



DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

OPCIÓN I.- TESIS

TRABAJO PROFESIONAL

**“DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA
RESIDUAL EN UN PROCESO DE PRODUCCIÓN DE
AZÚCAR DE CAÑA PARA CUMPLIR CON LA NORMA
NOM-001-SEMARNAT-2021 A TRAVÉS DE UN ESTUDIO
TÉCNICO Y BAJO EL ENFOQUE DE AGENTES
INTELIGENTES”**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

PRESENTA:

ING. GISELLE RIVERA JÁCOME

DIRECTOR DE TESIS:

DR. ALBERTO A. AGUILAR LASSERRE

CODIRECTOR DE TESIS:

DR. OCTAVIO RICO CONTRERAS



Orizaba, Veracruz, **17/mayo/2023**
Dependencia: **División de Estudios de
Posgrado e Investigación**
Asunto: **Autorización de Impresión**
OPCION: I

C. RIVERA JÁCOME GISELLE
Candidato a Grado de Maestro en:
INGENIERÍA INDUSTRIAL
PRESENTE

De acuerdo con el reglamento de Titulación vigente de los Centros e Institutos Tecnológicos Federales del Tecnológico Nacional de México, de la Secretaría de Educación Pública, y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo respecto a su Trabajo Profesional titulado:

**"DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN UN PROCESO DE
PRODUCCIÓN DE AZÚCAR DE CAÑA PARA CUMPLIR CON LA NORMA NOM-001-
SEMARNAT-2021 A TRAVÉS DE UN ESTUDIO TÉCNICO Y BAJO EL ENFOQUE DE AGENTES
INTELIGENTES"**

Comunico a usted que este Departamento concede su autorización para que proceda a la impresión del mismo.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA - TÉCNICA - CULTURA®


CUAUHTEMOC SANCHEZ RAMIREZ
**JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**



CSR/magh


OG-13-F06



Orizaba, Veracruz **Mayo 4, de 2023.**
Asunto: **Revisión de trabajo escrito**

C. CUAUHTEMOC SANCHEZ RAMIREZ
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
P R E S E N T E.-

Los que suscriben, miembros del jurado, han realizado la revisión de la Tesis del (la) C.:

RIVERA JÁCOME GISELLE

La cual lleva el título de:

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN UN PROCESO DE
PRODUCCIÓN DE AZÚCAR DE CAÑA PARA CUMPLIR CON LA NORMA NOM-001-
SEMARNAT-2021 A TRAVÉS DE UN ESTUDIO TÉCNICO Y BAJO EL ENFOQUE DE AGENTES
INTELIGENTES**

y concluyen que se acepta.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA - TÉCNICA - CULTURA®

PRESIDENTE: **DR. ALBERTO A AGUILAR LASSERRE**

FIRMA

SECRETARIO: **M.C. MAGNO ÁNGEL GONZÁLEZ HUERTA**

FIRMA

VOCAL: **MII CONSTANTINO GERARDO MORAS
SÁNCHEZ**

FIRMA

VOCAL SUP.: **DR. JOSÉ OCTAVIO RICO CONTRERAS**

FIRMA

TA-09-F18



Declaración de originalidad y cesión de derechos

Orizaba, Veracruz, el día 19 del mes de mayo del año 2023.

El(la) que suscribe

C. Giselle Rivera Jácome:

Declaro que esta tesis, que tiene una extensión de 135 cuartillas, ha sido escrita por mí y constituye el registro escrito del trabajo de la tesis titulada: “Diseño de un sistema de tratamiento de agua residual en un proceso de producción de azúcar de caña para cumplir con la NORMA NOM-001-SEMARNAT-2021 a través de un estudio técnico y bajo el enfoque de agentes inteligentes” del programa: maestría en ingeniería industrial bajo la asesoría y dirección del (la) Dr. Alberto Alfonso Aguilar Lasserre y Dr. Octavio Rico Contreras y no ha sido sometida en ninguna otra institución previamente.

Todos los datos y las referencias a materiales ya publicados están debidamente identificados con su respectivo crédito e incluidos en las notas bibliográficas y en las citas que se destacan como tal y, en los casos que así lo requieran, cuento con las debidas autorizaciones de quienes poseen los derechos patrimoniales. Por lo tanto, me hago responsable de cualquier litigio o reclamación relacionada con derechos de propiedad intelectual, exonerando de toda responsabilidad al Tecnológico Nacional de México campus Orizaba.

También declaro que, al presentar esta tesis, cedo los derechos del trabajo al Tecnológico Nacional de México campus Orizaba para su difusión, con fines académicos y de investigación, bajo las regulaciones propias de la institución y que si existe algún acuerdo de confidencialidad de la información lo haré saber en forma escrita para que se omitan las secciones correspondientes.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y del director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: depi_orizaba@tecnm.mx. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente de este.



Giselle Rivera Jácome

Contenido

Contenido de figuras.....	iv
Contenido de tablas	vi
Contenido de ecuaciones	vii
Resumen	ix
Summary.....	x
Introducción.....	1
1. Capítulo I Generalidades	2
1.1. Introducción	2
1.2. Antecedentes	2
1.3. Planteamiento del problema.....	3
1.4. Objetivos.....	4
1.4.1 Objetivo general	4
1.4.2 Objetivos específicos.....	4
1.5. Justificación	4
1.6. Hipótesis	5
1.7. Conclusión	5
2. Capítulo II Marco teórico	6
2.1. Introducción	6
2.2. Estudio técnico.....	6
2.3. Aguas residuales industriales.....	8
2.4. Industria azucarera	8
2.5. Contaminación de la industria azucarera	9
2.6. Tratamiento de aguas residuales	9
2.6.1 Planta de tratamiento de aguas residuales	10
2.7. Principales contaminantes en las aguas residuales	11

2.7.1	DBO (Demanda bioquímica de Oxígeno)	11
2.7.2	DQO (Demanda química de Oxígeno)	12
2.7.3	SST (Sólidos suspendidos totales).....	12
2.7.4	PH (Potencial de Hidrógeno).....	13
2.8.	Norma oficial mexicana (NOM-001-SEMARNAT-2021).....	14
2.9.	Simulación Montecarlo.....	14
2.10.	Dinámica de sistemas	15
2.11.	Agentes inteligentes	17
2.12.	Estado del arte	18
2.13.	Conclusión.....	23
3.	Capítulo III Metodología	26
3.1.	Introducción	26
3.2.	Metodología propuesta	26
3.3.	Visita al ingenio para conocimiento de proceso y problemática.	27
3.4.	Definición y establecimiento de objetivos del proyecto.	35
3.5.	Obtención de datos.....	37
3.6.	Simulación DS (Dinámica de sistemas).....	41
3.6.1	Validación mediante prueba t-pareada	47
3.6.2	Corridas óptimas.....	49
3.7.	Simulación Agentes inteligentes.....	52
3.8.	Descripción del tren de tratamiento de agua residual	55
3.8.1	Secuencia de tratamiento	56
3.8.1.1	Tratamiento fisicoquímico por flotación tipo DAF.....	56
3.8.1.2	Tratamiento anaerobio tipo UASB.....	58
3.8.1.3	Tratamiento aerobio mediante lodos activados	59

3.8.1.4	Clarificación	60
3.8.1.5	Desinfección.....	61
3.8.1.6	Secado de lodos	61
3.8.1.7	Reúso y/o envío hacia la descarga final actual.....	61
3.9.	Estudio técnico.....	62
3.10.	Aplicación de simulación Montecarlo (@RISK)	65
3.10.1	Identificar problemática.....	65
3.10.2	Definir variables de entrada.....	66
3.10.3	Configurar simulación	67
3.11.	Conclusión.....	69
4.	Capítulo IV Resultados.....	70
4.1.	Introducción	70
4.2.	Resultados de simulación Montecarlo	70
4.2.1	Beneficios económicos	76
4.3.	Resultados de simulación con dinámica de sistemas	81
4.4.	Resultados de simulación basada en agentes	83
4.5.	Conclusión	85
5.	Capítulo V Conclusiones	86
6.	Referencias	89
7.	ANEXO I.....	93

Contenido de figuras

Figura 1. Criterios por considerar para un estudio técnico. (Elaboración propia).....	7
Figura 2. Descripción general de método Montecarlo. (Anicama Salvatierra, 2015).....	14
Figura 3. Clasificación de variables. (Elaboración propia).	16
Figura 4. Clasificación de variables de acuerdo con su relación o función. (Elaboración propia).....	17
Figura 5. Mecanismo de función de un agente. (Gurrola López & Macías Torres, 2017)...	17
Figura 6. Diagrama secuencial de metodología (Elaboración propia).	26
Figura 7. Diagrama de descarga de agua actual en el ingenio.....	28
Figura 8. Recepción de la caña. (Imagen proporcionada por ingenio).	29
Figura 9. Molienda de caña (Imagen proporcionada por ingenio).	29
Figura 10. Calderas (Imagen proporcionada por ingenio).....	30
Figura 11. Etapa de alcalinización. (Imagen proporcionada por ingenio).....	31
Figura 12. Etapa de clarificación del jugo. (Imagen proporcionada por ingenio).....	31
Figura 13. Etapa de filtrado al vacío. (Imagen proporcionada por ingenio).	32
Figura 14. Etapa de evaporación. (Imagen brindada por ingenio).	32
Figura 15. Etapa de cristalización. (Imagen proporcionada por ingenio).	33
Figura 16. Etapa de centrifugado. (Imagen proporcionada por ingenio).....	33
Figura 17. Disposición de miel final. (Imagen proporcionada por ingenio).	34
Figura 18. Etapa de secado y envasado de azúcar. (Imagen proporcionada por ingenio)....	35
Figura 19. Diagrama de descarga de agua contemplando la planta de tratamiento de agua residual (PTAR).....	36
Figura 20. Ajuste de distribución para datos de toneladas de caña por zafra.	41
Figura 21. Elemento de stock. (Anylogic, 2015).....	42
Figura 22. Elemento de flujo. (Anylogic, 2015).....	42
Figura 23. Elemento de enlace o link. (Anylogic, 2015).....	42
Figura 24. Elemento variable dinámica. (Anylogic, 2015).	43
Figura 25. Elemento parámetro. (Anylogic, 2015).....	43
Figura 26. Configuración para variable "toneladas de caña por zafra".	44
Figura 27. Configuración para variable "horas por zafra"	44

Figura 28. Configuración para variable "metros cúbicos de agua de servicios por tonelada de caña".	45
Figura 29. Diagrama causal para el flujo de agua.	46
Figura 30. Modelo del flujo de PTAR con dinámica de sistemas. (Elaboración propia).	47
Figura 31. Sección de agentes inteligentes.	52
Figura 32. Función de evento.	53
Figura 33. Configuración de evento para cambio de flujo.	53
Figura 34. Modelo flujo PTAR con agente para reducción.	54
Figura 35. Plano topográfico de ubicación de PTAR.	62
Figura 36. Tamaño a escala de PTAR.	63
Figura 37. Layout PTAR.	64
Figura 38. Ajuste de distribución para datos de toneladas de caña	67
Figura 39. Ajuste de distribución a variables restantes.	68
Figura 40. Ajuste de distribución	71
Figura 41. Simulación del beneficio con torre de enfriamiento y condensadores.	77
Figura 42. Simulación del beneficio económico por la generación y tratamiento de biosólidos.	78
Figura 43. Simulación del beneficio energético.	79
Figura 44. Simulación del periodo de recuperación de la inversión en años.	81
Figura 45. Resultados de simulación DS.....	82
Figura 46. Gráfico de litros por hora para modelo DS.	82
Figura 47. Gráfico de metros cúbicos de agua de servicios por tonelada de caña.	83
Figura 48. Resultados de simulación con agente.	84
Figura 49. Gráfico de litros por hora cuando no hay zafra.	84
Figura 50. Diagrama de flujo del sistema de tratamiento.	85
Figura 51. Gráficos de visualización de remoción por etapa de tratamiento.	87

Contenido de tablas

Tabla 1. Cuadro de resumen de trabajos consultados. (parte a)	24
Tabla 2. Cuadro de resumen de trabajos consultados (parte b).	25
Tabla 3. Datos históricos. (Brindado por ingenio).	37
Tabla 4. Datos de consumo de agua. (Brindado por ingenio).	37
Tabla 5. Mediciones de parámetros del agua actualmente sin tratamiento. (Proporcionada por ingenio).....	38
Tabla 6. Límites permisibles para contaminantes básicos (a).	39
Tabla 7. Límites permisibles para contaminantes básicos (b).	39
Tabla 8. Límites permisibles para contaminantes básicos. (c)	40
Tabla 9. Datos recabados para prueba t pareada para toneladas de caña.	47
Tabla 10. Datos recabados para prueba t pareada para horas de zafra.	48
Tabla 11. Datos para cálculo de corridas. (Variable horas/zafra).	49
Tabla 12. Obtención de número óptimo de corridas (a).	50
Tabla 13. Datos para cálculo de corridas (variable: toneladas/zafra).	50
Tabla 14. Obtención de número óptimo de corridas. (b).....	51
Tabla 15. Resumen de cálculos para el sistema de tratamiento (a).	54
Tabla 16. Resumen de cálculos (b).....	55
Tabla 17. Desglose de costos para el proyecto de planta de tratamiento de agua residual. .	65
Tabla 18. Datos de entrada	71
Tabla 19. Datos de Agua consumida	72
Tabla 20. Datos de Agua consumida por zafra.....	72
Tabla 21. Datos para balance actual de agua.....	73
Tabla 22. Balance de agua con proyecto de torre de enfriamiento y planta de tratamiento de agua residual.	73
Tabla 23. Balance agua con proyecto de torre de enfriamiento y planta de tratamiento de tratamiento de agua residual (reutilizando agua de PTAR). (a)	74
Tabla 24. Balance de agua con proyecto de torre de enfriamiento y planta de tratamiento de agua residual (Reutilizando agua de PTAR). (b).....	74
Tabla 25. Diseño de Planta de tratamiento de agua residual (PTAR).	75
Tabla 26. Flujo de lodos, producción base húmeda.	75

Tabla 27. Flujo de lodos, producción base seca.	76
Tabla 28. Producción de Biogás.	76
Tabla 29. Datos de precio de agua.	77
Tabla 30. Datos de precio y beneficios por biosólidos.	78
Tabla 31. Datos de precio y beneficios por bioenergía.	79
Tabla 32. Beneficios económicos totales.	80

Contenido de ecuaciones

Ecuación 1. Ecuación de reacción DBO.	12
Ecuación 2. Ecuación de reacción DQO.	12
Ecuación 3. Determinación de SST.	12
Ecuación 4. Determinación de PH.	13
Ecuación 5 Metros cúbicos de agua por zafra.	45
Ecuación 6. Metros cúbicos de agua por hora.	45
Ecuación 7. Litros de agua por hora por zafra.	45

Agradecimientos:

A Dios:

Por siempre haberme acompañado y guiado a lo largo de esta etapa, por darme fortaleza ante situaciones difíciles no solo en este aspecto académico si no en el familiar y personal.

Agradezco por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y privilegios.

Mi mamá:

A mi madre agradezco eternamente por siempre apoyarme y alentarme a alcanzar mis metas y enseñarme que siempre se puede más, a valorar los momentos buenos, pero también los malos y por instruirme y también motivarme a ser resiliente en la vida.

Dr. Alberto:

A mi asesor, Dr. Alberto, le agradezco su apoyo y su enseñanza, su buena disposición siempre, su comprensión y empatía y sobre todo su paciencia, gracias a su motivación hizo que este proyecto se llevara a cabo y se culminara.

Dr. Octavio:

A mi coasesor, Dr. Octavio, agradezco su buena disposición y cooperación para de alguna forma facilitar todo este proceso de desarrollo del proyecto, de igual forma agradezco el que me haya brindado la oportunidad de formar parte de esto.

Al Tecnológico de Orizaba:

Porque a lo largo de todo este tiempo he realizado mi formación académica, desde la licenciatura hasta el día de hoy que he cursado la maestría en Ingeniería Industria, y que gracias a eso me llevo conocimientos proporcionados por mis maestros, pero también mucho aprendizaje de grandes compañeros como Evelyn, Daniela, Luis, Majo y William, con quienes compartí esta trayectoria y siempre estuvieron dispuestos a apoyarnos entre sí ante cualquier dificultad.

Por último, agradezco también al consejo nacional de ciencia y tecnología por la oportunidad brindada de ser parte de la extensa comunidad de becario, ya que sin ese apoyo no me hubiera sido posible realizar la maestría.

Resumen

En los últimos años, los efectos ambientales de las actividades industriales han aumentado considerablemente y esto a su vez a impactado en los factores suelo, aire y agua del medio ambiente. La industria de la caña de azúcar se encuentra entre las industrias con mayor impacto hacia el medio ambiente, debido a que utiliza grandes cantidades de agua, sobre todo en el lavado de la caña y la condensación de vapor, también incluye suministro de agua a las calderas, soluciones del proceso, para el lavado de los pisos, entre otros. Estas grandes cantidades de agua utilizada son muy pocas veces tratadas para su descontaminación siendo vertidas en los ríos cercanos a la industria provocando un gran efecto de contaminación.

Es muy común que la industria azucarera presente problemas de contaminación ambiental, uno de ellos es la descarga de aguas residuales con alta concentración de materia orgánica, debido a que usualmente no se le da un tratamiento previo, ocasionando problemas al ecosistema acuático y terrestre. (Solano De La Cruz, 2020). Por ello, es necesaria la implementación de un sistema para el tratamiento y aprovechamiento de este importante recurso.

El presente proyecto tiene como finalidad, el diseño de una planta de tratamiento de agua residual en un ingenio del sur del estado de Veracruz, el cual se enfrenta a esta problemática. Esto será para lograr cumplir y mejorar los parámetros requeridos por la NOM-001-SEMARNAT-2021, para reducir el impacto ambiental. Se propone realizar un estudio técnico y desarrollar un sistema del flujo, basado en agentes inteligentes utilizando la simulación de dinámica de sistemas para poder visualizar de manera más clara el escenario o los escenarios posibles y resultados del proceso.

Summary

In recent years, the environmental effects of industrial activities have increased considerably and this in turn has impacted the soil, air and water factors of the environment. The sugarcane industry is among the industries with the greatest impact on the environment, because it uses large quantities of water, especially in the washing of the cane and steam condensation, and includes the supply of water to the boilers, process solutions, washing of floors, among others. These large quantities of water used are rarely treated for decontamination and are discharged into the rivers near the industry, causing a major pollution effect.

It is very common for the sugar industry to present environmental pollution problems, one of which is the discharge of wastewater with a high concentration of organic matter, since it is usually not treated beforehand, causing problems for the aquatic and terrestrial ecosystem (Solano De La Cruz, 2020). Therefore, it is necessary to implement a system for the treatment and use of this important resource.

The purpose of this project is to design a wastewater treatment plant in a sugar mill in the south of the state of Veracruz, which faces this problem. This will be to achieve compliance and improve the parameters required by NOM-001-SEMARNAT-2021, to reduce the environmental impact. It is proposed to carry out a technical study and develop a flow system based on intelligent agents using system dynamics simulation in order to more clearly visualize the possible scenario(s) and process results.

Introducción

De acuerdo con el Departamento de Agricultura de Estados Unidos de América, México es uno de los mayores productores de azúcar en el mundo, ocupando el sexto lugar, pero también, de acuerdo con la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, la industria azucarera en el país representa grandes problemas de contaminación en el agua, ya que se hace un elevado uso de esta en este sector, la descarga de agua con altas temperaturas y gran contenido de materia orgánica (bagazo, cachaza y vinazas), es decir, el agua residual, producto de su operación, representa el 28% del total a nivel nacional; logrando ser el giro que más contribuye en cuanto a la descarga de materia orgánica en aguas residuales, seguido de la industria petrolera con un 19% y también de industria agropecuaria con 17% . (Solano De La Cruz, 2020).

Esta problemática mencionada anteriormente, está presente en la actualidad en un ingenio situado en la zona sur del estado de Veracruz, y lo que se busca es implementar una planta de tratamiento de agua residual para reducir el impacto medioambiental y de esa manera cumplir con los requerimientos que exige la norma: NOM-001-SEMARNAT -2021, explicada de manera general posteriormente en el capítulo II de marco teórico.

Para ello, se presenta a continuación el siguiente proyecto, en donde de primera instancia se hablará de la problemática a la que este ingenio se enfrenta, así también se mencionarán los objetivos que se pretenden lograr, la justificación de dicho proyecto y la hipótesis esperada, además un marco teórico que incluirá información y conceptos referentes al tema de tratamiento de efluentes. Del mismo modo se presentará la metodología llevada a cabo para el cumplimiento de los objetivos así como algunos artículos e investigaciones que se han realizado referentes al tema de efluentes y su tratamiento, finalizando con la mención de las herramientas bajo el enfoque de agentes inteligentes que ayudarán a la representación y/o simulación del flujo del proceso que se llevará a cabo para poder evaluar y analizar los distintos escenarios y finalmente se mostrarán resultados obtenidos y el análisis y conclusión de los mismos.

1. Capítulo I Generalidades

1.1. Introducción

A pesar de la importancia industrial y económica que representa la industria azucarera en nuestro país y además en el estado, como ya se mencionó anteriormente, los ingenios azucareros son de los principales causantes de residuos contaminantes en el medio ambiente debido a sus procesos. Es por eso que surge la necesidad de abordar este tema, y en el presente capítulo se comenzará a adentrar a los puntos de partida, desde lo que representa la industria de este sector en México, seguido de ello la problemática presente en este caso en particular, así como los objetivos por medio de los cuales se pretende buscar alternativas que ayuden a mejorar la situación, además de la justificación de abordar este tema, así como también los resultados que se esperan obtener.

1.2. Antecedentes

La industria azucarera mexicana ha venido transformando sus procesos industriales lentamente en comparación con otras industrias extranjeras del sector-sucroalcoholero, como Brasil, Guatemala, Estados Unidos, Colombia, entre otros.

La gran mayoría de los ingenios azucareros en México, nacieron como trapiches hace más de cien años, y durante el gobierno de Porfirio Díaz en 1940 hubo un mayor crecimiento industrial en los procesos de transformación. Cabe enfatizar que este crecimiento no fue planeado en términos de diseño de capacidad instalada, sino en términos de aumentar las capacidades de producción de manera aislada entre los departamentos al interior de las fábricas de azúcar. En la década de 1980 se construyeron en México 4 ingenios azucareros que nacieron con un diseño planeado en todos sus departamentos, incluido un circuito cerrado de recirculación de agua para enfriamiento por vacío, para evaporar el jugo de la caña de azúcar y favorecer la concentración en tempras de azúcar, utilizadas para producir azúcar estándar. Muy pocos ingenios en México previamente construidos en este periodo tuvieron que realizar modificaciones a sus sistemas de elaboración de azúcar para modernizar sus procesos y parcialmente ir instalando equipos y sistemas que gradualmente redujeran el consumo de agua utilizada para enfriamiento por vacío en los equipos de transferencia térmica que efectúan la evaporación del Jugo.

1.3. Planteamiento del problema

En las últimas dos décadas, se ha enfatizado el interés de proteger el medio ambiente estableciendo nuevas reglas de mitigación ambiental para que empresas o industrias lleven sus procesos bajo normas nacionales o internacionales, y puedan producir bienes y servicios de manera sostenible. Las normas actuales tienen impacto en aire, suelo y agua, el desarrollo de esta investigación está enfocado al consumo responsable y tratamiento del agua que es utilizada en los procesos de elaboración de azúcar.

La presente propuesta de proyecto surge de la necesidad existente de la problemática a la que se enfrenta un ingenio azucarero ubicado en el sur del estado de Veracruz, en cuanto al tratamiento de sus aguas residuales generadas del proceso de producción de azúcar de caña, ya que, esta agua debe cumplir con ciertos parámetros establecidos por la normativa, y para que eso suceda se le debe dar un tratamiento adecuado, así se evitaría sanciones el ingenio por el incumplimiento de la norma y también no se generaría un alto impacto ambiental con las descargas que se realicen al manto acuífero.

El estado de Veracruz es la entidad federativa con mayor concentración de Ingenios azucareros en México con una participación superior al 40% de ellos. Uno de ellos ubicado en la zona sur del estado, presenta las características antes señaladas.

Este ingenio tiene un permiso federal por 13 millones de metros cúbicos de agua para su utilización a lo largo de la zafra, actualmente tiene un consumo declarado de 4 millones de metros cúbicos de agua, sin embargo, los esfuerzos para reducir estos volúmenes no han sido suficientes. Así que se deben seguir realizando esfuerzos para continuar reduciendo los consumos de agua, y esto requiere de grandes inversiones para establecer sistemas de recirculación de agua para enfriamiento y sistemas de tratamiento de agua residual de servicios.

La problemática general del ingenio se divide en dos situaciones: la primera continuar reduciendo el consumo de agua proveniente del río para ser utilizada para realizar el efecto de enfriamiento por vacío para evaporar el jugo de caña y la segunda es el agua de servicios de lavados y limpiezas que contiene presencia de altas cargas orgánicas contaminantes, la cuál debe ser tratada, ya sea para su reúso o descarga. Y para este proyecto de tesis se tiene como prioridad proponer y diseñar un sistema de tratamiento de agua residual de servicios

de limpiezas y lavados con altas cargas orgánicas, para cumplir con la norma NOM-001-SEMARNAT-2021.

1.4. Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Diseñar un sistema de tratamiento de agua residual de servicios de limpiezas y lavados con altas cargas orgánicas y químicas, generada del proceso de producción de azúcar de caña para cumplir con los parámetros de calidad que establece la norma NOM-001-SEMARNAT-2021 y lograr el certificado de calidad del agua que emite la comisión nacional del agua del estado de Veracruz a través de un estudio técnico y técnicas de Simulación e IA.

1.4.2 Objetivos específicos

- Realizar estudio técnico (localización óptima para nuevo proyecto, tamaño del proyecto, ingeniería del proyecto, layout y cálculo de requerimiento de recursos).
- Diseñar un sistema de tratamiento de agua residual en un proceso de elaboración de caña de azúcar que reduzca los parámetros contaminantes.
- Simular flujo de agua para la planta de tratamiento mediante dinámica de sistemas.
- Simular flujo de agua planta de tratamiento basándose en agentes inteligentes.
- Evaluar los beneficios económicos que generaría la implementación de este nuevo proyecto de planta de tratamiento de agua residual.

1.5. Justificación

Las aguas residuales generadas por la industria azucarera significan una problemática grande para la empresa, principalmente porque esto está ocasionando daños irreversibles al medio ambiente, y se está incumpliendo cierta normativa que indica que para el desecho del agua empleada en el proceso se deben cumplir antes ciertos estándares de calidad en ella. Al no cumplir esta normativa, además del medio ambiente, quien también se ve afectada es la empresa misma, puesto que a consecuencia del incumplimiento de la normativa se le adjudican sanciones que por supuesto se convierten en pérdidas. Es por ello la importancia de diseñar una planta de tratamiento de agua que le dé el tratamiento adecuado a esta. El tratamiento de las aguas residuales es un proceso que convierte los contaminantes que

contiene el agua a un efluente que se puede reintegrar en el ciclo del agua, y que puede reutilizarse con otros propósitos. Las plantas de tratamiento de aguas residuales hacen exactamente todo el proceso de depuración y tratamiento del agua, en este caso generada por el ingenio azucarero.

Al llevar a cabo la propuesta y diseño, se puede evaluar el proceso en el que consistirá, es por ello el planteamiento de hacer un estudio técnico, además de que se trata de un proceso el cual se puede analizar, para hacer esto se requiere del uso de herramientas de inteligencia artificial que puedan generar importantes beneficios a este tipo de análisis, que en este caso se habla de la simulación con dinámica de sistemas basado en agentes inteligentes, esto debido a que la dinámica de sistemas se utiliza tanto en el diseño de grandes proyectos de infraestructura, como en la gestión de proyectos empresariales o el lanzamiento de un nuevo proyecto.

1.6. Hipótesis

El diseño y la implementación del sistema de tratamiento de agua residual aportará grandes beneficios, ya que el proceso le dará el tratamiento requerido al agua resultante del proceso de elaboración de azúcar de caña, principalmente al agua de servicios y lavados y con este tratamiento el agua adquirirá las propiedades que le van a permitir cumplir con los parámetros de calidad que exige la NOM-001-SEMARNAT-2021 y por consiguiente cumplirá con el certificado de calidad emitido por la comisión nacional de agua, además de que al llevarse a cabo la implementación de la planta de tratamiento de agua muy probablemente haya residuos generados en alguna de las etapas del tratamiento, los cuales pueden tener un valor agregados y puede haber gran beneficio para el ingenio. El uso de las técnicas de inteligencia artificial será de gran ayuda para la simulación del flujo de tratamiento de agua y también para el análisis de la información con la que se trabaje.

1.7. Conclusión

Con lo anteriormente expuesto, se da apertura al desarrollo del proyecto, pretendiendo atenuar la problemática presentada, con el cumplimiento de cada uno de los objetivos planteados del proyecto, logrando el desarrollo óptimo del mismo, para lograr esto se requieren de conocimientos y conceptos base para conocer y adentrarse más al tema y a las alternativas de solución, es por ello que a continuación, se presenta un marco teórico.

2. Capítulo II Marco teórico

2.1. Introducción

Existen diversas aportaciones de la implementación de este tipo de proyectos, en donde se han probado y puesto en marcha distintas alternativas, en esta revisión de literatura se presentarán conceptos que fungirán un papel importante ya que serán el sustento de desarrollo del proyecto, empezando por la definición y las partes importantes de un estudio técnico, además se hablará del tema de aguas residuales en México y como es que la industria azucarera contribuye a esto, así como las alternativas para combatir el problema partiendo del saber los principales contaminantes y los tipos de tratamientos de agua residual existentes. Considerando para este proyecto el uso de herramientas de inteligencia artificial se presentarán también conceptos como la dinámica de sistemas y agentes inteligentes, aunado a eso el concepto y utilización de la simulación Montecarlo y su importancia en la evaluación de proyectos.

2.2. Estudio técnico

En el estudio de implementación de un proyecto, se deben tomar en cuenta muchos factores para analizar, pero cuando se trata de la implementación de un proyecto con la finalidad de realizar una mejora para la empresa o industria, uno de los análisis que más impacto tienen es el estudio técnico del proyecto.

Técnicamente al hablar de la implementación de un proyecto pueden existir diversos pasos opcionales, como se observa en la Figura 1, en donde la jerarquización va a depender de lo que se pueda realizar en función del grado de beneficios que se busquen. Generalmente se plantea que deben aplicarse los procedimientos y tecnologías más modernos, pero, aunque dicha solución puede ser óptima en cuanto a lo técnico, en el tema financiero no siempre resulta ser lo mejor.

Uno de los resultados que cumple este estudio es definir la optimización de la utilización de recursos disponibles para el servicio o beneficio que dará el proyecto. De manera general, en el estudio técnico deben determinarse los requerimientos de equipos de fábrica para la operación y el monto necesario de la inversión correspondiente para llevarse a cabo. También, con el conocimiento de las características y especificaciones técnicas de los equipos se podrá determinar su disposición en planta, lo que a su vez permitirá dimensionar

las necesidades de espacio físico disponible. Al conocer y/o describir el proceso, esto hará posible, además, conocer los insumos y material que necesitará el mismo. A veces se tienen en cuenta más de una alternativa para implementar la mejora, sin embargo, siempre que existen dudas entre dos o más posibilidades, es mejor no tomar una decisión en una etapa tan preliminar. Esto resulta más entendible cuando se consideran otras variables interrelacionadas, por ejemplo, la localización. Para determinar la localización del proyecto a realizar se deben tomar en cuenta varios factores principalmente el tamaño que se estima del proyecto.

A veces resulta complicado el estudio de carácter técnico cuando se deben tomar en cuenta otros factores particulares del proyecto, como, por ejemplo, si se trata de considerar la perecibilidad de la materia prima que se ocupe en el proceso o del producto terminado, pues aquí ya entran otras condiciones de mercado y demanda. (Sapag Chain & Sapag Chain, 1991).

El estudio técnico se enfoca principalmente en:

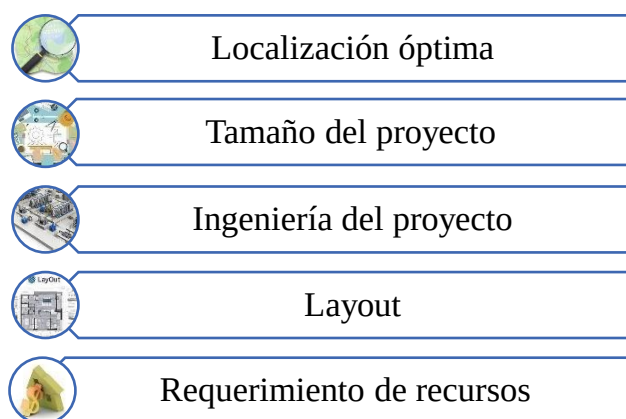


Figura 1. Criterios por considerar para un estudio técnico. (Elaboración propia).

- Localización óptima: lo que va a determinar la ubicación geográfica óptima para el proyecto.
- Tamaño del proyecto: este punto determinará la capacidad máxima del mismo.
- Ingeniería del proyecto: se toman en cuenta los procesos que se requieren para que funcione.

-
- Layout: se realiza la distribución física del proyecto.
 - Requerimiento de recursos: establecer los requerimientos de recursos que se necesitan contemplar para su operación.

(Echeverría Ruíz, 2017).

2.3. Aguas residuales industriales

En México existen problemas serios en cuanto al recurso del agua con que se cuenta, el desabasto y escasez en varias regiones del país es un problema crítico ya desde hace unos años, pero actualmente ha ido empeorando esta situación principalmente por la grave contaminación que existe sobre el agua al ser utilizada de forma inconsciente por las industrias.

De acuerdo con la Secretaría del Medio Ambiente, (SEDEMA, 2021), las aguas residuales industriales son las que provienen de cualquier actividad o negocio en donde haya un proceso de producción y/o transformación del cual hayan sido objeto, que contienen materia orgánica y otras sustancias que alteran su calidad. Por supuesto, son muy variables en cuanto a caudal que usan y la composición, es decir, difieren las características de sus aguas residuales, no solo de una industria a otra, sino también dentro de industrias que sean de un mismo giro.

Usualmente, estas aguas residuales generadas por la industria son mucho más contaminadas que las aguas residuales urbanas, además, con una contaminación mucho más difícil de tratar, lo que implicaría un proceso más complejo para reducir dicha contaminación. (Muñoz Cruz, 2008).

En general, toda industria y en cualquier sector que se emplea y requiere de agua para sus múltiples procesos, genera una alta contaminación del agua, pero resulta ser que una de las industrias que más emplea este recurso para su procesos y servicios, es la azucarera.

2.4. Industria azucarera

Esta industria comprende los ingenios en donde dicha actividad es la obtención del azúcar mediante el proceso de molienda de la caña, en donde se extraen jugos que posteriormente se someten a ciertos procesos unitarios de refinación, y usualmente se pueden obtener distintas variantes clasificadas del producto: azúcar refinada, cruda, concentrada y miel de caña, pero la contraparte de esto es que para la obtención de estos productos la generación de

residuos de manejo especial (RME), resulta ser de gran impacto ambiental. (Anacleto Jiménez, 2022)

Realizar un estudio sobre la generación de residuos peligrosos en la industria azucarera es de gran importancia debido a que la cantidad de residuos peligrosos generados tiene un gran impacto en el medio ambiente, según la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de la Industria Azucarera (SEMARNAT).

2.5. Contaminación de la industria azucarera

Este tipo de industria depende en alto grado de un abastecimiento adecuado de agua, pues es utilizada como componente de productos, o de manera indirecta en el control del proceso productivo o en la limpieza de determinadas operaciones, áreas y partes del proceso productivo del azúcar.

Los ingenios azucareros contribuyen significativamente a la contaminación ambiental al generar aguas residuales, emisiones y residuos sólidos. (SEMARNAT, 2010). Las grandes cantidades de materia vegetal de los molinos se vierten en mantos de agua dulce, es decir, en los ríos, absorbiendo el oxígeno disponible y provocando la muerte masiva de ecosistemas acuáticos. Además, los ingenios liberan gases de combustión durante el procesamiento, y muchos de ellos carecen de equipos de control de emisiones. Si todos los subproductos de la industria azucarera se usaran para convertirlos en productos con valor agregado, ayudaría en gran parte a minimizar la carga de contaminación. Los desechos de la industria azucarera pueden llegar a ser, por lo tanto, un recurso prometedor para la tecnología ambiental si se aplican de forma adecuada y eficiente el tratamiento de aguas.

2.6. Tratamiento de aguas residuales

Las técnicas de tratamiento de aguas residuales de procesos industriales en este sector por lo general deben incluir pretratamientos, esto debido al grado de contaminación que adquieren, como por ejemplo la filtración para la separación de sólidos filtrables, seguido de ello, el empleo de clarificadores para la sedimentación y así tener una reducción de sólidos en suspensión; también el tratamiento biológico, que generalmente es un tratamiento anaeróbico seguido de tratamiento aeróbico, para la reducción de materia orgánica soluble; la eliminación de nutrientes biológicos para reducción de nitrógeno y fósforo; la cloración de efluente cuando se requiere la desinfección; el secado y eliminación de residuos y en algunos

casos, inclusive se opta por el compostaje o la aplicación al terreno de los residuos derivados del tratamiento de aguas residuales cuando ya se tiene una calidad aceptable. (Solano De La Cruz, 2020).

2.6.1 Planta de tratamiento de aguas residuales

Las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), se constituyen por un conjunto de operaciones que incluyen procesos unitarios de origen fisicoquímico o biológico, o también combinación de ellos, los cuales están envueltos por fenómenos de transporte y manejo de fluidos, así como reacciones químicas.

El objetivo de darle un tratamiento a las aguas residuales es corregir la contaminación indeseable que contiene y que ocasionan un incumplimiento de la normativa, el tratamiento que se le da al agua tendrá que eliminar y/o disminuir materias orgánicas. (Méndez Gómez, 2019).

Dentro de las etapas que puede haber en el tratamiento de las aguas residuales se pueden encontrar:

- Tratamiento Preliminar: en esta etapa se remueven los sólidos de mayor tamaño y las arenas presentes en el agua contaminada. También se le conoce como un proceso que elimina los factores que dificultan el funcionamiento de los equipos relacionados con los diversos procesos que componen todo el proceso de tratamiento.
- Tratamiento Primario: aquí la finalidad es remover una parte de los sólidos sedimentables y en suspensión con ayuda de técnicas o métodos físicos y/o químicos. En esta parte, el efluente suele tener una cantidad alta de materia orgánica y por lo general también una DBO (demanda bioquímica de oxígeno) alta.
- Tratamiento Secundario: aquí los materiales orgánicos biodegradables se transforman en materiales estables por acción biológica. Está diseñado principalmente para eliminar sólidos en suspensión y compuestos orgánicos, y se dice que en ocasiones se incluye la desinfección en esta etapa.

-
- Tratamiento Terciario o avanzado: aquí ya se habla de tratamientos adicionales a los tratamientos convencionales para eliminar nutrientes, compuestos tóxicos, exceso de materia orgánica y materia en suspensión.
(Farías Marquez, 2016).

Existen diversas tecnologías que se han usado para tratar aguas residuales industriales, sin embargo, la tecnología o el método de tratamiento depende del tipo de contaminantes que estén presentes. (Omprakash, Dubasi Govardhana, Gopal, Anurag, & Dharm).

2.7. Principales contaminantes en las aguas residuales

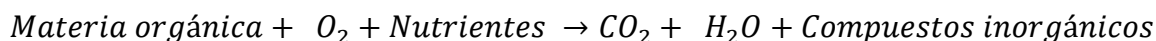
En las aguas residuales, tanto municipales, como industriales, existen variedad de contaminantes a tomar en cuenta cuando se planea diseñar y/o implementar un sistema de tratamiento de agua residual. Entre los más comunes e importantes se encuentran los mencionados a continuación:

2.7.1 DBO (Demanda bioquímica de Oxígeno)

La DBO es la demanda bioquímica de oxígeno que tiene el agua. Que en otras palabras se puede definir como la cantidad de oxígeno que los microorganismos necesitan, especialmente bacterias (aeróbicas o anaeróbicas) y hongos, para consumir durante la degradación de las sustancias orgánicas contenidas en la muestra. Este parámetro se usa como medida del grado de contaminación y se expresa en mgO_2/l o solo mg/l . Dado que la DBO es un proceso biológico, es delicado y requiere mucho tiempo. Debido a que el proceso de descomposición depende de la temperatura, normalmente se realiza a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 5 días y se denomina DBO5 (Ibanez, 2017).

El mecanismo de reacción de la DBO (ver *¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.*), se puede considerar como un proceso en donde organismos vivos ayudan a la oxidación de la materia orgánica hasta convertirse en dióxido de carbono y agua.

Ecuación 1. Ecuación de reacción DBO



(Ingenia UdeA, 2018).

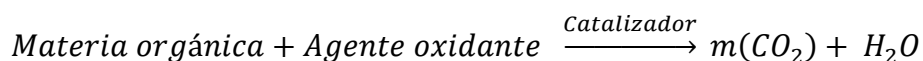
2.7.2 DQO (Demanda química de Oxígeno)

DQO es la demanda química de oxígeno del agua. Se considera como la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la materia orgánica químicamente y convertirla en CO₂ y H₂O. También se expresa en mgO₂/l. Entre más alta es la DQO, más contaminada está el agua.

Dado que la prueba de DQO tarda unas 3 horas, los resultados se obtienen en mucho menos tiempo que la prueba de DBO. La DQO del agua industrial oscila entre 50 y 2.000 mgO₂/l, pero puede llegar hasta los 5.000 en algunas industrias. (Ibanez, 2017).

La reacción puede ser explicada como la oxidación de la materia orgánica por un agente químico a dióxido de carbono y agua, representada en la siguiente ecuación.

Ecuación 2. Ecuación de reacción DQO.



(Ingenia UdeA, 2018).

2.7.3 SST (Sólidos suspendidos totales)

Los sólidos pueden llegar a clasificarse en: sólidos totales, sólidos totales disueltos, sólidos en suspensión y sólidos volátiles en suspensión.

- Sólidos totales en suspensión: la cantidad de lodos que se pueda llegar a producir en el sistema de tratamiento será relacionada directamente con el contenido de sólidos del agua. Son el residuo de la evaporación y secado a 103-105°C.

El contenido de sólidos totales se calcula mediante *Ecuación 3*:

Ecuación 3. Determinación de SST

$$SST = \frac{m_{G4}m_{G3}}{V} * 1000$$

En donde:

SST=Sólidos totales en suspensión (mg/l)

mG4= masa del crisol sumando el papel filtro con el residuo, eso después de la evaporación.

mG3= masa del crisol sumando el papel filtro

V= volumen de la muestra (ml)

- Sólidos volátiles en suspensión: resultan ser una fracción o porción de los sólidos que se han volatilizado, a una cierta temperatura que puede variar entre 550 ± 50 °C.
- Sólidos sedimentables: estos representan la cantidad de lodo que se puede remover por sedimentación simple y se pueden determinar por medio del volumen ocupado por sólidos asentados al fondo de un cono Imhoff.
- Sólidos disueltos: se refiere a la materia que es soluble y que generalmente para su remoción requiere de oxidación biológica.
- Sólidos suspendidos: son aquellos que no se disuelven y son la diferencia entre los sólidos totales de la muestra filtrada y no filtrada.

(Viracucha Ortiz, 2012).

2.7.4 PH (Potencial de Hidrógeno)

Es una medida del grado de alcalinidad o acidez que tenga el agua, es importante que en un sistema de tratamiento en donde implica un proceso biológico, se mantenga un PH (6-8). Este se mide con un electrodo de vidrio al que se le llama potenciómetro.

Por definición; el PH es igual al logaritmo negativo de la concentración de iones en la solución.

Ecuación 4. Determinación de PH.

$$pH = -\log[H_3O^+]$$

(Viracucha Ortiz, 2012).

2.8. Norma oficial mexicana (NOM-001-SEMARNAT-2021)

Esta norma es la que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas. Entre los aspectos que se encuentran en la NOM-001-SEMARNAT-2021 se pueden consultar las especificaciones, métodos de prueba, muestreos, parámetros de temperatura, graduación de la toxicidad, y el encuadre de usos posteriores para lijar la estipulación y cuidado de los cuerpos de agua, de esta manera como la avenencia con normas internacionales.

2.9. Simulación Montecarlo

El mundo actual, incluido el sector industrial está en constantes cambios económicos, y sociales es por eso por lo que las estrategias empresariales de inversión resultan ser más sofisticadas y arriesgadas, además de que tiende a haber mayores exigencias del mercado. En escenarios como este, el modelo de la simulación de Monte Carlo (ver *Figura 2*) es una herramienta que se ha utilizado y ha servido durante varios años para resolver problemas en situaciones de riesgo e incertidumbre. (Taco Mena, 2017).

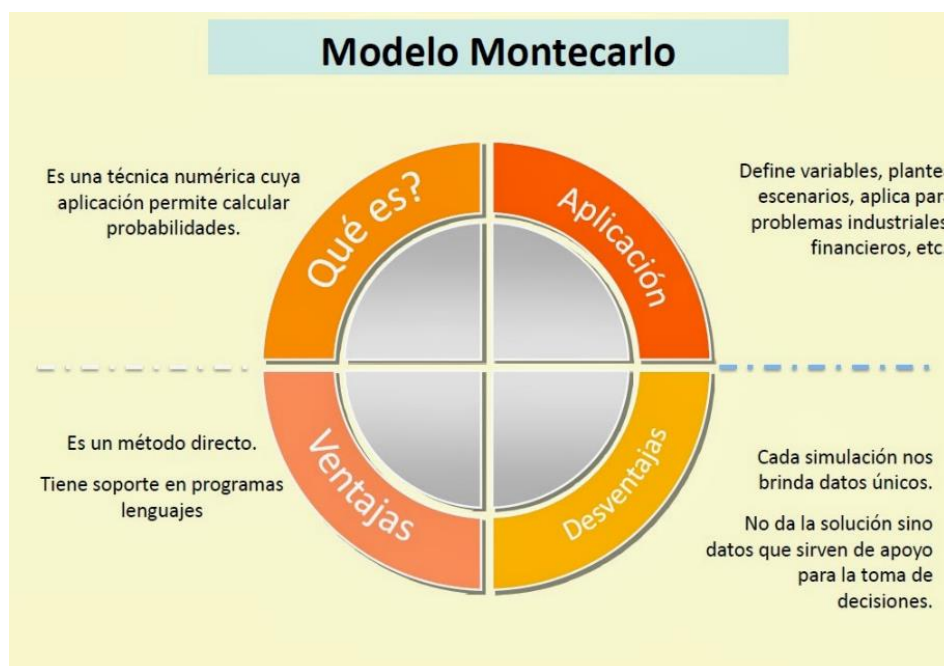


Figura 2. Descripción general de método Montecarlo. (Anicama Salvatierra, 2015).

2.10. Dinámica de sistemas

Esta técnica fue desarrollada por Jay W. Forrester en los años 50, inicialmente con el nombre de Dinámica Industrial, surgió del trabajo previo en sistemas de control de realimentación y fue aplicada inicialmente en modelos organizacionales. Años después, se empezó a aplicar la teoría de la realimentación en otro tipo de procesos, como los biológicos, ambientales, y sociales, y debido a esto se amplió su campo de aplicación, y se cambió su nombre a Dinámica de Sistemas.

Esta técnica estudia cómo la estructura de realimentación de un sistema produce su comportamiento dinámico, es decir, estudia las variables que intervienen en el proceso de realimentación existente y como una acción puede afectar la condición de un sistema y esa condición modificada puede afectar a otra acción, es decir, se enfoca en las relaciones de causalidad. Por lo general debido a la estructura de estos modelos, resulta sencillo casi siempre representarlos con ecuaciones de un lenguaje tradicional, en otras palabras, podemos decir que se pueden expresar con conjunto de ecuaciones algebraicas. . (Izquierdo, Galán, Santos, & Del Olmo, 2008).

La estructura del fenómeno o sistema a ser modelado se representa a partir de niveles y flujos. Los niveles son acumulaciones dentro del sistema, resultantes de la diferencia acumulada entre los flujos de entrada y los de salida; son las integrables de tiempo de las tasas de flujo; acumulan los resultados de acciones tomadas en el pasado y determinan la futura evolución del sistema. Las tasas de flujo son las que establecen los flujos presentes, entre los niveles del sistema.

Para Forrester, el uso principal de un modelo dinámico es el de estudiar la influencia de las variables sobre el comportamiento del sistema; influencia que se ve reflejada en la toma de decisiones a partir de las diferentes circunstancias que pueden surgir. (Wooldrige, 2002).

La dinámica de sistemas no pretende sustituir a los de gestión de proyectos en la realización de tareas que componen un proyecto, pero puede ayudar a comprender y prevenir los habituales problemas que aparecen en la ejecución de este.

Dentro de las variables que pueden estar involucradas podemos encontrar clasificación de estas, ya que estas pueden representar una característica, cualidad o valor y puede ser

cuantificada o medida de acuerdo con sus propiedades. Las variables pueden designar aspectos o características al objeto de estudio, también pueden analizar la distribución de un conjunto de datos o una población y dan a conocer o explicar su comportamiento. (Carballo Barcos & Guelmes Valdés, 2016).

De acuerdo con su naturaleza se pueden clasificar de la siguiente manera como se muestra en *Figura 3*.

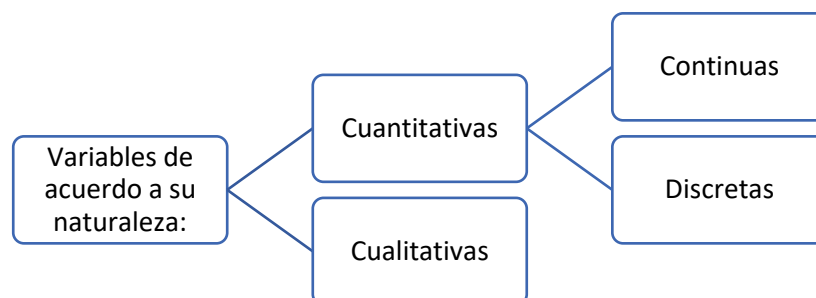


Figura 3. Clasificación de variables. (Elaboración propia).

Atendiendo a este criterio de clasificación, las variables cuantitativas son aquellas que indican las propiedades que pueden ser medidas o contadas. Y dentro de estas se encuentran las variables continuas, las cuales pueden tomar valores infinitos de un rango determinado de acuerdo con el instrumento de medida que se esté considerando. También la otra clasificación dentro de las variables cuantitativas son las variables discretas, estas solo pueden tomar determinados valores enteros dentro de un rango que considere el investigador. Por otro lado, en cuanto a las variables cualitativas, se definen como aquellas que representan un atributo o una característica del objeto de estudio y su representación no puede ser numérica. (Carballo Barcos & Guelmes Valdés, 2016).

Otra clasificación importante y común es de acuerdo con su función o relación (*Figura 4*) y de acuerdo con este criterio, se clasifican de la siguiente manera; variables independientes y variables dependientes, siendo las primeras aquellas variables que se puede manipular para describir o transformar el objeto de estudio dentro de una investigación, son las que explican el comportamiento y cambios de las variables dependientes. En cuanto a las variables se definen como aquellas que se modifican por la acción de la anterior mencionada, y son las

que dan origen a los resultados en la investigación que se esté realizando. (Carballo Barcos & Guelmes Valdés, 2016).

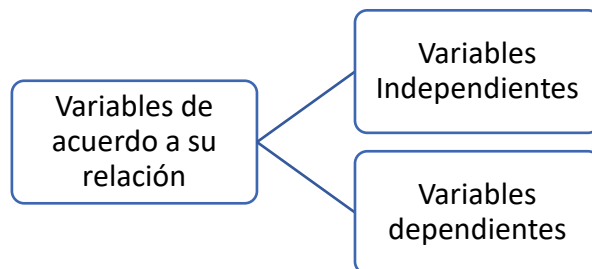


Figura 4. Clasificación de variables de acuerdo con su relación o función. (Elaboración propia).

2.11. Agentes inteligentes

Dentro de la inteligencia artificial (IA), se encuentran los agentes inteligentes que se consideran como una entidad autónoma que es capaz de observar, percibir y actuar sobre un entorno, es decir, realiza y dirige su actividad hacia algún objetivo, por eso se considera que es racional, porque se dice que los agentes inteligentes se pueden entrenar para aprender y usar el conocimiento para lograr sus tareas (ver *Figura 5*). (Coloma Garofalo, Vargas Salazar, Sanaguano Guevara, & Rochina, 2020).

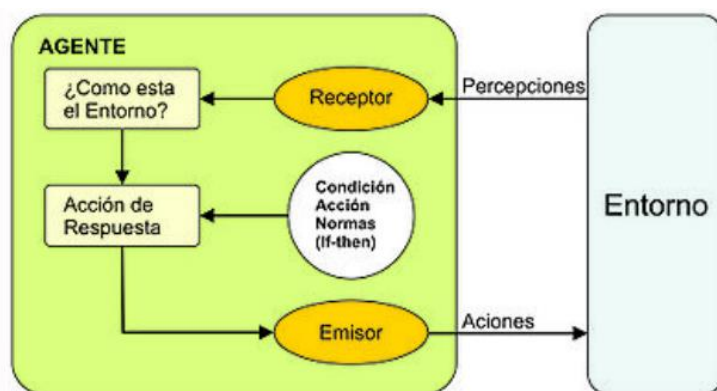


Figura 5. Mecanismo de función de un agente. (Gurrola López & Macías Torres, 2017).

En otras palabras, un agente se determina como un elemento que es capaz de percibir su ambiente y que responde o actúa en tal ambiente mediante efectores. Los Agentes Inteligentes son racionales, es decir, hacen lo correcto, esto es lo que le permite al agente obtener el mejor desempeño. Para evaluar el desempeño es necesario definir qué tan exitoso ha sido un agente en la consecución de los objetivos para el cual fue programado.

Los agentes suelen ser utilizados para representar organismos individuales (vivos o no, reales o inexistentes) o colectivos (como organizaciones o sus dependencias). Un modelado basado en agentes es un modelo computacional que representa agentes (con estados independientes y reglas de comportamiento individuales). Los agentes no tienen un conocimiento global del sistema ni pueden anticipar las consecuencias de sus decisiones individuales en él.

Los agentes se pueden clasificar, de acuerdo con las siguientes características:

- Autonomía: cuando el agente tiene la capacidad de tomar decisiones en forma independiente, teniendo control de su estado interno y de sus acciones.
- Reactividad: un agente reactivo tiene la capacidad de percibir su ambiente y responder oportunamente a los cambios que ocurren en él.
- Proactividad: cuando el agente tiene la capacidad de tomar la iniciativa, y no solamente de actuar en respuesta a lo que perciba del ambiente.

(Gácita González, 2012).

2.12. Estado del arte

En esta sección se presentará la revisión de publicaciones que implican técnicas y metodologías relacionadas con el tema de estudio, que es el tratamiento de aguas residuales.

La industria azucarera es considerada como una de las más antiguas tanto en el país como en el mundo. Este tipo de industrias se proyectaron y construyeron sin tomar en cuenta el volumen y e impacto de los residuales líquidos que se generarían, los cuales se caracterizan por ser altamente agresivos y tóxicos, las consecuencias de estas decisiones tomadas han traído enormes daños al medio ambiente, los que en la mayoría de las veces desafortunadamente son irreversibles. En el proceso de producción de azúcar, además del producto principal, se obtienen condensados que se generan en diferentes equipos de acuerdo con la etapa del proceso, estos condensados usualmente deben ser analizados para determinar

su calidad fisicoquímica y determinar su destino; ya sean tanques de agua para alimentar la caldera o tanques para uso del proceso tecnológico, por ejemplo, agua de imbibición, lavado en centrífugas, entre otras. En caso particular de este trabajo de investigación realizado por (Motito Legrá & Del Toro Álvarez, 2014), se menciona que una parte del volumen de condensado total destinado hacia la caldera está siendo afectado por contaminantes que son reflejados en los análisis fisicoquímicos que se realizan y si no se les da un tratamiento adecuado pueden afectar la operación de otros procesos.

Como es bien mencionando en la investigación realizada por (Panhwar & Bhutto Shahid, 2021), el sector industrial de la caña de azúcar desempeña un papel vital en las economías de todo el mundo, pero al mismo tiempo también es responsable de intensificar los problemas medioambientales al generar efluentes con una gran carga de contaminantes, lo que supone una amenaza para el medio ambiente, las masas de agua dulce y la vida acuática. Es un hecho que no hay una sola técnica de tratamiento que sea efectiva para el tratamiento de efluentes industriales, se han empleado muchos métodos de tratamiento de las aguas residuales de la industria de la caña de azúcar, como el tratamiento químico, el tratamiento físico, el intercambio iónico, la electrocoagulación y el tratamiento biológico. En este estudio, se utilizó la técnica fisicoquímica para eliminar los principales contaminantes según las normas de efluentes de la Agencia de Protección Ambiental de Sindh (SEPA), que incluyen la demanda química de oxígeno (DQO), la demanda biológica de oxígeno (DBO), el total de sólidos en suspensión (SST) y el contenido de aceites y grasas.

Entre las tantas alternativas que se han buscado para darle solución a esta problemática, (Khan, Kalsoom, Mahmood, Riaz, & Khan, 2003) , han dicho en su investigación que se ha desarrollado un proceso de tratamiento (principalmente fisicoquímico) para reducir los efectos nocivos de los efluentes de los ingenios azucareros y salvaguardar el hábitat acuático. El objetivo de estos estudios es controlar la eutrofización, es decir, el aporte en exceso de nutrientes inorgánicos, el aspecto estético y, sobre todo, proteger los cultivos de peces de los daños causados por el vertido continuo de los residuos de los ingenios azucareros, que son muy exigentes en oxígeno.

El problema de los efluentes generados por las industrias azucareras sucede en muchos lugares, por ejemplo, en el estudio de (Verma, Mandal, Singh, & Chand, 2021) , mencionan

que, ante la alarmante situación actual de la India, la agencia reguladora CPCB ordenó a cada industria azucarera que el límite máximo de descarga de efluentes sea de 200 litros por tonelada de caña molida. Y también es obligatorio instalar sistemas de monitorización continua de emisiones en línea (OCEMS) a la salida de la ETP (Planta de tratamiento de efluentes) para la evaluación continua de la calidad del efluente tratado. En general, el efluente una vez que fue tratado se aplica ampliamente a la tierra agrícola en la India. Pero los efluentes tratados por la industria azucarera tienen el potencial de contaminar tanto las masas de agua como las tierras agrícolas si no se tratan adecuadamente. La mayoría de las industrias azucareras se enfrentan a problemas debido a la generación de una enorme concentración de SDT (sólidos totales disueltos) y especialmente de la concentración de sulfato del efluente crudo. Aunque la concentración de sulfato puede reducirse mediante el método de precipitación de calcio, la tecnología de sedimentación tubular es ampliamente aceptada para reducir los SDT y la concentración de sulfato. El principio de la tecnología avanzada de sedimentadores tubulares tiene como objetivo dirigirse a los flóculos finos sedimentables y permitir que los flóculos más grandes se sedimenten en el fondo del tanque. Para que, de este modo, la tecnología de sedimentación tubular no sólo reduzca los SDT, sino que también reduzca los SST (sólidos suspendidos totales). En general, esta tecnología está siendo adoptada ampliamente por las plantas de tratamiento de efluentes comunes (CETP) para tratar los efluentes de las industrias pequeñas. Sin embargo, esta tecnología resulta de un costo elevado y la adaptación de esta tecnología puede no ser posible para las industrias azucareras a pequeña escala.

Es por ello la suma importancia de implementar tecnologías que busquen darle un tratamiento al agua, antes y después del proceso para el cual se le vaya a dar uso, de ahí surge la necesidad de las plantas de tratamiento de agua. El tratamiento de aguas residuales para su reúso, o reintroducción a aguas superficiales no es una opción muy común en México, por lo que se debe optar por una tecnología alternativa que permita reutilizar y/o devolver las aguas residuales a la naturaleza, pero con buena calidad, sin gastar tanta energía y sin producir tantos contaminantes.

En cuanto a las plantas de tratamiento y su tecnología, según (Lahera Ramón, 2010) es evidente que la infraestructura que se tiene en el país para hacerse cargo del tratamiento de

las aguas residuales no es suficiente para cubrir las necesidades. Según esta investigación, durante años se ha reportado una cantidad importante de plantas de tratamiento sin funcionar; esto significa recursos financieros desperdiciados en un país que no se puede dar ese lujo. Hablando de economía, debido a que implica un trabajo de ingeniería especializada que casi siempre es costosa, este tipo de plantas de tratamiento de agua a veces tienen un costo bastante elevado y fuera del alcance para muchos lugares del país.

(Pérez, Tijero, & Moral, 2014) mencionan que la coagulación y floculación, son procesos tradicionales en el tratamiento de aguas residuales. Aunque también se pueden utilizar pretratamientos en la etapa de separación como la flotación o sedimentación. Para este estudio, se decidió seleccionar la técnica FBRM la cual mide partículas para supervisar y controlar la floculación en el tratamiento de aguas residuales, para la selección del floculante para tener una mejor eficiencia en la etapa de separación se basaron en experiencias previas realizadas en otras aplicaciones. La finalidad de este estudio fue determinar el tipo y la dosis óptima de floculante.

En el trabajo realizado por (Rodríguez Miranda, García Ubaque, & Pardo Pinzón, 2015), mencionan que las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales (PTARM) se pueden considerar como un proceso productivo: en este caso las salidas serían representadas por los contaminantes que sean removidos de las aguas residuales crudas y la entrada sería el costo de operación y también mantenimiento de la planta de tratamiento. Estas plantas generalmente se usan para eliminar los contaminantes presentes en las aguas residuales sin tratar y deben responder a grandes variaciones en el flujo o la entrada a lo largo del tiempo, y también debe haber variaciones en las concentraciones o componentes de esas aguas residuales. Este artículo presenta la metodología desarrollada por los autores, teniendo en cuenta aspectos técnicos, económicos y ambientales, como apoyo a la decisión de futuras inversiones en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, considerando factores y elementos multidisciplinarios. A la hora de seleccionar la metodología o tecnología de tratamiento de aguas residuales más adecuada, ésta debe contribuir a la decisión de invertir recursos económicos en el tratamiento del agua. Esta metodología propuesta revela los elementos y aspectos técnicos de un diseño interdisciplinario para la aceptación de tecnología, apropiados al contexto que aseguren la confiabilidad, factibilidad, flexibilidad,

disponibilidad y análisis de procesos y el procesamiento y manejo de subproductos que cumplan con la normativa ambiental para vertidos.

En el trabajo de (Herrera Vega, 2018) recalca que la contaminación de ríos y arroyos se han convertido en uno de los problemas ambientales más graves del siglo XXI; nuestra sociedad, no deja de estar lejos de estos hechos reales y palpables, que año tras año se vive en el tiempo de producción de azúcar por los ingenios (en Andahuasi, para este caso en particular). La intensa quema de la caña junto con la fuerte contaminación producida por el ingenio ocasiona un deterioro de recursos naturales en flora y fauna, así como también del medio ambiente. El impacto ambiental en nuestros días es sinónimo de contaminación al suelo, agua y aire. Este trabajo de investigación permitió determinar de qué manera la contaminación del agua superficial originada por un Ingenio Azucarero, se relaciona con el impacto del medio ambiente en el Centro Poblado de Andahuasi 2017. El objetivo se resolvió mediante el método de observación directa, que permitió percibir las propiedades organolépticas de los componentes fisicoquímicos del agua.

(De la Hoz, Izquierdo González, & López Delgado, 2017) reiteran en su trabajo que la industria azucarera es una de las que más contribuyen a la contaminación del medio ambiente, además de que se destaca también como gran consumidor de agua cruda y como la de mayor descarga de residuales líquidos al medio ambiente. El impacto que ha generado el elevado consumo de agua en regiones donde además el recurso resulta limitado, ha sido el impulso al desarrollo de nuevas técnicas que accedan a analizar la administración eficiente del agua en las industrias. Este trabajo se realizó en la Unidad Empresarial de Base del Ingenio Manuel Fajardo. Para ello, se consideró necesario partir de un diagnóstico preliminar del medio, a fin de encontrar una primera aproximación al problema, la caracterización de sus efluentes durante la época de cosecha. Como resultado se obtuvo una caracterización completa del efluente a la salida del ingenio azucarero y en la laguna de oxidación con el fin de establecer soluciones específicas para el aprovechamiento de efluentes en esta industria. Además, se podría reducir el consumo de agua de fuentes externas, así como el consumo de agua por debajo de 1 m³/t y se podría ahorrar entre un 13% y un 15% del vapor generado.

Para (Díaz de los Ríos, Eng Sánchez, Herrera Díaz, & Lorenzo Acosta, 2016) el problema del procesamiento y disposición de los desechos líquidos de la industria azucarera es una

tarea compleja que requiere una solución urgente. La aplicación y promoción de regulaciones ambientales estrictas y la imposición de sanciones a las empresas que no cumplan con estos estándares deberían alentar la acción para proteger el medio ambiente. La composición de estas aguas contaminadas limita su vertimiento directo y en muchos casos su empleo en fertirriego, si se exige por los órganos regulatorios el cumplimiento de las normas tal cual están establecidas, es por ello que el sector debe trabajar en un programa a mediano y corto plazo que permita brindar soluciones a dicha problemática.

Por su parte (Kumar Poddar & Sahu, 2017) mencionan en su investigación que, las aguas residuales de las industrias azucareras tienen características complejas y se considera un reto para los ingenieros medioambientales, en términos de tratamiento como su utilización. Antes de su tratamiento o su rehúso, la determinación de los parámetros fisicoquímicos es un mecanismo importante. Se han introducido y modificado muchos tipos de técnicas y modificadas con este fin, pero dependen de los parámetros de calidad del agua. parámetros de calidad del agua. El objetivo principal de este estudio es determinar las características fisicoquímicas de las aguas residuales de la industria azucarera mediante el método estándar para así designar el tratamiento conveniente.

2.13. Conclusión

En este capítulo se han presentado las bases teóricas que dirigirán a este proyecto, con esta información recopilada se extiende el panorama de la situación a enfrentar y las maneras o alternativas de hacerlo, siempre con la intención de obtener resultados óptimos y convenientes para el ingenio en cuestión.

Es sabido que este tema del tratamiento de aguas residuales no es algo nuevo, y como se pudo apreciar en el apartado 2.12 de estado del arte, en muchos lugares se ha optado por investigar y desarrollar métodos o técnicas que ayuden a reducir la contaminación que generan las aguas residuales no tratadas al medio ambiente, a continuación, se presenta un comparativo de los trabajos consultados desarrollados con esta finalidad de mitigar el problema de contaminación, (Véase *Tabla 1* y *Tabla 2*).

Tabla 1. Cuadro de resumen de trabajos consultados. (parte a)

Título	Autor	Técnicas	Aportación
Estudio de las aguas industriales y residuales en la UEB Central Azucarero “Paquito Rosales”	Motito Legrá, José Alberto; Del Toro Álvarez, Dania. (2014)	• Análisis de calidad. • Análisis fisicoquímicos.	Clasificación de residuos líquidos con base a análisis fisicoquímicos previamente realizados.
“Improved Reduction of COD, BOD, TSS and Oil & Grease from Sugarcane Industry Effluent by Ferric Chloride and Polyaluminum Chloride Coupled with Polyvinyl Alcohol”	Panhwar, Aijaz, Bhutto Shahid. (2021)	• Análisis fisicoquímicos.	Reducción de DQO y DBO mediante experimentación de cloruro férrico y cloruro de polialuminio, mediante diferentes dosis para conseguir resultados óptimos.
“Characterization and treatment of industrial effluent from sugar industry”	Khan, M., Kalsoom, U., Mahmood, T.; Riaz, M.; Khan, A.R. (2003).	• Desarrollo de proceso práctico. • Análisis fisicoquímicos.	Se redujo el alcance de la contaminación debida a los efluentes de los ingenios azucareros y se desarrolló un método de tratamiento económico y factible.
“Infraestructura sustentable: las plantas de tratamiento de aguas residuales”	Lahera Ramón, Virginia. (2010)	• Estadística. - Censos.	Planificación urbana. Optar por alternativas de infraestructura que permitan el abastecimiento de disposición de agua.
“Optimización de los mecanismos de coagulación - floculación mediante un sensor “FBRM” en una Central Térmica de Ciclo Combinado”	Pérez, Ana; Tijero, Antonio; Moral, Ana. (2014)	• Técnica FBRM. • Análisis y cálculo de datos recaudados. - Implementación y Control.	Desarrollar una metodología que permitiera saber la cantidad óptima de floculante. Determinar la eficacia y estabilidad de diversos floculantes.

Tabla 2. Cuadro de resumen de trabajos consultados (parte b).

Título	Autor	Técnica	Aportación
“Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales”	Rodríguez Miranda, Juan Pablo; García Ubaque, César Augusto; Pardo Pinzón, Janneth. (2015)	• Recaudación de datos. • Análisis de procesos y tratamiento de subproductos, bajo normatividad.	Recomendaciones de optimización. La metodología expone elementos técnicos de construcción para la elección de tecnología apropiadas al contexto local o regional.
“Contaminación del agua superficial por un ingenio azucarero y su impacto en el medio ambiente en Andahuasi”	Herrera Vega Héctor Alexis. (2018)	• Observación directa. Análisis de propiedades organolépticas.	Gestión ambiental. Sistemas preventivos y correctivos.
“Caracterización y tratamiento de aguas residuales del central azucarero "Manuel Fajardo", para disminuir la contaminación en la fabricación de azúcar”.	De la Hoz, Izquierdo Yohanna; Izquierdo González, Yaima; López Delgado, Orly M. (2017)	• Análisis fisicoquímico. • Diagnóstico ambiental preliminar.	Se logró disminuir el consumo de agua por debajo de 1 m ³ /t y ahorra entre el 13% y 15% del vapor producido.
“El manejo de los residuales líquidos de la industria de azúcar y sus derivados en Cuba, en el contexto de las legislaciones ambientales actuales”.	Díaz de los Ríos, Manuel; Eng Sánchez, Felipe; Herrera Díaz, Yarelys; Lorenzo Acosta, Yanirirs. (2016).	• Análisis fisicoquímicos. • Análisis estadísticos. Regulaciones ambientales.	Disposición de aguas residuales de la industria azucarera, con base a regulaciones ambientales y políticas de penalización.
“Quality and management of wastewater in sugar industry”	Kumar Poddar Pradeep; Sahu Omprakash (2017).	• Análisis fisicoquímicos.	Conocimiento y determinación de principales parámetros fisicoquímicos a analizar en las aguas residuales de la industria azucarera.

3. Capítulo III Metodología

3.1. Introducción

Para llevar a cabo cualquier trabajo o investigación de forma correcta y ordenada, se requiere del seguimiento de ciertos pasos para ir recopilando información y trabajar con ella. Este capítulo ofrece una descripción detallada de la metodología planteada y empleada para el desarrollo de este proyecto, iniciando con la visita realizada al ingenio y la definición de los objetivos del proyecto, seguido de esto, la obtención de información y datos otorgados por el ingenio para realizar los siguientes puntos que fueron; la simulación con dinámica de sistemas y con agentes inteligentes, así también el desarrollo del estudio técnico y la simulación Montecarlo.

3.2. Metodología propuesta

Para la realización de este proyecto se propone la siguiente metodología (ver *Figura 6*), la cual contempla un estudio técnico de la implementación de este y además el uso de agentes inteligentes y dinámica de sistemas. Los pasos se plantean a continuación:

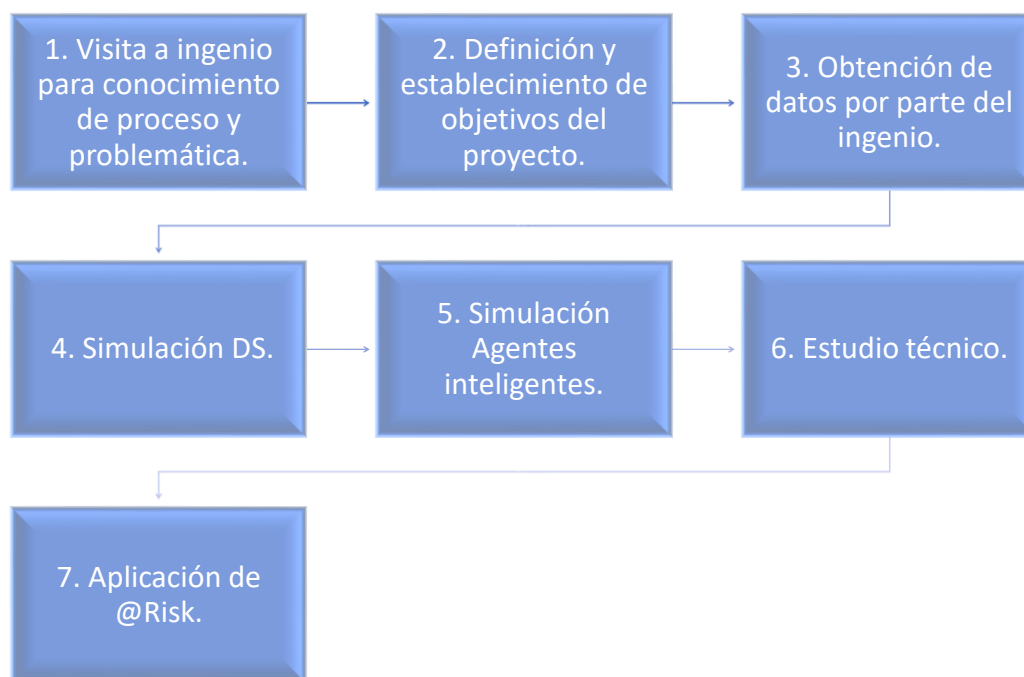


Figura 6. Diagrama secuencial de metodología (Elaboración propia).

3.3. Visita al ingenio para conocimiento de proceso y problemática.

En esta primera etapa se organizó a una reunión con los directivos encargados en el ingenio, y con otras compañías que se involucraron en el proyecto, mismos interesados en la implementación de esta planta de tratamiento de agua. Los directivos brindaron un recorrido por las instalaciones del ingenio y comentaron la problemática existente del consumo de agua y de las descargas de agua residual no tratada, mencionaron que era de suma importancia cumplir con lo establecido por las autoridades, en primer lugar en cuanto al consumo de agua concesionado para el ingenio y en segundo lugar el estar dentro de los parámetros permisibles para la norma (NOM001-SEMARNAT-2021), pues ya que en el ingenio no se le estaba dando un tratamiento adecuado para tratar esos efluentes, pues con lo único que contaba era con unas fosas de sedimentación y oxidación en donde se tratan los sólidos suspendidos totales y antes de ser enviadas a estas fosas de sedimentación se le adiciona lechada de cal (hidróxido de calcio) que sirve como sedimentador o floculador para que este ayude a sedimentar los sólidos y solo una pequeña cantidad de estos sólidos pase a la siguiente etapa que son las fosas de oxidación y en la celda 2 se aplica un tratamiento biológico con bacterias pulverizadas (Bacteria B350H para tratamiento de aguas); (ver *Figura 7*), con este tratamiento se ha logrado disminuir aproximadamente un 70% de la carga de materia orgánica; pero aun así no se logra cumplir con los límites máximos permisibles establecidos.

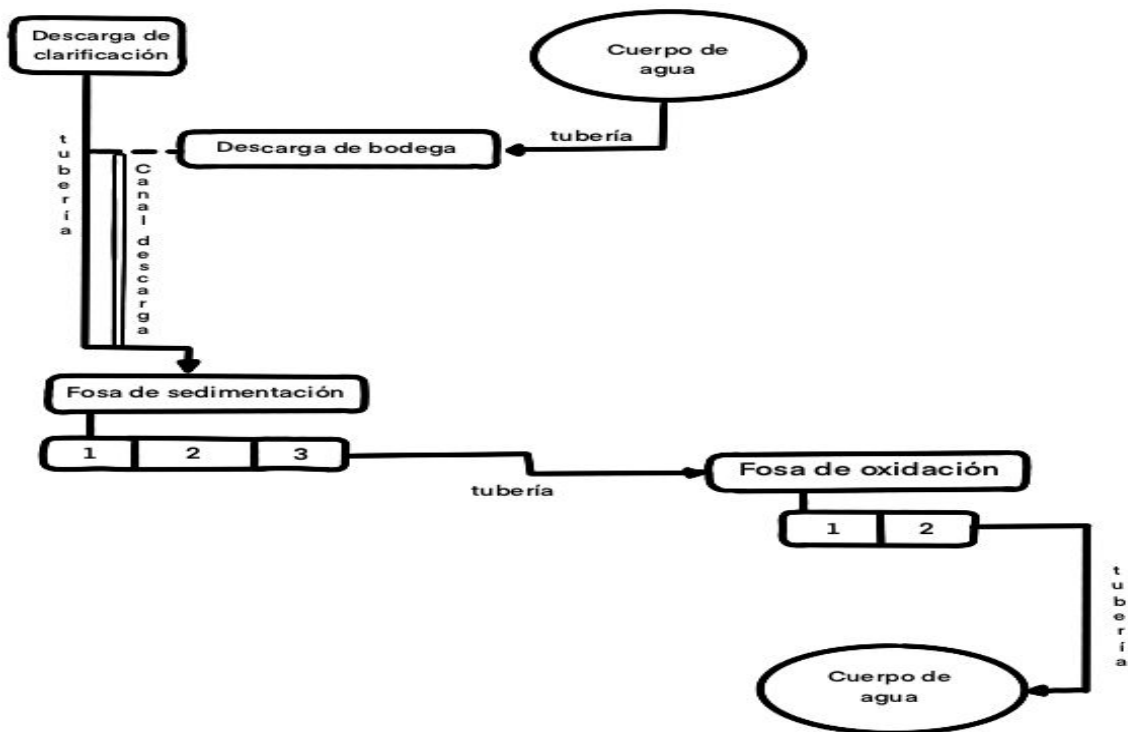


Figura 7. Diagrama de descarga de agua actual en el ingenio.

Durante esa visita uno de los ingenieros encargados que brindaron el recorrido por el ingenio, fue explicando a grandes rasgos el proceso de elaboración que realizan en esas instalaciones, el cual se presenta a continuación.

Se cubre el proceso desde la molienda hasta el secado del producto, pero para participar del proceso se explica desde la preparación de la caña de azúcar hasta el empaque del producto.

Primeramente, se tiene la recepción de la caña, la cual pasa por una báscula cañera, una vez pesada pasa a ser volcada para ser transportada a una banda niveladora que la llevará a una mesa alimentadora, asimismo hay una banda alimentadora de basura de caña la cuál será separada de la caña como tal y será depositada en una tolva de basura (ver *Figura 8*). De igual manera, la banda está ayudada por un rodillo alimentador que llevará la caña a los molinos.

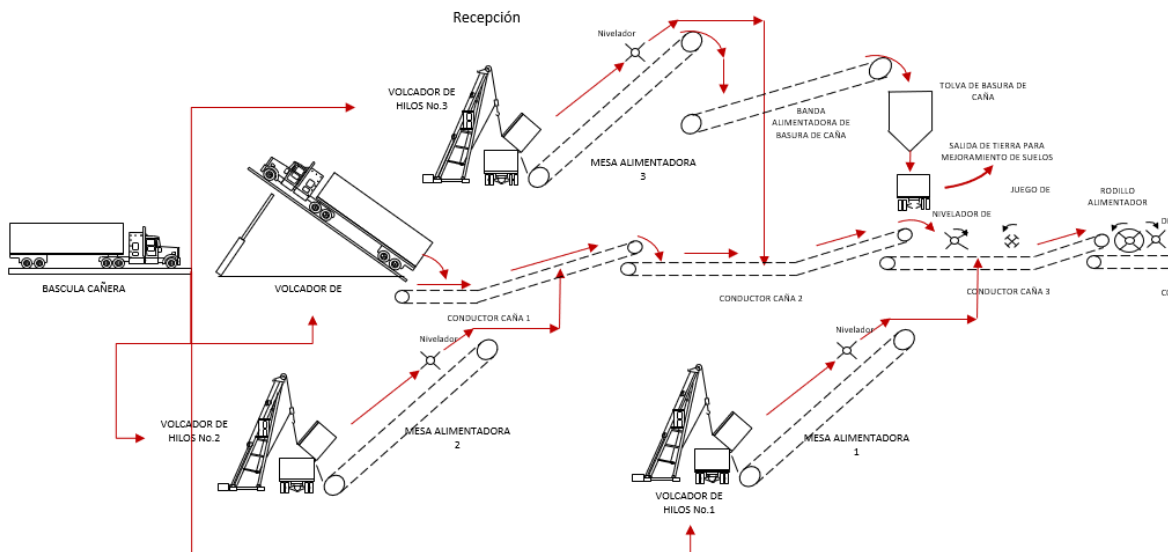


Figura 8. Recepción de la caña. (Imagen proporcionada por ingenio).

Al llegar al rodillo alimentador de los molinos, pasa por una desfibradora y partidor de la caña para que la caña entre “preparada” al molino 1, posteriormente al molino 2 y así sucesivamente hasta el molino 6, en esta etapa de molienda se suministra el agua de imbibición la cuál ayudará a extraerle más jugo al bagazo. El jugo extraído pasa a un colador de jugo mezclado para retirar el bagacillo y solidos finos (ver Figura 9).

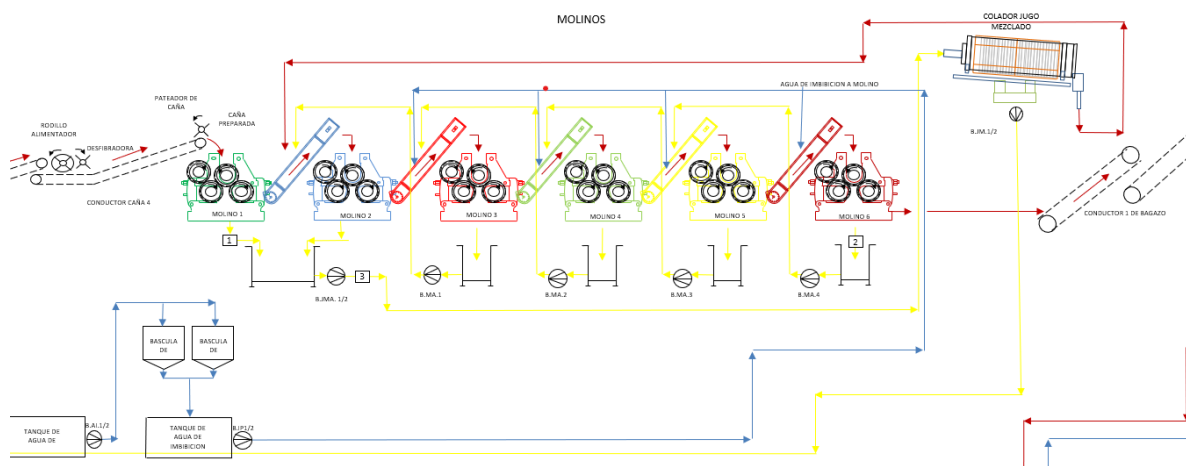


Figura 9. Molienda de caña (Imagen proporcionada por ingenio).

Por su parte el bagazo resultante pasa a unas bandas conductoras de bagazo que lo llevará directamente a cada una de las 5 calderas que generan y distribuyen el vapor para producción y para generación eléctrica (ver *Figura 10*).

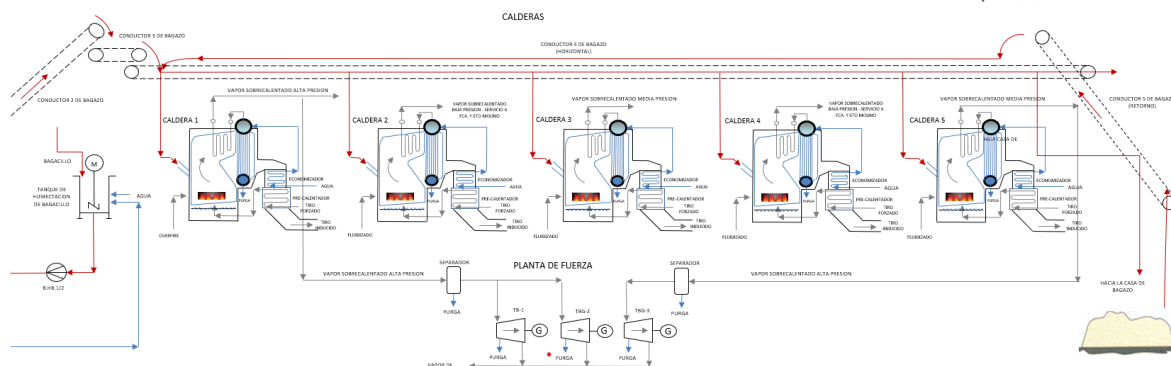


Figura 10. Calderas (Imagen proporcionada por ingenio).

El jugo previamente filtrado pasa a las torres de sulfatación allí se adiciona, en forma de finas burbujas, una corriente de humos (SO_2 , N_2 , O_2) proveniente de la quema de azufre sólido en un horno. El dióxido de azufre convierte los compuestos que le dan al jugo un color oscuro en compuestos incoloros. Además del efecto antiséptico, este efecto también persiste cuando el jugo se somete posteriormente al calor. Se espera que la sulfatación produzca jugo con un pH de 4,3 a 4,5, que es el extremo inferior del rango donde ocurre la pérdida de sacarosa, por lo que el control del pH es fundamental. Por eso es necesario enviarlo a los tanques de jugo alcalinizado, luego de esta etapa, se acostumbra una segunda alcalinización, que se espera arrastre partículas pequeñas y torne insolubles algunos contaminantes, y caliente el jugo (ver *Figura 11*).

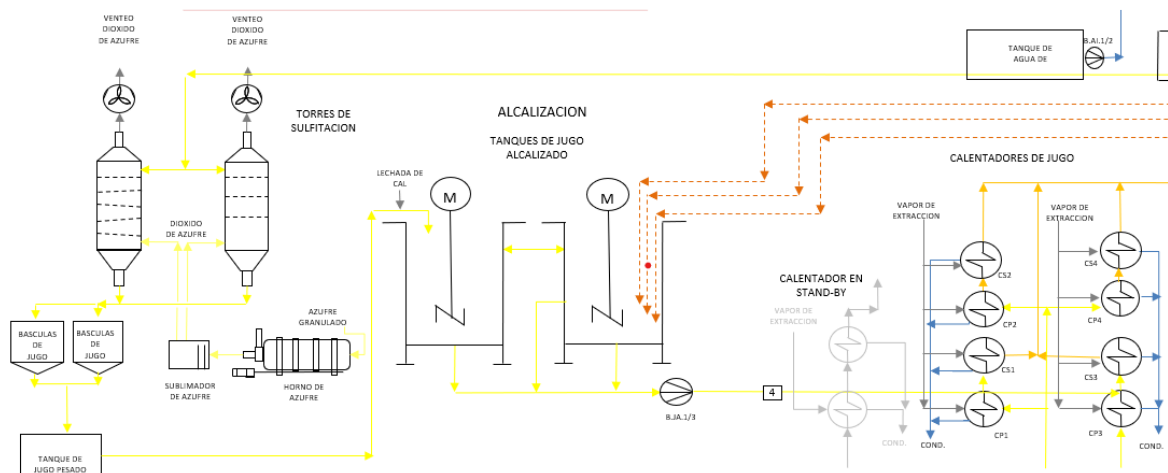


Figura 11. Etapa de alcalinización. (Imagen proporcionada por ingenio).

Seguido de la etapa de alcalinización el jugo es enviado a un tanque flash, en el finalizan las reacciones de purificación, para después enviar el jugo a los clarificadores los cuales permiten la obtención de jugo limpio para evaporación, si no se efectúa bien, la incrustación de contaminantes en los evaporadores aumenta (ver *Figura 12*).

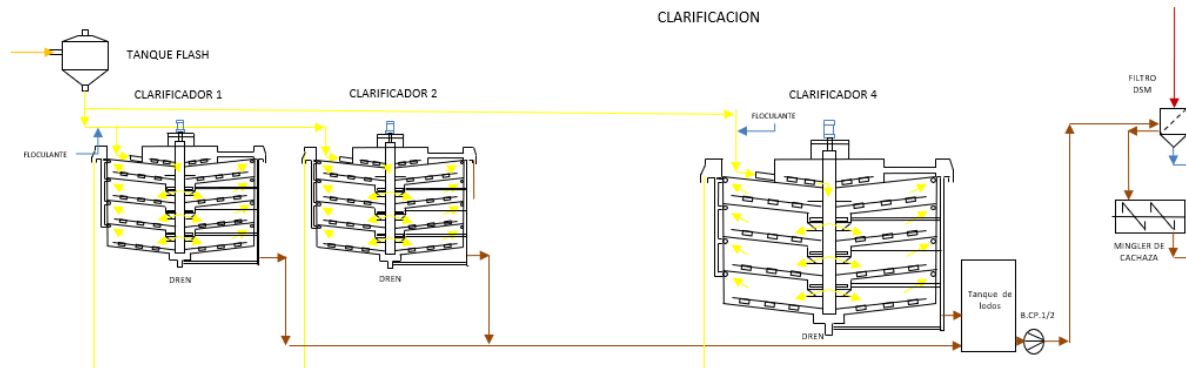


Figura 12. Etapa de clarificación del jugo. (Imagen proporcionada por ingenio).

En esa fase se obtendrá el jugo clarificado y por otra línea saldrá los “lodos” que se almacenarán en un tanque de lodos que será bombeado a una serie de filtros al vacío de la cachaza resultante (ver *Figura 13*)

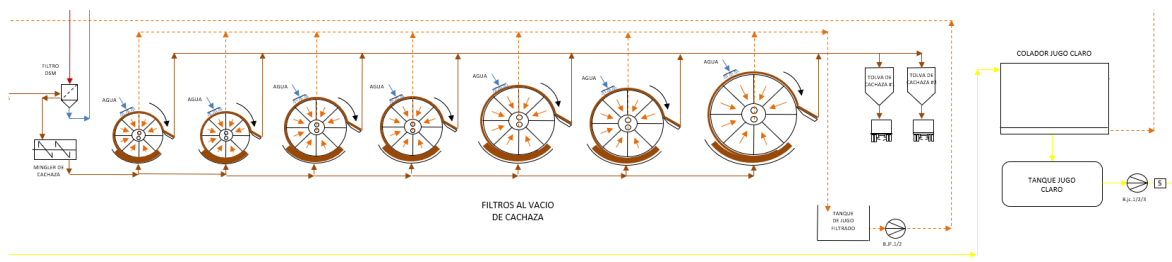


Figura 13. Etapa de filtrado al vacío. (Imagen proporcionada por ingenio).

El jugo, por su parte se manda a un colador de jugo claro y pasará a un tanque específico para ese jugo, este jugo será bombeado a los evaporadores, primero a los pre-evaporadores de triple efecto, después a los de cuádruple efecto y posteriormente a otros que nuevamente son de cuádruple efecto (ver *Figura 14*). La meladura resultante es almacenada en un tanque para poder ser enviada al proceso de cristalización.

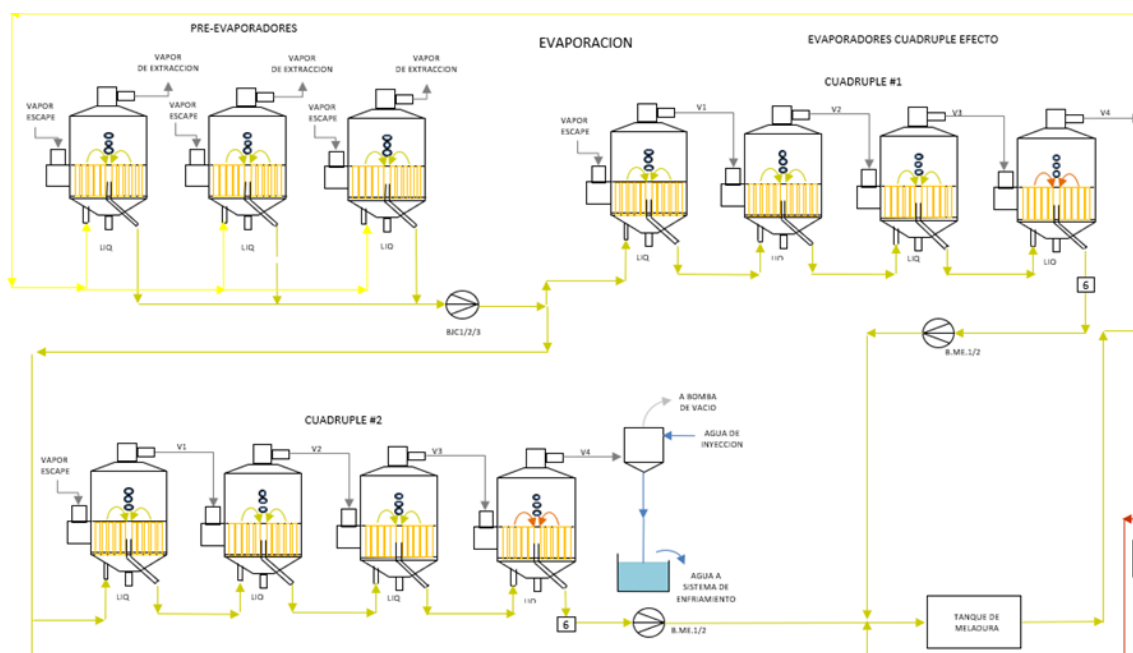


Figura 14. Etapa de evaporación. (Imagen brindada por ingenio).

La etapa de cristalización se refiere al proceso en el que una vez obtenida la meladura esta pasa a un cristizador para desarrollar el cristal. Se debe controlar el tiempo en el cual una

masa permanece en el cristalizador, para garantizar un mayor depósito de azúcar sobre el cristal formado (ver *Figura 15*).

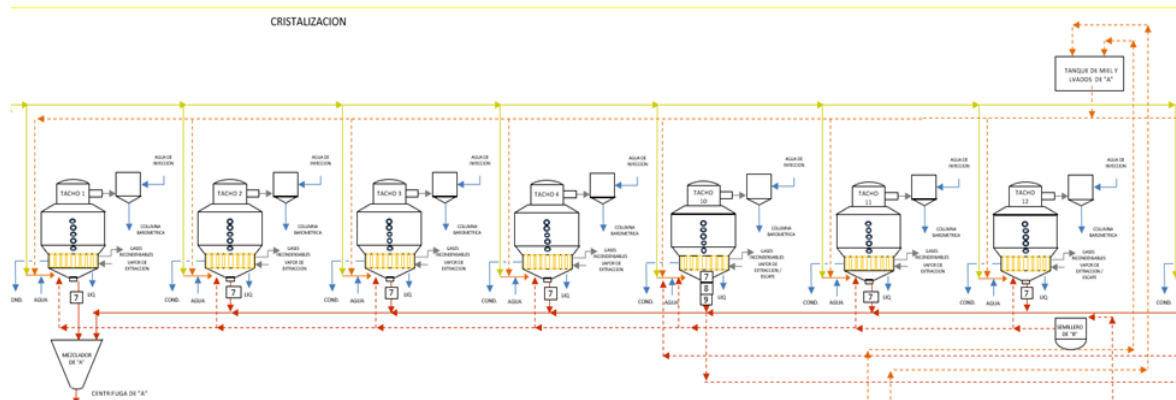


Figura 15. Etapa de cristalización. (Imagen proporcionada por ingenio).

Una vez formados los cristales del azúcar posterior, el jarabe resultante de los procesos de evaporación y cristalización pasa por una fase de centrifugación en la que gira a un 1000 rpm, haciendo que el líquido se deshaga de los cristales de azúcar (ver *Figura 16*).

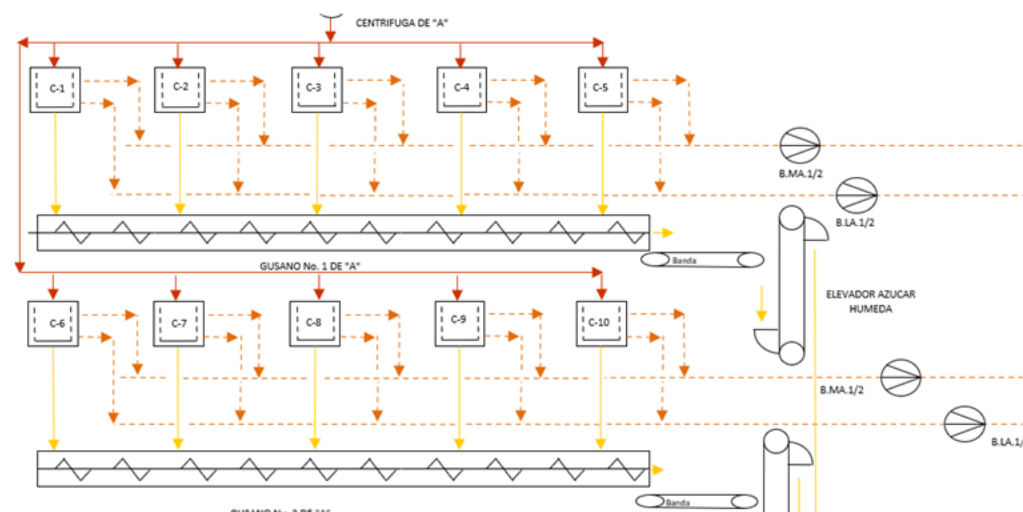


Figura 16. Etapa de centrifugado. (Imagen proporcionada por ingenio).

Este jugo una vez cumplido su proceso de centrifugación, es almacenado en un tanque, del que después de tomará para distribuirlo (ver *Figura 17*).

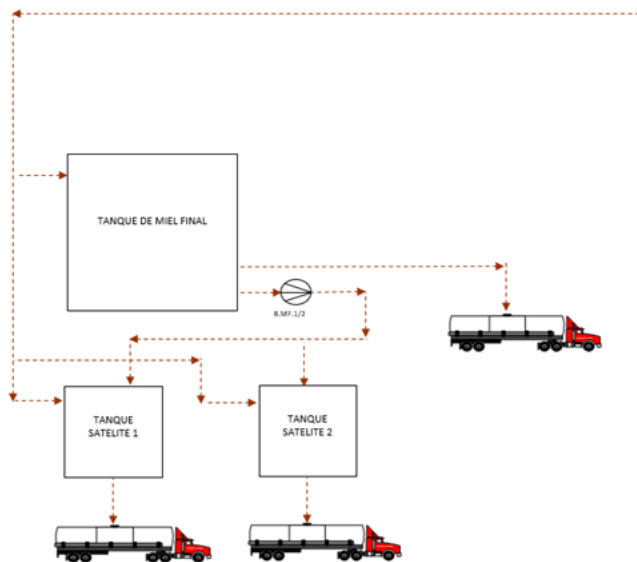


Figura 17. Disposición de miel final. (Imagen proporcionada por ingenio).

Por su parte los cristales de azúcar son enviados a la fase de secado, por medio de una banda en donde es transportada azúcar húmeda aún, llega a una tolva que la almacena y se va dosificando por medio de unos recipientes llamados “gusanos de azúcar”, para suministrarla en el secador, este secador tendrá un servicio de vapor y un filtro aire.

Después del secado, es enviada por medio de unas bandas que la transportan hacia un elevador de azúcar seca, el cual la sube a una criba por medio de la cual pasará y a su vez se dividirá en dos líneas; una será para el llenado de super sacos y la otra para el llenado de sacos de 50 kg, ambas líneas de llenado y una vez envasado el producto este se pasa por medio de conductores y bandas transportadores al área en la que se distribuirán con los camiones(ver *Figura 18*) .

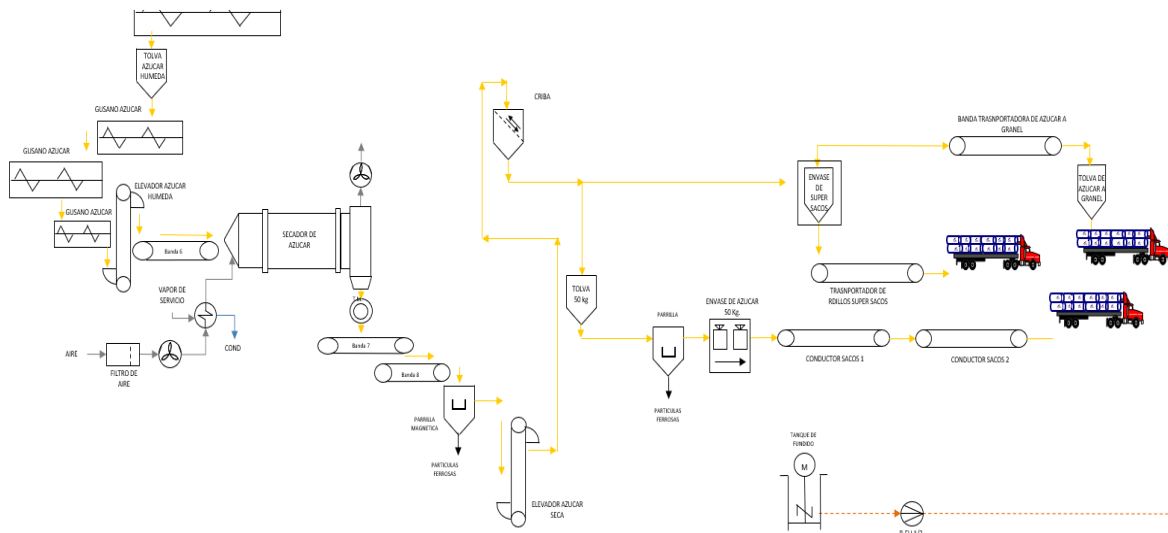


Figura 18. Etapa de secado y envasado de azúcar. (Imagen proporcionada por ingenio).

3.4. Definición y establecimiento de objetivos del proyecto.

De acuerdo con lo expuesto en la reunión con directivos, se definen los objetivos por lograr, así como el alcance que podrá tener este proyecto. Dentro de los objetivos se encuentra el establecer la propuesta de una planta de tratamiento de agua residual (PTAR) (ver *Figura 19*), para darle el tratamiento al agua resultante de servicios y limpieza del ingenio que contiene altas cargas orgánicas, de primera instancia lo que se buscó hacer es determinar el flujo de agua que podrá ser tratada en la PTAR.

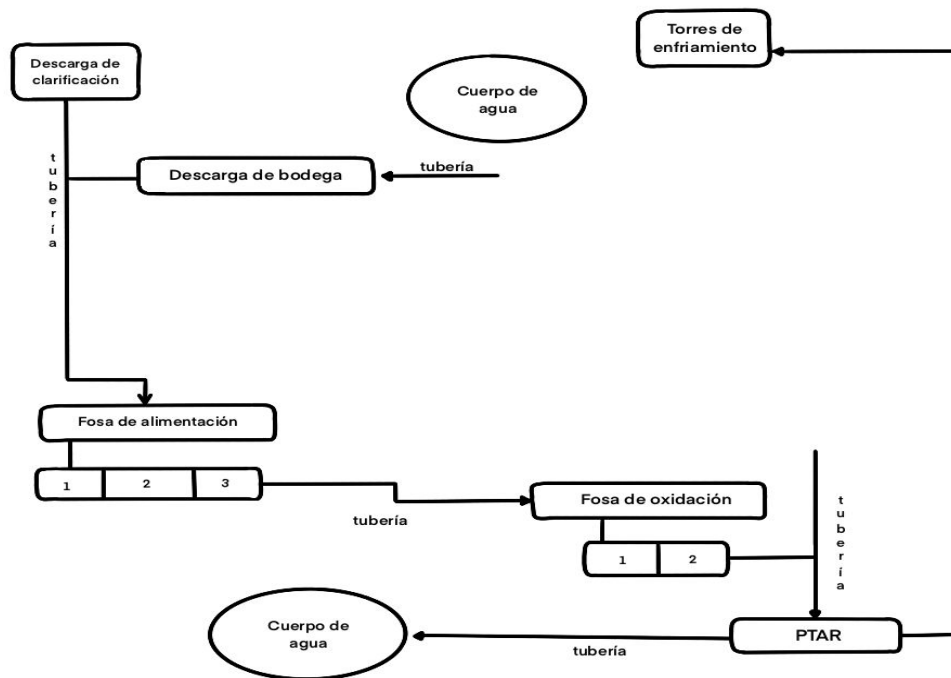


Figura 19. Diagrama de descarga de agua contemplando la planta de tratamiento de agua residual (PTAR).

Una vez que se defina la cantidad de agua, los directivos del ingenio decidieron que iban a contratar a una compañía externa, experta en plantas de tratamiento, la cual se encargó de los cálculos para la operación y las etapas que constituirán el tratamiento, es decir, las necesarias para reducir los parámetros de tal forma que al final se encuentren en lo permisible para la norma.

Se definió que, mediante los datos históricos proporcionados por el ingenio, se hiciera un modelo mediante dinámica de sistemas, el cuál indique el flujo para el cual debe ser calculada toda la PTAR. Y que también se considere que el sistema de tratamiento trabajará los 365 días del año, pero no siempre existirá el mismo flujo de agua, dado que en temporada de zafra este puede aumentar, entonces con ayuda de la simulación y aplicando agentes inteligentes, se detectará ese cambio y se notará en los flujos de agua. Una vez conociendo esa parte preliminar para el diseño de la planta, se estableció también hacer un estudio técnico del proyecto en donde se abordarán las partes que conforma este estudio como se menciona en el capítulo II de marco teórico, (ver Figura 1). Y, por último, se analizará con ayuda de @Risk los beneficios económicos que este proyecto puede lograr.

3.5. Obtención de datos.

En este paso, para la recopilación de datos e información, se contactó a varios de los ingenieros involucrados en el tema, para solicitar la información, y para este caso, el ingenio en estudio brindó datos históricos de los periodos de 10 años de zafra, como se observa en la Tabla 3, de toneladas de caña por zafra, días de zafra, toneladas por día y por hora y cantidad de agua utilizada por zafra.

Tabla 3. Datos históricos. (Brindado por ingenio).

Zafra	Datos de entrada									
	Toneladas de caña	Días de Zafra	Horas por Zafra	t caña/Día	t caña/hr	% Tiempo perdido	t caña/Día efectivo	t caña/hora efectivo	m ³ Agua/hr	m ³ Agua/zafra
Zafra 12-13	1,372,837	195	4,680	7,040	293	25.2%	9,412	392	10.8	15,494,707.09
Zafra 13-14	1,235,524	173	4,152	7,142	298	23.4%	9,323	388	10.9	13,944,905.68
Zafra 14-15	1,133,726	175	4,200	6,478	270	31.7%	9,485	395	10.8	12,795,949.04
Zafra 15-16	1,202,882	165	3,960	7,290	304	19.2%	9,023	376	11.3	13,576,487.42
Zafra 16-17	1,238,529	194	4,656	6,384	266	30.2%	9,146	381	11.2	13,978,822.02
Zafra 17-18	1,255,537	197	4,728	6,373	266	30.6%	9,183	383	11.1	14,170,785.07
Zafra 18-19	1,254,009	189	4,536	6,635	276	26.4%	9,015	376	11.3	14,153,539.09
Zafra 19-20	1,011,539	159	3,816	6,362	265	23.8%	8,349	348	12.2	11,416,869.24
Zafra 20-21	1,110,382	182	4,368	6,101	254	28.0%	8,474	353	12.0	12,532,473.88
Zafra 21-22	1,169,000	181	4,344	6,459	269	27.9%	8,958	373	11.4	13,194,073.73
Promedios	1,198,396	181	4,344	6,626	276	26.6%	9,037	377	11.3	13,525,861

Así como también se dieron datos del uso de agua permitido y su consumo en el ingenio, como se muestra en *Tabla 4*.

Tabla 4. Datos de consumo de agua. (Brindado por ingenio).

Descripción	Cantidad	Unidad
Concesión agua superficial	13,543,089	m ³
Días de zafra	181.00	días
Horas de zafra	4,344.00	h
Horas de zafra efectivas	3,186.76	h
m ³ de agua/hora	4,249.80	m ³ /h
Tonelada de caña/día	9,036.82	tc/d
Tonelada de caña/hora	376.53	tc/h
Consumo m ³ de agua/tonelada de caña	11.29	m ³ /tc ¹

También se obtuvieron datos de las mediciones de los parámetros del agua actualmente, proporcionados por el laboratorio del ingenio, lo cuales se presentan en la *Tabla 5*.

¹ tc: toneladas de caña.

Tabla 5. Mediciones de parámetros del agua actualmente sin tratamiento. (Proporcionada por ingenio).

Muestra	Ingreso al Proceso	Prom. Anual	Abril	Febrero	Instantánea	Concentraciones prom. A PTAR	Para Descarga a ríos	p/entregar a Dren municipal	p/Reutilizar Uso público (servicios)
Entrada/Salida	A la Entrada	A la Salida	A la Salida	A la Salida	A la Salida		A la Salida	A la Salida	A la Salida
Parámetros	Por Laboratorio	Laboratorio (Declarado)	1	2	3		NOM-001-SEMARNAT-1996	NOM-002	NOM-003
Arsénico Total	0.002	0.002	0.002	0.072	0.0945		0.1 0.5 / 1	-	-
Cadmio Total	0.02	0.02	0.02	0.278	0.028		0.1 0.5 / 1	-	-
Cianuro Total	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025		1	01-feb -	-
Cobre Total	0.1	0.025	0.1	0.851	0.1276		4	oct-20 -	-
Cromo Total	0.3	0.3	0.3	3.837	0.3		0.5 0.5 / 1	-	-
Fósforo Total	0.3	0.36	1.2	860.93	0.3		5 -	-	-
Mercurio Total	0.002	0.002	0.002	0.005	0.002		0.005 0.01 / 0.02	-	-
Níquel Total	1	1	1	10.578	1		2	04-ago -	-
Nitrógeno Total	4	4	4.29	252.28	287.28		15 -	-	-
Plomo Total	0.15	0.15	0.15	3.543	0.2417		0.2	01-feb -	-
Zinc Total	0.5	0.5	0.5	72.915	0.5		10	06-dic -	-
Coliformes Fecales	237	168	3	3	3		-	240 / 1000	-
Demanda Bioquímica Oxígeno (DBO)	3.31	36	260	45,800.00	64,200.00	4,890.00	30 -	20 / 30	-
Demanda Química Oxígeno (DQO)	30	79.692	469.778	97,456.52	169,066.67	8,250.00	100 -	-	-
Grasas y Aceites	4.97	4.967	0	0	8.39	35	15 50 / 100	15 / 15	-
Materia Flotante	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	-	-
Sólidos Sedimentables (SSD)	0.1	0.1	0.1	1.5	0.5	39	1	05-oct -	-
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	14	19	48	800	6,105.00	3,200.00	40 -	20 / 30	-
Temperatura						42	40 -	-	-
Huevos de helminto									
pH						7			

Si comparamos con los parámetros de interés de la columna resaltada en color verde, que son; demanda bioquímica de oxígeno (DBO5), demanda química de oxígeno (DQO), Nitrógeno, SST, Fósforo y Temperatura, con sus respectivos valores permisibles por la norma (en la *Tabla 6*, *Tabla 7* y *Tabla 8*), podemos observar que todos se encuentran fuera de límite permitido. Puesto que los límites de los parámetros de acuerdo con la norma son: DBO5=75 mg/l, SST=75 mg/l, Fósforo= 20 mg/l y Nitrógeno=40 mg/l.

Tabla 6. Límites permisibles para contaminantes básicos (a).

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA CONTAMINANTES BÁSICOS																				
PARÁMETROS	RIOS						EMBALSES NATURALES Y ARTIFICIALES				AGUAS						SUELO			
(miligramos por litro, excepto cuando se especifique)	Uso en riego agrícola (A)	Uso público urbano (B)	Protección de vida acuática (C)		Uso en riego agrícola (B)	Uso público urbano(C)	Explotación pesquera, navegación y otros usos (A)		Recreación (B)	ESTUARIOS (B)		Uso en riego agrícola (A)	HUMEDALES NATURALES (B)							
	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.		
Temperatura	N.A.	N.A.	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	N.A.	N.A.	40	40	
°C (1)																				
Grasas y Aceites (2)	y 15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25		
Materia Flotante (3)	au-sen-te	au-sen-te	au-sen-te	au-sen-te	au-sen-te	au-sen-te	au-sen-te	au-sen-te	au-sen-te	au-sen-te	au-sen-te	au-sen-te	au-sen-te	au-sen-te	au-sen-te	au-sen-te	au-sen-te	au-sen-te		
Sólidos Sedimentables (ml/l)	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	N.A.	N.A.	1	2
Sólidos Suspendedos Totales	150	200	75	125	40	60	75	125	40	60	150	200	75	125	75	125	N.A.	N.A.	75	125
Demanda Bioquímica de Oxígeno	150	200	75	150	30	60	75	150	30	60	150	200	75	150	75	150	N.A.	N.A.	75	150
Nitrógeno Total	40	60	40	60	15	25	40	60	15	25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	15	25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
Fósforo Total	20	30	20	30	5	10	20	30	5	10	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	5	10	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.

Tabla 7. Límites permisibles para contaminantes básicos (b).

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA CONTAMINANTES BÁSICOS																				
PARÁMETROS	RÍOS						EMBALSES NATURALES Y ARTIFICIALES				AGUAS COSTERAS						SUELO			
(*) (miligramos por litro)	Uso en riego agrícola (A)	Uso público urbano (B)	Protección de vida acuática (C)	Uso en riego agrícola (B)	Uso público urbano (C)	Explotación pesquera, navegación y otros usos (A)	Recreación (B)	ESTUARIOS (B)	Uso en riego agrícola (A)	HUMEDALES NATURALES (B)										
	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.
Arsénico	0.24	0.1	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2
Cadmio	0.24	0.1	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.5	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2
Cianuro	2.0	3.0	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0	1.0	2.0
Cobre	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0
Cromo	1.5	1.0	0.5	1.0	1.0	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	1.0	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0
Mercurio	0.01	0.005	0.001	0.005	0.001	0.005	0.001	0.005	0.001	0.005	0.02	0.01	0.01	0.005	0.001	0.005	0.001	0.005	0.001	0.005
Níquel	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4
Plomo	0.5	1	0.2	0.4	0.2	0.4	0.5	1	0.2	0.4	0.2	0.4	0.5	1	0.2	0.4	0.5	1	0.2	0.4
Zinc	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20

Tabla 8. Límites permisibles para contaminantes básicos. (c)

Límites Permisibles																		
Parámetros (*) (miligramos por litro, excepto cuando se especifique)	Ríos, arroyos, canales, drenes			Embalses, lagos y lagunas			Zonas marinas mexicanas			Suelo								
										Riego de áreas verdes			Infiltración y otros riegos			Cárstico		
	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.
Temperatura (°C)	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
Grasas y Aceites	15	18	21	15	18	21	15	18	21	15	18	21	15	18	21	15	18	21
										30	36	42	100	120	140	20	24	28
				100	120	140	85	100	120	60	72	84	150	180	210	60	72	84
				25	30	35	21	25	30	15	18	21	38	45	53	15	18	21
										NA	NA	NA	NA	NA	NA	15	25	30
							15	18	21	NA	NA	NA	NA	NA	NA	5	10	15
Huevos de Helminthos (huevo/litro)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	1								
Escherichia coli, (NMP/100 ml)	250	500	600	250	500	600	250	500	600	250	500	600	250	500	600	50	100	200
Enterococos fecales* (NMP/100 ml)	250	400	500	250	400	500	250	400	500	250	400	500	250	400	500	50	100	200
pH (UpH)	6-9																	
Color verdadero	Longitud de onda									Coeficiente de absorción espectral máximo								
	436 nm									7,0 m -1								
	525 nm									5,0 m -1								
	620 nm									3,0 m -1								
Toxicidad aguda (UT)	2 a los 15 minutos de exposición																	

Ya una vez conociendo todos esos datos tanto de las toneladas de caña por zafra, los días de zafra y la cantidad de agua empleada y/o consumida, se procedió a trabajar con esos datos para elaborar un modelo de dinámica de sistemas para así conocer el flujo probable a tratar.

Con base a ello y también con la información de los valores de los parámetros con los que se encuentra el agua actualmente, los ingenieros expertos de la compañía encargada de la PTAR podrán realizar los cálculos en la ingeniería, pertinentes para saber que técnicas de tratamiento sería conveniente para constituir todo el sistema y su modo de operación.

3.6. Simulación DS (Dinámica de sistemas).

La construcción del modelo se realizó con ayuda del software Anylogic® versión estudiante, este software permite a ingenieros comprender y optimizar sistemas y procesos complejos en diferentes sectores de la industria.

Tomando como referencia los datos históricos proporcionados, se ajustaron distribuciones para poder configurar el modelo del flujo de agua que llevará la planta de tratamiento de agua residual.

En la *Figura 20* se observa el ajuste de los datos a una distribución triangular para su uso en el software, para la variable “Toneladas de caña por zafra”, teniendo como valores: distribución triangular (954765, 1199427, 1430314).

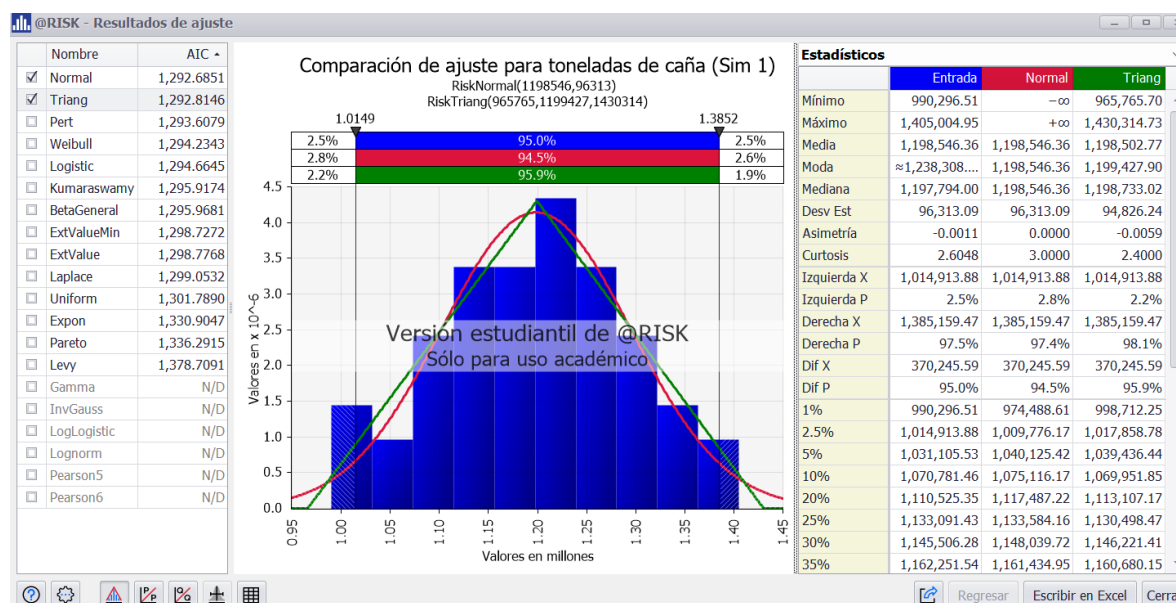


Figura 20. Ajuste de distribución para datos de toneladas de caña por zafra.

De la misma manera se hizo para la variable “Horas por zafra”, (*Figura 27*), ajustándola a una distribución triangular (3613, 4728, 4728). Y por último para la variable “metros cúbicos de servicios por tonelada de caña”, (*Figura 28*), su ajuste también fue a una distribución triangular (0.648995, 0.658995, 0.668995).

El software, a pesar de ser la versión estudiantil, cuenta con una amplia variedad de herramientas y elementos que se pueden usar para construir un modelo, a continuación, se describirán los usados para este caso.

- Stock

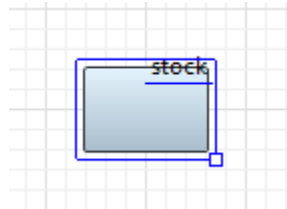


Figura 21. Elemento de stock. (Anylogic, 2015)

En dinámica de sistemas, los “stocks”, (*Figura 21*) (también conocidas como niveles, acumulaciones o variables de estado) se utilizan para representar los procesos del mundo real (por ejemplo, existencias de material, conocimientos, personas, dinero). Las existencias definen la parte estática del sistema. Los flujos definen cómo cambian los valores de las existencias en el tiempo y, por lo tanto, definen la dinámica del sistema. (Anylogic, 2015).

- Flujo

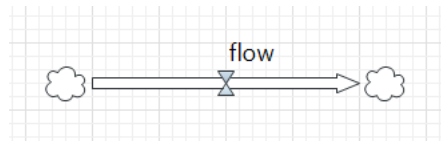


Figura 22. Elemento de flujo. (Anylogic, 2015)

El flujo (también conocido como tasa), al igual que las existencias (stock), es un elemento fundamental del diagrama de existencias y flujos. Mientras que las existencias definen la parte estática del sistema, los flujos definen la tasa de cambio de las existencias: cómo cambian los valores de las existencias en el tiempo y, por tanto, definen la dinámica del sistema. (Anylogic, 2015). (*Figura 22*)

- Enlace (link)

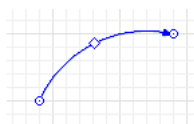


Figura 23. Elemento de enlace o link. (Anylogic, 2015).

El enlace se utiliza para definir una dependencia entre elementos de un diagrama de acciones y flujos. (*Figura 23*).

- Variable dinámica

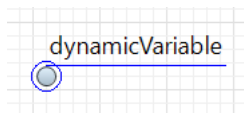


Figura 24. Elemento variable dinámica. (*Anylogic, 2015*).

Aunque los diagramas de stocks y flujos pueden contener sólo stocks y flujos, es una buena práctica definir conceptos intermedios con variables dinámicas (*Figura 24*). Normalmente, las variables dinámicas consisten en funciones de stocks (y constantes o entradas exógenas). En caso de que necesite definir una constante, se utiliza un parámetro (*Figura 25*). (*Anylogic, 2015*).

- Parámetro

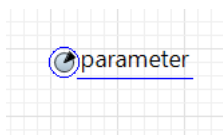


Figura 25. Elemento parámetro. (*Anylogic, 2015*).

Los parámetros se utilizan frecuentemente para representar algunas características del objeto modelado. Son útiles cuando las instancias del objeto tienen el mismo comportamiento descrito en el tipo de agente, pero difieren en algunos valores de los parámetros. Existe una clara diferencia entre variables y parámetros. Una variable representa un estado del modelo, y puede cambiar durante la simulación. Un parámetro se utiliza habitualmente para describir objetos de forma estática. (*Anylogic, 2015*).

Para la configuración del modelo se realizó lo siguiente: de primera instancia se designaron las variables de entrada para el modelo, las cuáles fueron toneladas de caña por zafra, horas por zafra y metros cúbicos de agua por servicios de limpieza y lavados por tonelada de caña, y como ya se mencionó, a las 3 se les realizó un ajuste de distribución, este ajuste realizado con la ayuda de @Risk, como se mostró en la *Figura 20*.

El elemento ocupado para representar estas 3 variables, fue el de variable dinámica y cada una se configuró como se observa en *Figura 26*, *Figura 27* y *Figura 28*.

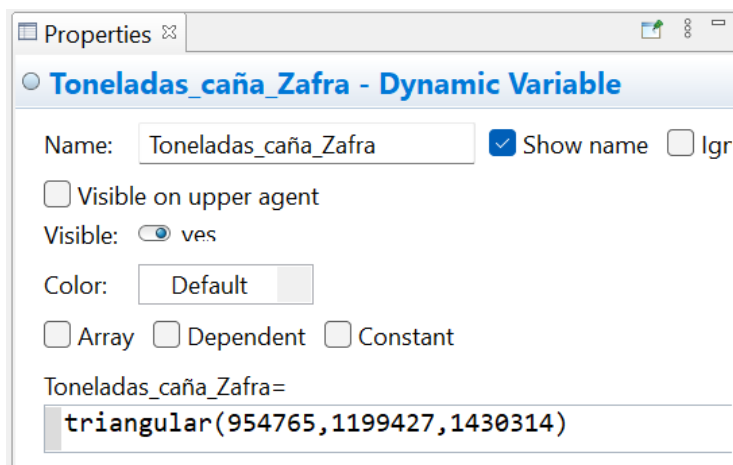


Figura 26. Configuración para variable "toneladas de caña por zafra".

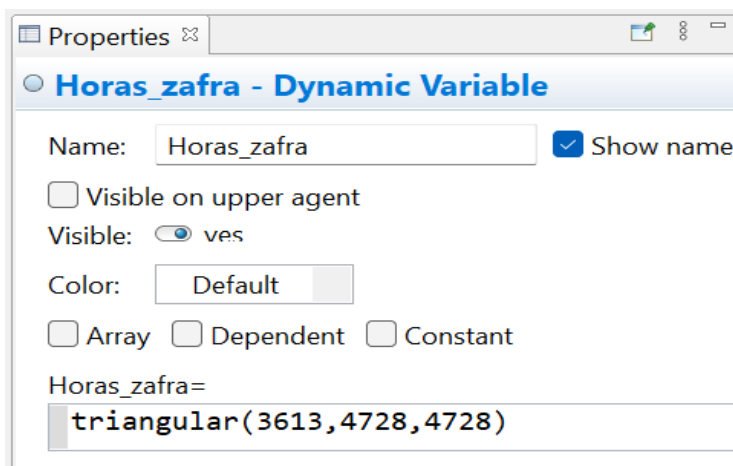


Figura 27. Configuración para variable "horas por zafra".

Metros_cúbicos_tc_servicios - Dynamic Variable

Name: ☒ Show name ☐ Ignore

☐ Visible on upper agent

Visible: ☐ ves

Color:

☐ Array ☐ Dependent ☐ Constant

Metros_cúbicos_tc_servicios=

Figura 28. Configuración para variable "metros cúbicos de agua de servicios por tonelada de caña".

Para las siguientes que se ocuparon igual se representaron con una variable dinámica, la cuales fueron; los “*metros cúbicos de agua por zafra*”, “*metros cúbicos por hora*” y “*litros por hora*” (siendo esta última una conversión para darle homogeneidad a las unidades en el modelo). Son resultado de las siguientes ecuaciones (*Ecuación 5*, *Ecuación 6*, *Ecuación 7*):

Ecuación 5 Metros cúbicos de agua por zafra.

$$m^3 \text{ de agua/zafra} = m^3 \text{ agua deservicios por tonelada caña} * \text{Tonelada de caña por zafra}$$

Ecuación 6. Metros cúbicos de agua por hora.

$$m^3 \text{ agua/h} = m^3 \text{ de agua por zafra} / h \text{ de zafra}$$

Ecuación 7. Litros de agua por hora por zafra.

$$L/h = m^3 \text{ de agua por zafra} * 1000$$

En la *Figura 29* podemos observar el diagrama causal que estas variables dinámicas seguirán, las de color amarillo son variables de entrada (dadas mediante distribuciones de probabilidad) y las otras tres variables restantes son las que serán generadas mediante las ecuaciones anteriores.

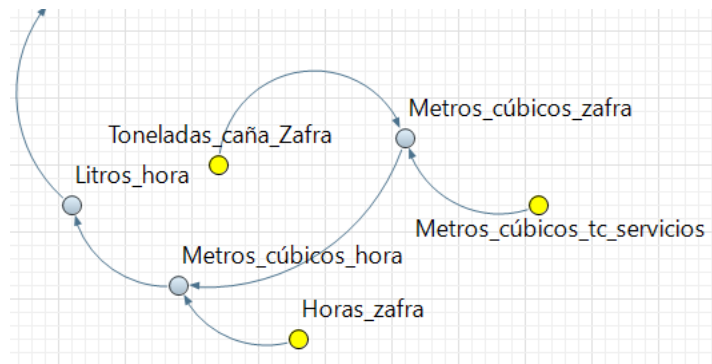


Figura 29. Diagrama causal para el flujo de agua.

Estos valores que se generarán en las variables dinámicas serán los que darán pauta al flujo de agua que entrará y será tratado en la PTAR, específicamente la variable de “*Litros por hora*”. Siendo una variable dinámica estará fluctuando entre distintos valores. Al momento de correr la simulación durante 24 horas, se tiene que en cada etapa del proceso podrá tratar una cantidad de aproximadamente 4,320,000 L/día. Las etapas del proceso se representaron mediante elementos de “stock”, se pudo haber representado con un solo elemento de stock y nombrarlo de manera general como “PTAR”, pero eventualmente se decidió utilizar varios elementos a modo de representar las etapas de tratamiento planteadas por los ingenieros expertos de la compañía externa, las cuáles fueron 5, que son las fosas actuales que tiene el ingenio, seguido de las fosas propusieron un tratamiento primario que es un reactor de difusión de aire disuelto, después un tratamiento secundario que será un reactor anaerobio y un aerobio y por último un clarificador. También en el modelo se tiene representada la generación de residuos sólidos (lodos), junto con el porcentaje de rendimiento estimado por los ingenieros, para el cálculo de lodos en base seca, habrá en tres etapas del proceso del tratamiento, la primera generación proviene del sistema de flotación por aire disuelto (DAF), la segunda proviene del reactor anaerobio y la tercera generación de lodos proviene del reactor anaerobio. Quedando la construcción del modelo de la siguiente manera como se aprecia en la *Figura 30*.

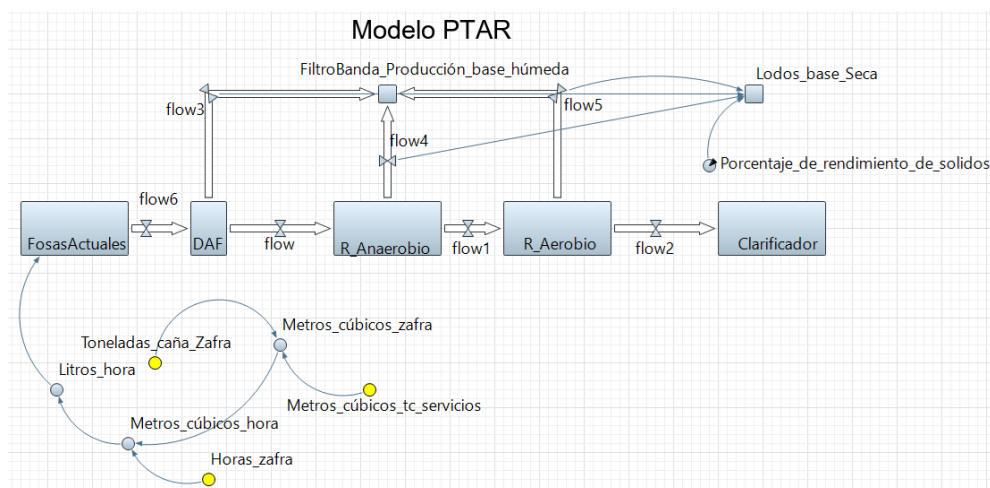


Figura 30. Modelo del flujo de PTAR con dinámica de sistemas. (Elaboración propia).

Se corrió el modelo y se obtuvieron los primeros resultados, se programó una reunión con el coasesor del proyecto para mostrarle el modelo y él diera su visto bueno, cubriendo con esto la fase de verificación del modelo. Seguido de esto se procedió a realizar la validación del modelo.

3.6.1 Validación mediante prueba t-pareada

Para la validación se realizaron 10 corridas piloto, se registraron los valores obtenidos para la variable de “toneladas de caña”, como se muestra a continuación:

Tabla 9. Datos recabados para prueba t pareada para toneladas de caña.

	Toneladas de caña- datos históricos	Toneladas de caña- valores del modelo		
Corridas	xj	Yj	Zj= Xj-Yj	$(Z_j - \bar{Z}_{10})^2$
1	1,372,837	2,020,938.00	-648,101.00	278,099,815,492.89
2	1,235,524	1,279,185.00	- 43,661.00	5,942,605,996.89
3	1,133,726	1,378,661.00	-244,935.00	15,422,088,084.49
4	1,202,882	1,218,332.00	- 15,450.00	11,087,942,580.49
5	1,238,529	1,131,473.00	107,056.00	51,895,254,708.09
6	1,255,537	1,127,463.00	128,074.00	61,913,034,622.89
7	1,254,009	1,227,539.00	26,470.00	21,673,522,292.49
8	1,011,539	1,322,127.00	-310,588.00	36,038,732,017.69
9	1,110,382	1,228,423.00	-118,041.00	7,334,888.89
10	1,169,000	1,257,317.00	- 88,317.00	1,051,854,083.29
Suma				483,132,184,768.10
Promedio	1,198,397	1,319,146	-120,749	

$$\widehat{Var}[\bar{Z}_{(n)}] = \frac{\sum_{i=1}^n [Z_i - \bar{Z}_{(n)}]^2}{n(n-1)} = 53,681,353,863.12$$

El intervalo de confianza es $(100(1 - \alpha))$: con alfa de 0.05.

$$\begin{aligned} & \bar{Z}_n \pm t_{n-1, 1-\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\widehat{Var}(\bar{Z}_n)} \\ & -120749 \pm 2.262 \sqrt{53681353.12} \\ & -120749 \pm 524,125.55 \\ & (-644,863.44, 403,375.55) \end{aligned}$$

El intervalo resultante si incluye al 0, por lo que se puede decir que el modelo tiene validez.

Tabla 10. Datos recabados para prueba t pareada para horas de zafra.

Horas zafra-datos históricos		Horas zafra-valores del modelo		
Corridas	xj	Yj	Zj= Xj-Yj	$(Z_j - \bar{Z}_{10})^2$
1	4680	4,384.40	295.60	70,891.19
2	4152	4,334.78	- 182.78	44,997.44
3	4200	4,378.23	- 178.23	43,087.80
4	3960	4,329.32	- 369.32	158,934.58
5	4656	4,292.76	363.24	111,485.20
6	4728	4,302.12	425.88	157,239.21
7	4536	4,382.02	153.98	15,533.63
8	3816	4,212.13	- 396.13	181,029.83
9	4368	4,302.22	65.78	1,327.44
10	4344	4,228.56	115.44	7,412.18
Suma				791,938.50
Promedio	4,344	4,315	29	

$$\widehat{Var}[\bar{Z}_{(n)}] = \frac{\sum_{i=1}^n [Z_i - \bar{Z}_{(n)}]^2}{n(n-1)} = 87,993.17$$

El intervalo de confianza es $(100(1 - \alpha))$: con alfa de 0.05.

$$\bar{Z}_n \pm t_{n-1, 1-\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\widehat{Var}(\bar{Z}_n)}$$

$$29 \pm 2.262 \sqrt{87,993.17}$$

$$29 \pm 671.04$$

$$(-641.69, 700.38)$$

El intervalo resultante si incluye al 0, por lo que se puede decir que el modelo tiene validez.

3.6.2 Corridas óptimas

Una vez validado el modelo, se procedió a calcular el número óptimo de corridas para el modelo. Tomando primero la variable de Horas/zafra. Los cálculos se realizaron por medio de Excel, obteniendo los resultados siguientes (*Tabla 11*):

Tabla 11. Datos para cálculo de corridas. (Variable horas/zafra).

Consecutivo	Horas/zafra
1	4384.4
2	4334.78
3	4378.23
4	4329.32
5	4292.76
6	4302.12
7	4382.02
8	4212.13
9	4302.22
10	4228.56
$\bar{x}$	4314.654
$S^2 n$	3642.126427
β	7

Tomando valores de 10 corridas, se calcularon los parámetros puntuales (media y varianza muestral, y se designó un valor de $\beta=7$, esto tomando en cuenta el grado de error que se va a tolerar, y ya que hablamos de miles de horas, designamos un ± 7 horas de error.

Posteriormente se realizaron los cálculos para obtener el número óptimo, esto será hasta que el valor de la celda que indica “=” sea menor que el valor de $\beta=7$, obteniendo lo siguiente en la *Tabla 12*.

Tabla 12. Obtención de número óptimo de corridas (a).

Número óptimo de corridas	
i	288
alfa	0.05
t	1.968264113
Raíz	3.556159771
=	6.999461656

Se deben hacer las i corridas mencionadas

También se calculó el número de corridas óptimas para la otra variable de entrada que son las toneladas de caña por zafra, ver *Tabla 13*.

Tabla 13. Datos para cálculo de corridas (variable: toneladas/zafra).

Consecutivo	Toneladas de caña entrantes por zafra
1	1,377,938.44
2	1,379,937.44
3	1,378,938.45
4	1,378,937.43
5	1,379,937.44
6	1,377,938.44
7	1,377,937.43
8	1,377,938.45
9	1,378,938.44
10	1,377,937.43
$\bar{x}$	1,378,637.94
$S^2 n$	677,446.28
β	50

De igual forma de recabaron datos de 10 corridas y se obtuvieron la media y la varianza, el valor de $\beta=50$, se designó así porque ya que estamos hablando de millones de toneladas de caña, podemos decir que permitiremos un margen de error de ± 50 toneladas.

Nuevamente se realizaron los cálculos para obtener el número óptimo, esto será hasta que el valor de la celda que indica “=” sea menor que el valor de $\beta=50$, obteniendo lo siguiente en la *Tabla 14*.

Tabla 14. Obtención de número óptimo de corridas. (b)

Número óptimo de corridas	
i	1,044
alfa	0.05
t	1.96224105
Raíz	25.4734157
=	49.98498198

Se deben hacer las i corridas mencionadas

Habiendo calculado el número de corridas considerando dos de las variables entrantes, se tomará el número de corridas que sea mayor, en este caso el de la variable de toneladas de caña, el cuál fue de 1,044 corridas como número óptimo.

NOTA: Es importante mencionar que el software utilizado (Anylogic®) es de la versión estudiantil, por lo que presenta ciertas limitantes, entre ella, el no poder configurar el número de corridas que se desean realizar, y mucho menor ir guardando o registrando los valores de los resultados en cada una de ellas, así que no se pudieron realizar como tal todas las corridas que resultaron del cálculo. En este caso, se realizaron 10 corridas debido también a que de los datos históricos proporcionados por el ingenio solo se tienen de 10 periodos, pero hay que recordar también los resultados obtenidos, fueron evaluados mediante la prueba t-pareada y resulta ser un modelo válidos.

3.7. Simulación Agentes inteligentes.

Para la simulación implementando agentes inteligentes, se realizó lo siguiente; primero se tomó como base el modelo de dinámica de sistemas ya existente como se puede apreciar en *Figura 30*. La finalidad de la implementación del agente es hacer que el sistema cambie de flujo cuando no es periodo de zafra ya que la planta de tratamiento trabajará de forma continua pero cuando no haya zafra pues el flujo reducirá, en cuanto a la variable de metros cúbicos de agua de servicios y limpiezas, según personal del ingenio, aproximadamente en un 20 o 30%.

De la paleta de herramientas se seleccionó el apartado de “agente” y dentro de este apartado podemos encontrar diversas opciones (ver *Figura 31*). Se decidió emplear un agente de tipo “evento”, debido a que un evento es la forma más sencilla de programar una acción en el modelo. Así, los eventos se utilizan habitualmente para modelar retrasos, acciones y tiempos de espera. (Anylogic, 2015).

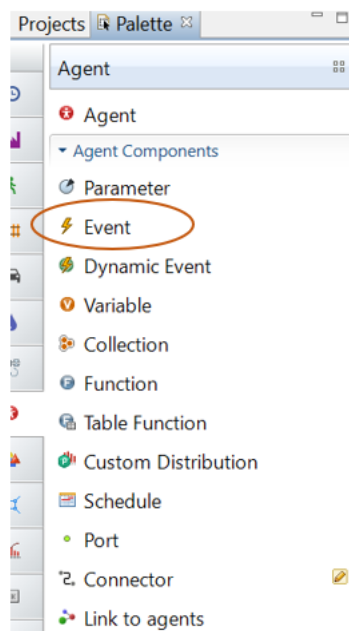


Figura 31. Sección de agentes inteligentes.

El tipo de agente que se utilizó, de acuerdo con la bibliografía expuesta en el apartado 2.11, es un agente de carácter reactivo ya que según (Gácita González, 2012), estos agentes son capaces de percibir su ambiente y responder de manera oportuna a los cambios que ocurren en él. En este caso específico el agente va a detectar una reducción de agua en periodo de no zafra y va a cambiar los niveles de flujo, la configuración que se le dio fue la siguiente, de los tres tipos de funciones que puede tener un evento, se seleccionó la de “timeout” (Figura 32), esto, porque a determinado tiempo, al correr la simulación por un año, casi a mitad del año (181 días después, que es lo que generalmente dura la zafra) tiene que reducir el flujo, puesto que ya no será periodo de zafra. Y como ya se había mencionado anteriormente, habrá una reducción de flujo de aproximadamente 20%. El evento se puso en modo “cíclico” esto para que cada determinado tiempo vaya actualizando el flujo entrante.

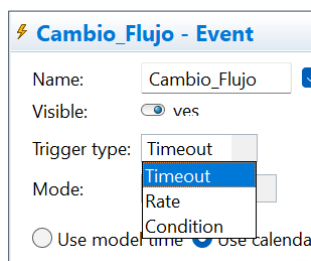


Figura 32. Función de evento.

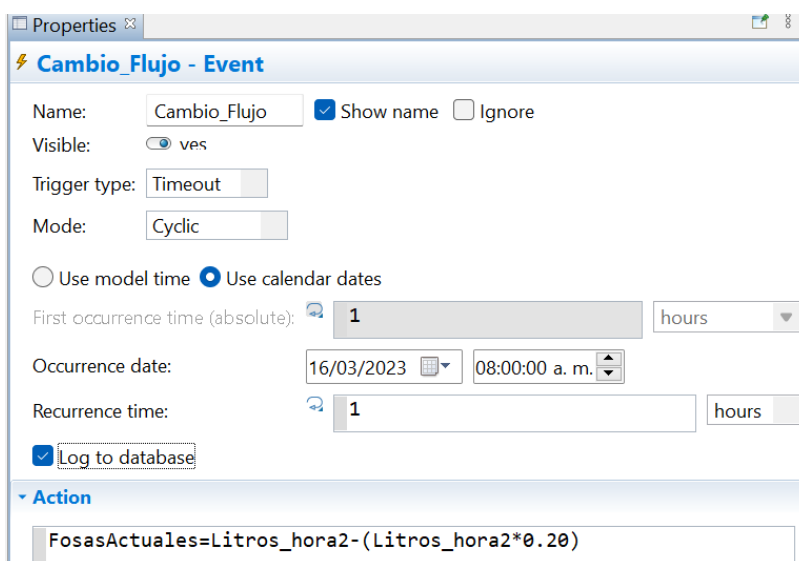


Figura 33. Configuración de evento para cambio de flujo.

Quedando el modelo representado de la siguiente manera. (Figura 34).

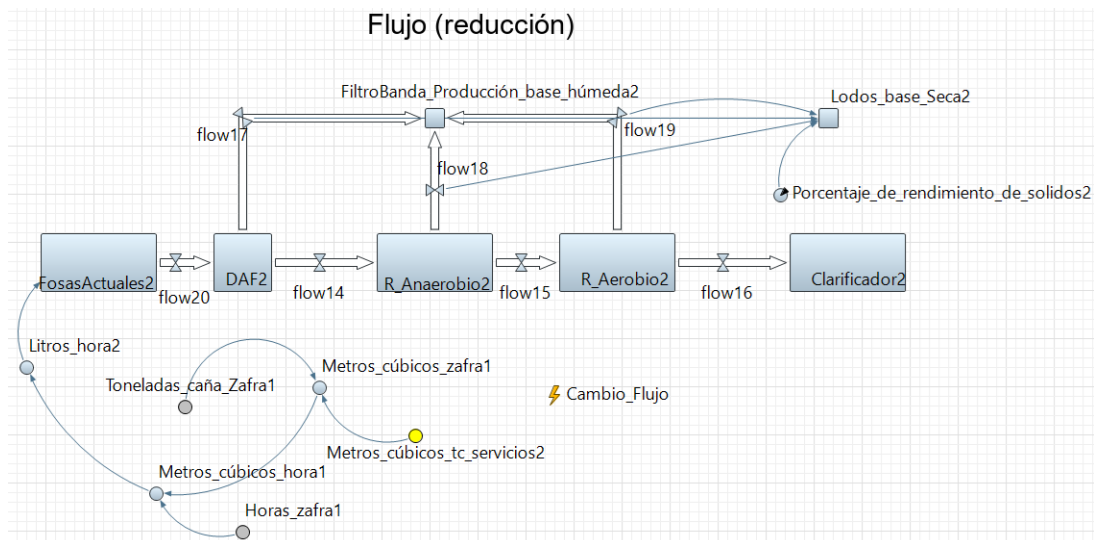


Figura 34. Modelo flujo PTAR con agente para reducción.

Una vez conociendo los flujos para lo que debe ser calculada la PTAR, los ingenieros realizaron los cálculos con base al flujo de periodo de zafra. Todos los cálculos fueron realizados por parte de un ingeniero perteneciente a la compañía externa y experta en plantas de tratamiento de aguas residuales.

Dichos resultados de los cálculos mostrados en resumen en (Tabla 15 y Tabla 16), podrán ser consultados en el ANEXO I. A continuación, se describe el sistema del tratamiento, las etapas de las cuales se constituirá y sus características de operación, así como su función.

Tabla 15. Resumen de cálculos para el sistema de tratamiento (a).

1	Altura de columna de agua	7.00
2	Área del reactor anaerobio	231.43
3	Numero de campanas colectoras de biogás	5.92
4	Numero de vertedores de descarga	462.86
5	numero de boquillas de alimentación al reactor	115.71
6	Remoción del sistema (%)	50.00
7	Producción de lodos diaria base seca (kg/día)	427.68
8	Producción teórica de gas metano (nm3/d)	1317.25

Tabla 16. Resumen de cálculos (b).

TABLA RESUMEN DEL CÁLCULO			
PARAMETROS DE DISEÑO	UNIDADES	PARTE "A" SOLO REMOCION DE DBO	PARTE "B" REM. DBO Y NITRIFICACION
Flujo de agua residual	m ³ / d	4320.00	4320.00
Carga promedio de DBO	kg / d	6759.9	6759.9
Carga promedio de NTK	kg / d	102.48	102.48
SRT aerobio	d	5.00	6.80
Volumen del tanque de aireación	m ³	4037.37	5640.78
Tiempo de ret. Hidráulico	h	22.43	31.34
SSLM	g / m ³	4000.00	4000.00
SSVLLM	g / m ³	3229.89	2904.71
F/M	g/g.d	0.51	0.59
Carga orgánica (DBO)	kg DBO/m ³ .d	1.67	1.20
Producción de lodo	kg / d	3229.89	2904.71
Rendimiento observado	kg SST / kg bDQO	0.48	0.43
	kg SSV / kg DBO	0.39	0.35
Oxígeno requerido	kg / h	296.95	281.21
SOTR	kg/hr	775.90	852.17
Promedio de flujo de aire	sm ³ / min	136.84	150.29
Retorno de lodos (RAS)	sín unidades	1.00	1.00
Clarificador, carga	m ³ / m ² .d	23.00	23.00
adición de alcalinidad como	kg / d	0.00	-2643.42
DBO en el efluente	g / m ³	< 30.0	21.97
SST en el efluente	g / m ³	< 30.0	20.0
Amonio en el efluente (NH4-	g / m ³	18.98	0.50

3.8. Descripción del tren de tratamiento de agua residual

Sabiendo el origen de las aguas residuales que alimentarán al sistema de tratamiento, que será de las fosas de oxidación existentes, se tienen los siguientes datos:

Flujo de agua residual que se alimentara al sistema de tratamiento:

- Durante periodo de Zafra: hasta 50 litros por segundo
- Durante periodo de mantenimiento: hasta 25 litros por segundo

Calidad del agua residual a tratar (después de las fosas de oxidación existentes)

- Tipo de Agua: agua procedente de fosas de oxidación.

o Q. medio (l/s) = 50.00

o DQO. (mg/l) = 8250.00

o DBO5 (mg/l) = 4890.00

o SST (mg/l) = 3500.00

o Nitrógeno total (mg/l) = 29.00

o Fosfatos (mg/l) =

o Temperatura °C = 42.00

o Factor DQO/DBO5 = 1.69

o Fosforo total (mg/l) = 96.00

o Sulfatos (mg/l) = 200.00

3.8.1 Secuencia de tratamiento

Con ayuda de los ingenieros expertos se describe a continuación este tren de tratamiento:

3.8.1.1 Tratamiento fisicoquímico por flotación tipo DAF

El proceso de trabajo del clarificador DAF (Flotación por Aire Disuelto), genera burbujas muy pequeñas, con un promedio de diámetro de 20 micrones; esto, en la parte media de la suspensión. Estas burbujas se adhieren tanto a sólidos finos, materia en suspensión, bacterias, precipitados de grasas, aceites, jabones, metales pesados, colorantes, proteínas, elementos orgánicos, etc., levantándolas y haciéndolas flotar en la superficie, permitiendo la clarificación en el fondo del tanque.

Datos de Diseño:

- Relación de carga de sólidos entre 4 y 12 kg/m²*h
- Carga Hidráulica entre los 4 y 12 m³/h/m²
- Relación A/S en un rango de 0.005-0.006mg/l
- Tiempo de retención de 5 a 8 min.

Las aguas residuales procedentes de las fosas de oxidación serán recibidas en la fosa 1 existente (control de válvulas), en este elemento se tendrá instalada una bomba sumergible de tipo instalación fija para un gasto de alimentación de hasta 55 litros por segundo máximo, destacando que el flujo de tratamiento será de 50 l/s. El bombeo será controlado en forma automática por electro niveles de paro y arranque, esto es, que cuando se tenga una columna de agua del 80% de la altura total de la fosa 1 el electro nivel se activará para que entre en funcionamiento la bomba sumergible que alimentará al sistema fisicoquímico y cuando se

tenga un 15% aproximado de la columna de agua se enviara una señal a la bomba sumergible para que pare y así sucesivamente, se destaca que con la finalidad de poder ajustar el tratamiento de las aguas residuales procedentes de las fosas de oxidación durante los periodos de zafra y el periodo de mantenimiento de la planta de producción, se instalaran dos equipos de flotación tipo DAF para tratar un flujo de aguas residuales de 25 l/s, cada uno (durante el periodo de Zafra trabajarán los dos equipos (50 l/s) y durante el periodo de mantenimiento solo trabajara un equipo (25 l/s). El ajuste de alimentación a los DAF será por medio de válvulas con ajuste manual, verificado por un medidor de flujo de tipo ultrasónico instalado en la tubería de alimentación el cual llevará un registro del agua de alimentación marcando el flujo instantáneo y totalizando el flujo que se alimenta en forma indefinida. Cuando se active la bomba sumergible para alimentar al tratamiento fisicoquímico se enviará una señal eléctrica al control del Sistema DAF, con la finalidad de que en forma automática se active la dosificación de reactivos (se utilizaran como reactivos un policloruro de aluminio (PAD) y un polímero aniónico), el aire de dilución, la bomba presurizadora y las rastras de separación de lodos.

Para la preparación del PAD, (el cual se surte en forma líquida con una concentración hasta del 23%), se tendrán instalados tres tanques con una capacidad de 10,000.0 litros cada uno, de los cuales dos se tendrán para el almacenamiento del PAD y un tercero para preparar las diluciones al 10% por gravedad mediante juego de válvulas teniendo con esto una capacidad de almacenamiento de reactivo hasta por un mes. El Polímero de tipo aniónico (polvo) se preparará en un sistema en línea al 0.001%, dosificándose en forma directa junto con la solución de PAD, en el sistema coagulador-floculador que viene integrado al tanque DAF.

El sistema DAF puede trabajar en forma automática y solo se tiene que estar al pendiente de los reactivos, que no lleguen a faltar o haciendo los ajustes de válvulas para el correcto suministro de estos.

Los lodos que se generen se enviarán a un sistema de desaguado de lodos (filtro banda) y el lodo deshidratado por sus características (contenido orgánico) puede ser utilizado como fertilizante en suelos agrícolas y forestales (previo análisis CRETIB, para demostrar que cumple los límites máximos permisibles).

3.8.1.2 Tratamiento anaerobio tipo UASB

La eficiencia de este tipo de reactores en aguas residuales con altas cargas orgánicas es mayor al 60 %. El reactor anaerobio presenta las siguientes ventajas: baja inversión inicial, no requiere equipos electromecánicos, los espacios para su instalación son pequeños, no se agregan sustancias químicas, produce poca cantidad de lodos por el tiempo de retención celular, se considera que los lodos están estabilizados y por lo tanto se pueden disponer en terrenos de cultivo después de ser deshidratados en lechos de secado.

Su principio de funcionamiento se basa en la buena sedimentación de la biomasa producida dentro del reactor, la cual se aglomera en forma de flóculos. Estos cuentan además con una actividad metanogénica muy elevada, lo que explica los buenos resultados del proceso. El reactor es de flujo ascendente y en la parte superior cuenta con un sistema de separación gas-líquido-sólido, el cual evita la salida de los sólidos suspendidos en el efluente y favorece la evacuación del gas y la decantación de los flóculos que eventualmente llegan a la parte superior del reactor. Un punto importante de su diseño es la distribución de las entradas del agua residual, ya que una mala repartición puede provocar que ciertas zonas de la cama de lodos no sean alimentadas, desperdiciando así su actividad. Esto es particularmente cierto en este tipo de aguas a tratar, pues la limitada materia orgánica presente forma pequeñas cantidades de biogás y por lo tanto la agitación del lecho provocado por las burbujas se ve reducida.

De la fosa 2 se alimentará de igual forma por bombeo al reactor anaerobio (serán dos elementos con capacidad de tratar 25 l/s de agua pretratada c/u.) y la operación en forma automática será de la misma forma que en la fosa 1, por medio de electro niveles siguiendo la misma secuencia que la fosa 1. El agua residual tratada fisicoquímicamente se alimentará por bombeo a una caja de distribución primaria y será la encargada de alimentar por gravedad a ocho cajas de alimentación secundarias (4 por reactor), cada caja será encargada de distribuir en forma homogénea el agua residual al reactor anaerobio, teniendo una boquilla de descarga por cada dos metros cuadrados de área. En este elemento se tiene contemplada una remoción de materia orgánica (DBO5 y DQO) del 50.0% y hasta un 80.0 % de sólidos suspendidos totales.

Como un subproducto del tratamiento se obtendrán aproximadamente 3,764.0 m³/día de biogás y de este biogás se espera el 70% será gas metano. Con la finalidad de evitar que dicho gas se vaya a la atmosfera se instala un quemador de biogás, destacando que el biogás puede utilizarse como fuente de energía para producir energía eléctrica y/o utilizarse como fuente de carbono y como neutralizante para fuentes alcalinas. La operación de este elemento solo requiere que se esté verificando la correcta distribución del agua residual hacia las cajas repartidoras (primaria y secundaria), que el quemador de biogás funcione correctamente, este equipo trabaja en forma automática, ya que al detectar una presión del gas de 2" columna de agua se abre la válvula que está integrada en el regulador de presión para que pase el biogás y se prende el piloto para que el biogás empiece a quemarse, cuando el piloto detecta una temperatura estable se apaga y solo se produce la flama por biogás exclusivamente.

El agua residual tratada en el reactor anaerobio será colectada por medio de canales que estarán colocados en la corona de agua y por medio de gravedad serán enviadas al reactor aerobio.

3.8.1.3 Tratamiento aerobio mediante lodos activados

El proceso de lodos activados es una técnica de tratamiento en la cual el agua residual y el lodo biológico (microorganismos) son mezclados y aireados en un tanque comúnmente llamado de aireación o reactor biológico. En el proceso de lodos activados, los microorganismos son completamente mezclados con la materia orgánica del agua residual, de tal manera que la usen como alimento y así puedan reproducirse.

A medida que los microorganismos crecen, se agrupan y van formando flóculos para producir una masa activa de microorganismos llamada "lodo activado". El agua residual fluye continuamente dentro de un tanque de aireación, donde el aire es introducido para mezclar el lodo activado. La mezcla de lodos activados y agua residual en el tanque de aireación se llama "licor mezclado". El lodo generado por los microorganismos se deja en el tanque de aireación para mantener una alta población de microorganismos y una remoción de contaminantes óptima. Debido a que el lodo que se produce es mayor que el necesario, se desecha una determinada cantidad de lodos para su tratamiento y disposición.

Los procesos de tratamiento aerobios son aquellos en los cuales los microorganismos realizan su actividad en un medio ambiente que contiene oxígeno disuelto, el cuál es utilizado en las

reacciones metabólicas. El metabolismo es el proceso bioquímico (reacciones de oxidación y reducción) que llevan a cabo los organismos vivientes para producir la energía que se utiliza en la síntesis, movimientos, respiración y en general para sobrevivir y reproducirse. En el organismo heterótrofo, que es el que tiene lugar en la generalidad de los procesos de tratamiento aerobio, la materia orgánica es el sustrato utilizado como fuente de energía.

Las aguas residuales procedentes del reactor anaerobio son alimentadas por gravedad a cada uno de los reactores aerobios, (dos reactores para un gasto de 25 l/s, c/u.). Para el suministro de aire se tendrán instalados 6 equipos sopladores de aire de 100 hp. de potencia cada uno, de los cuales solo trabajarán 5 equipos y el sexto equipo estará en “stand-by”, por si se requiere dar mantenimiento a alguno de los equipos que estén en funcionamiento.

En esta etapa del tratamiento, se debe de tener cuidado del mantenimiento preventivo de los sopladores (engrasado y verificación del nivel de aceite cada semana, así como la limpieza de los filtros de aire en el mismo periodo de tiempo), esto es importante, ya que, una falta de lubricación o exceso de estos mismos puede ocasionar que se incremente la temperatura en los equipos sopladores ocasionando disminución en el volumen de aire producido y daños en los rodamientos internos de los equipos ocurriendo lo mismo por la falta de limpieza y cambio de los filtros de aire. En cada reactor se tendrá instalado un equipo de medición de oxígeno disuelto con la finalidad de que el operador este verificando la concentración de oxígeno disuelto en el reactor, además la medición será enviada aun PLC, el cual controlará el funcionamiento de un equipo de soplado, (el que seleccione el operador), para que cuando por alguna razón se tenga una concentración alta de oxígeno mande una señal al equipo para que disminuya sus revoluciones hasta un 80 % o apague el equipo en caso de ser necesario y lo vuelva a activar al detectar una baja concentración de oxígeno.

El agua residual tratada será enviada por gravedad a un tanque clarificador para que en este elemento se separen los lodos biológicos que hayan sido arrastrados por el agua.

3.8.1.4 Clarificación

Las aguas residuales procedentes de los reactores aerobios se alimentarán por medio de gravedad al tanque clarificador, con la finalidad de que el lodo biológico al tener una densidad mayor que el agua tienda a sedimentar y por medio de una rastra mecánica dichos lodos sean orientados al centro del clarificador, en este punto y por medio de una tubería los

lodos serán enviados a una caja registro donde se tendrá instalada una bomba sumergible que será la encargada de retornar el lodo biológico a los reactores aerobios, con la finalidad de mantener una concentración estable de microorganismos en los reactores y el excedente de lodo por gravedad sea enviado al filtro banda para su desaguado respectivo y el agua tratada y clarificada por gravedad se enviará a un tanque de desinfección.

3.8.1.5 Desinfección

Las aguas tratadas serán recibidas por gravedad en el tanque de desinfección donde por medio de una bomba dosificadora se dosificarán hasta 4 partes por millón por litro de agua tratada de Hipoclorito de Sodio al 13%, con la finalidad de inhibir los coliformes totales y fecales, dando con este último paso una calidad de agua residual tratada que cumplirá la normatividad vigente (NOM-001-SEMANART-2021).

3.8.1.6 Secado de lodos

Para la deshidratación de lodos se tendrá un filtro banda que será el encargado de deshidratar el lodo que se genere en las diferentes etapas del tratamiento.

Estimación de producción de lodos por etapa de tratamiento:

- Tratamiento fisicoquímico (DAF): 9,288.00 kg. Base seca o 232.2 m³ de lodo al 4%.
- Tratamiento Anaerobio: 855.36 kg. Base seca o 21.40 m³ de lodo al 4%.
- Tratamiento Aerobio: 5,808.00 kg. Base seca o 145.2 m³ de lodo al 4%.
- Gran total producción de lodos: 15,951.36 kg. Base seca o 398.78 m³ de lodo al 4%.

El filtro banda opera en forma automática y se tendrá que estar verificando la dosificación del polímero que sirve como ayuda para el desaguado del lodo. El lodo desaguado puede ser usado como fertilizante o se puede enviar a la caldera para su quemado, previa demostración de que no es un lodo tipo CRETIB. (Acrónimo de clasificación de las características a identificar en los residuos peligrosos y que significa: corrosivo, reactivo, explosivo, tóxico ambiental, inflamable y biológico-infeccioso).

3.8.1.7 Reúso y/o envío hacia la descarga final actual

El agua residual tratada podrá ser usada en el sistema de enfriamiento existente y/o disponer de ella para su envío a la descarga final existente, cumpliendo cabalmente la normatividad.

3.9. Estudio técnico

Para la realización del estudio técnico se siguieron los criterios planteados en Figura 1 del capítulo II marco teórico.

- Localización óptima:

En esta etapa se determinó la ubicación geográfica óptima para el nuevo proceso a implementar. Se analizaron los diferentes lugares donde era posible ubicar el proyecto, buscando establecer un lugar que ofrece los máximos beneficios. Y mediante estudios topográficos realizados por un ingeniero civil se designó la mejor ubicación del proyecto, ver Figura 35.

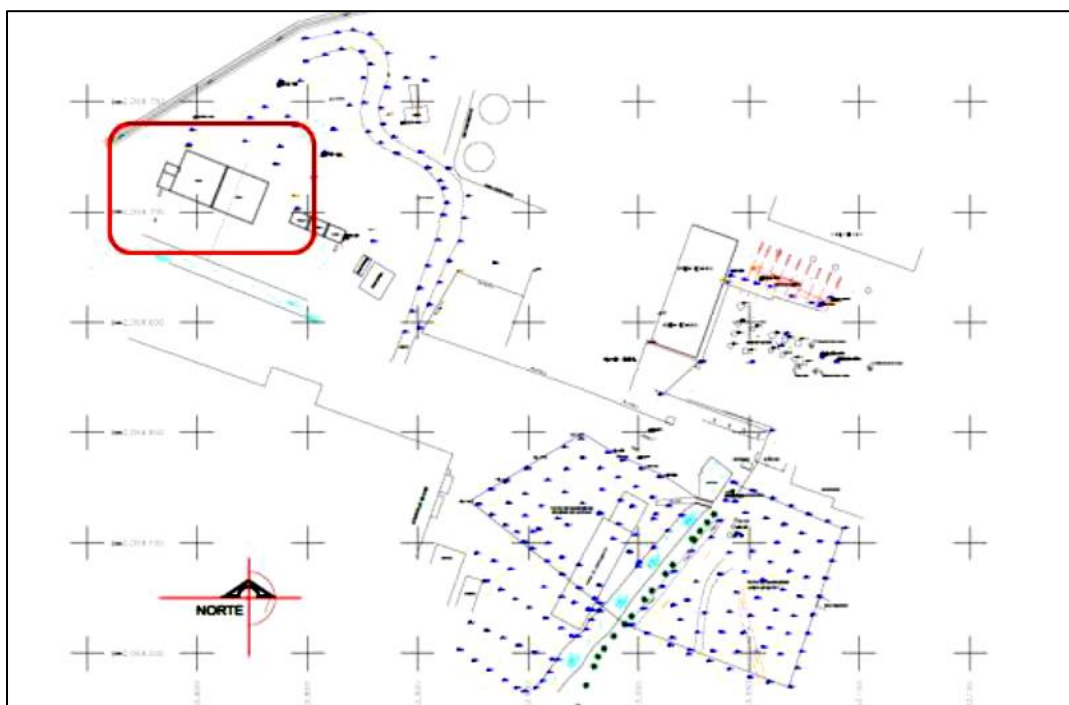


Figura 35. Plano topográfico de ubicación de PTAR.

- Tamaño del proyecto

Dado que el flujo que se tiene contemplado hasta el momento que es de 40 L/s, la propuesta es implementar un sistema de tratamiento de agua residual que cubra hasta 50 L/s, teniendo contemplados dos reactores anaerobios de un flujo de 25 L/s cada uno y un reactor aerobio

que cubrirá la capacidad de 50 L/s. Con este diseño se espera lograr cumplir los parámetros permisibles para descargas.

Se espera que el proyecto abarque un área aproximada de 6,400 m², aproximadamente y considerando la distribución antes propuesta. (ver *Figura 36*).

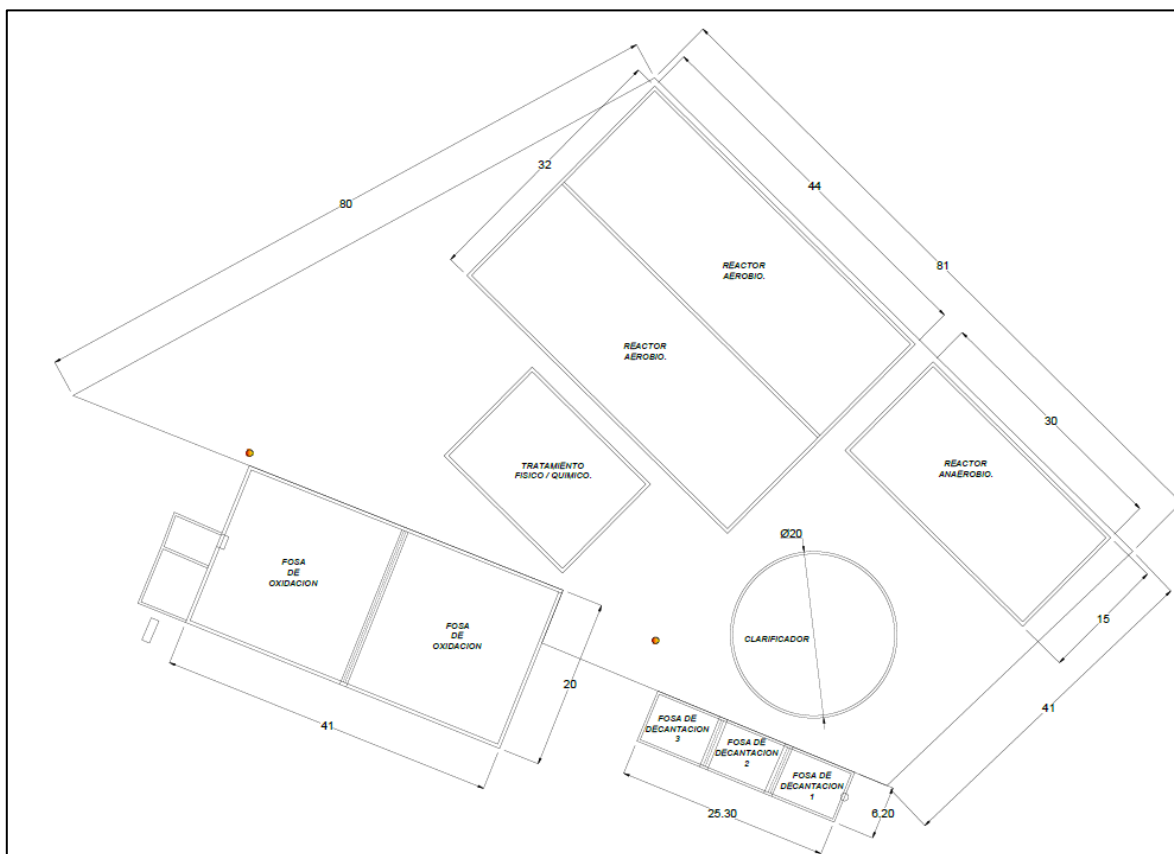


Figura 36. Tamaño a escala de PTAR.

- Ingeniería del proyecto

Para la ingeniería del proyecto, fueron proporcionadas al ingenio memorias de cálculo del diseño por compañía externa. A continuación, se muestra el resumen de cálculos en las siguientes tablas. Este paso se trabajó a la par a partir de que se conocieron las características del agua residual y el flujo entrante con la ayuda de los modelos en Anylogic®, se proporcionaron memorias de cálculo al ingenio, las cuales se pueden consultar en ANEXO I

- Layout

La distribución final que tendrá la planta de tratamiento, se la que se observa en *Figura 37*. Teniendo de inicio las fosas de sedimentación y oxidación (existentes desde antes en el ingenio), seguido de esto, el agua se alimentará al sistema (DAF) después a los reactores anaerobio y aerobio hasta llegar a la etapa de clarificador, es decir, el orden será de izquierda a derecha.

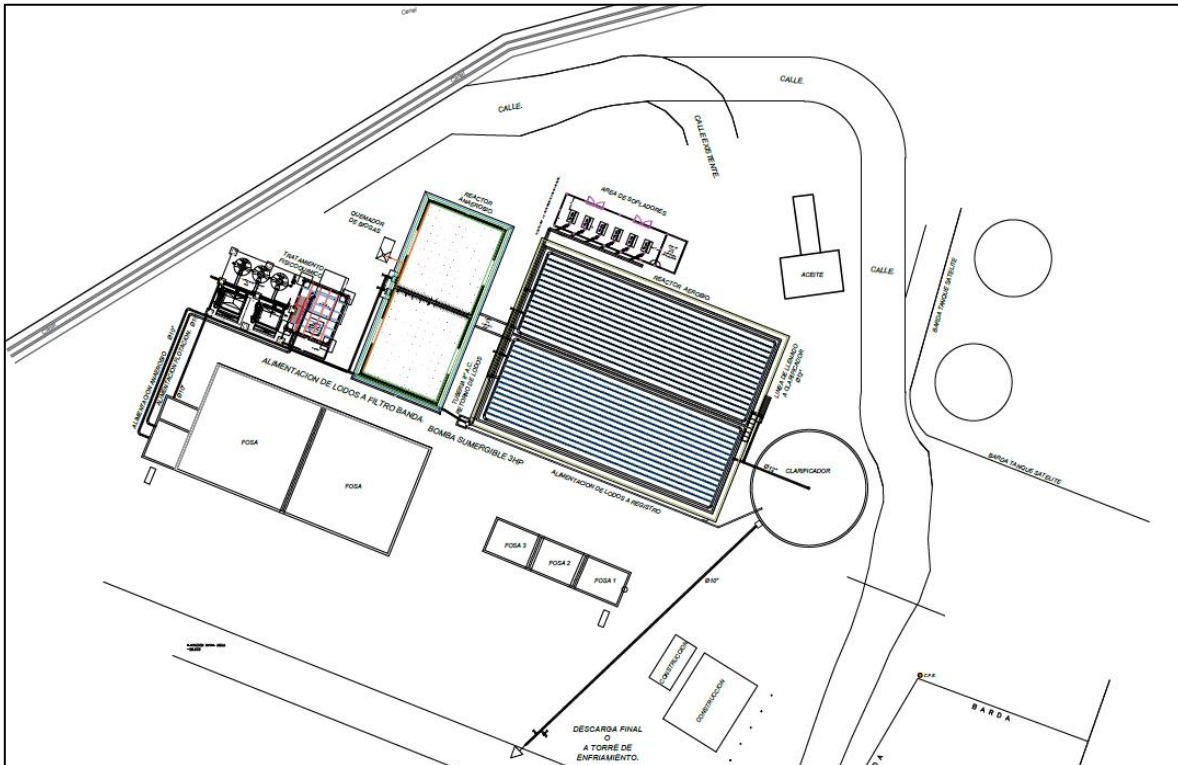


Figura 37. Layout PTAR.

- Requerimiento de recursos

El establecer los requerimientos de recursos que se necesitan contemplar para su operación no fue una tarea sencilla, pues para ello, una vez teniendo la ingeniería y sabiendo el sistema de tratamiento, se supieron los requerimientos de equipos necesarios para el montaje y correcto funcionamiento del proceso. En una secuencia de reuniones en donde se involucraron los ingenieros tanto del ingenio como de compañías externa, nos dimos a la tarea de buscar y cotizar equipo de acuerdo con las especificaciones que sugerían los

expertos, teniendo de manera general los siguientes costos recabados aproximados, ver *Tabla 17*.

Tabla 17. Desglose de costos para el proyecto de planta de tratamiento de agua residual.

Desglose de costos de proyecto- Planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR)	
Reactor anaerobio (Biológico)	\$ 14,687,513.00
Reactor aerobio	\$ 13,069,871.00
Clarificador	\$ 3,414,123.00
Sistema pretratamiento Fisicoquímico (DAF)	\$ 7,527,215.00
Sistema de deshidratación de lodos-Filtro banda	\$ 4,202,100.00
Medidor de flujo de entrada y salida	\$ 90,000.00
Sistema de aire (sopladores para aerobio)	\$ 3,387,944.00
Terracerías y señalización	\$ 342,709.00
Equipo eléctrico	\$ 1,596,315.00
Total	\$ 48,317,790.00

3.10. Aplicación de simulación Montecarlo (@RISK)

Para realizar el modelo de simulación de Montecarlo se tomaron en cuenta los siguientes pasos:

3.10.1 Identificar problemática

El proyecto que desea poner en marcha el ingenio en cuestión, como todo proyecto de inversión, tiene cierto grado de incertidumbre, en este caso específico, es analizar los parámetros inciertos que puede llegar a influir y en qué grado sobre la planta de tratamiento de aguas residuales, ya de ello se van a derivar conceptos como la generación de residuos

sólidos que podrán ser usados como biofertilizantes, dependiendo la cantidad, calidad y costo de estos, también la generación de bioenergía y por supuesto el ahorro que se tendrá por el cumplimiento de uso moderado o mínimo de agua y además por descargas en parámetros.

3.10.2 Definir variables de entrada

Sabemos ya por la bibliografía consultada en el capítulo II de marco teórico (*Figura 3*) que las variables se pueden clasificar en dos ramas dentro de las cuales encontraremos subclasificaciones, la determinación del tipo de variables que se usarán para este modelo depende del concepto del que se esté hablando.

Para este modelo, las variables de entrada que se manejarán serán las siguientes:

- Días de zafra
- Horas por zafra
- Toneladas de caña por día
- Toneladas de caña por hora
- Porcentaje de tiempo perdido
- Toneladas de caña por día efectivo
- Metros cúbicos de agua por hora
- Metros cúbicos de agua por zafra

Todas estas variables se clasificarán como variables del tipo continuas, debido a que estas pueden tomar cualquier valor dentro de un intervalo dado.

Pasando a las variables de salida, tenemos las siguientes:

- Agua de proceso de elaboración de azúcar
- Agua de fábrica de diversos usos
- Consumo de agua en metros cúbicos por tonelada de caña

Estas variables de igual forma se clasificarán como continuas y dependientes, porque pueden tomar cualquier valor, pero además dependen de otras variables o parámetros para conocer sus valores.

La incertidumbre viene dada siempre por un parámetro incierto, este suele tener comportamientos inesperados, y pueden influir muchos factores sobre él es por eso que siempre guarda cierto grado de incertidumbre.

Para este caso, el parámetro incierto que influye es:

- Toneladas de caña entrantes
- Concesión de agua superficial

3.10.3 Configurar simulación

En este punto se, organizan los datos recabados, los cuales se tratan de datos históricos de las toneladas de caña entrantes durante 10 zafra, así como los días de zafra, las horas de zafra, las toneladas de caña por hora, toneladas de caña por día efectivo, los metros cúbicos de agua por hora y los metros cúbicos de agua por zafra. De todos estos datos se sacaron valores promedio, lo cuales fueron ajustados con una distribución normal, como se muestra a continuación:

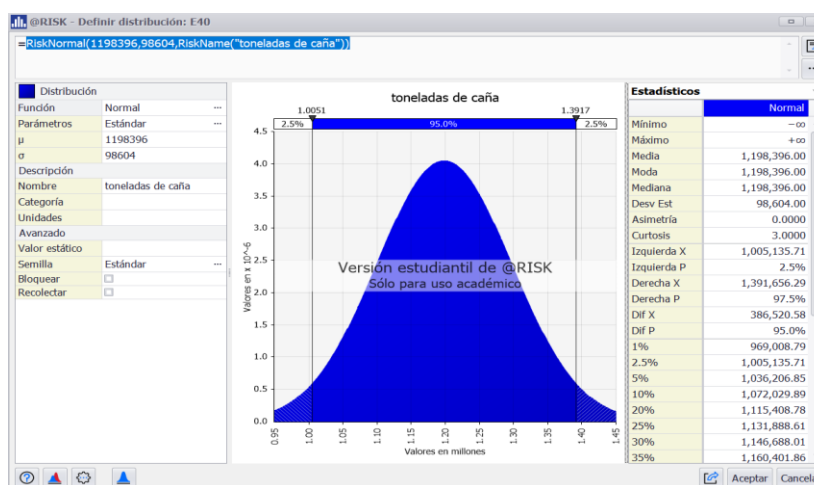


Figura 38. Ajuste de distribución para datos de toneladas de caña

Este ajuste se realizó con un nivel de confianza de 93%, y se realizó para cada una de variables mencionadas anteriormente.

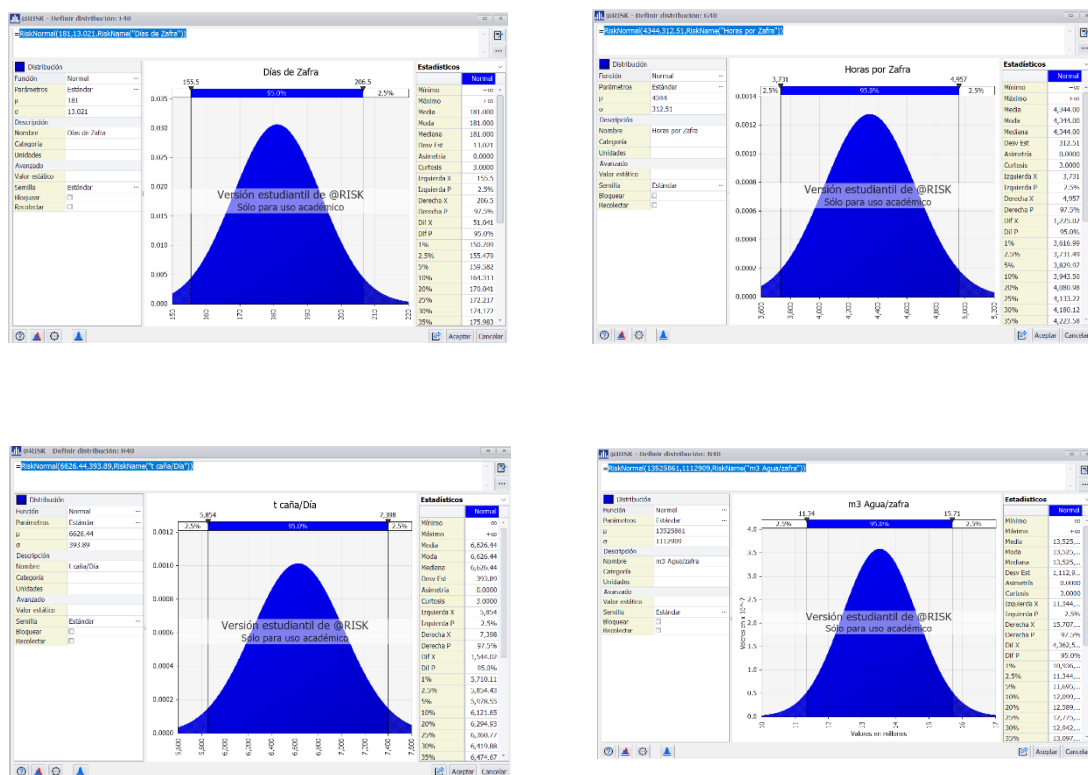


Figura 39. Ajuste de distribución a variables restantes.

Nota: Cabe resaltar que como bien se mencionó anteriormente en la problemática de este proyecto, el objetivo principal es la reducción de contaminantes para el cumplimiento de la norma, pero otra de sus necesidades también es la reducción del consumo de agua por medio de la implementación de un sistema de recirculación y torre de enfriamiento, este segundo punto fue llevado a cabo casi a la par con este proyecto, pero para este caso en particular el enfoque solo será para el tratamiento de sus residuos, aun así en el modelo de Montecarlo se contemplan algunos aspectos del proyecto de torre de enfriamiento, esto se hizo con la finalidad de tener un panorama general de la inversión que implicaría la puesta en marcha de ambos proyectos para el ingenio.

3.11. Conclusión

Esta metodología presentada se siguió de forma ordenada para poder obtener buenos resultados tanto con el manejo de los datos proporcionados por el ingenio, como en el estudio técnico para el diseño de la PTAR, es decir, toda gira en torno a los objetivos establecidos para este caso de estudio. Una vez realizada la configuración y los ajustes para el modelo, se procedió a realizar las simulaciones, de las cuales se describen resultados en la siguiente sección de resultados

4. Capítulo IV Resultados

4.1. Introducción

La sección de resultados evidentemente es muy importante porque a partir de ella se tomarán en cuenta diversas opciones de solución a la problemática basándose en lo obtenido. Aquí se analizarán dichos resultados considerando los escenarios posibles de la situación real. Además, estos resultados que abordan la simulación Montecarlo, la simulación por dinámica de sistemas y por agentes inteligentes serán el punto de partida para ir cumpliendo los principales objetivos e ir dando las primeras conclusiones de solución a este caso de estudio.

4.2. Resultados de simulación Montecarlo

Generalmente cuando se trata de invertir en un nuevo proyecto es conveniente utilizar la simulación de Montecarlo, ya que nos ayuda a generar diferentes escenarios que se podrían presentar en función de los costos y plazo del proyecto.

Para este caso, se tomó como punto de partida los datos de entrada proporcionados por el ingenio (véase *Tabla 18*), lo cuáles son recopilación de datos históricos, se realizó un modelo de simulación Montecarlo para reiterar el balance del flujo de agua que tendrá la planta de tratamiento de agua residual, tomando en cuenta desde el consumo que se logrará una vez adaptado el proyecto de torre de enfriamiento y líneas de condensadores para la recirculación del agua.

Estos datos son el registro que se tiene considerando cada periodo de zafra. Se contempla el registro desde el año 2012 hasta el año 2022, en la *Tabla 18* podemos observar las toneladas de caña entrantes por cada periodo de zafra, así como los días de duración y las horas. También se tienen los datos de toneladas de caña por hora. El porcentaje de tiempo perdido y las toneladas de caña por hora y día efectivo.

Tabla 18. Datos de entrada

Datos de entrada								
Zafra	Toneladas de caña	Días de Zafra	Horas por Zafra	t caña/Día	t caña/h	% Tiempo perdido	t caña/Día efectivo	t caña/hora efectiva
Zafra 12-13	1,372,837	195	4,680	7,040	293	25.2%	9,412	392
Zafra 13-14	1,235,524	173	4,152	7,142	298	23.4%	9,323	388
Zafra 14-15	1,133,726	175	4,200	6,478	270	31.7%	9,485	395
Zafra 15-16	1,202,882	165	3,960	7,290	304	19.2%	9,023	376
Zafra 16-17	1,238,529	194	4,656	6,384	266	30.2%	9,146	381
Zafra 17-18	1,255,537	197	4,728	6,373	266	30.6%	9,183	383
Zafra 18-19	1,254,009	189	4,536	6,635	276	26.4%	9,015	376
Zafra 19-20	1,011,539	159	3,816	6,362	265	23.8%	8,349	348
Zafra 20-21	1,110,382	182	4,368	6,101	254	28.0%	8,474	353
Zafra 21-22	1,169,000	181	4,344	6,459	269	27.9%	8,958	373
Promedios	1,198,396	181	4,344	6,626	276	26.6%	9,037	377

Para obtener la fila de promedios, ajustamos los datos de cada columna a una distribución normal con un nivel de confianza de 93%. (véase *Figura 40*). Esto se hizo para cada una de las columnas de la tabla de datos de entrada.

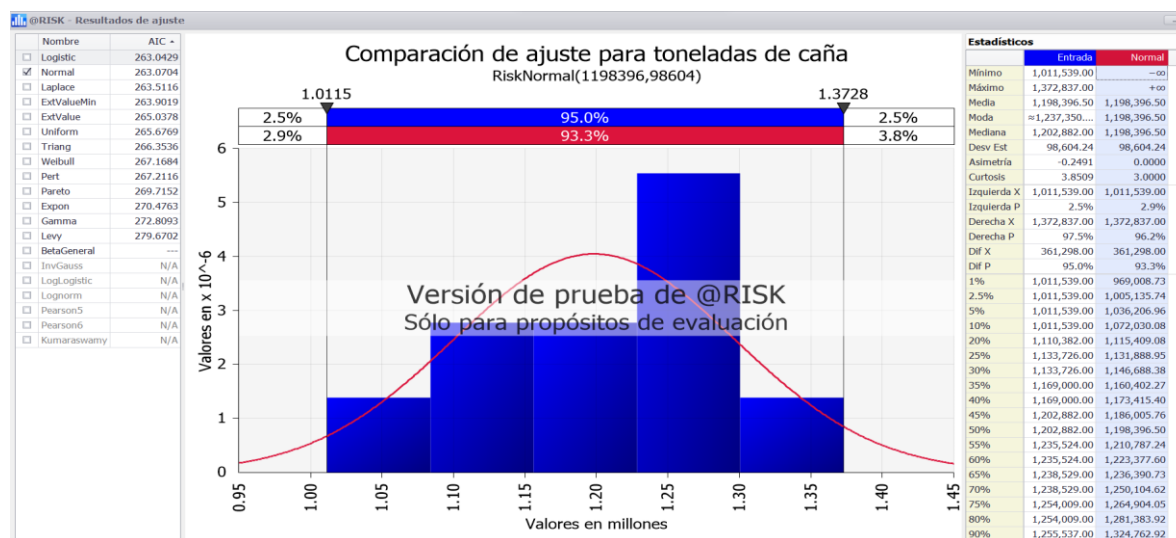


Figura 40. Ajuste de distribución

En *Tabla 19* se observa que, para la cantidad de la fila de concesión de agua, como no se cuenta con un dato exacto siempre, es decir se tiene un aproximado, entonces se manejó una distribución triangular (*RiskTriang (13443089, 13543089, 13643089)*).

Tabla 19. Datos de Agua consumida

Descripción	Cantidad	Unidad
Concesión agua superficial	13,543,089	m ³
Días de zafra	181.00	días
Horas de zafra	4,344.00	h
Horas de zafra efectivas	3,186.76	h
m ³ de agua/hora	4,249.80	m ³ /h
Tonelada de caña/día	9,036.82	tc/d
Tonelada de caña/hora	376.53	tc/h
Consumo m ³ de agua/tonelada de caña	11.29	m ³ /tc

Para calcular los m³ de agua por hora (m³ Agua/h) de cada zafra registrada, en la *Tabla 20* se realizó una operación de división de los m³ de agua en una zafra entre las toneladas de caña por día efectivo (t caña/día efectivo). En lo que respecta a la columna de m³ de agua por zafra (m³ Agua/zafra), se realizó una multiplicación de las toneladas de caña de cada una de las zafras por el consumo de m³ de agua por tonelada de caña. En la última fila nuevamente se ajustan los datos a una distribución normal para obtener los promedios, como se hizo anteriormente, (ver *Figura 40. Ajuste de distribución*).

Tabla 20. Datos de Agua consumida por zafra

m ³ Agua/h	m ³ Agua/zafra
10.8	15,494,707.09
10.9	13,944,905.68
10.8	12,795,949.04
11.3	13,576,487.42
11.2	13,978,822.02
11.1	14,170,785.07
11.3	14,153,539.09
12.2	11,416,869.24
12.0	12,532,473.88
11.4	13,194,073.73
11.3	13,525,861

Actualmente como se puede ver en *Tabla 21*, la cantidad de agua de fábrica para diversos usos no se tiene con exactitud así que nuevamente se manejó con una distribución triangular, (*RiskTriang (0.648995, 0.658995, 0.668995)*). El consumo actual de agua que se viene manejando es de 11.29 m³/ton de caña.

Tabla 21. Datos para balance actual de agua

Balance actual de agua			
Descripción	m ³ agua/tc	m ³ agua/h	%
Agua de proceso de elaboración de azúcar	10.63	4002	94.2%
Agua de fábrica diversos usos	0.66	248	5.8%
Consumo de agua m ³ /ton de caña	11.29	4,250	100%

El agua de proceso de elaboración se tomó del cálculo realizado considerando ya implementada y puesta en marcha la torre de enfriamiento, es decir, una vez trabajando la torre de enfriamiento y la recirculación se planea tener un consumo de 1.24 m³ agua/ton de caña. Y observamos también en esta *Tabla 22* que el beneficio que tendría el ingenio será de una reducción en su consumo agua de proceso de elaboración de azúcar de 10.63 a 1.24 m³ agua/ton de caña, hablamos de una diferencia de 9.39 m³ agua/ton de caña.

Tabla 22. Balance de agua con proyecto de torre de enfriamiento y planta de tratamiento de agua residual.

Balance de agua con proyecto TE y PTAR			
Descripción	m ³ agua/tc	m ³ agua/h	%
Agua de proceso de elaboración de azúcar	1.24	466	65.3%
Agua de fábrica diversos usos	0.66	248	34.7%
Consumo de agua m ³ /ton de caña	1.90	714	100%
Beneficio de ingenio (Torre de Enfriamiento + Estación condensadores)	9.39	3,535.66	88.4%

Una vez teniendo en funcionamiento tanto la torre de enfriamiento como la planta de tratamiento de agua residual (PTAR), se estima lo siguiente; de la *Tabla 22* se sabe que los 0.66 m³ agua/toneladas caña, que es el agua de fábrica de diversos usos y es el agua que será tratada por la PTAR, después del tratamiento, una parte será enviada hacia la torre de enfriamiento, 0.44 m³ agua/toneladas caña y el resto, 0.22 m³ agua/toneladas de caña, se quedará contenida en la PTAR después de la zafra y eventualmente será destinada para los diversos usos de la fábrica, (Véase *Tabla 23*).

Tabla 23. Balance agua con proyecto de torre de enfriamiento y planta de tratamiento de agua residual (reutilizando agua de PTAR). (a)

Balance de agua con proyecto TE y PTAR (reutilizando agua de la PTAR en TE)			
Descripción	m³ agua/tc	m³ agua/h	%
Agua contenida en la PTAR después de zafra	0.22	81.98	33.0%
Reutilización de agua de PTAR hacia Torre de Enfriamiento	0.44	166.16	67.0%
Sumas	0.66	248.13	100%

Asimismo, podemos observar en la *Tabla 24*, que el agua disponible ahora para el proceso de elaboración de azúcar, es decir, los 0.80 m³ agua/tonelada caña resulta de la resta del agua de proceso de elaboración de azúcar de la *Tabla 22* menos el agua reutilizada de PTAR hacia torre de enfriamiento.

Tabla 24. Balance de agua con proyecto de torre de enfriamiento y planta de tratamiento de agua residual (Reutilizando agua de PTAR). (b)

Balance de agua con proyecto TE y PTAR (reutilizando agua de la PTAR en TE)			
Descripción	m³ agua/tc	m³ agua/h	%
Agua de proceso de elaboración de azúcar	0.80	300	78.5%
Agua de fábrica diversos usos	0.22	82	21.5%
Consumo de agua m ³ /ton de caña	1.00	381.8	100%

Para estimar el flujo para el cual sería diseñada la planta de tratamiento de agua residual, ver *Tabla 25*, se tomaron en cuenta los 0.66 m³ agua/toneladas caña obtenidos del balance de agua con el proyecto de torre de enfriamiento (TE) y planta de tratamiento de agua residual (PTAR), ya que es la cantidad que se pasará al tren de tratamiento, esa cantidad se multiplica por el promedio de toneladas de caña por zafra, para conocer la cantidad de agua que se pasará al tratamiento durante la zafra y así se obtiene 789,736.97 m³/zafra. Posteriormente se consideran las horas de zafra sin tiempo perdido, puesto que la planta seguirá en funcionamiento sea o no sea periodo de zafra, por eso se toma el promedio de horas de zafra que son 4,344.00 horas. Seguido de ello, se dividen los m³/zafra entre las horas de zafra sin el tiempo perdido, dando como resultado 181.80 m³/h, posteriormente se realiza una conversión de m³ a L y de horas (h) a segundos (s), dando como resultado final que el flujo para el cual la PTAR fue diseñada es un flujo de 50 L/s.

Tabla 25. Diseño de Planta de tratamiento de agua residual (PTAR).

Diseño flujo de PTAR	
Cantidad	Unidades
789,736.97	m ³ /zafra
4,344.00	h/zafra sin Tiempo perdido
181.80	m ³ /h
181,799.49	L/h
3,029.99	L/min
50.50	L/s

Flujo de lodos residuales

Como bien fue mencionado en la descripción del sistema de tratamiento, habrá etapas en las que se generarán residuos sólidos, en este caso lodos, esto debido a la naturalidad de los procesos ocurridos en las etapas de este tren de tratamiento, las cantidades fueron estimadas por ingenieros expertos, de acuerdo con las condiciones de operación que se planea, en la *Tabla 26* se muestran los valores de producción, se le conoce como base húmeda porque de primera instancia se expresa en términos de volumen.

Tabla 26. Flujo de lodos, producción base húmeda.

Producción base húmeda	Producción diaria (t/día)
Lodos base húmeda de DAF	232.2
Lodos tratamiento anaerobio	21.4
Lodos tratamiento aerobio	145.2
Lodos base húmeda total de PTAR	398.8

Se estableció un aproximado de rendimiento volumétrico para los residuos sólidos del 4%, (ver *Tabla 27*) para conocer la base seca, es decir en términos de masa, para la obtención de la columna de producción diaria se realizó un cálculo de multiplicación de la cantidad de lodos de base húmeda de cada una de las etapas por el porcentaje de rendimiento, y para la columna de producción por zafra se tomó el producto de la multiplicación de cada una de las cantidades de base seca al día por los días de zafra en promedio.

Tabla 27. Flujo de lodos, producción base seca.

Producción base seca	Producción diaria (t/día)	Producción zafra	
Porcentaje de rendimiento volumétrico de sólidos	4%	Cantidad	Unidades
Lodos base seca de DAF	9.288	1,681	t/zafra
Lodos tratamiento anaerobio	0.856	155	t/zafra
Lodos tratamiento aerobio	5.808	1,051	t/zafra
Lodos base seca total de PTAR	15.95	2,887.31	t/zafra

Otro de subproductos generados durante el proceso, resulta ser el biogás (ver *Tabla 28*), este biogás se traduce a bioenergía, de acuerdo (Varnero Moreno, 2011), el contenido energético del biogás al 70% de metano (CH₄) se aproxima a 26,044 BTU, sabiendo esto y también el aproximado de biogás que se producirá al día, se realizan cálculos y conversiones para obtener el resultado de energía en unidades de mega Jules (MJ) por zafra.

Tabla 28. Producción de Biogás.

Producción de Biogás		
BTU's en biogás al 70% de concentración	26,044.4	
Producción de biogás al 70% de CH ₄ por día	3,764.00	m ³ de CH ₄ al 70%/día
Poder calorífico contenido en la producción de biogás	98,031,121.60	BTU's /día
Poder calorífico contenido en la producción de biogás	4,084,630.07	BTU's/h
Producción energética	17,743,633,009.60	BTU's/zafra
Producción energética mega Jules	18,721,307.19	MJ/zafra

4.2.1 Beneficios económicos

En la *Tabla 29*, se encuentran los datos del precio del agua que es de \$18.0505 pesos/ m³, aproximadamente y el costo que genera el consumo que se realiza sin la implementación del proyecto tanto de torre de enfriamiento como del sistema de tratamiento de agua residual, siendo estos de \$244,459,527.99 y \$21,719,211.27 pesos/ m³ respectivamente. Sabiendo ya, que la finalidad de la implementación de esta planta de tratamiento es darle el tratamiento necesario al agua para que esta se encuentre dentro de los parámetros permitidos por la norma (NOM-001-SEMARNAT-2021), al lograr cumplir estos parámetros es muy probable que se pueda obtener el certificado de calidad del agua y al obtenerlo el costo del consumo de agua (celda remarcada), con el proyecto se volvería \$0.00 pesos/m³. Así también, observamos el beneficio económico que se tendría, si de inicio se consumían 13,543,089 m³/zafra ahora con

el proyecto se consumirán 1,203,247.07 m³/zafra, así que en términos económicos sin el proyecto se tiene un gasto de \$244,459,527.99 pesos/ m³ y con el proyecto \$21,719,211.27 pesos/ m³, lo que refleja una diferencia de \$222,740,316.73 pesos/ m³ en beneficio para el ingenio.

Tabla 29. Datos de precio de agua

Agua		
Precio del Agua	18.0505	Pesos/m ³
Beneficios económicos	m ³ /zafra	Pesos Zafra
Consumo de Agua sin proyecto	13,543,089	244,459,527.99
Consumo de Agua con proyecto	1,203,247.07	21,719,211.27
Beneficio TE y condensadores	12,339,841.93	222,740,316.73

En la *Figura 41* se observa el gráfico resultante de la simulación del beneficio que se tendrá con el proyecto, el cual puede encontrarse en un valor mínimo aproximado de \$218,140,665.19 y un valor máximo de aproximadamente \$226, 891,804.45 pesos/zafra.

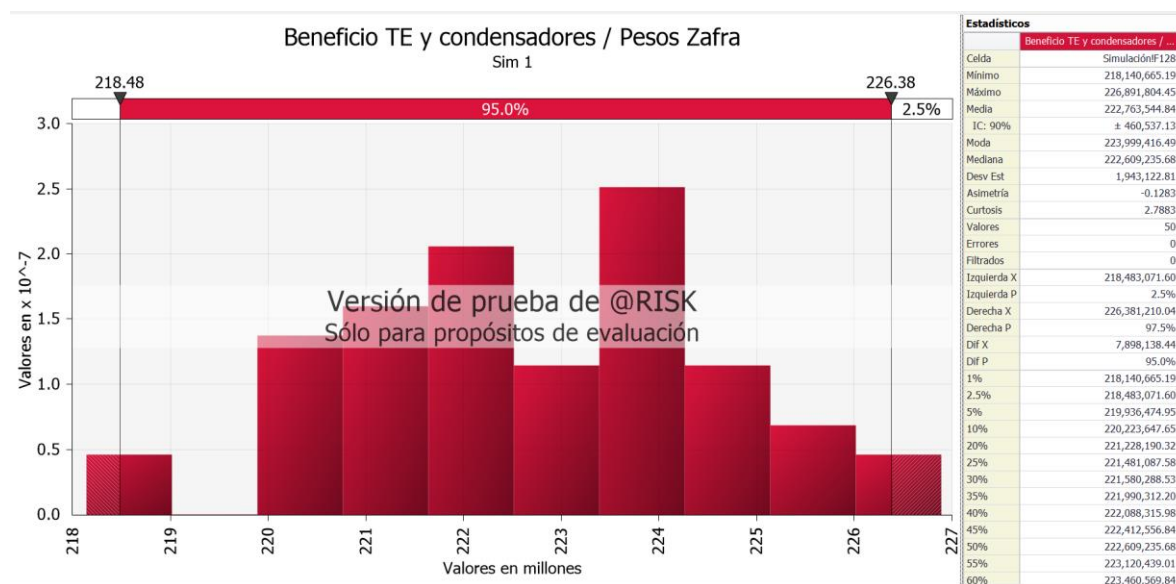


Figura 41. Simulación del beneficio con torre de enfriamiento y condensadores.

Para el beneficio que se tendrá con el tratamiento de biosólidos, en la *Tabla 30* se observa el precio aproximado de biosólidos biofertilizantes que es de \$70.00 pesos/m³ aproximadamente. Evidentemente sin el proyecto no hay producción ni tratamiento de lodos por lo que el costo será \$0.00. Una vez puesta en marcha la PTAR se producirá un aproximado de 2,887.31 m³/zafra lo que equivale a un beneficio de \$202,111.84 Pesos/zafra, más el ahorro que se tendrá por realizar las descarga en parámetros requeridos por la norma que será de \$1,141,440.00 Pesos/zafra, se tendrá un ahorro total de aproximadamente \$1,343,551.84 Pesos/zafra, aunque de acuerdo con la simulación Montecarlo este ahorro puede oscilar entre \$1,312,175.00 y \$1, 374, 758.00 pesos. (Véase *Figura 42*).

Tabla 30. Datos de precio y beneficios por biosólidos.

Biosólidos		
Precio de Biosólidos Biofertilizantes)	\$ 70.00	pesos/m ³
Beneficios económicos	m ³ /zafra	Pesos/zafra
Producción de lodos sin proyecto	0	-
Producción de lodos con proyecto	2,887.31	\$ 202,111.84
Beneficio PTAR	2,887.31	\$ 202,111.84
Ahorro por descargas en parámetros (SST y DQO)		\$ 1,141,440.00
Total		\$ 1,343,551.84

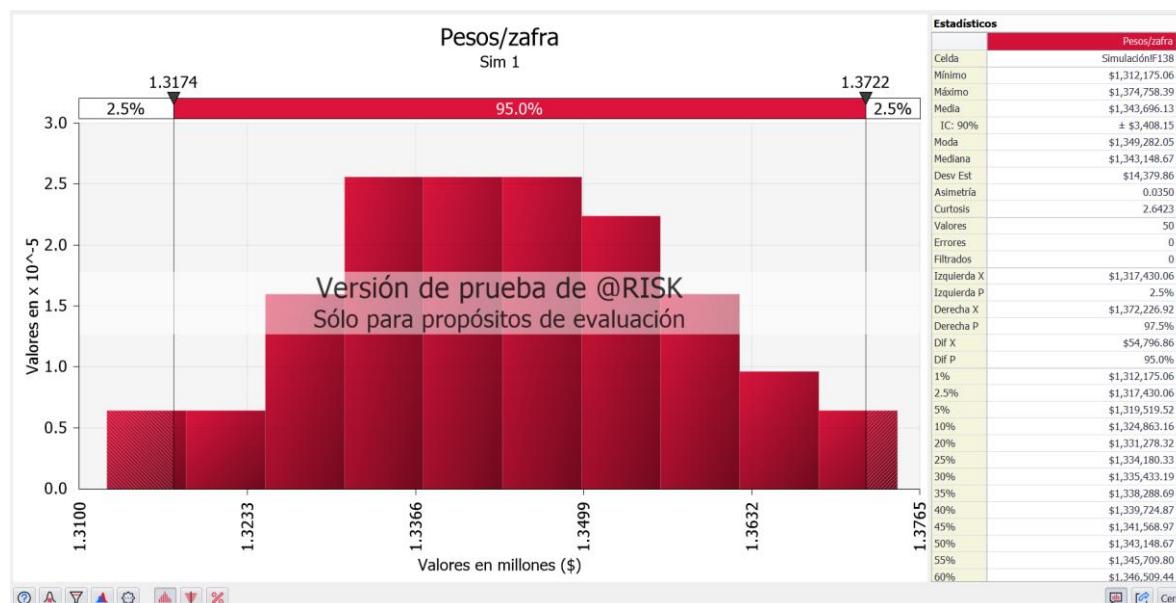


Figura 42. Simulación del beneficio económico por la generación y tratamiento de biosólidos.

En cuanto a la generación de biogás, que se utilizará como bioenergía, en la *Tabla 31* se presenta el precio aproximado del combustóleo que es de \$0.29 pesos/MJ. Los mega Joules (MJ) lo convertimos a BTU para manejar otras unidades de energía. Sin el proyecto, evidentemente no habrá producción de biogás, por lo tanto, no se tiene ningún beneficio o ahorro, ya con el proyecto se espera un aproximado de 18,721,307.19 BTU's/zafra lo que refleja un beneficio económico de \$5,398,587.46 Pesos/zafra.

Tabla 31. Datos de precio y beneficios por bioenergía.

Bioenergía		
Precio de Energía	\$ 0.29	pesos/MJ
Beneficios económicos	BTU's/zafra	Pesos/zafra
Producción de bioenergía sin proyecto	0	\$ -
Producción de bioenergía con proyecto	18,721,307.19	\$ 5,398,587.46
Beneficio energético de PTAR	18,721,307.19	\$ 5,398,587.46

Observando la *Figura 43*, el beneficio económico que se tendrá con la generación de bioenergía será aproximadamente de \$ 5,391, 480. 79, con un valor mínimo y máximo de entre \$4, 274, 739.58 y \$6, 239, 193.12, respectivamente.

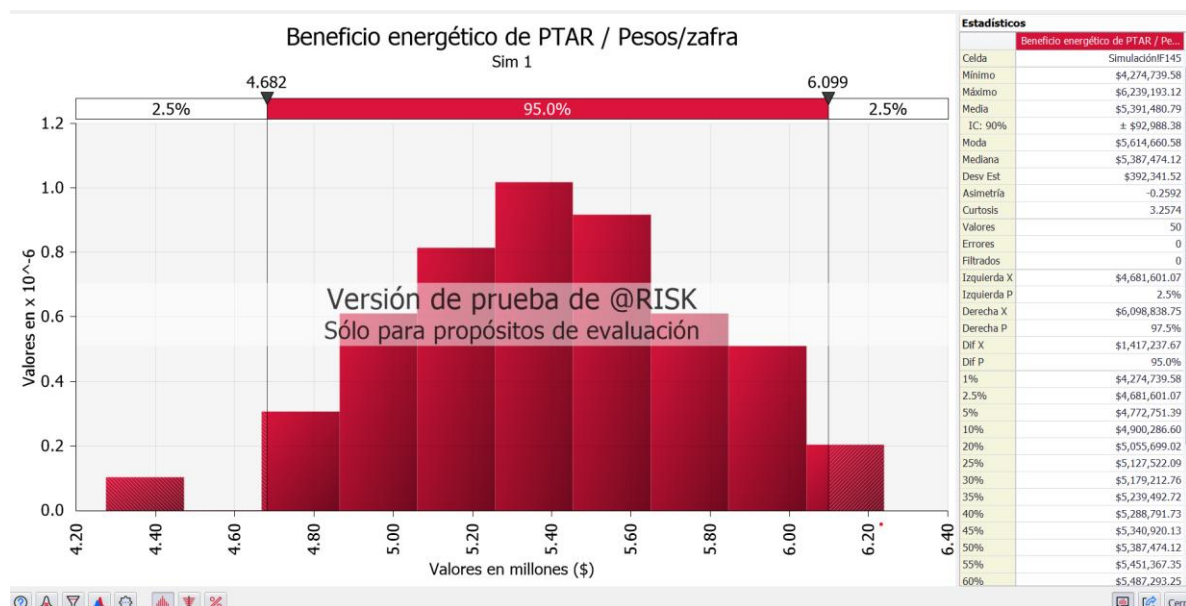


Figura 43. Simulación del beneficio energético.

Finalmente, en la *Tabla 32* se conjuntan los beneficios económicos que se tendrán con la implementación de la planta de tratamiento de agua residual, y por supuesto también de la implementación de la torre de enfriamiento y recirculación del agua. Primeramente se tendrá una reducción del costo del agua, siendo esta de \$222,740,316.73, seguido de esta reducción de costo, se tiene un beneficio para el ingenio por la producción de biofertilizantes y por cumplir con los parámetros establecido por norma, el cuál será de \$1,343,551.84, y también se presenta el beneficio por la producción de biogás empleada como bioenergía, el cual será de \$5,398,587.46, sumando todos estos beneficios se tiene un total de \$229,482,456.02, conveniente para el Ingenio.

Tabla 32. Beneficios económicos totales.

Suma de beneficios	
Reducción de Costo de Agua	\$ 222,740,316.73
Producción de biofertilizantes y Agua en parámetros	\$ 1,343,551.84
Producción de bioenergía	\$ 5,398,587.46
Total	\$ 229,482,456.02

Se estima que el monto de inversión que tiene que hacer el ingenio es de aproximadamente \$251,500,000.00, y se espera de acuerdo con el cálculo del periodo de recuperación que la inversión se recupere en aproximadamente 1 año y 10 meses.

Valor del proyecto (Inversión)	\$ 251,500,000.00
Periodo de recuperación (Años)	1.10

Al simular el periodo de recuperación que puede presentar esta implementación de proyecto, se estima de acuerdo con la *Figura 44*, que la recuperación se lleve a cabo como mínimo en 1 año y como máximo en 1 año y 11 meses (aproximadamente 2 años).

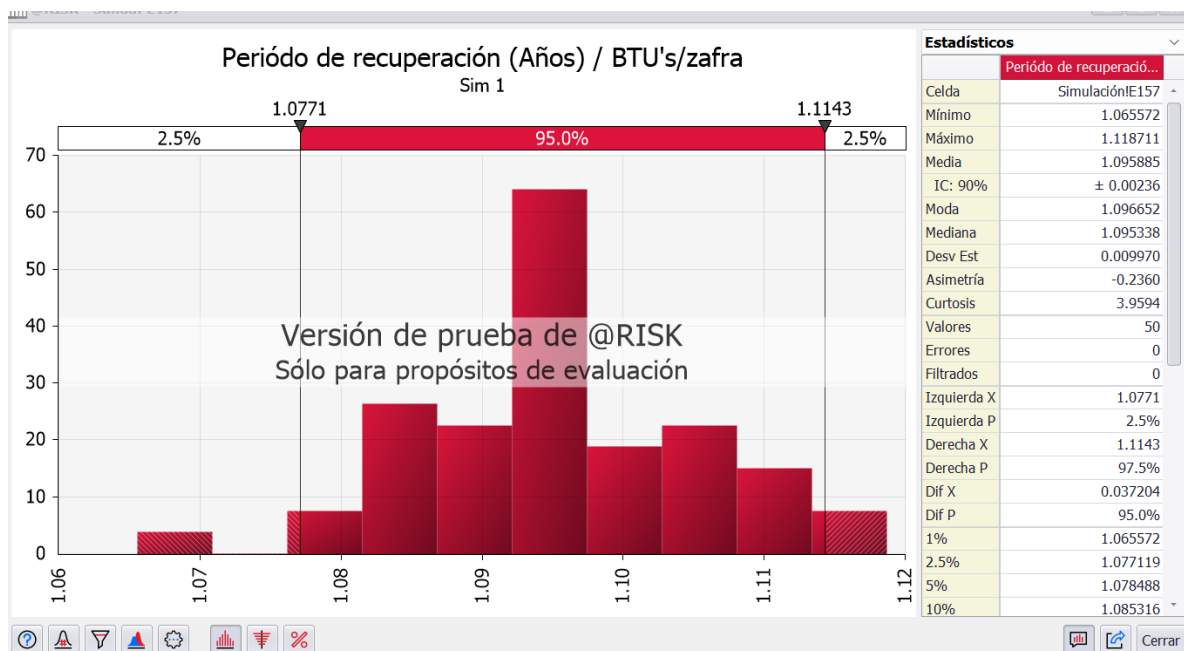


Figura 44. Simulación del periodo de recuperación de la inversión en años.

4.3. Resultados de simulación con dinámica de sistemas

Con los resultados obtenidos de la simulación del modelo de la PTAR, (Figura 45) vemos que los metros cúbicos de agua usada de servicios por tonelada de caña arrojó un valor de 0.662 m^3 , lo que genera la cantidad de $675,557.723 \text{ m}^3$ de agua por zafra. El modelo realiza las operaciones correspondientes con las que fue configurado y arroja un resultado de $159,212.187 \text{ L/h}$.

En el gráfico de la Figura 46, observamos que el flujo de litros por hora estará fluctuando aproximadamente entre 170,000 y 180,000 L/h, habiendo solo dos picos que sobresalen indicando que sobrepasan lo usual de flujo, pero se considera en promedio los 180, 000 litros por hora.

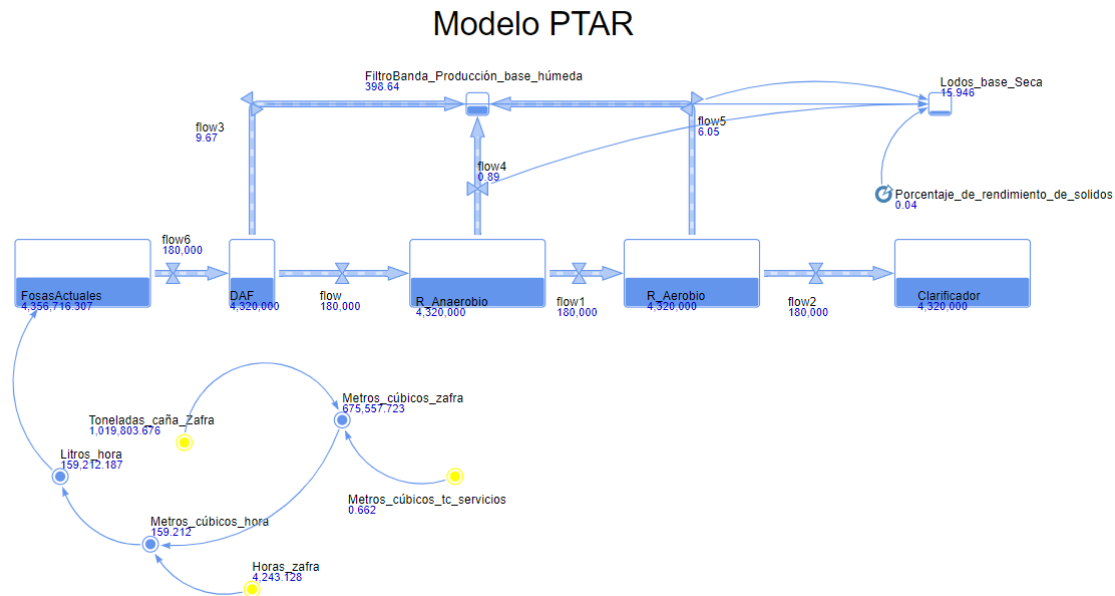


Figura 45. Resultados de simulación DS

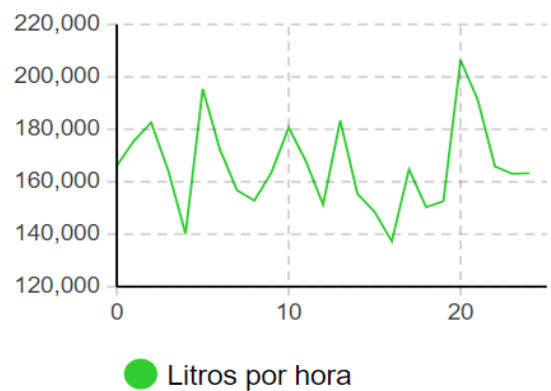


Figura 46. Gráfico de litros por hora para modelo DS.

En la *Figura 47*, se pueden observar mejor los valores de agua utilizada para servicios y limpieza, van a estar fluctuando entre 0.66 m^3 y 0.61 m^3 y debido a esa fluctuación se va a tener un flujo que va a oscilar entre 140,000 L/h y 200,000 L/h. Con estos resultados obtenidos, se decidió que el flujo a tratar para la PTAR sería de 180,000 L/s (50 L/s), debido a que, como bien se mencionó anteriormente, puede llegar a haber ciertos picos que sobrepasan e incluso alcanzan los 200,000 L/h es muy poco probable que se llegue a tener

ese flujo. Inclusive los ingenieros afirman que usualmente el agua de servicios y limpiezas suele rondar entre los 0.44 y 0.46 m³, pero se acordó que el flujo para el cual se diseñaría toda la ingeniería estuviera un tanto sobrado, para prevenir ciertos picos de uso de agua en un futuro.

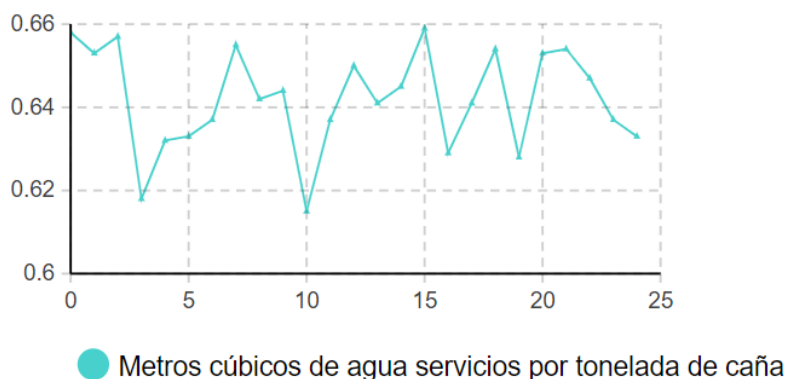


Figura 47. Gráfico de metros cúbicos de agua de servicios por tonelada de caña.

4.4. Resultados de simulación basada en agentes

Con la aplicación del agente que en este caso fue un “evento”, podemos observar los resultados arrojados del modelo. (Figura 48) un consumo de metros cúbicos de agua de servicio y limpieza de 0.364 m³, y en general al correr más simulaciones los valores oscilan entre 0.35 y 0.42 m³ de agua.

Lo que nos da una fluctuación de flujo de agua por hora de hasta casi 70,000 L/h, (Figura 49) es decir, que esta temporada en la que el flujo de entrada se reduzca, se podrá emplear solo la mitad del tren de tratamiento, en el caso por ejemplo del tratamiento anaerobio que se manejan dos reactores, y así poder brindar mantenimiento requerido. Evidentemente también la producción de lodos se ve reducida por el cambio de flujo que será tratado ahora.

Flujo (reducción)

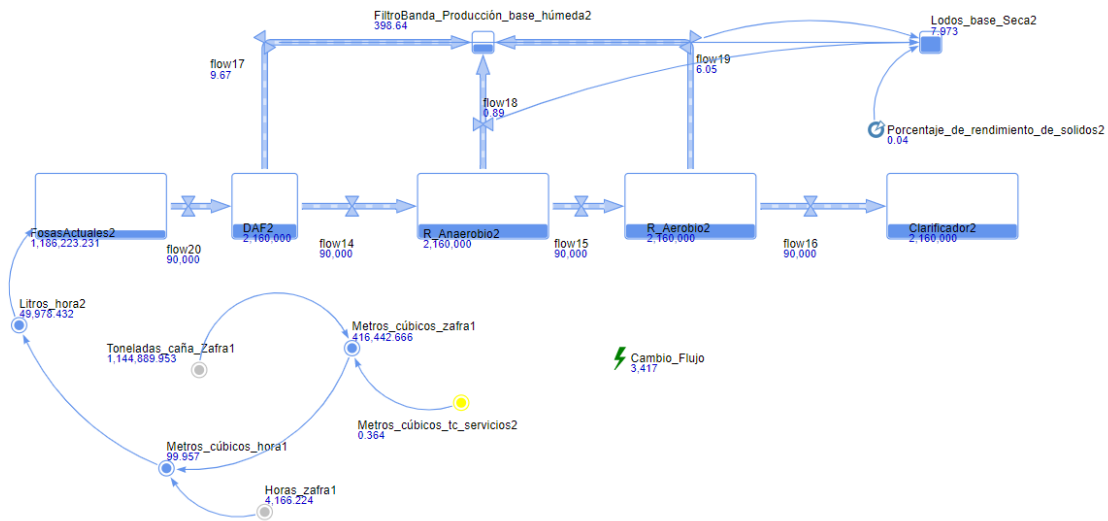


Figura 48. Resultados de simulación con agente.



Figura 49. Gráfico de litros por hora cuando no hay zafra.

De manera general, ya habiendo obtenido los flujos presentes, teniendo información de las características del agua a tratar, habiendo elaborado por los ingenieros de compañía externa las memorias de cálculo correspondientes, se plantea que el tren de tratamiento será de la siguiente manera *Figura 50*.

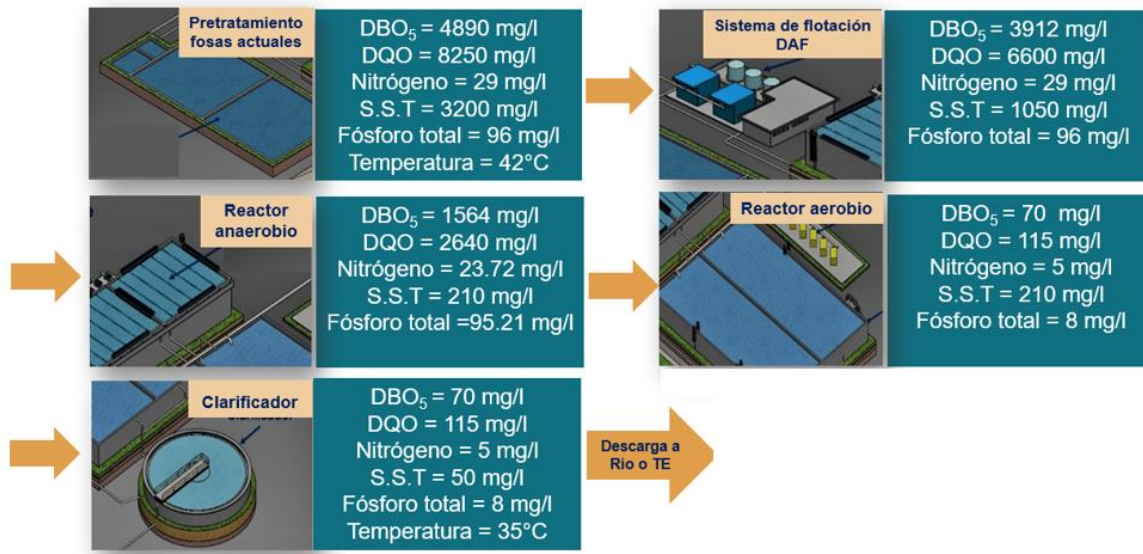


Figura 50. Diagrama de flujo del sistema de tratamiento.

4.5. Conclusión

En este capítulo fueron expuestos los resultados obtenidos siguiendo los pasos de la metodología propuesta, teniendo una presentación clara de las soluciones existentes para el diseño de esta planta de tratamiento de agua residual, como primer punto de partida se obtuvieron valores del flujo de agua próximo a tratar para tener una idea clara de cómo es que se tenía que diseñar el sistema de tratamiento, las etapas que lo constituirían, así como también la aproximación clara de la capacidad, ubicación y distribución del tren de tratamiento y la estimación de inversión a realizar para la puesta en marcha de este proyecto. De igual manera se obtuvieron resultados mediante la simulación Montecarlo que reiteran las cantidades de flujo de agua y muestran los beneficios económicos que se podrían alcanzar con dicho proyecto.

5. Capítulo V Conclusiones

La idea de la presente investigación surge de la necesidad de reducir los contaminantes que como industria azucarera emiten a causa de su proceso, y principalmente los contaminantes del agua. Debido a que emplean agua cruda (agua de río) para sus procesos y luego de darle uso, la descargan al manto acuífero sin darle el tratamiento adecuado. Esto además de generar un impacto ambiental, también afecta al ingenio como empresa, puesto que para la norma (NOM001-SEMARNAT-2021) que rige los límites permisibles de contaminantes para descargas de agua, está ocurriendo un incumplimiento, al ocurrir esto son sometidos a sanciones. Es por ello la necesidad de mitigar la contaminación de sus efluentes.

Con la ayuda de la técnica de dinámica de sistemas se pudo conocer el flujo en promedio para el cuál debe ser contemplada la planta de tratamiento, teniendo un valor de flujo establecido de 50 L/S, para temporada de zafra y al implicar el agente que permitiera identificar cuando ya no es temporada de zafra se obtuvo un valor de casi el 40% menos de agua, proveniente de servicios y limpiezas para ser tratada, al conocer este dato, ingenieros de una compañía externa pudieron realizar los cálculos de la ingeniería del diseño para su correcta operación y eficiencia.

De acuerdo a las características de contaminación que presentaba el agua residual, se determinó un sistema de tratamiento, que incluye un pretratamiento, un tratamiento primario y uno secundario, que se conforma de; un sistema de clarificación de difusión por aire disuelto (DAF), en el cual, de acuerdo a los cálculos elaborados, se espera que tenga una remoción de aproximadamente 20% para DBO y DQO y de hasta un 60% para sólidos suspendidos totales. El reactor anaerobio por su parte, se estima que tendrá una remoción de aproximadamente un 60% para DBO y DQO y de hasta un 80% para sólidos suspendidos totales. Por su parte el reactor aerobio se considera como uno de los más efectivos alcanzado casi siempre una remoción de hasta un 90% para carga orgánica (DQO y DBO) y un 80% para nitrógeno y fósforo. Y por último para la última etapa, que es el clarificador en realidad ahí ya no ocurre como tal una remoción de carga orgánica, solo se remueven un porcentaje más de sólidos suspendidos totales. Representativamente así se espera la reducción de los parámetros de interés en este tratamiento de agua ver en Figura 51.

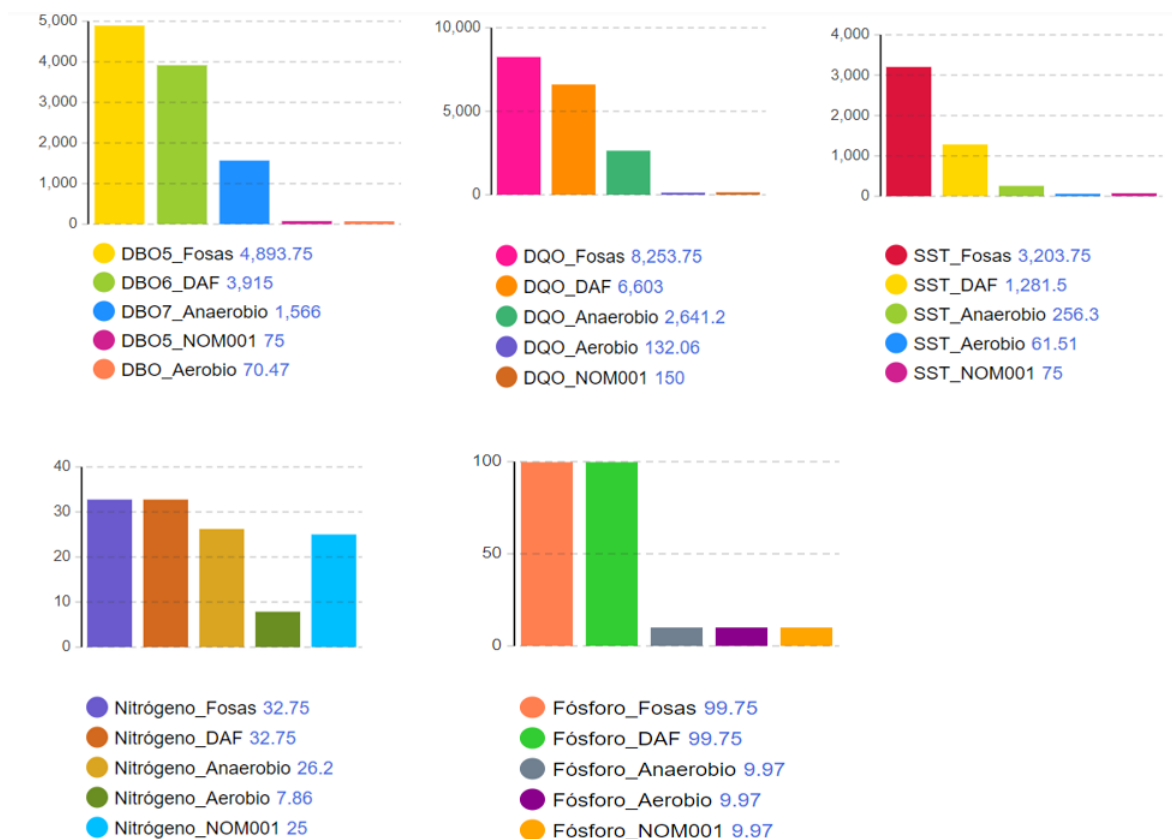


Figura 51. Gráficos de visualización de remoción por etapa de tratamiento.

Con ayuda también del estudio técnico, se pudo determinar cuán posible era llevar a cabo este proyecto, analizando aspectos generales: el tamaño (capacidad del proyecto), la localización más conveniente en el ingenio, la ingeniería (cómo se realizará el proceso, con qué tecnología y tipos de procesos), y por supuesto la estimación de costos que fue de gran ayuda para visualizar la inversión que se tenía que hacer.

Por su parte con el modelo de simulación de Montecarlo, pudimos observar y reiterar el balance de agua usada en el ingenio partiendo de datos históricos proporcionados por el mismo, además de que se contemplaron los beneficios que se tendrán al echar a andar los proyectos (torre de enfriamiento y recirculación de agua) pero sobre todo los beneficios que se tendrán con la implementación de la PTAR, pues se estima que si se cumple correctamente el tratamiento de agua y se convierte en agua de calidad, es decir, dentro de los parámetros,

se tendría un ahorro de aproximadamente \$1,343,551.84 pesos y además con la generación de gases durante el proceso que se convertirán en bioenergía se tendrá un ahorro de \$5,398,587.46 aproximadamente. Ahora bien, si se toma en cuenta la reducción de agua (con el proyecto de torre de enfriamiento y recirculación) esto generaría un beneficio de \$222,740,316.73, lo que vendría resultado al final un beneficio total de \$229, 482, 456.02, con esto podríamos concluir que sin duda es un proyecto de se traduce a gran inversión pero que será redituable para el ingenio, tanto en el aspecto ambiental como en el aspecto económico.

Como conclusión final, podemos decir que la finalidad de este proyecto se logró gracias a la ayuda y uso de técnicas como lo es la dinámica de sistemas, que con base la construcción del modelos de simulación nos permitió abordar situaciones en donde se observó la relación con cada una de sus partes y variables involucradas, y también con la ayuda de la implementación de agentes inteligentes se pudo apreciar el cambio de los resultados de la variable de interés una vez que cambiaban las condiciones del entorno. Siempre al hablar de la implementación o diseño de un proyecto se deben considerar muchos aspectos, los que van a determinar si el proyecto es conveniente para la empresa y así evaluar el riesgo de inversión, lo que fue realizado con la ayuda del estudio técnico y la simulación Montecarlo. Y, por último, pero no menos importante, es mencionar que gracias a este proyecto, que cabe destacar que se registró como proyecto Conacyt y fue aprobado y publicado por el Diario Oficial de la federación el 27 de febrero del 2023, se podrá mitigar la contaminación ambiental del agua en el sector industrial azucarero, ya que, si se le está dando un uso y aprovechamiento, pues lo ideal es el correcto tratamiento para poder realizar la descarga (devolución) al río o que pueda ser reutilizada para enviarla a torre de enfriamiento. Otro punto importante para mencionar es que la operación de la planta requiere de un cierto tiempo para su estabilización, (se habla aproximadamente de 3 meses de estabilización), principalmente por los microorganismos que se emplean en el reactor aerobio, inclusive el ingenio actualmente está contemplando la compra de microorganismos de otras plantas ya estabilizadas para acelerar este proceso en la planta propia y así reducir el tiempo de espera y que comience a tener la eficiencia correcta, una vez logando esto la planta comenzará a trabajar de la forma planeada y ya solo resta capacitar correctamente al personal para que se encarguen de la correcta operación de la planta y así se puedan obtener resultados favorables.

6. Referencias

- Anacleto Jiménez, N. (2022). *Estudio de generación de los residuos en la industria azucarera mexicana*. Puebla: Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Anicama Salvatierra, R. E. (2015). *Actualidad y negocios*. Obtenido de Actualidad y negocios: <http://actualidadnegocios.blogspot.com/2014/03/metodo-montecarlo.html>
- Anylogic. (2015). *Ayuda de Anylogic*. Obtenido de <https://anylogic.help/anylogic/system-dynamics/stock.html>
- Carballo Barcos, M., & Guelmes Valdés, E. L. (2016). Algunas consideraciones acerca de las variables en las investigaciones que se desarrollan en educación. *SciElo Analytics*, NO 8.
- Coloma Garofalo, J., Vargas Salazar, J. A., Sanaguano Guevara, C. A., & Rochina, A. G. (2020). Inteligencia artificial, sistemas inteligentes, agentes inteligentes. *Recimundo*, 16.-30.
- De la Hoz, I. Y., Izquierdo González, Y., & López Delgado, O. M. (2017). Caracterización y tratamiento de aguas residuales del central azucarero "Manuel Fajardo", para disminuir la contaminación en la fabricación de azúcar. *ICIDCA*, 72-74.
- Díaz de los Ríos, M., Eng Sánchez, F., Herrera Díaz, Y., & Lorenzo Acosta, Y. (2016). El manejo de los residuales líquidos de la industria de azúcar y sus derivados en Cuba, en el contexto de las legislaciones actuales. *ICIDCA*, 59-63.
- Echeverría Ruíz, C. (2017). Metodología para determinar la factibilidad de un proyecto. *Publicando*, 172-188.
- Farías Marquez, B. (12 de Diciembre de 2016). *iaqua*. Obtenido de Conocimientos básicos sobre plantas de tratamiento de aguas residuales (módulo I): <https://www.iaqua.es/blogs/bettys-farias-marquez/conocimientos-basicos-plantas-tratamiento-aguas-residuales-ptar-modulo-i>
- Gácita González, B. A. (2012). *Agentes inteligentes para la identificación de sistemas en proceso biotecnológicos de tratamiento de residuales*. La Habana: Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.

-
- Gurrola López, M. D., & Macías Torres, J. C. (14 de Junio de 2017). *Inteligencia Artificial*.
Obtenido de <https://sitiointeligenciaa.wordpress.com/>
- Herrera Vega, H. A. (2018). *Contaminación del agua superficial por un ingenio azucarero y su impacto en el medio ambiente en Andahuasi 2017*. Andahuasi, Perú.:
Universidad Nacional José Justino Sánchez Carrión.
- Ibanez, Á. (20 de Noviembre de 2017). *Nihon Kasetsu*. Obtenido de Nihon Kasetsu:
<https://nihonkasetsu.com/es/dbo-y-dqo-para-caracterizar-aguas-residuales/>
- Ingenia UdeA. (17 de Mayo de 2018). *Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO 5)*. Obtenido
de <https://www.youtube.com/watch?v=YBIfsYMVNek>
- Ingenia UdeA. (17 de Mayo de 2018). *Demanda Química de Oxígeno (DQO)*. Obtenido de
<https://www.youtube.com/watch?v=G6IPrD7VDKQ&list=RDCMUC-3vUoM2WWEbMU6NxGlttiQ&index=2>
- Izquierdo, L. R., Galán, J. M., Santos, J. I., & Del Olmo, R. (2008). Modelado de sistemas
complejos mediante simulación basada en agentes y mediante dinámica de sistemas.
EMPIRIA. Revista Metodológica de las Ciencias Sociales. NO. 16, 85-112.
- Khan, M., Kalsoom, U., Mahmood, T., Riaz, M., & Khan, A. (2003). Caracterización y
tratamiento de los efluentes industriales de la industria azucarera. *Jour. Ctiem.Soc.
Pak. Vol 25*.
- Kumar Poddar, P., & Sahu, O. (2017). Quality and management of wastewater in sugar
industry. *Appl Water Sci*, 461-468.
- Lahera Ramón, V. (2010). Infraestructura sustentable: las plantas de tratamiento de aguas
residuales. *Quivera*, 58-69.
- Méndez Gómez, M. C. (2019). *Propuesta de mejora de la planta de tratamiento de aguas
residuales de arbelaes a partir del sistema de Deer Island Wastewater treatment
plant*. Bogotá : Universidad Católica de Colombia, Facultad de ingeniería.

-
- Motito Legrá, J. A., & Del Toro Álvarez, D. (2014). Estudio de las agua industriales y residuales en la UEB Central Azucarero "Paquito Rosales". *Tecnología Química*, 172-183.
- Muñoz Cruz, A. (2008). *Caracterización y tratamiento de aguas residuales*. Hidalgo: Universidad Autónoma del estado de Hidalgo.
- Omprakash, S., Dubasi Govardhana, R., Gopal, R., Anurag, T., & Dharm, P. (2017). Treatment of wastewater from sugarcane process industry by electrochemical and chemical process: Aluminum (metal and salt). *Journal of water process engineering*, 50-62.
- Panhwar, A., & Bhutto Shahid. (2021). Mejora de la reducción de DQO, DBO, SST y aceites y grasas de los efluentes de la industria de la caña de azúcar mediante cloruro férrico y cloruro de polialuminio acoplado con alalcohol polivinílico. *Ingeniería Ecológica y tecnología medioambiental*, 8-14.
- Pérez, A., Tijero, A., & Moral, A. (2014). Optimización de los mecanismos de coagulación-floculación mediante un sensor "FBRM" en una central térmica de ciclo combinado. *Biosaia*.
- Rodríguez Miranda, J. P., García Ubaque, C. A., & Pardo Pinzón, J. (2015). Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. *Tecnura*, 149-164.
- Sapag Chain, N., & Sapag Chain, R. (1991). *Preparación y evaluación de proyectos*. México: McGraw-Hill.
- SEDEMA. (2021). *Secretaría del medio ambiente*. Obtenido de Secretaría del medio ambiente: <http://www.sadsma.cdmx.gob.mx:9000/datos/glosario-definicion/Agua%20residual>
- SEMARNAT. (2010). *SEMARNAT*. Obtenido de Gobierno de México: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio_2020/dgeiawf.semarnat.gob.mx_8080/approot/dgeia_mce/html/RECUADROS_INT_GLOS/D2_INDUSTRIA/D2_INDUSTRI01/D2_R_INDUSTRIA01_01.htm#:~:text=La%20industria%20azucarera%20presenta%20efectos,bagazo%2C%20cachaza%2

-
- Solano De La Cruz, V. (2020). *Tratamiento de agua residual azucarera utilizando un sistema híbrido (digestión anaerobia-humedal construido)*. Orizaba: Instituto Tecnológico de Orizaba.
- Taco Mena, D. C. (2017). *Simulación de Monte Carlo para la gestión de costos en la evaluación de proyectos de inversión, caso: Construcción del Hotel Wyndham Gran Cóndor Pronobis S.A.*. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires; Facultad de Ciencias Económicas.
- Varnero Moreno, M. T. (2011). *Preparación de manual de biogás*. Santiago de Chile.
- Verma, D. K., Mandal, P., Singh, P., & Chand, D. (2021). Calidad y tratamiento de los efluentes de la industria azucarera. *Revista de la Asociación de la India de Gestión Medioambiental*.
- Viracucha Ortiz, S. M. (2012). *Tratamiento biológico de aguas residuales generadas en un ingenio azucarero con tecnología de lodos activados*. Quito: Universidad central de Ecuador Facultad de Ingeniería Química.
- Wooldridge, M. (2002). *An introduction to multiagent Systems*. John Wiley & Sons, Ltd.

7. ANEXO I

Tratamiento biológico

Diseño de reactor anaerobio de flujo ascendente de lecho de lodos (UASB)

Los reactores anaerobios de flujo ascendente de lecho de lodos han sido utilizados para el tratamiento de aguas residuales en varios países de Latinoamérica y del mundo.

La eficiencia de este reactor en aguas residuales con altas cargas orgánicas es hasta del 85%, sin embargo, por requerimientos de diseño se considera una remoción de carga orgánica del (%):50.00.

Su principio de funcionamiento se basa en la buena sedimentación de la biomasa producida dentro del reactor, (para esta condición de diseño se considera que la biomasa sea de tipo floculante). Estos flóculos cuentan además con una actividad metanogénica elevada, lo que explica los buenos resultados del proceso. El reactor es de flujo ascendente y en la parte superior cuenta con un sistema de separación gas- líquido-sólido, (GLS) el cual evita la salida de los sólidos suspendidos en el efluente y favorece la evacuación del gas y la decantación de los flocos que eventualmente llegan a la parte superior del reactor.

Un punto importante de su diseño es la distribución de las entradas del agua residual, ya que una mala repartición puede provocar que ciertas zonas de la cama de lodos no sean alimentadas, desperdiciando así su actividad. Esto es particularmente cierto en el tratamiento de aguas residuales de proceso. El punto débil del proceso consiste en la lentitud a la que se forma el lodo, elemento indispensable del sistema. Situación que se soluciona mediante la inoculación de lodos adecuados.

Los factores que regulan el proceso son: pH, temperatura, carga orgánica, nutrientes, compuestos tóxicos y gasto a tratar.

La digestión anaerobia es un proceso natural que ocurre cuando compuestos biodegradables son expuestos a la acción biológica en ausencia de oxígeno molecular, siendo convertidos a dióxido de carbono y metano.

Datos de diseño:

Tabla A 1. Datos de diseño

Tipo de agua:	Agua de Proceso de Nixtamalizado	
Q. medio (l/s) =	25.00	2160.00
DQO. (mg/l) =	6600.00	8250.00
DBO5 (mg/l) =	3912.00	4890.00
SST (mg/l) =	1050.00	3500.00
Nitrógeno total (mg/l) =	29.00	
Fosfatos (mg/l) =		
Temperatura °C =	35.00	
Factor DQO/DBO5 =	1.69	
Fosforo total (mg/l) =	96.00	860.93
Sulfatos (mg/l) =		200.00

NOTA: se considera una remoción en el sistema de flotación (previo al tratamiento biológico) del 20% de la DBO5 y la DQO, un 70.0% máximo de sólidos suspendidos totales y hasta un 50% de fósforo total, previo al cribado fino.

Tiempo de retención mínimo (horas.) = 18.00

Altura de la columna de agua del Reactor para garantizar una sedimentabilidad aceptable (m.) = 7.00 m.

Diseño:

Volumen requerido del reactor

El volumen del reactor depende de algunos valores como:

- La carga máxima de DQO diaria
- Velocidad ascendente del líquido admisible
- Temperatura mínima del agua residual
- Características y concentración del agua residual
- Eficiencia requerida del tratamiento

Velocidad máxima admisible (calculada en el área superficial del sedimentador)

En los reactores anaerobios de flujo ascendente, con lodo de tipo floculante la velocidad ascendente es en promedio de 0.5 m/h., bajo estas condiciones se retiene el lodo dentro del reactor. En periodos cortos (horas al día) velocidades ascendentes de hasta 2 m/h. durante 2 a 4 Horas. Son toleradas para aguas solubles y parcialmente solubles respectivamente. Estas velocidades elevadas lavaran el lodo poco sedimentable, lo cual no causan serios problemas.

Cuando se considera la velocidad ascendente como variable de diseño, el tiempo de retención hidráulico (Θ) se determina mediante el área superficial y la altura del reactor de acuerdo con la siguiente ecuación:

Ecuación A 1

$$\theta = \frac{A * H}{Q}$$

Siendo:

Θ ; Tiempo mínimo de retención hidráulico (horas) =18.00

A; Área superficial (m^2)

H; Altura de la columna de agua del Reactor (m.) = 7.00

Q; Tasa de flujo (m^3 /hora) = 90.00

Por lo tanto, al despejar el área superficial se tiene lo siguiente:

Ecuación A 2

$$A = \theta * \frac{Q}{h}$$

A (m^2) =231.43

Θ (horas.) = 18.00 Tiempo de retención hidráulico

Cálculo de la velocidad ascendente

Con el valor comprobado del tiempo de retención hidráulico se estima la velocidad superficial ascendente (V_a) y se determina con la siguiente ecuación:

Ecuación A 3

$$V_a = \frac{H}{\theta}$$

$$V_a \text{ (m /h)} = 0.39$$

NOTA: de acuerdo con el MOP No. 8 de la WEF 2010, pág. 14-136 es aceptado tener valores promedio de velocidad superficial ascendente, en el rango de 0.4 a 0.8 m/h, Condición que se cumple ya que la velocidad superficial ascendente obtenida está dentro del rango.

Volumen del reactor por uso del gasto medio; V_r

Ecuación A 4

$$V_r = \theta * Q$$

$$V_r = 18 \text{ h} * 90 \text{ m}^3 / \text{h}$$

$$V_r \text{ (m}^3\text{)} = 1620 \text{ m}^3$$

Verificación de la altura de la columna de agua del reactor

Ecuación A 5

$$h_r = \frac{V_r}{A}$$

$$h_r = V_r \text{ (m}^3\text{)} / A \text{ (m}^2\text{)}$$

$$h_r \text{ (m.)} = 7.00$$

Verificación del volumen del reactor con la altura calculada

Ecuación A 6

$$Vr = A(m^2) * hr (m)$$
$$Vr (m^3) = 1620$$

Verificación del tiempo de residencia

Ecuación A 7

$$TRH = Vr (m^3) / \frac{Vm(l/s)}{}$$

$$THR (hr.) = 18.00$$

Verificación del volumen del reactor por carga orgánica volumétrica (OLR)

Para desechos con altas concentraciones, el volumen del reactor puede depender sobre todo de la concentración del agua residual (C) y de la aplicación de la carga orgánica volumétrica (Bv) de acuerdo con la siguiente ecuación.

Ecuación A 8

$$Vr = \frac{24 C Q}{OLR}$$

Donde:

24= valor constante

C= concentración de materia orgánica (DQO) en Kg / m³

Q= gasto en m³ / hr.

OLR (kg DQO/m³/d), (valor para temp. de 35 °C. promedio) = 9.00

DQO (kg/m³) = 6.60

La siguiente tabla se puede consultar como:

Tabla 14.26, OLRs permisibles en reactores UASB de un solo paso en relación con la temperatura para aguas residuales con 30 a 40% de DQO en sólidos suspendidos (adaptado de Henze et al., 2008). MOP No. 8 de la WEF 2010.

Tabla A 2. OLR permisible en reactores UASB.

Temperatura (°C)	OLR (kg. COD applied/m3/d)
15	1.5 - 2.0
20	2.0 - 3.0
25	3.0 - 6.0
30	6.0 - 9.0
35	9.0 - 14.0
40	14.0 - 18.0

$$V_r (m^3) = 1,584.00$$

Volumen menor al calculado por gasto medio, por lo que se considera como factor de diseño el gasto medio.

Área del reactor acorde al volumen de diseño

Ecuación A 9

$$A = \frac{V_r}{H A (m^2)}$$

$$A = 231.43$$

Con las siguientes medidas para el ancho y el largo del reactor:

$$\text{Ancho (AC) (m)} = 15.21 \quad \text{Largo (Lc) (m.)} = 15.21$$

Con un tiempo de residencia de:

$$\theta = AH/Q \quad \theta (\text{hrs.}) = 18.00$$

Verificando la velocidad ascendente:

$$V_a = H / \theta \quad V_a (\text{m/h}) = 0.39$$

Cálculo del número de toberas:

Para el cálculo del número de toberas de distribución del agua residual en el fondo del reactor se toma la recomendación, de acuerdo con el MOP No. 8 de la WEF 2010. pág. 14-138.

Number of Inlet Points		
Rough guidelines for the number of inlet points required in UASB reactors treating mainly soluble waste waters		
Type of sludge	Loading rate (kg COD . m ⁻³ . day ⁻¹)	Area (m ²) per feed inlet point
Dense flocculant sludge (>40 kg DS/m ³)	< 1	0.5 - 1
	1 - 2	1 - 2
	> 2	2 - 3
Medium thick flocculant sludge (20 - 40 kg DS/m ³)	<1 - 2	1 - 2
	> 3	2 - 5
Granular sludge	< 2	0.5
	2 - 4	1 - 2
	> 4	>2

Figura A 1.Pauta aproximada para el número de entradas requeridas un UASB.

En el cual indica que para floculo relativamente denso y floculante y con cargas orgánicas entre 1.0 y 2.0 kg. De DQO/m³/día, debe ser de una boquilla de alimentación por cada: 1.0 a 2.0 m²* y (Lettinga g. and Hulshoff (1991) UASB Process Desing for various types of wastewaters) Para este diseño se considera que debe ser una boquilla a cada (2.0 m²):

$$\text{Área por punto de alimentación (m}^2\text{)} = 2.00$$

Por lo tanto y para este cálculo, se requieren:

$$\text{No. De boquillas} = A / 2 \text{ (m}^2\text{/m}^2\text{)} = 115.71$$

Con una separación del fondo del reactor de 10.0 cm.

Producción de lodos

La producción de lodos en sistemas anaerobios está directamente relacionada a la conversión de la DQO a Metano, al tipo de compuestos orgánicos degradados y a la concentración de sólidos inertes en la alimentación.

En el tratamiento anaerobio de aguas residuales domesticas por medio de reactores UASB, se tiene una producción de lodos en el rango de 0.10 a 0.20 kg SST /kg de DQO aplicada. (Van Haandel y Lettinga.1994 y tabla 14.30, MOP 8, 2010), (para este cálculo se tomará 0.1 kg SST/ kg DQO aplicada).

Producción de lodos por día:

kg. SST / kg / DQO aplicada = 0.1

Lodos por día = $\text{m}^3/\text{día} \times \text{kg DQO aplicada} / \text{m}^3 \times 0.10$ (kg. SST / kg DQO aplicada

Lodos por día (kg SST/día) = 1425.60

De acuerdo con la *Figura A 2* de este documento, encontrada en el libro como figura 14.69, (pág. 14-135, MOP 8,2010) donde se destaca el tiempo de retención de los sólidos requerido en función de la temperatura, para la estabilización de los lodos, generados por el tratamiento de aguas residuales domésticas. Se considera un tiempo estimado de residencia en:

Días de: 25 y de temperatura del agua (°C) de: 35 .00

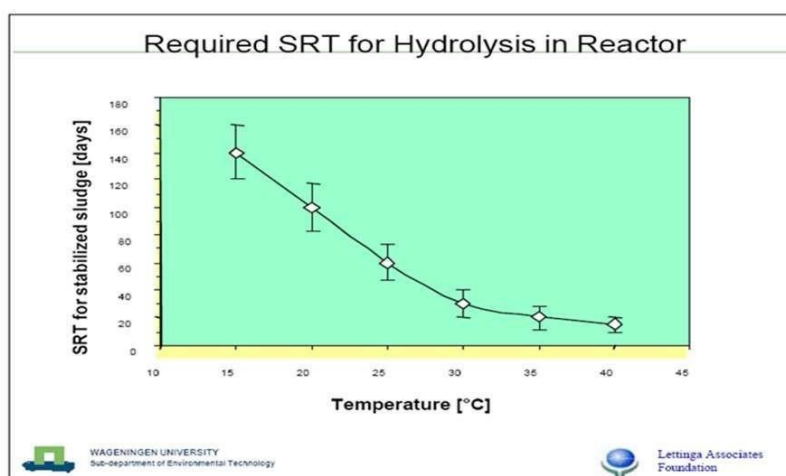


Figura A 2. Tiempo de retención de sólidos en función de la temperatura para estabilización de lodos.

Por lo anterior y considerando una concentración de lodo dentro del reactor del 4 al 5 % (50 kg de lodo / m³), con una altura del manto de lodos de 2 a 4 metros (Van Haandel y Lettinga, 1994) (pag. 14-131, MOP 8,2010).

Concentración de lodo (kg / m³) = 40

Producción de lodos por día / concentración del lodo (kg SST/día) / (kg/m³) = m³ / día

Altura del manto de lodos (lodo en el reactor durante el periodo de estabilización entre el área total):

Producción de lodos por día (m³ lodo / día) = 35.64

Producción de lodos durante el periodo de estabilización por día (m³) = 891.00

Altura del manto de lodos (m.) = 3.85

Revisión de la parte del reactor que actuara como sedimentador

La altura de sedimentación debe de ser en promedio el 25% de la altura total del reactor, (VAN LIER,2003, maneja: 1.5 a 2.0 m))

h (en metros) = 1.75

Separador GLS:

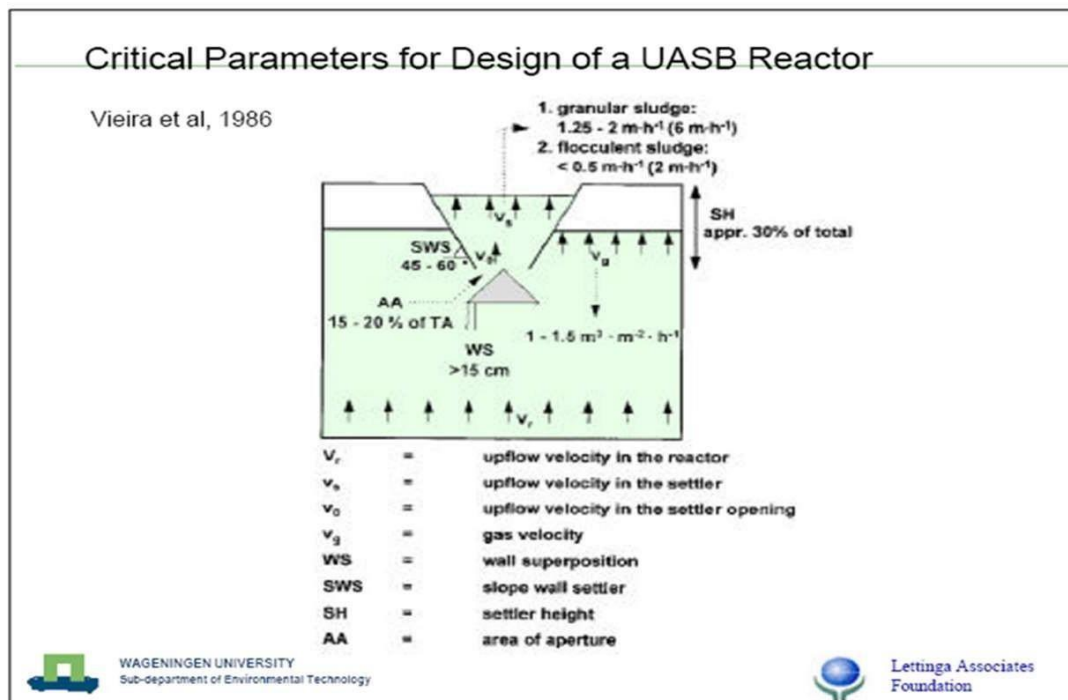


Figura A 3. Parámetros críticos para el diseño de un reactor UASB.

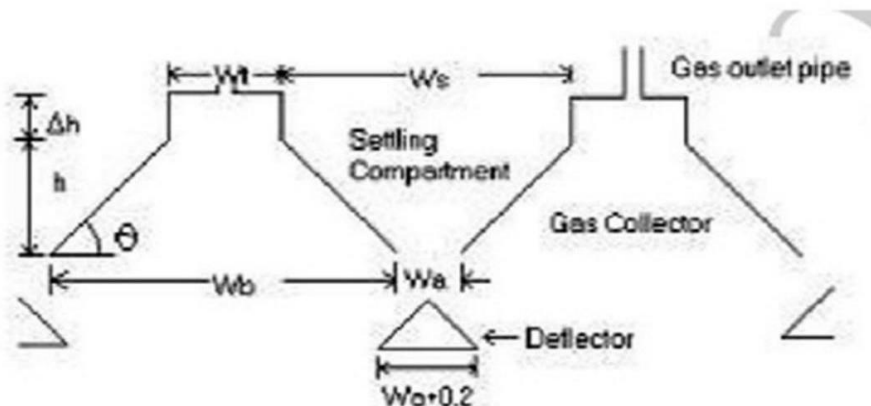


Figura A 4. Guía de ángulos a identificar.

Para estimar inicialmente el número de separadores, se requiere inicialmente el Angulo de la pared del separador con respecto a la horizontal, (se recomienda de 45° a 60° , pág. 14-137, MOP, 8, 2010) para este caso y previa verificación se selecciona como valor de diseño en grados de: 60° .

Datos:

$W_t = 0.2$ a 0.3 (ancho de la parte superior de la campana en este caso se toma el valor en m.

igual a): 0.25

W_a (en metros) = 0.30

El ancho de la base del domo (W_b) se calcula de la siguiente forma:

Ecuación A 10

$$W_b = \frac{2(h + Dh)}{\tan \theta}$$

Donde:

Ecuación A 11

$$Dh = \left(\frac{W_t}{2} \right) \tan \theta$$

Dh = altura de la zona seca de descarga de gas

W_t = ancho del área de la zona de extracción de gas

$\tan \theta = 1.73$

Tomando Ecuación A 11

Dh (metros) = 0.22

Sustituyendo en Ecuación A 10

W_b (en m) = 2.27

Para definir el número de campanas (WB) se tiene que dividir el ancho del tanque (15.21) entre: ($W_b + W_a$).

WB (en m.) = 2.57

Ecuación A 12

$$No. Campanas WB = \frac{15.21 m}{2.57m} = 5.92$$

El área de apertura entre el deflector y el separador, así como la del separador con el muro del reactor y entre campanas, debe ser entre el 15 y el 20 % del área superficial del reactor (Van Lier, 2003, pág. 14-137, MOP, 8, 2010) por lo tanto la separación entre campanas será de:

Porcentaje de separación seleccionado (%) = 15.0

Área de apertura (en metros) = 34.71

El ancho de la apertura es igual al área de la apertura calculada entre el largo del tanque, entre el número de pasos de acuerdo con la cantidad de campanas calculadas

Número de pasos calculados= 6.92

Ancho de la apertura (en m.) = 0.33

Velocidad ascendente en el área del separador GLS. (Vs)

Datos:

Flujo promedio en el área de sedimentación considerando las zonas de sedimentación calculadas

Flujo promedio (en m³/h) =13.01

Ws (ancho de la superficie para la sedimentación de lodos)

Ecuación A 13

$$Ws (m) = Wb - Wt$$

Sustituyendo valores se tiene:

$W_s = 2.02 \text{ m}$

Ecuación A 14

$$V_s = \frac{Q \text{ promedio}}{W_s * L_c}$$

$V_s \text{ (m/h)} = 0.42$

$L_{rc} \text{ (Longitud de campana en m.)} = 2.06$

Volumen de sedimentador GLS

Ecuación A 15

$$V_{sed} = \frac{W_b * L_c * L_{cr}}{2}$$

$V_{sed} \text{ (m}^3\text{)} = 35.58$

Por lo tanto, para determinar el gasto medio de alimentación por campana se tiene lo siguiente:

Ecuación A 16

$$\text{Gasto de alimentación (litros por segundo)} = \frac{Q \text{ promedio}}{\text{Número de campanas calculadas}}$$

$\text{Gasto de alim. (en l/s)} = 4.42$

Cálculo del tiempo de retención:

Ecuación A 17

$$T_{ret} = \frac{V_{sed}}{\text{Gasto de alimentación}} * 3.6$$

$T_{ret} \text{ (en horas)} = 2.34$

Dentro del rango acorde a tabla 14.29, pág. 14-139 para el tiempo de retención hidráulico en el sedimentador con flujo promedio MOP, 8, 2010.)

NOTA: Se pueden colocar campanas triangulares, respetando como requisito que se mantenga los volúmenes de sedimentación calculados.

Cálculo de la velocidad de flujo en el canal de recolección.

En la superficie del reactor (considerando 5 líneas de descarga, valor determinado como el Número de campanas calculado más 1.)

Ecuación A 18

$$\text{Número de descargas} = V \text{ canal (l/s/m)} * \frac{Q_{mc}}{LC}$$

Q_{mc} = gasto medio de alimentación entre el número de pasos (descargas) calculados:

$$Q_{mc} = 3.61$$

$$V \text{ canal (l/s/m)} = 0.24$$

Lo que representa que la velocidad al ser menor de 1.0 l/s/m por lo tanto se acepta. Para el vertido del fluido hacia el canal colector principal se consideran vertedores triangulares con 90° de apertura, considerando dos vertedores por m² del área del reactor.

Sustituyendo en Ecuación A 18:

$$\text{Número de vertedores de descarga} = 462.86$$

Por lo tanto y considerando el número de descargas se tendrán: 66.91 vertedores por descarga.

Por lo anterior cada vertedor estará alimentado al canal principal de descarga (en m³/seg.)
= 0.000054

La cantidad anterior se verifica mediante la fórmula de Thompson:

Ecuación A 19

$$Q = 1.4 \, hr/2$$

$$Q = m^3/s$$

$$h^{5/2} = \text{altura o carga del agua sobre el vertedor} \quad h^{5/2} = 0.000039$$

$$Q \, (m^3/seg) = 0.000054 \quad Q \, (l/seg) = 0.054$$

$$Q \, (ml/seg) = 54.01$$

Tomando en consideración los criterios de la tabla 14.3, pág. 14-139 del MOP, 8, 2010. Se tiene lo siguiente:

Tabla A 3. Criterios de dimensiones para el canal de recolección.

Para la alimentación dentro del reactor el diámetro de la boquilla será de:	2" Ø
Distancia entre el nivel de agua de alimentación y el nivel de agua del sedimentador, (con lo cual se garantiza una velocidad mínima de descarga en la boquilla de 0.5 m/s):	0.3 m.
Distancia entre el fondo del reactor y la boquilla de alimentación:	0.1 m.
Número de vertedores triangulares por metro cuadrado de área del reactor:	2.0
Diámetro de la tubería de purga de lodos:	4.0" Ø
Diámetro de tubería para toma de muestra de lodos:	1.0" Ø
Rendimiento de la Producción de lodos (kg TSS/kg COD applied):	0.1 - 0.2
Concentración del lodo:	2.0 - 5.0 %

El reactor anaerobio de flujo ascendente se diseñó para una eficiencia de remoción de la DQO en porcentaje del: 50.00

Por lo tanto, el efluente final será de: $DQOf = (1 - 0.5) \times DQO \text{ de alim.}$

$$DQOf \text{ (mg/l)} = 2640$$

El valor de DBO5, de descarga que se tendría aplicando el factor que da de la división entre el valor de la DQO inicial entre el valor de la DBO5 inicial seria:

$$\text{Factor DQO inicial entre DBO5 final} = 1.69$$

$$DBO5, \text{ final (mg/l)} = 1564.8$$

Producción teórica de gas metano

La producción de gas es:

$P_{CH_4} = (0.35 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 / \text{Kg. DQO removido})$ Pag. 621 McGraw-Hill Series In Water Resources and Environmental Engineering-Metcalf and Eddy Inc. y pag.14-141 del MOP 8, 2010.

Ecuación A 20

$$DQO_{\text{removido}} = DQO_{\text{inicial}} - DQO_{\text{final}}$$

DQO removido (en kg/día) = 3763.58

Producción de metano (CH_4) (en Nm^3) = 1,317.25

Nota: si se considera que la producción del gas metano es del 65 al 70 % del biogás producido, podemos estimar que el biogás producido es en el orden de (en $\text{m}^3 / \text{día}$): 1881.79

(Cabe destacar que el metano tiene una solubilidad en el agua cerca de 1 mmol / l, a presión atmosférica, por lo que por cada 64 mg/l de DQO convertida del influente se tiene 1 mmol de gas metano (Van Haandel and Lettinga, 1994,) la pérdida de metano en el efluente y en la superficie del reactor puede ser una fracción significativa del total del metano generado de aguas residuales domesticas de baja carga. (pág. 14-141 del MOP 8, 2010).

Producción de exceso de lodos:

Asumiendo que la producción del exceso de lodos es en el orden de: 0.05 kg SST/ kg / DQO con una concentración hasta del 5% (50 kg/m^3) (Van Haandel and Lettinga.1994)

Ecuación A 21

$$\text{Producción de exceso de lodos} = \frac{\text{m}^3 \text{ de agua a tratar}}{\text{DQO de alimentación}} * \text{eficiencia de remoción}$$

Producción de exceso de lodos = m³ por día de agua a tratar, por DQO de alim. En kg. Por 0.05 kg SST, por la eficiencia de remoción.

Producción de lodo base seca (en kg SST/día) = 427.68

Producción de lodo base húmedo

Considerando las unidades finales en m³ lodo/día, dependiendo del porcentaje de lodo seleccionado y obteniendo una concentración en kg/m³ tenemos:

Ecuación A 22

$$\text{Producción de lodo base húmeda} = \frac{\text{producción de lodo en exceso}}{\text{Concentración de lodo}}$$

Producción de lodo base húmedo (m³ lodo/día) = producción de lodo en exceso en (kg/sst (lodo base seca) /día) / concentración del lodo en (kg/m³)

Concentración de lodo deseado (%) = 4.0

Concentración de lodo en (kg/m³) = 40.0

Producción de lodo base húmeda en (m³ lodo/día) = 10.69

Datos:

Sulfatos en (mg/l) = 200

DQO influente, en (mg/l) = 6600.00

Eficiencia de remoción en (%) = 50.0

DQO final en (mg/l) = 2640

Relación DQO inicial (mg/l) / SO₄ (mg/l) = 33.00

(Asumiendo una reducción de sulfatos del 100%)
Estimando que 1 mg $\text{H}_2\text{S} - \text{S}$ es igual a: (mg de DQO) = 2.0

Con un peso molecular para el sulfato en (g/mol).

Determinación de sulfuros

(factor DQO entre concentración de sulfatos de alim. Entre valor del peso molecular del sulfato)

Sulfuros = 0.34

La concentración del sulfhídrico en el efluente sería igual a: (contenido de sulfuros por el valor de sulfatos de alimentación)

Concentración de ácido sulfhídrico en el efluente (mg/l) = 68.71

En (mg DQO/l) = 137.41

Fracción del ácido sulfhídrico en el efluente (en %) = 5.21 de la DQO en el efluente.

Nutrientes

La digestión anaerobia por ser un proceso biológico requiere además de la fuente de carbono, nutrientes inorgánicos esenciales para el desarrollo de las bacterias y la síntesis de la nueva biomasa, así como para incrementar la actividad específica de utilización del sustrato. Los nutrientes esenciales son el nitrógeno y el fósforo. (También, conocidos como macronutrientes).

El requerimiento de nitrógeno para el proceso anaerobio es solo una pequeña fracción (0.2 a 0.5) de lo requerido en procesos aerobios. Esto se debe a la baja tasa de crecimiento (síntesis celular) de las bacterias anaerobias. Así mismo el requerimiento de fósforo es aproximadamente 15% con respecto al nitrógeno.

La cantidad de nitrógeno y fosforo necesario para el crecimiento anaerobio, se puede estimar por medio de la formula empírica de las bacterias $C_2H_7O_2N$, donde los constituyentes nitrogenados representan el 18% de la masa celular en peso seco.

Si se asume que el 10 % de la DQO biodegradable es convertida a nuevas células (el rendimiento de crecimiento celular es 0.1 Kg SSV / Kg DQO removida). Se puede entonces calcular los requerimientos de nitrógeno y fosforo.

Tabla A 4. Requerimientos de Nitrógeno y Fósforo.

DQO influente en (mg/l)	6600.00
Eficiencia del tratamiento en (%)	50.00
DQO removida en (mg/l)	3960.00
Crecimiento de la biomasa en mg ssv/l	396.000
Nitrógeno influente en (mg/l)	29.00
Fosforo influente en (mg/l)	96
Factor para el nitrógeno requerido	0.182
Nitrógeno requerido (en mg/l)	5.28
Fósforo requerido (en mg/l)	0.79

Remanente de nitrógeno (mg/l): = 23.72

Remanente de nitrógeno (kg/día) =16.40

Remanente de Fosforo (mg/l): =95.21

Remanente de Fosforo (kg/día): = 65.81

Tabla A 5. Tabla de resumen de cálculos. (Elaborados por I.Q. José A. Deaquino Barrera).

1	Altura de columna de agua	7.00
2	Área del reactor anaerobio	231.43
3	Numero de campanas colectoras de biogás	5.92
4	Numero de vertedores de descarga	462.86
5	numero de boquillas de alimentación al reactor	115.71
6	Remoción del sistema (%)	50.00
7	Producción de lodos diaria base seca (kg/día)	427.68
8	Producción teórica de gas metano (nm ³ /d)	1317.25

Nota: se deberá de construir dos reactores con las mismas características.

Cálculo de tratamiento biológico aerobio

Cálculo del tratamiento aerobio (lodos activados) considerando solamente:

A.- remoción de DBO exclusivamente

B.- para remoción de DBO con nitrificación

Constantes de diseño: tomando como base la calidad de agua después del tratamiento físico químico, por flotación

- $Q \text{ (m}^3\text{/día)} = 4320.00$
- Temperatura del licor mezclado en el reactor (°C) = 30.00
- Se contemplan difusores de burbuja fina, con membrana de neopreno y una eficiencia de transferencia de oxígeno del (%): 35
- Altura de la columna de agua (m) = 4.00
- Altura de la membrana del difusor con respecto al piso (m) = 0.30
- Oxígeno disuelto requerido en el reactor (mg/l) (Ci)= 2.00
- Elevación de la localidad (msnm) = 9.00
- Factor a (aireación) para nitrificación= 0.65
- Factor a (aireación) para remoción de DBO solamente= 0.50
- Factor b = 0.95
- Factor de ensuciamiento del difusor “F” = 0.90

Coeficientes cinéticos para utilizar: tabla 8:10 y 8:11 del libro “Metcal & Eddy” cuarta edición.

- SRT para remoción de DBO5 (d)= 5.00
- MLSS del licor mezclado X_{TSS} : 2000.00 – 5000.0 (g/m³) = 4000.00, 3500
- X_r , (retorno de lodos, 4000-12000 mg/L) = 8000.00
- Carga hidráulica superficial, para cal. Clarificador (16.0 -28) (m³/m². d)=
23.00 FS, Factor de seguridad para el NTK = 1.50

Tabla A 6. Datos de calidad de agua residual a tratar.

Parámetro	Concentración (g/m ³)
DBO	1564.80
sDBO	938.88
DQO	2640.00
sDQO	1584.00
SST	210.00
SSV	178.50
NTK	23.72
NH ₄ -N	16.61
P Total	95.21
Alcalinidad como CaCO ₃	150.00
Relación bCOD/DBO	1.60
Relación DQO / DBO=	1.69

Nota: g / m³ = mg/l

A. Remoción de DBO, sin nitrificación

1. Desarrollo de las características del agua residual necesarias para el diseño

Determinación de DQO biodegradable:

Ecuación A 23

$$bDQO \left(\frac{g}{m^3} \right) = 1.6 * DBO$$

$$bDQO (g/m^3) = 2503.68$$

Determinación de DQO no biodegradable:

Ecuación A 24

$$nbDQO \left(\frac{g}{m^3} \right) = DQO - bDQO$$

$$nbDQO (g/m^3) = 136.32$$

Determinación de DQO soluble en el efluente (suponiendo que no es biodegradable):

Ecuación A 25

$$sDQOe \left(\frac{g}{m^3} \right) = sDQO - 1.6 sDBO$$

$$sDQOe (g/m^3) = 81.79$$

Determinación de $nbSSV (g/m^3)$

Ecuación A 26

$$nbSSV = \left(\frac{1 - bpDQO}{pDQO} \right) * SSV$$

$$bpDQO / pDQO = ((bDQO/DBO) (DBO - sDBO)) / (DQO - sDQO)$$

$$bpDQO / pDQO = 1.6 (DBO - sDBO) / (DQO - sDQO) \quad bpDQO / pDQO = 0.0484$$

$$nbSSV (g/m^3) = 9.22$$

Determinación de los sólidos suspendidos totales inertes

Ecuación A 27

$$iSST (g/m^3) = SST - SSV$$

$$iSST (g/m^3) = 31.50$$

2. Diseño del sistema de crecimiento suspendido solo para remoción de DBO

a. Determinación de la producción de biomasa

Ecuación A 28

$$P_{x,ssv} = ((QY (S_0 - S)) / (1 + (kd) SRT) + ((fd) (kd) QY (S_0 - S) SRT) / (1 + (kd) SRT))$$

$$P(m^3/d) = 4320.00$$

$$Y = (gSSV/g bDQO) (0.30 - 0.50) = 0.40$$

$$S_0 (g bDQO/m^3) = 2503.68$$

Determinación de S:

Ecuación A 29

$$S = K_s [1 + (kd)SRT] / SRT(\mu_m - kd) - 1$$

Ecuación A 30

$$\mu_m (g SSV / g SSV * d) (3.0 - 13.2) = 6.00$$

Ecuación A 31

$$K_s (g bDQO/m^3) (5.0 - 40.0) = 20.00$$

Ecuación A 32

$$kd (g SSV / g SSV * d) (0.06 - 0.20) = 0.12$$

Ecuación A 33

$$fd \text{ (g/g) } (0.08 - 0.20) = 0.15$$

Ecuación A 34

$$\mu mn \text{ (g SSV / g SSV.d) } = \text{ (g/g.d) } (0.20 - 0.90) = 0.75$$

Ecuación A 35

$$Kn \text{ (g NH4 - N/m}^3\text{) } (0.5 - 1.0) = 0.74 \quad 0.85$$

Ecuación A 36

$$Yn \text{ (g SSV / g NH4 - N) } (0.10 - 0.15) = 0.12$$

Ecuación A 37

$$Kdn \text{ (g SSV / g SSV.d) } (0.05 - 0.15) = 0.08$$

$$KO \text{ (g/m}^3\text{) } (0.40 - 0.60) = 0.5$$

$$\mu m \text{ (sin unidad) } (1.03-1.08) = 1.07 \quad 1.03$$

$$Kd \text{ (sin unidad) } (1.03-1.08) = 1.04$$

$$ks \text{ (sin unidad) } (1.0) = 1.00$$

$$\mu n \text{ (sin unidad) } (1.06 - 1.123) = 1.07$$

$$Kn \text{ (sin unidad) } (1.03 - 1.123) = 1.053$$

$$Kdn \text{ (sin unidad) } (1.03 - 1.08) = 1.04$$

$$\mu m, T = \mu m \theta^{T-20}$$

$$T (^{\circ}\text{C}) = 30.00$$

$$\mu_m, T \text{ (g/g}\cdot\text{d)} = 11.803$$

$$K_d, T = k_d \theta^{T-20} = 0.1776$$

$$S \text{ (g bDQO/m}^3\text{)} = 0.66$$

Sustituyendo valores anteriores en la expresión anteriormente dada para:

PX, SSV

$$P_{x,ssv} \text{ (kg SSV/d)} = 2290.7 + 305.17$$

$$P_{x,ssv} \text{ (kg SSV/d)} = 2595.90$$

3. Determinación de la masa de los SSV y SST en el tanque de aireación

$$\text{Masa} = P_x (\text{SRT})$$

a. Determine PX, SSV y PX, SST, considerando "A, B y C" = 0, porque no es nitrificación

Ecuación A 38

$$P_{x,ssv} \text{ (kg/d)} = 2595.90 + Q (nbSSV)$$

$$P_{x,ssv} \text{ (kg/d)} = 2635.71$$

Ecuación A 39

$$P_{x,TSS} \text{ (kg/d)} = P_{x,ssv}/0.85 + Q(nbSSV) + Q(SST_0 - SSV_0)$$

$$P_{x,TSS} \text{ (kg/d)} = 3229.89$$

b. cálculo de la masa de SSV y SST en el tanque de aireación

Cálculo de la masa de sólidos suspendidos volátiles del licor mezclado

Ecuación A 40

$$(X_{SSV})(V)(kg) = (P_{X,SSV}) SRT = 13178.57$$

Cálculo de la masa de sólidos sedimentables del licor mezclado

Ecuación A 41

$$(X_{TSS})(V)(kg) = (P_{X,SST}) SRT = 16149.46$$

4. Determinación del volumen del tanque de aireación y su tiempo de residencia usando los cálculos obtenidos en el punto 3.

a. Determinación del volumen del tanque de aireación

$$(V)(X_{SST})(kg) = 16149.46$$

$$At X_{SST} (g/m^3) = 4000.00$$

$$\text{Factor de conversión (g / Kg)} = 10.0^3 = 1000$$

Ecuación A 42

$$V = ((V)(X_{SST})(10^3 g/kg)) / At X_{SST}$$

$$V (m^3) = 4037.37$$

5. Determinación del tiempo de retención del tanque de aireación

Ecuación A 43

$$T = (V(m^3)) (24h/d) / Q (m^3/día) \text{ Horas}$$

$$T = 22.43$$

6. Determinación de SSVLM

Ecuación A 44

$$\text{Fracción de SSV} = X_{SSV} / X_{SST} = 0.816$$

$$SSVLM (g/m^3) = 3264.15$$

7. Determinación de F/M y carga orgánica volumétrica (DBO)

a. Determinación de F/m

Ecuación A 45

$$F/M = (Q (m^3/día)) (S_0 (g/m^3)) = kg DBO / kg SSVLM * d$$

$$F/M (g/g * d) \text{ o } (kg/kg * d) = 0.51$$

b. Determinación de carga orgánica volumétrica (DBO)

Ecuación A 46

$$\text{Carga DBO} = Q S_0 (Kg DBO) / V(m^3 * d) * 10^3(g/kg)$$

$$\text{Carga DBO } (kg/m^3 * d) = 1.67$$

8. Determinación del rendimiento observado en base a los SST y los SSV

a. Rendimiento observado en base a los SST

Ecuación A 47

$$\text{rendimiento observado} = g SST / g bDQO = kg SST / kg bDQO$$

$$P_x, TSS (kg/d) = 3229.89$$

Ecuación A 48

$$bDQO \text{ removida} = (Q \text{ (m}^3 \text{ * día)} (S_0 - S \text{ (g/m}^3))) / (1^3)$$
$$bDQO \text{ removida (kg/día)} = 10813.04$$

Ecuación A 49

$$Y_{obs, SST} \text{ (gSST/gDQO)} = 0.30$$

Ecuación A 50

$$Y_{obs, SST} \text{ (gSST/gDBO)} = 0.48$$

b. Rendimiento observado en base a los SSV

Ecuación A 51

$$Y_{obs, SSV}: SSV/SST = 0.82$$

Ecuación A 52

$$Y_{obs, SSV} \text{ (gSSV/g bDQO)} = 0.24$$

Ecuación A 53

$$Y_{obs, SSV} \text{ (gSSV/gDBO)} = 0.39$$

9. Cálculo de la demanda de oxígeno

Ecuación A 54

$$R_o \text{ (kg/h)} = Q (S_0 - S) - 1.42 P_{x, bio}$$
$$R_o \text{ (kg/d)} = 7126.87$$
$$R_0 \text{ (kg/h)} = 296.95$$

10. Diseño de aireación por medio de burbuja fina, determinando el caudal de aire de diseño

Ecuación A 55

$$AOTR = SOTR (\beta C_{s,T,H} - C_L / C_{S,20}) * (1.024^{T-20})(F)$$

Donde:

AOTR: tasa real de transferencia de oxígeno bajo condiciones de campo (kg O₂/h).

SOTR: tasa de transferencia de oxígeno estándar en agua a 20°C y una concentración de cero de oxígeno disuelto (kg O₂/h).

a. Determinación de $C_{s,T,H}$, la concentración promedio de saturación de oxígeno disuelto en agua limpia, en el tanque de aireación a una temperatura “T” y una altitud “H”.

Ecuación A 56

$$C_{s,T,H} = (C_{s,T,H})^{1/2} ((P_d/P_{atm}) + (O_t/21))$$

b. Tomando variables de la tabla D-1 (apéndice D) del libro Metcalf & Eddy, cuarta edición).

$$C_{20} \text{ (mg/l)} = 9.08$$

$$C_{30} \text{ (mg/l)} = 7.54$$

c. Determinación de la presión relativa a una elevación de 10 m., para corrección de la concentración de oxígeno disuelto a dicha altitud.

Ecuación A 57

$$P_b / P_{atm} = \exp [- gM (Z_b - Z_a) / RT]$$

$$P_b / P_{atm} = 0.9990$$

La concentración de oxígeno a:

$$m = 9.00$$

$$^{\circ}\text{C} = 30.00$$

$$C_{s,T,H} \text{ (mg/l)} = 7.532$$

d. Determine la presión atmosférica en metros de agua, a una elevación de:

$$\text{msnm.} = 9.00$$

$$\text{Temperatura } (^{\circ}\text{C}) = 30.00$$

Tomando variables de las tablas B y C del libro Metcalf & Eddy, cuarta edición:

$$\gamma \text{ kN/m}^3 (30^{\circ}) = 9.764$$

$$P_{atm, H} \text{ kN/m}^2 (100^{\circ}) = 101.325$$

Ecuación A 58

$$P_{atm, H} = ((P_b / P_{amt}) (P_{atm, H} \text{ kN/m}^2)) / (\gamma \text{ kN/m}^3)$$

$$P_{atm, H} \text{ (m)} = 10.37$$

e. Determinación de la concentración de oxígeno en el reactor, suponiendo que el porcentaje de concentración que sale del tanque de aireación es de:

% que sale del tanque es de (O_t): 19.00

Ecuación A 59

$$C - s, T, H = (((C_{s, T, H}) (1/2)) (P_{atm, H} + P_{w, Eff\ depth})) / (P_{atm, H})$$

$$C - s, T, H = 8.52$$

f. Determinación de la velocidad estándar de transferencia de oxígeno (SOTR) en agua a 20°C y una concentración de cero de oxígeno disuelto usando:

$$\alpha = 0.50$$

$$\beta = 0.95$$

$$F = 0.90$$

$$Cl\ (g/m^3) = 2.00$$

Ecuación A 60

$$SOTR\ (kg/h) = AOTR\ (C_{s, 20}) / \alpha F (\beta C - s, T, H - CL) (1.024^{20 - T})$$

$$SOTR\ (kg/h) = 775.90$$

g. Determinación de flujo de aire:

Ecuación A 61

$$\begin{aligned} \text{Flujo de aire (m}^3\text{/min.)} \\ = (SOTR\ kg/h) / (E)(60\ (min))\ (kgO_2/m^3\ aire) \end{aligned}$$

$$\text{Flujo de aire (m}^3\text{/min.)} = 136.84$$

B. Remoción de DBO, considerando nitrificación

1. Realizar el diseño de nitrificación siguiendo los mismos pasos para remoción de DBO. Excepto el diseño de “SRT” que primero debe determinarse.

Ecuación A 62

$$\mu_n = (\mu_{nm} N / K_n + N) (DO / K_0 + CO) - k_{dn}$$

a. Determinar: μ_{nm} para una $T (^{\circ}\text{C}) = 30.00$

$$\mu_{nm}, 30^{\circ}\text{C} (\text{g/g.d}) = 1.48$$

b. Determinar: K_n' para una $T (^{\circ}\text{C}) = 30.00$ $K_n' 30^{\circ}\text{C} (\text{g/m}^3) = 1.24$

c. Determinar k_{dn} , para una $T (^{\circ}\text{C}) = 30.00$

$$k_{dn}, 30^{\circ}\text{C} = 0.118$$

Sustituyendo los valores anteriores en:

$$N (\text{g/m}^3) = 0.50$$

$$OD (\text{g/M}^3) = 2.00$$

$$K_0 (\text{g/m}^3) = 0.5$$

$$\mu_n (\text{g/g.d}) = 0.2207$$

2. Determinación del “SRT” teórico y de diseño.

a. Determinación del “SRT” teórico

Ecuación A 63

$$SRT \text{ teórico (día)} = 1 / \mu_n$$

$$SRT \text{ teórico (día)} = 4.53$$

b. Determinación del “SRT” de diseño

Ecuación A 64

$$FS = TKN \text{ pico} / TKN \text{ promedio} = 1.5$$

Ecuación A 65

$$SRT \text{ de diseño} = (FS) (SRT \text{ teórica})$$

$$SRT \text{ de diseño} = 6.80$$

3. Determinación de la producción de la biomasa

Ecuación A 66

$$PX, bio = (QY (S_0 - S) / 1 + (k_d) SRT) + (f_d (k_d) Q(Y)(S_0 - S) SRT) / 1 + (k_d) SRT + (QYn(Nox) / 1 + (k_{dn}) SRT)$$

a. Definiendo los datos de entrada para la Ecuación A 66.

$$Q \text{ (m}^3\text{/día)} = 4320.00$$

$$Y \text{ (SSv/g bDBO)} = 0.40$$

$$S_0 \text{ (g bDQO/m}^3\text{)} = 2503.68$$

$$k_d \text{ (g/g. d)} = 0.1776$$

$$\mu_m \text{ (g/g. d)} = 11.803$$

Determinación de “s”

Ecuación A 67

$$S = KS (1 + (kd)SRT) / SRT (\mu m - kd) - 1$$

$$S (g\ b\ DQO) / m^3 = 0.566$$

$$Y_n (SSV/g\ Nox) = 0.12$$

$$k_{dn, 30^\circ C} (g/g.d) = 0.118$$

Asumiendo que NOX es el 80% de NTK como nitrógeno, ya que el balance del nitrógeno no se puede realizar todavía.

$$NO_x (g/m^3) = 18.98$$

b. Sustituyendo los valores anteriores para la obtención de (P X, bio)

$$P_{X, bio} (kg\ SSV/d) = 1959.23 + 354.81 + 5.45$$

$$P_{X, bio} (kg\ SSV/d) = 2319.49$$

c. Determinar la cantidad de nitrógeno oxidado a nitrato. Utilizando:

Ecuación A 68

$$Nox = TKN - Ne - 0.12 P_{X, bio} / Q$$

$$N_{ox} (g/m^3) = -41.21$$

5.Determinar la concentración y la masa de los “SSV y SST” en el tanque de aireación.

Ecuación A 69

$$Masa = Px (SRT)$$

a. Determinar la concentración de SSV y SST en el tanque de aireación

$$P_{X, SSV} (kg/d) = 2359.31 \quad 39.82$$

$$P_{X, SST}(\text{kg/d}) = 2904.71$$

b. Cálculo de la masa de SSV y SST en el tanque de aireación

Masa de SSVLM

Ecuación A 70

$$(XSSV)(V) = (PX, SSV) SRT (kg)$$

$$\text{Masa de SSVLM} = 16035.74$$

Masa de SSLM

Ecuación A 71

$$(XSST)(V) = (PX, SSV) SRT (kg)$$

$$\text{Masa de SSLM} = 19742.73$$

6. Determinación del volumen del tanque de aireación

a. Volumen del tanque de aireación

Ecuación A 72

$$V = (XSSt)(\text{kg}) / At \text{ SSLM } (\text{g/m}^3)$$

$$(XSSt)(kg) = 19742.73$$

$$At \text{ SSLM } (\text{g/m}^3) = 3500.00$$

$$V (\text{m}^3) = 5640.78$$

b. Determinación del tiempo de retención del tanque de aireación

Ecuación A 73

$$T = V/Q (h)$$

$$T = 31.3$$

c. Determinación de SSVLM

$$\text{Fracción SSV} = 0.812$$

$$\text{SSVLM (g/m}^3\text{)} = 3248.94$$

7. Determinación de “F/M” y carga orgánica volumétrica

a. Determinación de F/M

Ecuación A 74

$$F/M \text{ (g/g.d)} = QS_0 / XV = \text{g DBO} / \text{g MLSSV.d}$$

$$F/M \text{ (g/g.d)} = 0.59$$

b. Determinación de carga orgánica volumétrica

Ecuación A 75

$$Lorg = QS_0 / V = \text{kg DBO} / \text{m}^3.\text{d}$$

$$Lorg \text{ (kg/m}^3.\text{d)} = 1.20$$

8. Determinar el rendimiento observado en base a los SST y los SSV

Ecuación A 76

$$\text{Rendimiento observado} = \text{g SST} / \text{g bDQO} = \text{kg SST} / \text{kg bDQO}$$

$$PX, SST \text{ (kg/d)} = 2904.71$$

Ecuación A 77

$$\text{bDQO removido (kg/d)} = Q (S_0 - S)$$

$$bDQO \text{ removido (kg/d)} = 10811.6$$

a. Rendimiento observado basado en los SST

Ecuación A 78

$$Y_{obs, SST} (g \text{ SST/g } bDQO) = 0.27$$

Ecuación A 79

$$Y_{obs, SST} (g \text{ SST/g } bDBO) = 0.43$$

b. Rendimiento observado basado en los SSV

Ecuación A 80

$$Y_{obs, SSV} (SSV/SST) = 0.82$$

Ecuación A 81

$$Y_{obs, SSV} (g \text{ SSV/g } bDQO) = 0.22$$

Ecuación A 82

$$Y_{obs, SSV} (g \text{ SSV/g } DBO) = 0.35$$

9. Cálculo de la demanda de oxígeno

Ecuación A 83

$$Ro \text{ (kg/h)} = Q (S_0/S) - 1.42 P_{x, bio} + 4.33 Q (NOx)$$

$$Ro \text{ (kg/d)} = 6748.95$$

$$Ro \text{ (kg/h)} = 281.21$$

10. Diseño de aireación por medio de burbuja fina, determinando el caudal de aire de diseño

a. Calculando el SOTR usando los datos indicados a continuación:

$$\alpha = 0.65 \quad \beta = 0.95 \quad F = 0.90$$

Ecuación A 84

$$SOTR (kg/h) = AOTR (CS, 20 / \alpha F (\beta C - s, T, H - C)) * (1.024^{20 - T})$$

$$SOTR = 852.17$$

b. Determinación del flujo de aire

$$Flujo\ de\ aire\ (m^3/min) = 150.29$$

11. Verificación de la alcalinidad

a. Preparando un equilibrio de la alcalinidad

Ecuación A 85

$$\begin{aligned} &Alcalinidad\ para\ mantener\ un\ pH \sim 7 \\ &= alc.de\ alimentación - alc.requeridas - alc.Agregada. \end{aligned}$$

$$Alcalinidad\ de\ alimentación\ (g/m^3\ como\ CaCO_3) = 150.00$$

$$Cantidad\ de\ nitrógeno\ convertido\ a\ nitratos: NO_x\ (g/m^3) = -41.21$$

$$Alcalinidad\ usada\ para\ nitrificación = (7.14\ g\ CaCO_3/g\ NH_4-N)(NO_x\ g/m^3)$$

$$Alcalinidad\ usada\ para\ nitrificación\ (g/m^3, como\ CaCO_3) = -294.23$$

b. Sustituyendo los valores conocidos para determinar el requerimiento de alcalinidad

Concentración de alcalinidad residual necesaria para mantener el pH en un rango de: 6.8 - 7.0 = 70 - 80 (g/m³) como CaCO₃ se selecciona: 80.00

$$80.00 = Alc.Inf. + Alc.Req. + Alc.Adicionar$$

$$Alcalinidad\ requerida\ (g/m^3\ como\ CaCO_3) = -364.23$$

$$Alcalinidad\ requerida\ (kg/d\ como\ CaCO_3) = -1573.46$$

c. Determinación de alcalinidad requerida como bicarbonato de Sodio

El Bicarbonato de Sodio es preferible a la cal, para la adición de alcalinidad, debido a la facilidad de manejo y se tiene menos problemas de incrustación en comparación con la cal.

Cantidad de Bicarbonato de Sodio requerido:

Peso equivalente de CaCO_3 (g/equivalente) = 50.00

Peso equivalente de Na (HCO_3), (g/equivalente) = 84.00

Na (HCO_3), requeridos (kg/d) = -2643.42

12. Estimación de la DBO del efluente

Ecuación A 86

$$DBO \text{ (G/m}^3\text{)} = SDBO_e + (1 \text{ g DBO}/1.42 \text{ g SSV}) (0.85 \text{ g SSV}/\text{g SST}) (\text{SST, g/m}^3\text{)}$$

Asumiendo $SDBO_e \text{ (g/m}^3\text{)} = 10.0$

$\text{SST (g/m}^3\text{)} = 20.0$

$$DBO \text{ (g/m}^3\text{)} = 21.97$$

13. Diseño del clarificador secundario (para ambas condiciones solo remoción de DBO y remoción de DBO con nitrificación).

a. Definición de retorno de lodos

Ecuación A 87

$$Q_r X_r = (Q + Q_r) X$$

(asumiendo que la masa de lodo de residual es insignificante)

$Q_r \text{ (m}^3\text{/d)} = \text{flujo del retorno de lodo}$

$X_r \text{ (g/m}^3\text{)} = \text{concentración de la masa del retorno de lodo}$

Ecuación A 88

$$RAS, \text{relación de reciclaje} = Q_r / Q = R$$

Ecuación A 89

$$R X_r = (1 + R) X$$

Ecuación A 90

$$R = (X / X_r - X)$$

b. Cálculo del tamaño del clarificador.

$$X_r \text{ (g/m}^3\text{)} = 8000.00$$

$$R = 1.00$$

Ecuación A 91

$$\text{Área (m}^2\text{)} = Q / \text{carga hidráulica}$$

$$\text{Área (m}^2\text{)} = 300.52$$

Ecuación A 92

$$D \text{ (m)} = \sqrt{A / 0.785}$$

$$D \text{ (m)} = 19.57$$

c. Verificando carga de sólidos

Ecuación A 93

$$\text{carga de sólidos (kg SSLM/m}^2\text{.h)}$$

$$= \text{kg SST aplicado / m}^2 \text{ área del clarificador}$$

$$\text{carga de sólidos} = (Q + Q_r) (\text{SSLM}) / A = (1 + R) Q (\text{SSLM}) / A$$

$$\text{carga de solidos (kg SSLM/m}^2\text{.h)} = 4.79$$

Rango de carga de solidos aceptados (kg/m². d) = 4.0 - 6.0

Tabla A 7. Tabla de resumen de cálculos. (Realizados por I.Q. José A. Deaquino Barrera)

Parámetros de diseño	Unidades	Parte "A" solo remoción de DBO	Parte "B" rem. DBO y nitrificación
Flujo de agua residual	m ³ / d	4320.00	4320.00
Carga promedio de DBO	kg / d	6759.9	6759.9
Carga promedio de NTK	kg / d	102.48	102.48
SRT aerobio	d	5.00	6.80
Volumen del tanque de aireación	m ³	4037.37	5640.78
Tiempo de ret. Hidráulico	h	22.43	31.34
SSLM	g / m ³	4000.00	4000.00
SSVLLM	g / m ³	3229.89	2904.71
F/M	g/g.d	0.51	0.59
Carga orgánica (DBO)	kg DBO/m ³ .d	1.67	1.20
Producción de lodo	kg / d	3229.89	2904.71
Rendimiento observado	kg SST / kg bDQO	0.48	0.43
	kg SSV / kg DBO	0.39	0.35
Oxígeno requerido	kg / h	296.95	281.21
SOTR	kg/hr	775.90	852.17
Promedio de flujo de aire	sm ³ / min	136.84	150.29
Retorno de lodos (RAS)	sin unidades	1.00	1.00
Clarificador, carga	m ³ / m ² .d	23.00	23.00
adición de alcalinidad como	kg / d	0.00	-2643.42
DBO en el efluente	g / m ³	< 30.0	21.97
SST en el efluente	g / m ³	< 30.0	20.0
Amonio en el efluente (NH4-	g / m ³	18.98	0.50

14. Nutrientes

Datos:

DBO5 (mg/l) :1564.80

DBO5 (Kg/d): 6759.94

Por cada 100 partes de DBO5 se requieren 5 partes de Nitrógeno, por lo tanto:

2457 kg/d. de oxígeno / 100: 67.60

Por lo tanto, se requiere de nitrógeno (kg/ d): 337.9968

Quedando un remanente de nitrógeno de (kg/d) = -235.52

15.Desnitrificación

Cantidad de nitrógeno a ser denitrificado) $\text{Nox-N/d (g/m}^3\text{)} = -235.52$

Velocidad de desnitrificación ((N/kg MLSS/d) = 0.18

Volumen anoxico requerido (m^3) = -327.11