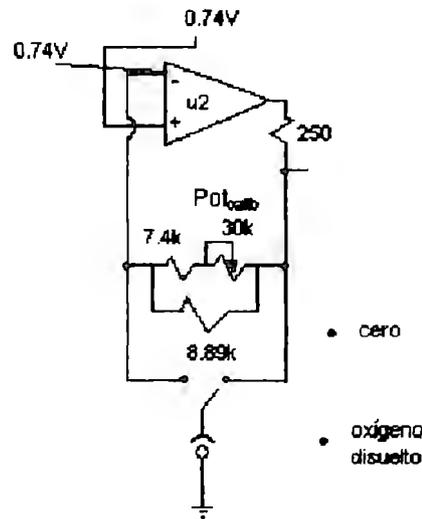
7.4.1.1 Regulación de voltaje.

Se utiliza un regulador de voltaje de 1.23 V, como se muestra a continuación.



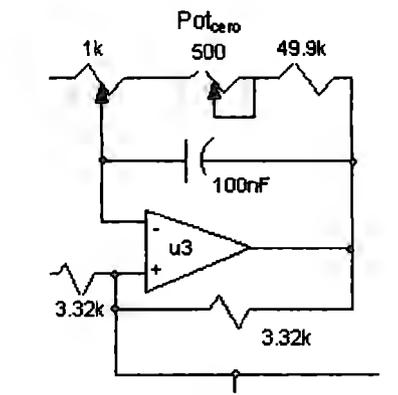
7.4.1.2 Convertidor corriente a voltaje.

El voltaje de salida proveniente de u1 (0.74V) mantiene un voltaje de entrada constante para u2; u2 se encarga de polarizar a la sonda de oxígeno. La retroalimentación de u2 consiste de un arreglo de resistencias variable para un rango dado de la corriente entregada por la sonda. Así, la señal de salida de u2 es una señal de voltaje más el voltaje de polarización de la sonda.



7.4.1.3 Convertidor voltaje a corriente.

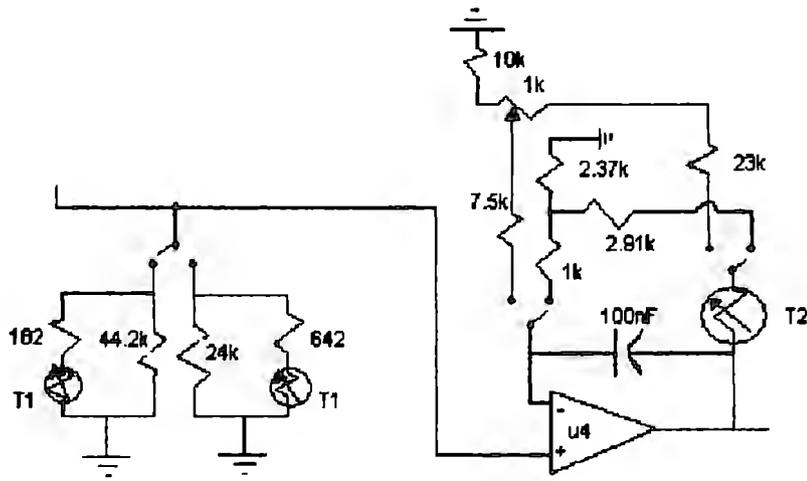
El voltaje de salida de u1 también se encarga de mantener un voltaje de salida constante para la entrada inversora de u3. Esta etapa está encargada de remover el voltaje de polarización y convertir la señal de voltaje en una señal de corriente que fluye por los dos resistencias de 3.32k. La función del trimpot de 1k consiste en balancear las razones de resistencias de las dos ramas del convertidor V-I. El Pot_{cero} es usado para resetear los cambios en las resistencias de éstas dos ramas y eliminar los voltajes de offset de u2, u3 y u4.



7.4.1.4 Compensación de temperatura.

La compensación de temperatura es llevada a cabo por los termistores (T1 y T2) en conjunto con u4. El arreglo de resistencias alrededor de T1 constituye la carga de la fuente de corriente anterior. Cuando la resistencia de T1 aumenta el voltaje hacia u4 disminuye. Cuando la resistencia de T2 aumenta, la proporción del voltaje en la retroalimentación de u4 disminuye. Esta combinación de cambios compensan los efectos

de la permeabilidad de la membrana debido a cambios en la temperatura. El circuito es básicamente un amplificador no inversor.



- oxígeno disuelto
- cero

7.4.1.5 Circuito general.

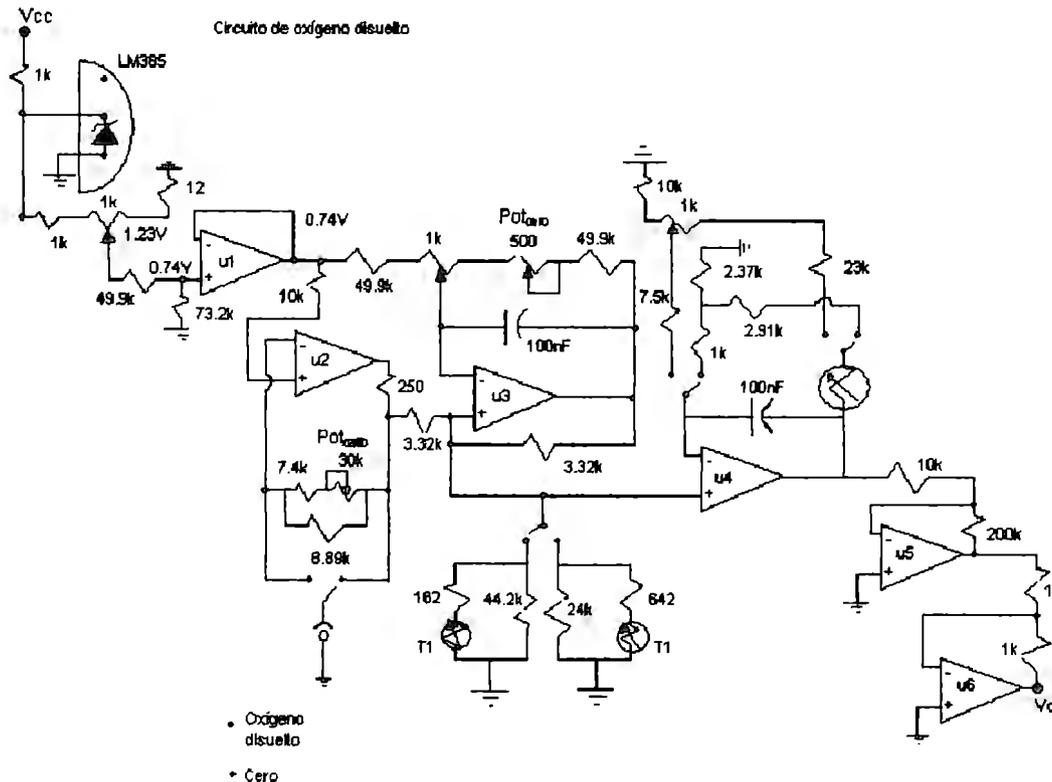


Figura 7-6 Circuito del oxímetro

Se utilizaron resistencias de precisión (+/- 1% de error); 4 op-amp's LM4250 para eliminar el offset de salida; 2 op-amp's LF411; un LM385 y los dos termistores de que dispone la sonda de oxígeno y dos capacitores de 100nF. Además $V_{cc} = -V_{ee} = 15\text{ V}$.

7.4.2 Calibración.

La calibración consiste en exponer la sonda a una concentración de oxígeno conocida y ajustar Pot_{calib} hasta obtener la concentración de O_2 disuelto en la muestra.

Los pasos para una buena calibración, son los siguientes:

1. Se debe colocar la sonda en un medio húmedo, un trapo mojado o una esponja mojada pueden servir y se debe ajustar a cero antes de empezar a calibrar.
2. Es importante que se calibre y se ajuste a cero a una temperatura similar a la temperatura en donde se realizará la medición de oxígeno disuelto.
3. Verificar nuevamente una lectura de 0.00 en la calibración en cero.
4. Determinar la altitud local o la presión atmosférica real. Usando la tabla de presión/altitud se debe determinar el factor de calibración adecuado. Para la Ciudad de México es de 76

Tabla 7-3 presión/altitud

Pressure Inches of Hg	Pressure mm Hg	Pressure kPA	Altitude in feet	Altitude in meters	Calibration Value in %
30.23	768	102.3	-276	-84	101
29.92	760	101.3	0	0	100
29.61	752	100.3	278	85	99
29.33	745	99.3	558	170	98
29.02	737	98.3	841	256	97
28.74	730	97.3	1126	343	96
28.45	722	96.3	1413	431	95
28.11	714	95.2	1703	519	94
27.83	707	94.2	1995	608	93
27.52	699	93.2	2290	698	92
27.24	692	92.2	2587	789	91
26.92	684	91.2	2887	880	90
26.61	676	90.2	3190	972	89
26.34	669	89.2	3496	1066	88
26.02	661	88.2	3804	1160	87
25.75	654	87.1	4115	1254	86
25.43	646	86.1	4430	1350	85
25.12	638	85.1	4747	1447	84
24.84	631	84.1	5067	1544	83
24.53	623	83.1	5391	1643	82
24.25	616	82.1	5717	1743	81
23.94	608	81.1	6047	1843	80
23.62	600	80.0	6381	1945	79
23.35	593	79.0	6717	2047	78
23.03	585	78.0	7058	2151	77
22.76	578	77.0	7401	2256	76
22.44	570	76.0	7749	2362	75
22.13	562	75.0	8100	2469	74
21.85	555	74.0	8455	2577	73
21.54	547	73.0	8815	2687	72
21.26	540	71.9	9178	2797	71
20.94	532	70.9	9545	2909	70
20.63	524	69.9	9917	3023	69
20.35	517	68.9	10293	3137	68

5. por el factor de calibración seleccionado previamente y posteriormente dividirlo entre 100 para obtener una correcta concentración de oxígeno disuelto de la muestra a medir.

Ejemplo: Temperatura 21°C; por ende, Solubilidad = 8.92 mg/L

Altitud: Cd. de México; factor de calibración = 76,

Valor de calibración correcto = $(8.92 \times 76)/100 = 6.78$ mg/L

* Se debe mover Pot_{calib} hasta obtener el valor de calibración correcto.

Tabla 7-4 Solubilidad de oxígeno

Temperatura (°C)	Solubilidad (mg/L)
15	10.08
16	9.87
17	9.67
18	9.47
19	9.28
20	9.09
21	8.92
22	8.74
23	8.58
24	8.42
25	8.26
26	8.11
27	7.97
28	7.83

7.5 Oxígeno Disuelto

Para mantener viva una población aerobia de lodos en un tanque es necesario introducir oxígeno. La variación en la demanda de oxígeno en un sistema, hace que también se tenga una variación en la cantidad de oxígeno alimentado (oxígeno disuelto) para mantener una concentración deseada. Es decir hay una relación importante entre la demanda de oxígeno y el oxígeno disuelto.

El oxígeno disuelto es oxígeno libre y disponible para bacterias aeróbicas y facultativas. Este oxígeno se presenta en su forma de partícula: O_2 . Este oxígeno puede entrar al agua por inyección (aeración) o por el simple contacto entre el agua y la atmósfera. El oxígeno disuelto de las aguas residuales crudas, por ejemplo, proviene del abastecimiento de agua y del contacto entre aire y agua.

Cuando la temperatura y la materia orgánica son altos, la acción bacteriana consume el oxígeno en un tiempo relativamente corto. De este modo el oxígeno disuelto indica la frescura de los desechos. Estos mismos desechos se estabilizan después de ser oxidados por el proceso que se lleva a cabo en el que intervienen bacterias e inyección de oxígeno.

Cuando la temperatura es alta, el nivel de saturación de oxígeno disuelto disminuye también; cuando la temperatura es baja, el nivel de saturación aumenta. Esta saturación es la cantidad máxima de oxígeno que puede estar disuelta en el agua. Cuando se alcanza la saturación, no importa que se inyecte más oxígeno, la cantidad de oxígeno disuelto permanecerá igual.

En el tanque de aereación de una planta de tratamiento de lodos activados se deben tener concentraciones uniformes de oxígeno disuelto. Un factor que puede afectar de manera importante al proceso de mezclado del licor, lodos activados y aguas crudas, es una pobre concentración de oxígeno disuelto en algunas partes del reactor, esto debe monitorearse constantemente con un oxímetro portátil. El valor del oxígeno disuelto debe oscilar entre 1.5 y 4 mg/l en cualquier parte del reactor biológico dentro del riel de aereación. Cuando el Oxígeno disuelto no está dentro de este rango se crean capas anaeróbicas en el reactor, esto ocasiona mal olor y la producción de bacterias anaerobias.

La concentración de oxígeno en la interfase, es aquella que está en equilibrio con el oxígeno en la fase gaseosa, y dependerá principalmente de la presión parcial de oxígeno en la fase gaseosa. De acuerdo a la Ley de Henry los factores que afectan el coeficiente de actividad del oxígeno disuelto son la temperatura, la presión y los solutos o sustancias presentes en el agua.

7.6 Temperatura

La solubilidad del oxígeno disminuye con el aumento de la temperatura. Se ha obtenido una considerable cantidad de datos experimentales, un ejemplo es la correlación propuesta por Truesdale, Downing y Lowden en 1955:

$$C^* = 14.6 - (0.3943 \times T) + (0.007714 \times T^2) - (0.0000646 \times T^3) \pm 0.05 \text{ g / m}^3$$

Para la concentración de saturación del oxígeno en agua pura a T°C, en equilibrio con el aire a una atmósfera, o a una presión parcial de oxígeno de 158.8 mmHg. Landine propuso en 1971 cierto número de correlaciones y descubrió que la de Montgomery, Thom y Cokburn era la que más se acercaba a los resultados experimentales. Considerando agua pura en equilibrio con aire saturado con vapor de agua a 760 mmHg y T dentro del rango 0 – 50 °C:

$$C^* = 468 / (31.6 + T) \pm 0.05 \text{ g / m}^3$$

Presión parcial

La presión parcial del oxígeno en la fase gaseosa que está en equilibrio con el oxígeno disuelto en una interfase, se determina por la presión total del gas y la proporción de oxígeno en la fase gaseosa:

$$p_c = m_c \times P_A$$

Donde p_c es la presión parcial del oxígeno, m_c es la fracción molar de oxígeno en la fase gaseosa y P_A es la presión total del gas.

8 Sistema de adquisición de datos e interfaz de visualización

8.1 Introducción

Uno de los objetivos principales de este proyecto es realizar un sistema de monitoreo electrónico tanto para oxígeno disuelto en el biorreactor como temperatura del licor de la P.T.A.R. del ITESM CCM, para ello se realizó el hardware y el software descrito en esta sección. El cual consta de un sistema de adquisición de datos compuesto por 2 convertidores analógico digitales modelo 0804 de National Semiconductor y un microprocesador de la serie 89C51 de Atmel.

Por el lado del software, el equipo de trabajo decidió emplear el lenguaje de programación Visual Basic versión 6.0, en conjunto con librerías de tipo DLL (*dynamic link library*) que permitieran el libre acceso a los puertos de la computadora aun en sistemas operativos con un sistema de archivos NTFS, tales como Windows XP o Windows 2000.

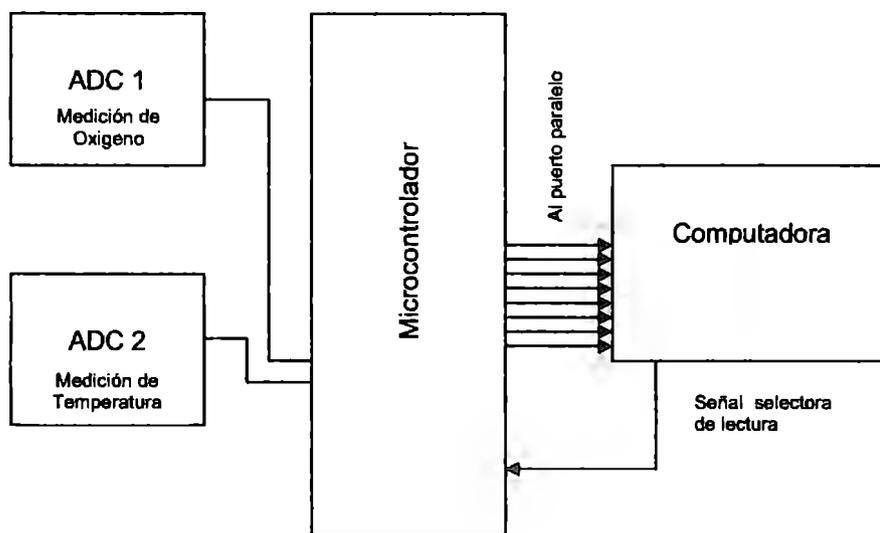


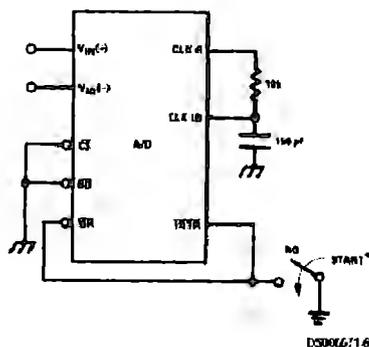
Figura 8-1 Diagrama general del sistema de adquisición de datos

8.2 Convertidores analógico-digital (ADC)

La configuración de los ADC se observa en la figura 8-2, donde se puede observar que las señales de control del integrado están en autorunning mode, de manera que no necesita que un microcontrolador le este dando las instrucciones de cuando leer y escribir.

Las principales características del convertidor se encuentran a continuación.

Self-Clocking in Free-Running Mode



*After power-up, a momentary grounding of the WR input is needed to guarantee operation.

Figura 8-2 Conexión del ADC

$$\text{Frecuencia del Reloj } F_c = \frac{1}{1.1RC} = 606 \text{ KHz}$$

Tabla 8-1 Resolución del ADC

HEX	BINARY	FRACTIONAL BINARY VALUE FOR		OUTPUT VOLTAGE CENTER VALUES WITH $V_{REF/2} = 2.560 V_{DC}$	
		MS GROUP	LS GROUP	VMS GROUP (Note 15)	VLS GROUP (Note 15)
F	1 1 1 1	15/16	15/256	4.800	0.300
E	1 1 1 0	7/8	7/128	4.480	0.280
D	1 1 0 1	13/16	13/256	4.160	0.260
C	1 1 0 0	3/4	3/64	3.840	0.240
B	1 0 1 1	11/16	11/256	3.520	0.220
A	1 0 1 0	5/8	5/128	3.200	0.200
9	1 0 0 1	9/16	9/256	2.880	0.180
8	1 0 0 0	1/2	1/32	2.560	0.160
7	0 1 1 1	7/16	7/256	2.240	0.140
6	0 1 1 0	3/8	3/128	1.920	0.120
5	0 1 0 1	5/16	2/256	1.600	0.100
4	0 1 0 0	1/4	1/64	1.280	0.080
3	0 0 1 1	3/16	3/256	0.960	0.060
2	0 0 1 0	1/8	1/128	0.640	0.040
1	0 0 0 1	1/16	1/256	0.320	0.020
0	0 0 0 0			0	0

Note 15: Display Output=VMS Group + VLS Group

8.2.1 Microcontrolador

El principio de operación del microcontrolador, será la de multiplexar la salida digital para que la computadora reciba la señal de temperatura o de oxígeno disuelto. Esto se logrará al emplear 2 pines de control del puerto paralelo de la computadora para realizar esto, estos pines tendrán un efecto de interrupción externa sobre el microcontrolador y de esta forma se enviará al puerto de salida la señal solicitada.

Por otro lado se propone una implementación de transmisión vía radiofrecuencia, para ello es necesario convertir una palabra binaria (recibida en paralelo del ADC) en un stream de bits serie que cumpla con el estándar del RS 232.

Es recomendable emplear un buffer (74LS244) para evitar que existan problemas de acoplamiento de impedancias a la salida del circuito, al hacer esto se genera una etapa de impedancia infinita por lo que la carga únicamente recibirá una señal de voltaje.

A continuación se presenta un esquema de este sistema;

paralelo equ p1
puerto equ p3

ORG 0

JMP MAIN
ORG 3h
JMP AD1
;ORG 0Bh
;JMP TIMER0
ORG 13h
JMP AD2
;ORG 23h
;JMP RX

MAIN: MOV SP,#70h
MOV paralelo,#0

;movemos lo que tenemos en el adc1 al paralelo

; MOV TMOD, #00100001b
; MOV TH0,#0D8h
; MOV TL0,#0F0H
; MOV TH1,#0FAh
; MOV TL1,#0FAh
MOV IE, #10010111b

setb it0
setb it1

; SETB TR0
; SETB TR1
; MOV SCON, #01010000b
; MOV CONTADOR, #10
; MOV BANDERA, #00001010b

JMP \$

AD1: PUSH ACC
PUSH PSW
CLR P3.2
MOV paralelo, temperatura
POP PSW
POP ACC

reti

AD2: PUSH ACC
PUSH PSW
CLR P3.3
MOV paralelo, oxigeno
POP PSW
POP ACC

reti

TIMER0: PUSH ACC
PUSH PSW

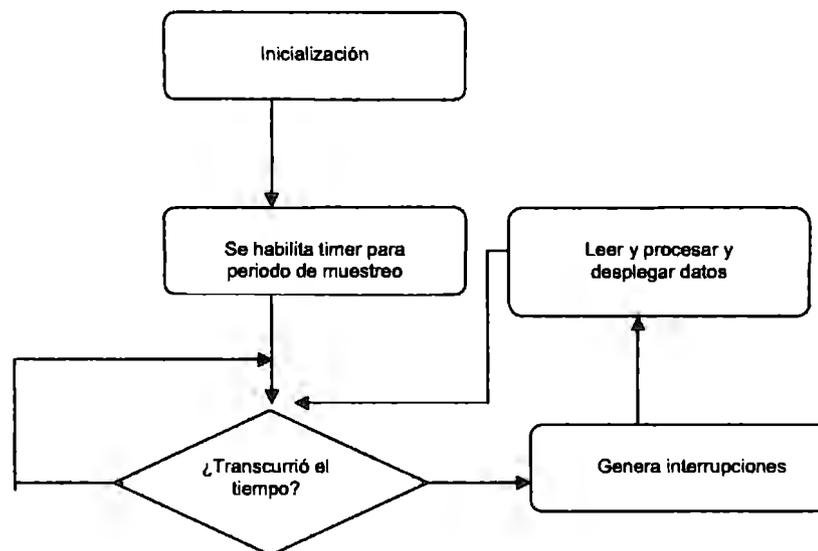
```
MOV TH0, #0D8h
MOV TLO, #0F0h
DJNZ CONTADOR, SALIR1
MOV CONTADOR, #10
MOV BANDERA, P1
CJNE BANDERA, #00001010b, OTRO
MOV A, #00001010b
CALL RX
MOV A, P0
CALL RX
MOV BANDERA, #00000101b
JMP SALIR1
OTRO:MOV A, #00000101b
CALL RX
MOV A, P2
CALL RX
MOV BANDERA, #00001010b
SALIR1:  POP PSW
        POP ACC
        RETI

RX:     PUSH ACC
        PUSH PSW
        JB TI, SALIR2
        CLR RI
        MOV A, SBUF
SALIR2:  POP PSW
        POP ACC
        RETI
end
```

8.3 Programa de Visualización de datos

Se realizó un programa en Visual Basic 6.0 para poder leer los datos entregados por el microcontrolador, para ello se emplearon algunas librerías tipo DLL (dynamic link library), que no fueron desarrolladas por el equipo de trabajo, ni suministradas por Microsoft, tal es el caso de la librería IO.dll la cual implementa la función PortIn, (empleada para leer el puerto deseado en cualquier sistema basado en windows). Esto se realizó debido al mapeo virtual de puertos que realizan sistemas operativos como windows 2000 y windows XP.

El funcionamiento del programa se puede ver en este diagrama a bloques,



El tiempo de muestreo es ajustable, pero para fines prácticos y por recomendación del experto de la UDLA es suficiente muestrear cada 5 minutos, esto debido a que el proceso de lodos activados es muy lento, y la sonda de oxígeno tiene cierto tiempo de demora para estabilizarse, por lo que si el muestreo se generara más frecuentemente estaríamos obteniendo una serie de puntos oscilatorios sobre el valor que se alcanza en el tiempo de estabilización. Por otro lado los cambios en estas 2 variables, oxígeno y temperatura, son muy lentos, de manera que esto nos permite fijar un tiempo de muestro de 5 minutos para el sistema en completa operación.

8.3.1 Código

Para la realización del código se realizó un estudio extensivo del comportamiento de los puertos de una PC en diferentes sistemas operativos, razón por la cual se tomaron en cuenta diferentes aspectos para que el sistema fuera funcional en cualquier sistema operativo que se empleara.

El único requerimiento de este software es tener instalado en la computadora el programa Microsoft Office en su versión XP, esto debido a que los add-ins que se emplean son de Excel XP. .

```
*****'
*****'
Private Declare Sub PortWordOut Lib "IO.DLL" (ByVal Port As Integer, ByVal Data As Integer)
Private Declare Sub PortDWordOut Lib "IO.DLL" (ByVal Port As Integer, ByVal Data As Long)
Private Declare Function PortIn Lib "IO.DLL" (ByVal Port As Integer) As Byte
Private Declare Function PortWordIn Lib "IO.DLL" (ByVal Port As Integer) As Integer
Private Declare Function PortDWordIn Lib "IO.DLL" (ByVal Port As Integer) As Long
Private Declare Sub SetPortBit Lib "IO.DLL" (ByVal Port As Integer, ByVal Bit As Byte)
Private Declare Sub ClrPortBit Lib "IO.DLL" (ByVal Port As Integer, ByVal Bit As Byte)
Private Declare Sub NotPortBit Lib "IO.DLL" (ByVal Port As Integer, ByVal Bit As Byte)
Private Declare Function GetPortBit Lib "IO.DLL" (ByVal Port As Integer, ByVal Bit As Byte) As Boolean
Private Declare Function RightPortShift Lib "IO.DLL" (ByVal Port As Integer, ByVal Val As Boolean) As Boolean
Private Declare Function LeftPortShift Lib "IO.DLL" (ByVal Port As Integer, ByVal Val As Boolean) As Boolean
Private Declare Function IsDriverInstalled Lib "IO.DLL" () As Boolean

Dim MuestraActual As Integer
Dim RenglonActual As Integer

Private Sub Form_Load()
    'Para que este programa funcione correctamente se debe tener el
    'puerto paralelo (378h) en modo bidireccional, esto es en modo EPP 1.7,
    'Leyenda.Caption = "Este programa fue realizado por alumnos de la carrera de
    Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones"

    PortOut &H378, 0 'Inicializamos el registro de lectura para que este siempre en 0
    PortOut &H37A, 32 'Habilitamos la bidireccionalidad del puerto

    Set ChtMuestras.DataSource = ShtMuestras

    Dim Grafica As ChChart
    Set Grafica = ChtMuestras.Charts.Add 'Agrega una nueva grafica
    Grafica.Type = chChartTypeLine      'Grafica de linea

    ChtMuestras.SetData ChartDimensionsEnum.chDimSeriesNames, _
        ChartSpecialDataSourcesEnum.chDataBound, "C1:D1"

    ' Ligar el eje de categorías a la columna de números (#) en la hoja de cálculo
    Grafica.SetData ChartDimensionsEnum.chDimCategories, _
        ChartSpecialDataSourcesEnum.chDataBound, "A2:A21"

    ' Ligar los valores de las series de datos a la columna de oxígeno en la hoja de
    cálculo
    Grafica.SeriesCollection(0).SetData ChartDimensionsEnum.chDimValues, _
        ChartSpecialDataSourcesEnum.chDataBound, "C2:C21"

    Grafica.SeriesCollection.Add
    ' Ligar los valores de las series de datos a la columna de oxígeno en la hoja de
    cálculo
```

```
Grafica.SeriesCollection(1).SetData ChartDimensionsEnum.chDimValues, _  
    ChartSpecialDataSourcesEnum.chDataBound, "D2:D21"
```

```
MuestraActual = 1 'Base del número identificador de muestra  
RenglonActual = 2 'El primer renglon de datos es 2, porque el 1 contiene titulos
```

```
Randomize 'Inicializa el generador de números pseudoaleatorios  
End Sub
```

```
Private Sub TmrMuestreo_Timer()
```

```
'El intervalo de muestreo se establece en el objeto Timer, propiedad Interval  
(milisegundos)
```

```
Static Oxigeno As Integer
```

```
Static Temperatura As Integer
```

```
Static n As Integer ' Va a ser el contador para permitir tiempos de muestreo mas  
grandes
```

```
Static Intervalo As Integer
```

```
Intervalo = 10 'Con esta variable ajustamos el tiempo de muestreo
```

```
If n = Intervalo - 2 Then
```

```
    PortOut &H37A, 0 ' Se genera la interrupción por flanco
```

```
    PortOut &H37A, 1 ' Se genera la interrupción por flanco
```

```
    PortOut &H37A, 0 ' Se genera la interrupción por flanco
```

```
    PortOut &H37A, 32 ' Regresamos el puerto a la modalidad de bidireccional
```

```
    PortOut &H378, 9
```

```
    Oxigeno = PortIn(&H378)
```

```
End If
```

```
If n = Intervalo - 1 Then
```

```
    PortOut &H37A, 0 ' Se genera la interrupción por flanco
```

```
    PortOut &H37A, 2 ' Se genera la interrupción por flanco
```

```
    PortOut &H37A, 0 ' Se genera la interrupción por flanco
```

```
    PortOut &H37A, 32 ' Regresamos el puerto a la modalidad de bidireccional
```

```
    PortOut &H378, 16
```

```
    Temperatura = PortIn(&H378)
```

```
End If
```

```
If n = Intervalo Then
```

```
    Dim Hoja As Worksheet
```

```
    Set Hoja = ShtMuestras.ActiveSheet
```

```
    Dim Renglon As Range
```

```
    Set Renglon = Hoja.Rows(RenglonActual)
```

```
'Llena el renglon en la tabla
```

```
Renglon.Cells(1).Value = MuestraActual
```

```
Renglon.Cells(2).Value = Now 'Indica a que hora se tomo la ultima muestra
```

```

Renglon.Cells(3).Value = Oxigeno
Renglon.Cells(4).Value = Temperatura

If RenglonActual = 21 Then
    Hoja.Range("A3:D21").Copy "A2:D20"
Else
    RenglonActual = RenglonActual + 1
End If
MuestraActual = MuestraActual + 1

LblMuestra.Caption = Format(Renglon.Cells(2).Value, "dddd tttt") 'Formato
definido en el panel de control
TxtOxigeno.Text = Renglon.Cells(3).Value
TxtTemperatura.Text = Renglon.Cells(4).Value
n = 0
Else
    n = n + 1

End If
End Sub

*****
*****
Private Declare Sub PortOut Lib "IO.DLL" (ByVal Port As Integer, ByVal Data As Byte)

```

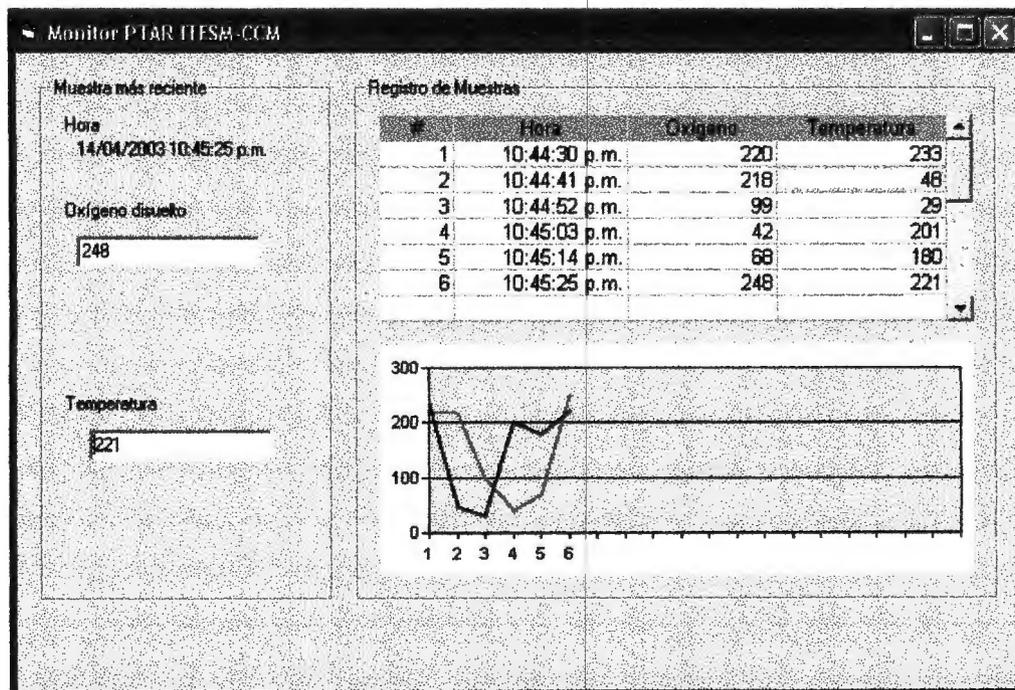


Figura 8-3 Interfaz gráfica en VB 6.0

Como se puede apreciar, el sistema cuenta con 3 secciones, una en donde se puede ver la última muestra que se tomó, tanto de temperatura como de oxígeno así como la hora a la que se tomó esta muestra. En la segunda sección se puede ver una tabla con la información histórica de las últimas 20 muestras en donde se indicará la hora a la que fue tomada, así como el número de muestra que es cada una de las mediciones. En la tercera sección se puede apreciar una gráfica, la cual únicamente es visible en tiempo de ejecución ya que esta se va generando en función de la cantidad de muestras existentes. El reloj que se puede observar en la esquina superior izquierda se refiere al tiempo de muestreo, el cual es modificable por el usuario.

8.3.2 Puerto paralelo de la computadora

Para poder realizar este programa se realizó una investigación exhaustiva acerca del funcionamiento del puerto paralelo, así como de sus modos de operación, ya que había que habilitar la bidireccionalidad del puerto, puesto que el registro en el que se escribe es un registro unidireccional a menos que se cambie una palabra de control, esto se puede encontrar más detalladamente en el código del programa. En las siguientes imágenes se pueden observar los diferentes registros con que cuenta el puerto paralelo, así como sus modos de operación.

Tabla 8-2 Pines del puerto paralelo (SPP)

Pin No (D-Type 25)	Pin No (Centronics)	SPP Signal	Direction In/out	Register	Hardware Inverted
1	1	nStrobe	In/Out	Control	Yes
2	2	Data 0	Out	Data	
3	3	Data 1	Out	Data	
4	4	Data 2	Out	Data	
5	5	Data 3	Out	Data	
6	6	Data 4	Out	Data	
7	7	Data 5	Out	Data	
8	8	Data 6	Out	Data	
9	9	Data 7	Out	Data	
10	10	nAck	In	Status	
11	11	Busy	In	Status	Yes
12	12	Paper-Out PaperEnd	In	Status	
13	13	Select	In	Status	
14	14	nAuto-Linefeed	In/Out	Control	Yes
15	32	nError / nFault	In	Status	
16	31	nInitialize	In/Out	Control	
17	36	nSelect-Printer nSelect-In	In/Out	Control	Yes
18 - 25	19-30	Ground	Gnd		

Como podemos ver el puerto paralelo tiene 3 registros, el de datos (que se emplea para mandar datos a la impresora), el de control (que configura el funcionamiento del

puerto) y el de estado (el cual es bidireccional en algunos pines, los cuales nos dan una retroalimentación sobre el estado de la impresora).

En cuanto a la distribución de pines del registro de datos podemos ver que es de la siguiente forma:

Tabla 8-3 Registro de datos

Offset	Name	Read/Write	Bit No.	Properties
Base + 0	Data Port	Write (Note-1)	Bit 7	Data 7 (Pin 9)
			Bit 6	Data 6 (Pin 8)
			Bit 5	Data 5 (Pin 7)
			Bit 4	Data 4 (Pin 6)
			Bit 3	Data 3 (Pin 5)
			Bit 2	Data 2 (Pin 4)
			Bit 1	Data 1 (Pin 3)
			Bit 0	Data 0 (Pin 2)

Mientras que la distribución de pines del registro de control tiene las siguientes características:

Tabla 8-4 Registro de control

Base + 2	Control Port	Read/Write	Bit 7	Unused
			Bit 6	Unused
			Bit 5	Enable bi-directional Port
			Bit 4	Enable IRQ Via Ack Line
			Bit 3	Select Printer
			Bit 2	Initialize Printer (Reset)
			Bit 1	Auto Linefeed
			Bit 0	Strobe

Para referirse a cada uno de los registros se debe trabajar con su dirección base, en el caso de este programa la dirección es la 378 hexadecimal, y una de las modificaciones más importantes que se realizaron a estos registros fue el cambiar la palabra de control de la dirección 37A hex. Poniendo en alto el bit 5 (32 decimal) para habilitar el bidireccionamiento del registro de datos.

Debido a que se van a multiplexar ambas señales, tanto la de oxígeno disuelto como la de temperatura, se implementó una rutina que cambia los valores del puerto paralelo para permitir habilitar las interrupciones externas del microcontrolador. Esto es cambiar la palabra lógica del puerto de control de 32 decimal a

El registro de estado estará dado por la siguiente configuración:

Tabla 8-5 Registro de estado

Base + 1	Status Port	Read Only	Bit 7	Busy
			Bit 6	Ack
			Bit 5	Paper Out
			Bit 4	Select In
			Bit 3	Error
			Bit 2	IRQ (Not)
			Bit 1	Reserved
			Bit 0	Reserved

9 Conclusiones y trabajo futuro

9.1 Conclusiones

En este trabajo se realizó una caracterización de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, se investigó su funcionamiento, y después de estudiar a profundidad los diferentes procesos que se llevan a cabo dentro de ella, se diseñó un sistema de control que regula la cantidad de oxígeno en el reactor biológico variando la velocidad del soplador en función del oxígeno disuelto, de la temperatura y del flujo (influyente).

Se eligió como opción de control el control difuso por su alta capacidad de adecuarse a sistemas que se evalúan de manera cualitativa, así como por su versatilidad, facilidad de diseño y capacidad de plasmar el conocimiento de un experto en un sistema de control.

Se propusieron y evaluaron 24 reglas, y se ajustaron las funciones de membresía para obtener un sistema de control que fue sometido a pruebas y posteriormente validado por el experto M. C. René Lara.

Como estrategia de control para la velocidad del motor se eligió la de V/F por ser confiable en lazo abierto, por su precisión y porque se puede implementar sin modificar el motor.

La simulación del control difuso y el control del motor se realizó en Matlab con valores reales y se obtuvieron resultados que fueron validados por el experto.

También se diseñaron y propusieron un circuito para medir el oxígeno disuelto, y otro para medir la temperatura. Ambos circuitos se calibraron y se comprobó su buen funcionamiento comparando los valores obtenidos con sensores de uso comercial.

Adicionalmente se diseñó e implementó un sistema de adquisición de datos que captura los valores obtenidos por el oxímetro y el termómetro, y los entrega a una

aplicación programada en Visual Basic que los despliega y facilita el monitoreo de estas dos importantes variables para estudiar su comportamiento y las tendencias que presentan.

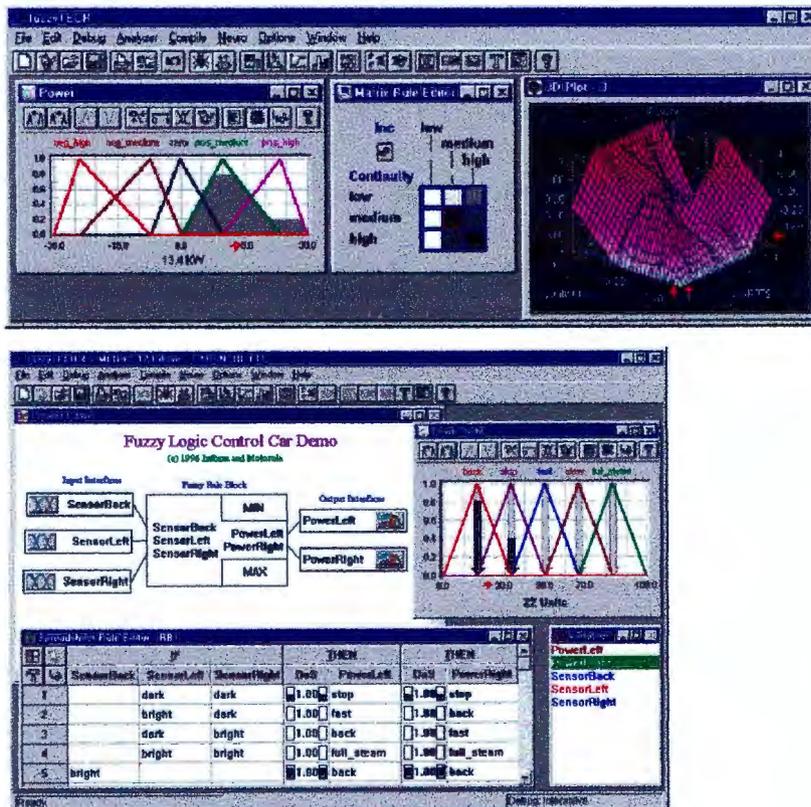
Es factible darle continuidad a este trabajo, el trabajo futuro se menciona en el siguiente apartado.

9.2 Trabajo futuro

Como trabajo a futuro se contempla la implementación del control difuso, que se puede realizar de muchas maneras. Sin embargo se recomienda emplear un microcontrolador que preferentemente tenga un set de instrucciones para el control difuso. La familia 68HC12 de Motorola cuenta con un amplio set de instrucciones para la programación de un control difuso.

Con el editor y analizador fuzzyTECH de motorola se pueden programar fácilmente las funciones de membresía, así como las reglas de control.

Las funciones de membresía y el editor para reglas se pueden evaluar en superficies, y todo desde un ambiente windows. Además se tienen varios editores para programar las reglas.



En la figura de arriba se aprecia cómo se puede monitorear el disparo de las reglas y el estado de las variables.

La implementación ayudará al análisis de la respuesta del sistema y al ajuste de las funciones de membresía. También se realizó un programa en Matlab que simula el control difuso de la PTAR por el método de Sugeno para una futura implementación de redes neuronales. El código permite un mejor control sobre las funciones de membresía ya que la media y la desviación estándar se introducen de manera numérica y no aproximada como en el editor de control difuso.

Otra parte del trabajo a futuro consiste en comparar otras estrategias de control para la velocidad del motor tales como Control Directo del Par (CDP) o control vectorial.

Una parte fundamental es la medición de las variables de entrada, en este trabajo se presenta un sensor de oxígeno y uno de temperatura, sin embargo haría falta un sensor para medir el flujo del influente.

Se hizo el diseño de sistema de R/F para el módulo de adquisición de datos, por lo que posteriormente se podría implementar este sistema inalámbrico.

En una segunda etapa del proyecto se podría buscar controlar otras variables tales como la tasa de recirculación de lodos activados o la purga de los mismos.