



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

GRADO EN INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA
ESPECIALIDAD MECÁNICA

ESTACIÓN DEPURADORA DE AGUA RESIDUALES PARA LA INDUSTRIA AZUCARERA CON APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO

Autor: Joaquín Villar Font de Mora

Director: Carlos Morales Polo, Mercedes Otte Alba

Madrid
Junio 2017.

AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESIS O MEMORIAS DE BACHILLERATO

1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor D. **Joaquín Villar Font de Mora**, como estudiante de la UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS (COMILLAS), **DECLARA** ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: **Estación Depuradora de Aguas Residuales para la Industria Azucarera con Aprovechamiento Energético**, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2º. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

3º. Condiciones de la cesión y acceso

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducirla en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

4º. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.
- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 16 de Junio de 2017.

ACEPTA



Fdo.....

Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Estación Depuradora de Aguas Residuales Para la Industria Azucarera Con Aprovechamiento
Energético

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2016-2017 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni
total ni parcialmente y la información que ha sido tomada
de otros documentos está debidamente referenciada.

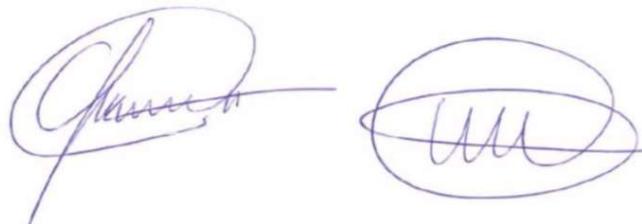


Fdo.: Joaquín Villar Font de Mora

Fecha: 15/06/2017.

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Carlos Morales Polo y Mercedes Otte Alba Fecha: 15/ 06/2017.

ESTACIÓN DEPURADORA DE AGUAS RESIDUALES PARA LA INDUSTRIA AZUCARERA CON APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO

Autor: Villar Font de Mora, Joaquín

Director: Morales Polo, Carlos y Otte Alba, Mercedes

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Introducción

El agua es un bien preciado e indispensable tanto para la mayor parte de los procesos industriales, como para el ser humano y la vida cotidiana. No obstante, hoy en día los contaminantes del agua superan las capacidades de sus mecanismos de descontaminación, y por ello se diseñan tratamientos basados en diferentes técnicas y procesos de depuración con el objeto de reducir la contaminación de los vertidos (según el uso posterior del agua) según la normativa vigente y reutilizar el agua. En consecuencia, surgen las “Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales” (EDAR) en las que además de obtener agua limpia para el medio ambiente según la ley directiva 91/271/CEE, se es capaz de reciclar la energía del proceso de depuración.

El objeto de este proyecto es el tratamiento de las aguas residuales procedentes de la industria azucarera (mediante una EDAR), buscando lograr la depuración del efluente residual cumpliendo la normativa vigente, la reutilización máxima del agua y, el estudio del aprovechamiento energético de la EDAR diseñada.

La producción de azúcar consta de 9 procesos de los cuales 4 o 5 de ellos contiene aguas y 2 de ellos aporte exterior de agua. Con ello, se utilizan grandes volúmenes de agua por lo cual las fábricas del sector utilizan aporte exterior para 2 de los procesos. Por todo ello, las instalaciones del sector constan de tres circuitos cerrados de agua en la instalación, haciendo vitales los procesos de depuración de agua para poder reciclar y reutilizar el agua en esos circuitos.

Existe una gran cantidad de contaminantes en el sector azucarero, los cuales han de ser tratados independientemente según los distintos niveles a los que tengan que ser reducidos. En primer lugar se puede realizar un análisis general de la contaminación del agua ya que la remolacha contiene un 75% de agua la cual se libera a lo largo del proceso de fabricación. En consecuencia, todos los efluentes contienen restos de materia orgánica, metales, químicos, aumentos del pH (procedentes de los componentes químicos pertenecientes a los fertilizantes de la remolacha) y un alto contenido de sólidos en suspensión procedentes de las hojas, barro y piedras que acompañan a la remolacha al entrar en la instalación.

Debido a los grandes volúmenes de agua utilizados en la industria y debido a su alto contenido orgánico se puede concluir que el factor medioambiental más importante en los efluentes de la industria son debidos a los elevados niveles de DBO y DQO del agua:

- Demanda Química de Oxígeno (DQO): Es un parámetro que mide la cantidad de sustancias capaces de ser oxidadas mediante un ensayo químico. Aunque este ensayo se utilice para medir la concentración de materia orgánica, en ocasiones sufre de interferencias debido a la presencia de materia inorgánica que una vez oxidada aparece en la medida.
- Demanda Biológica de Oxígeno (DBO): Es un parámetro que muestra la cantidad de materia susceptible de ser consumida por medios biológicos. Dicho parámetro se obtiene mediante un ensayo en el cual se mide la cantidad de oxígeno de una muestra de agua, posteriormente se desposee de luz a la muestra durante 5-7 días y se vuelve a medir los niveles de oxígeno.

Metodología.

El proyecto desarrollado se puede segmentar en cuatro partes principales, dichas partes se han ido desarrollando en un orden concreto para poder realizar el proyecto de forma correcta.

En primer lugar y como descrito en la breve introducción descrita anteriormente, se realiza un correcto estudio de los contaminantes contenidos en el agua, ambos procedentes de la instalación como fuera de ella y un estudio del volumen de agua consumido. Este punto es fundamental, ya que según el tipo y la cantidad de contaminantes, se utilizaran unas etapas u otras en la EDAR propuesta. Para el estudio de dichos contaminantes es de vital importancia analizar dos puntos: Primero se hace un análisis exhaustivo del material utilizado en la producción del azúcar (la remolacha). Por último pero igual de importante se realiza un estudio de la instalación y los procesos utilizados para la extracción de la remolacha ya que como se podrá observar en el proyecto, el uso de materiales como carbonato cálcico y sulfuro hace que parámetros como el pH del efluente varíen.

Una vez hallados los valores de contaminación del afluente (mostrados en la tabla expuesta en la introducción), se realiza la elección del sistema de depuración de la instalación de tal forma que elimine los excesos de contaminación del agua. A la hora de realizar este apartado, se tiene en cuenta uno de los aspectos fundamentales del proyecto, la reutilización energética, por ello se utilizará un sistema de digestión anaerobia las dos líneas de depuración.

Continuando con el diseño de la EDAR, teniendo en cuenta el volumen de agua consumido al día por la instalación y, realizando ciertas hipótesis descritas en los posteriores puntos, se realiza un cálculo de las dimensiones de la depuradora. Gracias a

este cálculo se obtiene las dimensiones de cada etapa (para poder realizar su construcción posterior) y los fangos y cantidades de contaminantes reducidos en cada sección de la depuración.

Finalmente se realiza un estudio del aprovechamiento energético que se puede obtener con la digestión anaerobia realizada en las etapas de depuración. Dicho estudio se realiza en primer lugar, calculando la cantidad total de biogás generada por la EDAR. Con ello, se continúa realizando un cálculo de la combustión completa del biogás y su posterior potencial energético, utilizando su poder calorífico. Finalmente teniendo en cuenta las tecnologías existentes, se estudia la posibilidad de recuperación energética, así como la cantidad a poder recuperar.

Resultados y Conclusiones.

Una vez realizado el análisis total de la contaminación del agua, los contaminantes y parámetros de control principales de los efluentes de agua en la industria son los siguientes:

Parámetros	Mínima	Máxima
DQO [mg/l]	2300	3500
DBO [mg/l]	1650	2300
pH	3.5	9
Caudal [m ³ /día]	2481	5954
N total [mg/l]	25	60
P total [mg/l]	2	3

Con ello, se decide utilizar las siguientes etapas de depuración para reducir la contaminación global del agua procedente de la instalación:

LÍNEA DE AGUAS	
ETAPAS	PROCESOS
PRETRATAMIENTO	DESBASTE
	TAMIZADO
	DESARENADO
TRATAMIENTO PRIMARIO	DECANTACIÓN PRIMARIA
TRATAMIENTO SECUNDARIO	REACTOR DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA
	DECANTACIÓN SECUNDARIA

LÍNEA DE FANGOS	
ETAPAS	PROCESOS
ESPELAMIENTO	POR GRAVEDAD
ESTABILIZACIÓN	DIGESTIÓN ANAEROBIA
DESHIDRATACIÓN	ERAS DE SECADO

Cabe destacar las dos etapas de digestión anaerobia en el efluente de agua. En primer lugar estas etapas se escogen por la posibilidad que ofrecen a reutilizar la energía del biogás generado. No obstante, debido al elevado contenido en materia orgánica del agua (elevados niveles de DQO y DBO) la digestión anaerobia tanto en la línea de fangos como en la de agua, resulta la elección idónea para reducir los niveles.

Como queda descrito en la metodología, a continuación se calcula la cantidad de gas y energía que se puede explotar de la digestión anaerobia realizada a lo largo de la depuración.

Volumen de Metano Línea Fangos (m^3)	Densidad (Kg/m^3)	Masa (Kg)
8372,395222	0,656	5492,29127
Volumen de Metano Línea Aguas (m^3)	Densidad (Kg/m^3)	Masa (Kg)
41908,82382	0,656	27492,18842

Obteniendo por ende, la energía máxima generada por una combustión completa del metano utilizando su poder calorífico inferior.

Energía Generada Inferior (KWh)	
Línea de Aguas	381591,5753
Línea de Fangos	76233,00277

Finalmente se realiza un estudio de la reutilización de esta energía mediante tres tipos de tecnologías:

Tipo de Energía	Energía Máxima en C.C.	Rendimiento Instalación (%)	Energía Eléctrica Generada (MWh)
Caldera de Vapor	457,825	56	256,381
Ciclo Turbina Vapor	457,825	40	183,13
Ciclo Combinado	457,825	60	274,695
Motor Alternativo	457,825	45	206,021

A pesar de requerir de instalaciones más costosas de producir y cuyas dimensiones son mucho mayores que las otras tecnologías, durante el proyecto se supone que se obtienen el espacio y dinero suficiente como para construirlas. Por ello, en principio parece que la tecnología idónea para ser instalada es un ciclo combinado de aire – gas. No obstante, ya

que en la mayor parte de las tecnologías se pierde un alto contenido energético por culpa del calor expulsado por la combustión, se decide realizar un estudio con cogeneración para reutilizar el mayor porcentaje de energía posible.

Tecnología	Energía Máxima en C.C. (MWh)	Rendimiento Eléctrico (%)	Rendimiento Calor (%)	Rendimiento Instalación	Energía Generada (MWh)
Motores y Cogeneración	457,8245	45	45	90	412,0421
Turbina de Gas Cogeneración	457,8245	40	45	85	389,1508
Caldera Vapor Cogeneración	457,8245	56	30	86	393,7291

Como se puede observar la instalación que ofrece un mayor rendimiento energético es la creada por motores alternativos junto con cogeneración. Además de ello, posee diferentes ventajas frente a las demás:

- El **coste de producción** es menor que el resto de las instalaciones sugeridas en el capítulo.
- Su **consumo de combustible** disminuye ya que debido al segundo aprovechamiento energético no se requiere de su funcionamiento durante unos periodos de tiempo tan elevados.
- El **Impacto Ambiental** producido por esta instalación es mucho menor, ya que los gases de escape son aprovechados y se requiere de un menor tiempo de combustión por el combustible.
- **Construcción menos costosa** no se requiere de un amplio espacio para la construcción de la instalación y los motores de cogeneración poseen unas dimensiones mucho menores que las turbinas de generación eléctrica.

Por todas estas razones, se considera la tecnología más óptima para implementarla en la industria azucarera y utilizar tanto su energía calorífica como eléctrica en la instalación. En principio se decide utilizar la energía eléctrica para alimentar a la instalación general y consumir por tanto menos potencia, y el uso de la energía calorífica para la etapa de calentamiento y secado de las cosetas y el azúcar refinado limitando así todo consumo extra innecesario.

PROJECT SUMMARY

Introduction

Water is a precious commodity that is indispensable for most industrial processes, as well as for human beings and daily life. However, today water contaminants exceed the capacities of its decontamination mechanisms, and therefore, treatments based on different purification techniques and processes are designed with the aim of reducing contamination of the wastes (depending on the later use of the water) according to current regulations and reuse water. As a result, "Sewage Treatment Plants" (WWTP) are emerging in which, in addition to obtaining clean water for the environment according to the directive 91/271 / EEC, it is able to recycle the energy of the purification process.

The objective of this project is the treatment of waste water from the sugar industry (through a Waste Water Treatment Plant), seeking to purify the residual effluent complying with current regulations, maximum reuse of water and the study of the energy use of the WWTP Designed.

The production of sugar consists of 9 processes of which 4 or 5 of them contain water and 2 of them external water supply. With this, large volumes of water are used, so the factories in the sector use external input for 2 of the processes. For all this, the facilities in the sector require three closed water circuits in the facility, making water purification processes vital to be able to recycle and reuse the water in those circuits.

There is a large amount of contaminants in the sugar sector, which must be treated independently according to the different levels at which they have to be reduced. In the first place, a general analysis of water contamination can be carried out since the beet contains 75% of water which is released throughout the manufacturing process. As a result, all effluents contain residues of organic matter, metals, chemicals, pH increases (from chemical components belonging to beet fertilizers) and a high solids content of leaves, mud and stones Accompany the beet when entering the facility.

Due to the large volumes of water used in the industry and due to its high organic content it can be concluded that the most important environmental factor in the effluents of the industry are due to the high levels of BOD and COD of the water:

Oxygen Chemical Demand (COD): It is a parameter that measures the amount of substances capable of being oxidized by a chemical test. Although this test is used to measure the concentration of organic matter, it sometimes suffers from interference due to the presence of inorganic matter that once oxidized appears in the measurement.

Biological Oxygen Demand (BOD): It is a parameter that shows the amount of material that can be consumed by biological means. This parameter is obtained by an assay in

which the amount of oxygen in a water sample is measured, then the sample is disposed of for 5-7 days and the oxygen levels are measured again.

Methodology.

The developed project can be divided into four main parts, these parts have been developed in a specific order to be able to carry out the project correctly.

Firstly and as described in the brief introduction described above, a correct study of the contaminants contained in the water, both from the installation as well as outside, and a study of the volume of water consumed, is carried out. This point is fundamental, since according to the type and quantity of pollutants, some stages or others will be used in the proposed WWTP. For the study of these pollutants it is vital to analyze two points: First a thorough analysis of the material used in the production of sugar (beet) is made. Finally, but equally important is a study of the installation and processes used for the extraction of sugar beet since, as will be observed in the project, the use of materials such as calcium carbonate and sulfur causes parameters such as pH of the effluent to vary.

Once the contaminant values of the water are found, the purification system is chosen in such a way as to eliminate excess contamination of the water. At the time of making this section, it takes into account one of the fundamental aspects of the project, the energy reuse, so an anaerobic digestion system will be used in both of the purification lines.

Continuing with the design of the WWTP, taking into account the volume of water consumed per day by the installation and, taking into account certain hypotheses described in the following project, a calculation of the dimensions of the treatment plant is carried out. Thanks to these calculations, the dimensions of each stage are obtained (for subsequent construction) and the sludges and quantities of contaminants reduced in each section of the purification are acquired.

Finally, a study of the energy utilization that can be obtained with the anaerobic digestion carried out in the purification stages is carried out. This study is done first, calculating the total amount of biogas generated by the WWTP. With this, a calculation is made of the complete combustion of the biogas and its subsequent energy potential, using its calorific value. Finally taking into account the existing technologies, it is studied the possibility of energy recovery, as well as the amount to be able to recover.

Conclusions and Results.

Once the total analysis of water pollution has been carried out, the main contaminants and control parameters of water effluents in the industry are as follows:

Parameters	Minimum	Maximum
COD [mg/l]	2300	3500
BOD [mg/l]	1650	2300
pH	3.5	9
Caudal [m ³ /día]	2481	5954
N total [mg/l]	25	60
P total [mg/l]	2	3

With this, it is decided to use the following purification steps to reduce global pollution of the water from the facility:

WATER LINE	
STEPS	PROCESS
PRETREATMENT	THINNING
	SIZING
	DESAND
PRIMARY TREATMENT	PRIMARY DECANTING
SECONDARY TREATMENT	ANAEROBIC DIGESTION REACTOR
	SECONDARY DECANTING

SLUDGE LINE	
STEPS	PROCESS
THICKENING	BY GRAVITY
STABILIZATION	ANAEROBIC DIGESTION
DEHIDRATATION	DRYING

It is worth noting the two stages of anaerobic digestion in the water effluent. In the first place these stages are chosen for the possibility that they offer to reuse the energy of the biogas generated. However, due to the high organic matter content of the water (high COD and BOD levels), anaerobic digestion in both the sludge and water lines is the ideal choice to reduce the levels.

As described in the methodology, the amount of gas and energy that can be exploited from the anaerobic digestion carried out along the purification is then calculated.

Methane Volume Sludge Line (m³)	Density (Kg/m³)	Mass (Kg)
8372,395222	0,656	5492,29127
Methane Volume Water Line (m³)	Density (Kg/m³)	Mass (Kg)

41908,82382	0,656	27492,18842
-------------	-------	-------------

Thus obtaining the maximum energy generated by a complete combustion of methane using its lower calorific power value.

Energy Generated (KWh)	
Water Line	381591,5753
Sludge Line	76233,00277

Finally, a study of the reuse of this energy through three types of technologies is carried out:

Type of Energy	Maximum Energy in C.C (MWh)	Facility Performance (%)	Electrical Energy Generated (MWh)
Steam Boiler	457,825	56	256,381
Steam Turbine Cycle	457,825	40	183,13
Combined Cycle	457,825	60	274,695
Alternative Engine	457,825	45	206,021

In spite of requiring more costly facilities to produce and whose dimensions are much larger than other technologies, during the project it is assumed that there will be enough space and money to build them. Therefore, in principle, it seems that the technology suitable to be installed is a combined air - gas cycle. However, since most of the technologies lose a high energy content due to the heat expelled by the combustion, it is decided to conduct a study with cogeneration in order to reuse the highest percentage of energy possible.

Technology	Maximum Energy in C.C (MWh)	Electrical Performance (%)	Heat Performance (%)	Facility Performance (%)	Energy Generated (MWh)
Engines + Cogeneration	457,8245	45	45	90	412,0421
Gas Turbine + Cogeneration	457,8245	40	45	85	389,1508
Steam Boiler + Cogeneration	457,8245	56	30	86	393,7291

As can be observed the installation that offers a greater energy efficiency is the one created by alternative motors along with cogeneration. In addition, it has different advantages compared to the others:

The cost of production is lower than the rest of the facilities suggested in the chapter.

- Its **fuel consumption** decreases because due to the second energy use it is not required to operate for such a long period of time.

- The **environmental impact** produced by this installation is much lower, since the exhaust gases are harnessed and less fuel combustion time is required.
- **Less expensive construction** does not require a large space for the construction of the installation and the cogeneration engines have a much smaller dimensions than the electric generation turbines.

For all these reasons, it is considered the most optimal technology to implement it in the sugar industry and use both its heat and electrical energy in the installation. In principle it is decided to use the electric energy to feed the general installation and therefore consume less power, and the use of heat energy for the heating and drying stage of the cosets and the refined sugar limiting thus any extra consumption unnecessary.

MEMORIA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA DE COMILLAS - Estación Depuradora de Aguas Residuales Para la
Industria Azucarera con Aprovechamiento Energético

INDICE

Capítulo 1. MEMORIA.....	7
1. INTRODUCCIÓN.....	9
2. OBJETIVOS.....	11
3. ANALISIS DE LOS CONTAMINANTES.....	13
3.1 Consumo de Agua	15
3.1.1 Efluentes de Agua.....	17
3.1.2 Afluentes de Agua	20
3.2 Caracterización de las Aguas.....	22
4. DISEÑO BASE DEL SISTEMA DE DEPURACION.....	27
4.1 Análisis de la contaminación.....	27
4.1.1 Niveles de contaminación de entrada y salida.....	28
4.2 Selección de las etapas de depuración.....	29
4.2.1 Línea de Agua	30
4.2.2 Línea de Fangos.....	46
4.2.3 Etapas de Depuración.....	53
Capítulo 2. CÁLCULOS.....	55
1. LINEA DE AGUAS	57
1.1 Dimensionado del Pretratamiento.....	58
1.1.1 Desbaste.....	58
1.1.2 Tamices.....	59
1.1.3 Desarenado	60
1.1.4 Balsa de homogeneización.....	61
1.2 Dimensionado del Tratamiento Primario.....	63
1.2.1 Decantación Primaria	63
1.3 Dimensionado del Tratamiento Secundario	65
1.3.1 Digestión Anaerobia.....	65
1.3.2 Decantación secundaria	68
2. LINEA DE FANGOS	71
2.1 Espesamiento	71
2.1.1 Espesamiento por Gravedad	71
2.2 Estabilización.....	72

2.2.1	Diseño Digestión Anaerobia	72
2.3	Deshidratación.	75
2.3.1	Eras de Secado	75
Capítulo 3. ESTUDIO Y CÁLCULO DE LA QUEMA DEL BIOGÁS.....		77
1.	INTRODUCCIÓN.....	79
2.	CANTIDAD DE METANO GENERADO.....	81
2.1	Digestión Anaerobia.....	81
2.1.1	Etapas de la digestión Anaerobia.....	81
2.1.2	Parámetros de Control.....	83
2.2	Cálculo de la Cantidad de Metano.	84
2.2.1	Cantidad de DQO.....	84
2.2.2	Volumen de Metano Producido.....	86
3.	GENERACIÓN ENERGÉTICA	89
3.1	Capacidad Energética del Metano.	89
3.1.1	Combustión del Metano.....	89
3.1.2	Energía Liberada.....	92
3.2	Reutilización de la Energía.	93
3.2.1	Turbina de Gas.	93
3.2.2	Caldera de Vapor.....	97
3.2.3	Motores Alternativos.	99
3.2.4	Cogeneración Eléctrica.....	99
Capítulo 4. IMPACTO AMBIENTAL.....		103
1.	MATRIZ DE IMPACTO.....	105
BIBLIOGRAFÍA		109

INDICE DE FIGURAS.

Figura 1: Diagrama del proceso de producción del azúcar. Fuente: Guía MTD de Azúcar.	16
Figura 2: Etapas que utilizan el caudal de agua de transporte. Fuente: Elaboración Propia.....	17
Figura 3: Diagrama de Bloques de los efluentes de agua. Fuente: Elaboración Propia.....	20
Figura 4: Diagrama de Bloques de los Afluentes de Agua. Fuente: Elaboración Propia	21
Figura 5: Diagrama de flujo de la metodología del diseño de la EDAR. Fuente: Elaboración Propia.	27
Figura 6: Esquema General de una EDAR. Fuente: Apuntes ICAI Medioambiente.....	30
Figura 7: Esquema de las etapas del Pretratamiento. Fuente: Elaboración Propia.....	32
Figura 8: Rejas de Gruesos en Posición Inclinada.	33
Figura 9: Tamiz Rotativo Mostrando flujo de Agua.....	34
Figura 10: Tamiz Deslizante de Gran Caudal.	34
Figura 11: Desarenador de corriente Vertical.....	36
Figura 12: Desarenador de Flujo Inducido.	36
Figura 13: Factor de Punta horario para aguas residuales.....	37
Figura 14: Esquema de Tratamiento Primario. Fuente: Elaboración Propia.....	38
Figura 15: Esquema Decantación Primaria. Fuente: CLED15	39
Figura 16: Decantador Rectangular: Fuente CEDEX 2014.....	40
Figura 17: Esquema y Selección de las etapas del Tratamiento Secundario. Fuente: Elaboración Propia.	42
Figura 18: Esquema reactor anaerobio.	44
Figura 19: Imagen de Reactor de Digestión Anaerobia.....	44
Figura 20: Esquema de las etapas de la línea de agua de la EDAR. Fuente: Elaboración Propia.....	45
Figura 21: Tanque de espesamiento por Gravedad.....	48
Figura 22: Espesador por Flotación.....	48
Figura 23: Proceso de Descomposición de Materia Orgánica mediante digestión anaerobia. ...	49
Figura 24: Digestor de Digestión en Fase. Fuente: Elaboración Propia	50
Figura 25: Eras de Secado. Fuente: Apuntes ICAI asignatura Medioambiente.....	51
Figura 26: Representación Gráfica de la Línea de Fangos. Fuente: Elaboración Propia.	52
Figura 27: Esquema Completo de la EDAR a Diseñar. Fuente: Elaboración Propia.	53
Figura 28: Degradación Biológica de Materia Orgánica.....	81
Figura 29: Aumento del pH en Función de la reducción de H ₂ S. Fuente: Elaboración Propia....	82
Figura 30: Etapas de la Digestión Anaerobia.....	83
Figura 31: Diagrama de Combustión Fuente: Elaboración Propia.	90
Figura 32: Ciclo Simple de Turbina de Gas.	94
Figura 33: Ciclo Combinado Gas-Vapor.....	96
Figura 34: Esquema de Ciclo con Caldera de Vapor.....	98

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Caudales de afluentes. Fuente: Guía MTD Azúcar, Elaboración Propia.....	22
Tabla 2: Parámetros de Contaminación. Fuente: Elaboración Propia.....	28
Tabla 3: Parámetros Medios y a Diseñar. Fuente: Elaboración Propia.....	28
Tabla 4: Valores máximos según legislación. Fuente: Guía MTD azúcar.....	29
Tabla 5:Caudales Totales: Fuente: Elaboración Propia.....	57
Tabla 6: Caudales de Diseño. Fuente: Elaboración Propia.....	57
Tabla 7: Parámetros de Partida Rejas de Finos. Fuente: Elaboración Propia.....	58
Tabla 8:Resultado del Cálculo de Rejas de Finos. Fuente: Elaboración Propia.....	58
Tabla 9: Parámetros de Partida del Tamiz Rotativo. Fuente: Elaboración Propia.....	59
Tabla 10: Resultado del Cálculo del Tamiz Rotativo. Fuente: Elaboración Propia.....	59
Tabla 11: Parámetros de Partida del Desarenador de Flujo Vertical. Fuente: Elaboración Propia.	60
Tabla 12: Resultados del Cálculo. Fuente: Elaboración Propia.....	61
Tabla 13: Regulación de Caudal con Balsa de Homogeneización. Fuente: Elaboración Propia..	62
Tabla 14: Resultado del Cálculo. Fuente: Elaboración Propia.....	63
Tabla 15:Parámetros de Partida de Decantadores Primarios. Fuente: Elaboración Propia.....	63
Tabla 16: Resultados del Cálculo. Fuente: Elaboración Propia.....	64
Tabla 17: Producción de Fangos Primarios. Fuente: Elaboración Propia.....	64
Tabla 18: Resultados del Cálculo. Fuente: Elaboración Propia.....	64
Tabla 19: Parámetros de Partida del Digestor Anaerobio. Fuente: Elaboración Propia.....	65
Tabla 20: Resultados del Cálculo. Fuente: Elaboración Propia.....	66
Tabla 21: Parámetros de Partida Digestión Anaerobia. Fuente: Elaboración Propia.....	67
Tabla 22: Cácluos de la Digestión Anaerobia. Fuente: Elaboración Propia.....	67
Tabla 23: Parámetros de Partida del Decantador Secundario. Fuente: Elaboración Propia.....	68
Tabla 24: Resultado del Cálculo. Fuente: Elaboración Propia.....	68
Tabla 25:Producción de Fangos Secundarios. Fuente: Elaboración Propia.....	69
Tabla 26:Resultados del Cálculo. Fuente: Elaboración Propia.....	69
Tabla 27: Parámetros de Partida Digestor Anaerobio. Fuente: Elaboración Propia.....	72
Tabla 28: Resultados del Cálculo del Digestor Anaerobio. Fuente: Elaboración Propia.....	73
Tabla 29: Parámetros de salida de la Digestión Anaerobia. Fuente: Elaboración Propia.....	73
Tabla 30: Resultados del Cálculo de la Digestión Anaerobia. Fuente: Elaboración Propia.....	74
Tabla 31: Parámetros de salida de las Eras de Secado. Fuente: Elaboración Propia.....	75
Tabla 32:Resultados del Cálculo. Fuente: Elaboración Propia.....	75
Tabla 33: DQO de Entrada digestor Línea de Aguas. Fuente: Elaboración Propia.....	85
Tabla 34: DQO de Entrada al digestor de Línea de Fangos. Fuente: Elaboración Propia.....	85
Tabla 35:Volumen de Metano Producido en la Línea de Aguas. Fuente: Elaboración Propia....	87
Tabla 36:Volumen de Metano Producido en la Línea de Fangos. Fuente: Elaboración Propia..	87
Tabla 37: Composición Exacta del biogás. Fuente: Elaboración Propia.....	87
Tabla 38: Número de Moles y Masa molecular según reacción Estequiométrica. Fuente: Elaboración Propia.....	91
Tabla 39: Relación Másica Aire-Combustible. Fuente: Elaboración Propia.....	91
Tabla 40:Masa de Metano Producida en la Línea de Aguas. Fuente: Elaboración Propia.....	91
Tabla 41:Masa de Metano Producida en la Línea de Fangos. Fuente: Elaboración Propia.....	91
Tabla 42:Masa Total de Oxidante requerida para la Línea de Aguas. Fuente: Elaboración Propia	91

Tabla 43: Masa Total de Oxidante requerida para la Línea de Aguas. Fuente: Elaboración Propia	92
Tabla 44: Poder Calorífico y Masa de Metano Producida en las Líneas. Fuente: Elaboración Propia.	92
Tabla 45: Cantidad Máxima Liberada en el proceso de Combustión. Fuente: Elaboración Propia.	93
Tabla 46: Número de Turbinas Necesarias. Fuente: Elaboración Propia.	94
Tabla 47: Energía Máxima producida por las Turbinas de Gas. Fuente: Elaboración Propia.	95
Tabla 48: Generación Eléctrica Ciclo Simple. Fuente: Elaboración Propia.	95
Tabla 49: Generación Eléctrica del Ciclo Combinado. Fuente: Elaboración Propia.	96
Tabla 50: Rendimiento Total de la Instalación. Fuente: Elaboración Propia.	98
Tabla 51: Generación Eléctrica de la Caldera de Vapor. Fuente: Elaboración Propia.	98
Tabla 52: Generación Eléctrica del Motor Alternativo. Fuente: Elaboración Propia.	99
Tabla 53: Generación Eléctrica con Cogeneración. Fuente: Elaboración Propia.	100
Tabla 54: Generación Total de Energía. Fuente: Elaboración Propia.	101
Tabla 55: Matriz de Impacto Ambiental. Fuente: Elaboración Propia.	108

Capítulo 1. MEMORIA

1. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso imprescindible para la mayor parte de los procesos industriales, poseyendo sus propios mecanismos naturales de purificación. Sin embargo hoy en día la cantidad y naturaleza de los contaminantes que llegan al agua, superan las capacidades de sus mecanismos de descontaminación, por lo que se ha hecho necesario su tratamiento para su reutilización.

Dichos tratamientos se basan en diferentes técnicas y procesos de depuración que han ido evolucionando, permitiendo así tratar los contaminantes del agua para poder reducirlos hasta cumplir la normativa vigente según la posterior utilización de esta (para el uso cotidiano e industrial, o para su ingesta), existiendo además la posibilidad de obtener distintos subproductos (según el proceso) que pueden ser utilizados posteriormente. Estos procesos se llevan a cabo en dos tipos de estación de tratamiento de agua según su uso posterior; “Estación Depuradora de Aguas Residuales” denominada EDAR, en la que el agua se utiliza para procesos industriales, uso cotidiano etc. y “Estación de Tratamiento de Agua Potable” denominada ETAP donde se trata el agua destinada a la ingesta.

El objetivo del proyecto trata del tratamiento de aguas residuales procedentes de la industria azucarera con aprovechamiento energético, buscando lograr de manera constante y eficiente la depuración del afluente residual, evacuando un efluente de agua cumpliendo la normativa vigente de este sector. Esta industria se dedica a la extracción del azúcar, principalmente de la remolacha (constituyendo un 99.38% de su producción) y de la caña de azúcar, para usos industriales y venta directa al público, obteniendo además los subproductos de pulpa y melaza.

La producción de azúcar consta de 9 procesos de los cuales 4-5 (según el tipo de almacenamiento del producto que se haga) contienen agua y 2 de ellos aporte exterior de agua. Al utilizar volúmenes de agua tan grandes, las fábricas de este sector constan de tres circuitos cerrados de agua, haciendo vitales los procesos de depuración de agua para poder reciclar y reutilizar el agua en esos circuitos.

Además, este sistema de producción, tiene un alto nivel de emisiones de CO₂ y un consumo de combustible elevado, que en los últimos años ha ido reduciéndose gracias al aumento de gasificación.

Por lo tanto, y siguiendo la Directiva *91/271/CEE*, que obliga a toda industria que genere cantidades de agua residual altamente contaminada a contar con una estación de agua residual, el objetivo del proyecto se basa cálculo y diseño de una depuradora (EDAR) para la industria azucarera con aprovechamiento energético.

2. OBJETIVOS

Los objetivos principales son los siguientes:

Primero se realizará un análisis detallado de los contaminantes predominantes de las aguas residuales generadas en la industria azucarera que, debido a las materias que la componen, son principalmente orgánicos. Este primer estudio es de vital importancia, ya que la elección de las etapas a llevar a cabo en la EDAR depende tanto de la cantidad de contaminantes en el agua como del tipo de estos.

Una vez realizado el análisis, se realizará y justificará la elección de los distintos procesos necesarios con los que debe contar la EDAR para depurar los contaminantes de forma adecuada. La EDAR consistirá principalmente de procesos fisicoquímicos y biológicos. Con ello, se estudiará la depuración del agua mediante un proceso de digestión anaerobia. Un proceso biológico que utiliza los contaminantes del agua al transformar la materia orgánica en ellos en un biogás, una mezcla de CO_2 y CH_4 utilizado como quema de biocombustible.

A continuación, en el apartado de cálculos se dimensionarán todos los elementos necesarios para llevar a cabo los procesos descritos en los anteriores apartados de la EDAR.

Por último se realizará un último estudio de la utilización del biogás generado en la etapa de digestión anaerobia como quema de combustible y su impacto energético dentro de la industria.

3. ANALISIS DE LOS CONTAMINANTES.

Existe una gran cantidad de contaminantes en el sector azucarero los cuales han de ser tratados de forma diferente e independiente según los distintos niveles a los que tengan que ser reducidos. Para poder realizar un correcto análisis de los contaminantes es necesario conocer las distintas etapas del proceso productivo:

- *Descarga:* La remolacha se descarga en seco o en mojado. Por un lado la descarga del camión se realiza mediante vagones o plataformas, no obstante también se recibe remolacha en vagones de fondo plano los cuales se descargan mediante un chorro de agua a 2.5 bar.
- *Almacenamiento y Transporte:* Este proceso se basa en el almacenamiento (en silos) y transporte de la remolacha, con el objetivo de entrelazar la discontinuidad de la descarga con la cadena de producción. El proceso puede ser por vía húmeda donde se extrae la remolacha del silo mediante transporte hidráulico (arrastrando la remolacha mediante una corriente de agua) o por vía seca, mediante cintras de transporte.
- *Lavado:* Es el primer proceso de la producción, destinado a la eliminación de la tierra y materia vegetal que puedan estar presentes en la materia prima. Se puede llevar a cabo mediante lavaderos fijos con alabes rotativos o con lavadoras rotativas. El principio de esta etapa es que el agua y la remolacha circulen en direcciones opuestas mientras están en el lavadero. Es necesario la utilización de agentes floculantes y antiespuma para prevenir la obstaculización de la remolacha.
- *Cortado:* Después de ser lavada, se utilizan molinos cortarraíces, que trocean la remolacha en cosetas, de esta forma se aumenta la superficie de intercambio¹.
- *Extracción:* Una vez cortadas, la sacarosa extraída de las cosetas pasa al agua en un difusor mediante agua que circula en dirección opuesta. Este proceso deja un jugo azucarado no depurado y unas cosetas agotadas.
- *Depuración y Filtrado:* Es el proceso más importante a la hora de la separación. Para realizar las siguientes fases del proceso de producción es necesario la eliminación de macromoléculas y partículas en suspensión del jugo azucarado proveniente del difusor que contiene aproximadamente un 15% de materia seca. Para ello, es necesario añadir cal y dióxido de carbono al líquido para que precipiten los no azúcares y generar un contenido en materia seca del 50-70%. Después se filtra y se le añade SO_2 gas para evitar la coloración del azúcar que finalmente se lleva a un proceso de descalcificación.

¹ La superficie de intercambio, es la superficie de remolacha expuesta al agua para realizar el intercambio de sacarosa mediante difusión.

- *Evaporación*: Este proceso se centra en evaporar el jugo azucarado resultante de la depuración y filtrado para aumentar la materia seca en un 68% y que después pueda ser cristalizado y centrifugado.
- *Cristalización y Centrifugado*: Una vez evaporado el jugo se cuece y se le añade azúcar impalpable para que comience el proceso de la cristalización, que produce un magma que contiene cristales y jarabe de azúcar que se separan por el proceso de centrifugado.
- *Secado, Enfriado y Almacenamiento*: Por último, el azúcar se seca y enfría para posteriormente ser almacenado en función del tipo de necesidades del mercado.

Como puede comprobarse al tratarse de un proceso productivo tan extenso se puede realizar un análisis general de la contaminación dividiendo sus emisiones en 3 tipos diferentes:

- La contaminación atmosférica que genera este sector industrial se debe a la amplia gama de combustibles utilizados en los procesos de secado de pulpa y las calderas de producción de vapor (estos últimos suelen ser reutilizados para el proceso de secado y por tanto todas las emisiones salen por las chimeneas de secado de pulpa).
- La contaminación de residuos sólidos se producen principalmente de los lodos del proceso de depuración de los efluentes, los cuales se intentan reciclar e implementar en la agricultura. Los aceites, láminas de metal y trozos de vidrio del mantenimiento y producción también forman parte de estos residuos aunque en menor medida.
- La remolacha utilizada en el sector contiene un 75% de agua la cual se libera a lo largo del proceso de fabricación descrito anteriormente. Además, 5 de las nueve etapas del proceso requieren de aportación exterior de agua, mezclándose con el líquido liberado por la remolacha y pasando por todos los conductos de la instalación. En consecuencia, todos estos efluentes contendrán restos de materiales orgánicos, metálicos (debido a las instalaciones) y químicos, debiendo ser tratados posteriormente para poder reutilizar el agua de nuevo haciendo de la contaminación de los efluentes de agua residuales la más importante de todas.

Debido a los grandes volúmenes de agua utilizados en la industria y debido a su alto contenido orgánico se puede concluir que el factor medioambiental más importante en el sector es debido al impacto de los efluentes residuales. Esta contaminación se traduce en elevados niveles de DBO y DQO:

- Demanda Química de Oxígeno (DQO): Es un parámetro que mide la cantidad de sustancias capaces de ser oxidadas mediante un ensayo químico. Aunque este ensayo se utilice para medir la concentración de materia orgánica, en ocasiones sufre de interferencias debido a la presencia de materia inorgánica que una vez oxidada aparece en la medida.
- Demanda Biológica de Oxígeno (DBO): Es un parámetro que muestra la cantidad de materia susceptible de ser consumida por medios biológicos. Dicho parámetro se obtiene mediante un ensayo en el cual se mide la cantidad de oxígeno de una muestra de agua, posteriormente se desposee de luz a la muestra durante 5-7 días y se vuelve a medir los niveles de oxígeno.

3.1 Consumo de Agua

Debido a la gran cantidad de etapas en las cuales se requiere aportación de agua exterior para la producción del azúcar, las instalaciones dedicadas a ello poseen varios circuitos cerrados e independientes de agua.

En esta industria el volumen de agua requerido para el procesamiento de una tonelada de remolacha puede ascender hasta los $20m^3$, por ello la reutilización de esta agua dentro de las fábricas es clave. Con una correcta distribución de los sistemas hidráulicos el aporte exterior de agua se puede reducir hasta los $0.5m^3/ton$. Además, como se detallará en el siguiente punto, según el tipo de efluente el agua poseerá unos niveles de contaminación diferentes.

Por último, a pesar de tratar de recircular la mayor cantidad de agua, existen afluentes de agua procedentes del proceso de fabricación. Estos afluentes, según la época del año en el que se encuentren varían de volumen de agua.

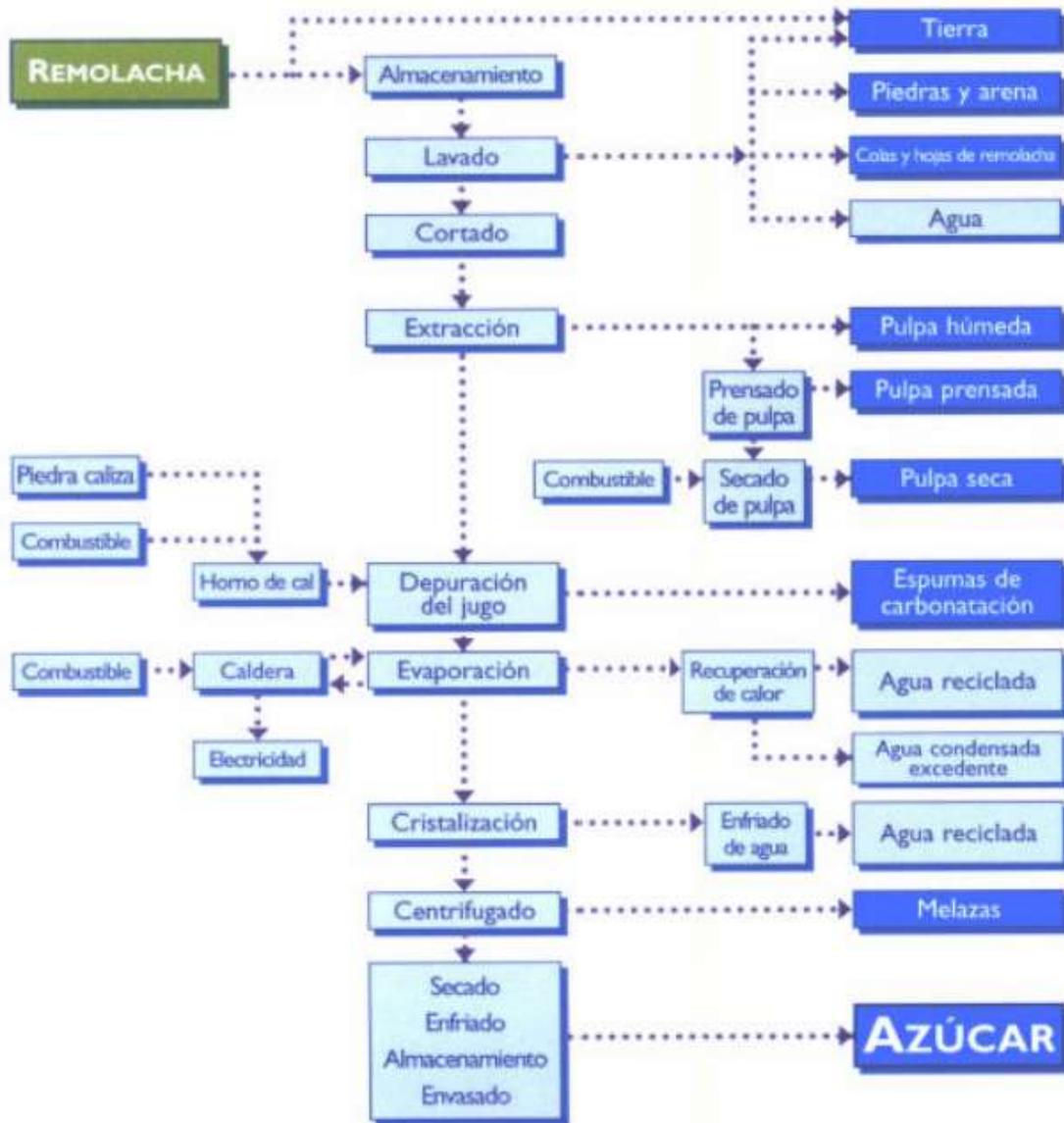


Figura 1: Diagrama del proceso de producción del azúcar. Fuente: Guía MTD de Azúcar.

Como se puede observar en la figura las celdas provenientes de la derecha son los inputs que se requieren en la instalación, las celdas del centro son las etapas descritas y las celdas de la izquierda son los outputs de la instalación. Cabe destacar que existen cuatro zonas del proceso de producción que crean distintos afluentes de agua.

3.1.1 Efluentes de Agua

Como bien se puede apreciar en la descripción de las etapas de fabricación, el agua dentro de estas industrias es un bien necesario. Por tanto, en sus distintos circuitos cerrados se intenta reciclar el mayor volumen de agua posible de tal forma que la captación de agua externa y el vertido de agua externo se minimicen al máximo. Los principales efluentes de agua utilizados son:

- Agua de transporte y/o lavado de remolacha.
- Agua de proceso.
- Agua de refrigeración.
- Efluentes de balsas (aguas de depósitos).
- Aguas de tipo sanitario.

1. Agua de transporte y/o lavado de remolacha.

Este circuito de agua permite la circulación del fluido desde las balsas hasta las primeras tres etapas del proceso de fabricación incluyendo el transporte, lavado de la remolacha.



Figura 2: Etapas que utilizan el caudal de agua de transporte. Fuente: Elaboración Propia.

A pesar de ser un proceso de fabricación que requiere agua en prácticamente cada una de sus etapas, el caudal de este efluente puede variar mucho según el tipo de transporte y almacenamiento que se haga. Si el proceso de almacenamiento y transporte resulta ser mediante transporte hidráulico por chorro de agua su consumo se dispara.

Este efluente de agua posee una gran cantidad de materia orgánica. Por un lado, la remolacha almacenada de los camiones posee un alto contenido en piedras, hojas de remolacha, hierbas, tierra y posibles fertilizantes que se transfiere al efluente de transporte entre el silo y el lavadero. En caso de poseer un transporte en punto fijo² gran parte de estos materiales (tierra seca y piedras de grandes dimensiones) se reducen a lo largo del camino, disminuyendo la contaminación del efluente.

Por otro lado, al entrar en el proceso de lavado se añaden antiespumantes y floculantes a un caudal de agua limpio proveniente del mismo efluente. A pesar de ser necesarios para que la circulación de remolacha por el circuito sea lo más fluida posible, estos aditivos aumentan la contaminación del efluente que requiere ser tratado antes de volver al almacenamiento.

A lo largo de este efluente, si el transporte de remolacha es mediante vía húmeda, se puede reutilizar parte del agua proveniente del lavadero directamente para los conductos de alimentación y transporte de remolacha.

2. Agua de proceso.

Este efluente de agua sale de la misma balsa de almacenamiento que el destinado al transporte y lavado de la remolacha. No obstante, está utilizado para los procesos de extracción, depuración y filtrado de la remolacha. Al igual que en todos los efluentes de la industria, se trata de maximizar el volumen de agua reciclada en este circuito.

Al entrar la remolacha en la zona de extracción se requiere calentar el agua y las cosetas a una temperatura de 73°C en el difusor. El efluente de agua requiere un aporte externo para inicializar el proceso (tratando de reducir dicho aporte al mínimo) y parte del agua reciclada del condensador. Además, se precisan coadyuvantes como $CaSO_4$ en el agua para poder continuar con el proceso, añadiendo residuos en el efluente.

Posteriormente, cuando la remolacha se dirige a la zona de depuración y filtrado se precisa la mezcla de aditivos en el jugo tales como lechada de cal (descrita en la introducción de las etapas de producción) para poder fijar las impurezas en el jugo y ser correctamente depurado, dióxido de carbono para la precipitación de los azúcares y SO_2 gas para la decoloración del mismo.

Además, después de esto es necesario descalcificar el jugo. Para ello, se requiere añadir en una primera etapa resinas de intercambio de catión pudiendo ser fuertes o

² El transporte en punto fijo se denomina al transporte en seco de la remolacha mediante cintas de transporte.

suavemente ácidas. Más adelante en una segunda etapa se utilizan sales comunes para la regeneración de la resina. Este proceso permite que el sodio se cambie por magnesio, potasio, calcio y algo de amoníaco. Todos estos aditivos generan reacciones aumentando la coloración del agua, sus residuos químicos etc.

3. Agua de refrigeración.

Las aguas de refrigeración provienen de las torres de refrigeración, condensados, etc. Son aguas que se caracterizan por la presencia de sólidos en suspensión y por experimentar amplias variaciones de temperatura y conductividad. El agua destinada al proceso de refrigeración posee un circuito distinto al resto ya que se utiliza en los procesos de evaporación y cristalización, donde se condensa toda el agua posible para poder ser reciclada y reutilizada, tanto en este circuito como en otro.

4. Efluentes de balsas (aguas de depósitos).

En el supuesto de que los volúmenes de agua de los depósitos llegasen a los mínimos estos efluentes son los encargados de reabastecer de agua a las presas y balsas. Estos efluentes no requieren de tratamiento ya que el agua que llega a los depósitos ya está tratada según la normativa.

5. Aguas de tipo sanitario.

Las aguas de tipo sanitario utilizadas para el consumo humano utilizan un circuito separado al de los procesos, aunque integrados en las instalaciones. Este tipo de efluentes no requieren de posterior estudio ya que el suministro de agua proviene del suministro municipal.

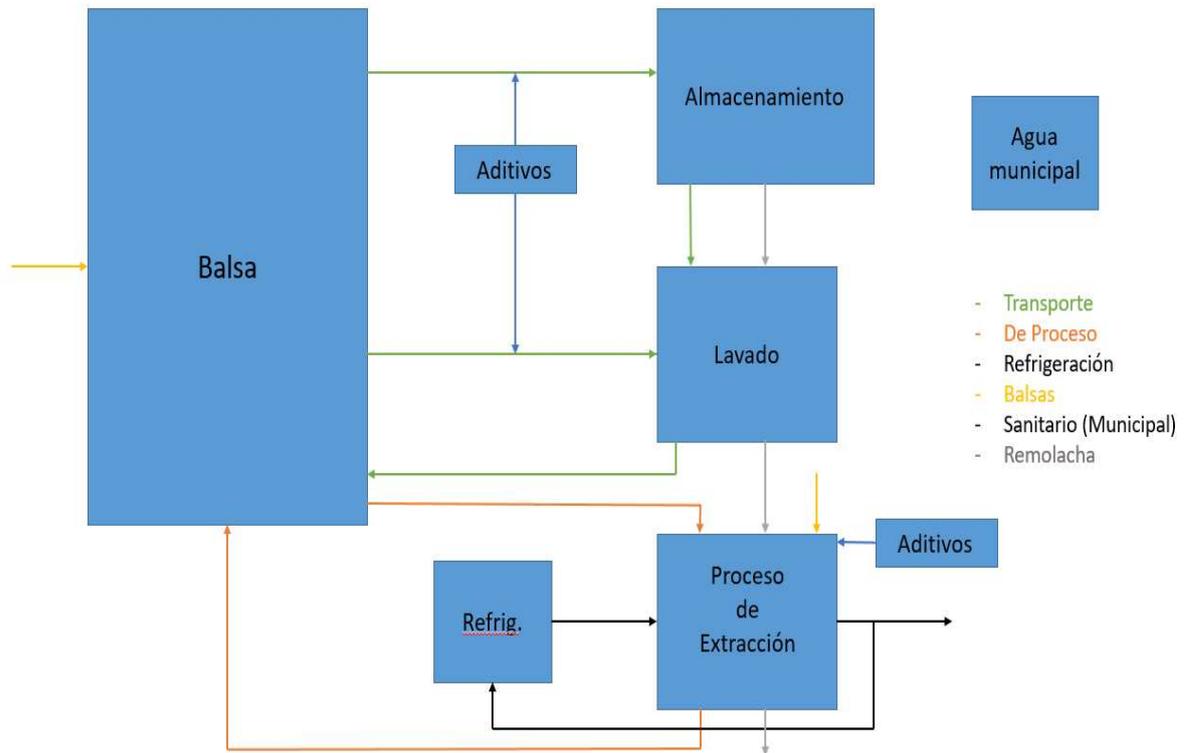


Figura 3: Diagrama de Bloques de los efluentes de agua. Fuente: Elaboración Propia

En conclusión y debido a la contaminación descrita anteriormente según los procesos y circuitos de agua, se puede diferenciar dos claros tipos efluentes: uno altamente contaminado procedente de las zonas de procesos tanto de lavado como de su proceso de extracción (el caudal procedente de la zona de lavado es aproximadamente de $0.5m^3/ton$) y otro muy poco contaminado procedente de las zonas de refrigeración de las instalaciones y el de la condensación del proceso de evaporación y cristalización.

3.1.2 Afluentes de Agua

A pesar de tratar de reciclar el mayor volumen de agua posible en las instalaciones, el proceso de fabricación deja 4 afluentes de agua que, antes de llegar a descargarse han de ser tratados. Los afluentes de agua restantes se muestran en la figura1, que muestra el diagrama del proceso de fabricación del azúcar.

El primer afluente de agua que se muestra es durante el lavado de la remolacha donde parte del agua no puede ser reciclada para el proceso y sale. Este afluente posee altos contenidos de tierra y hojas de remolacha además de altos contenidos de antiespumantes y coadyuvantes. Todo esto dota al agua de un alto contenido orgánico

(aumentando los niveles de DQO y DBO del agua) además de un nivel en sólidos en suspensión elevado (debidos a las espumas generadas por la remolacha).

Después de la depuración del jugo, existe un pequeño afluente de agua con el excedente de cal y espumas debidas a la carbonatación del fluido. El alto contenido en dióxido de carbono y cal reduce la cantidad de microorganismos en el agua (dando unos niveles de DQO inferiores al afluente anterior), no obstante debido a la adición de gases como el SO_2 provoca un cambio en el PH del agua.

Por último existen dos afluentes de aguas recicladas del proceso y uno debido al excedente de agua condensada proveniente del proceso de evaporación y cristalización de la producción.

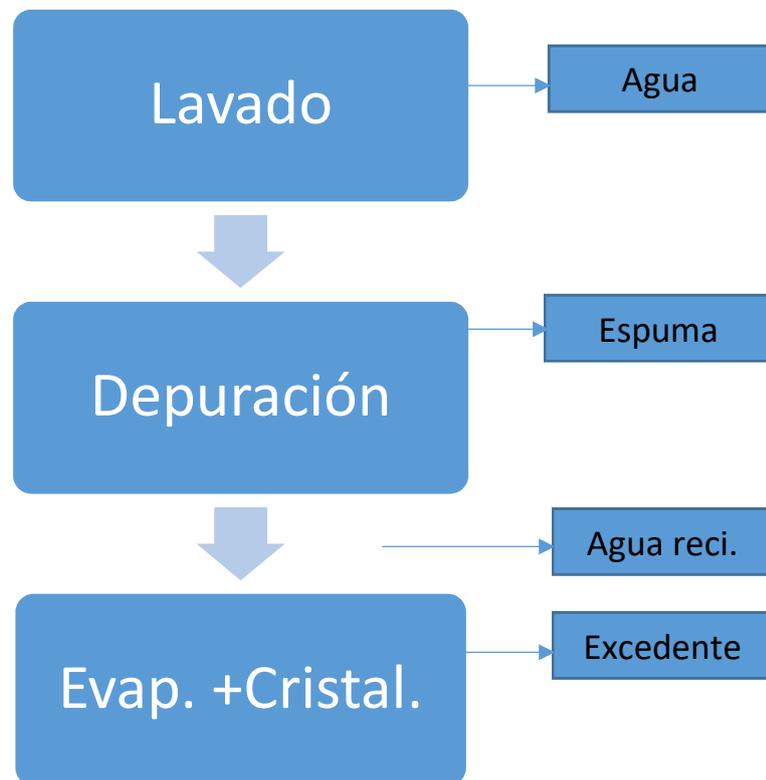


Figura 4: Diagrama de Bloques de los Afluentes de Agua. Fuente: Elaboración Propia

Como explicado al principio del apartado los caudales de estos afluentes varían según la época del año. Los volúmenes de agua de los afluentes son los siguientes:

EPOCA DEL AÑO	CAMPAÑA	INTERCAMPAÑA
VOLUMEN	480-14400 m ³ /día	700-6000 m ³ /día

Tabla 1: Caudales de afluentes. Fuente: Guía MTD Azúcar, Elaboración Proipa.

3.2 Caracterización de las Aguas.

Debido a todo lo mencionado en el punto anterior se concluye estudiar las siguientes características de las aguas residuales de la industria:

1. La **cantidad de agua (caudal)** en m³/día que se desecha en la instalación en sus distintos afluentes, estos parámetros se muestran en la Tabla1.
2. **pH**. El pH del agua de la instalación puede llegar a ser muy ácido en algunas zonas de la instalación y más elevado en otras, oscilando entre 3-9.5.
3. **Conductividad** elevada debida a la adición de CaSO₄ en el jugo para contrarrestar los efectos del filtrado y depuración.
4. Elevado contenido en **materia orgánica**, generando altos niveles de **DQO**.
5. **Sólidos totales**, disueltos y en suspensión.
6. **Amonio**.
7. **Nitratos**.
8. **Fósforo**.

1. Cantidad de agua.

En España la industria requiere 30m³ de agua por cada 100 toneladas de remolacha que se procesan. Dentro del país el procesamiento de la remolacha varía según las zonas geográficas en las que se encuentran resultando en una media de 9.470 ton/día³ de remolacha. Por tanto, concluyendo que el caudal medio total de agua requerido en sus procesos es de 2.481m³/día requiriendo de un control exhaustivo del mismo en toda la instalación.

Dentro del proceso se precisa un control de los niveles de agua en cada uno de sus circuitos. De esta forma se puede reducir el aporte de agua externa necesitado en la instalación y reducir los gastos. En estos circuitos cabe destacar una especial atención en el control de los caudales del agua de refrigeración (ya que este circuito puede obtener superávit de caudal debido al proceso de condensación) y el caudal del efluente destinado al lavado y transporte de la remolacha (debido a su elevado caudal y contaminación orgánica).

No obstante, a pesar de ser un sector cuyo reciclaje de agua es muy elevado, se sigue desechando grandes cantidades de agua a lo largo del día, por tanto, haciendo realmente importante el control de estos caudales en distintos afluentes (mostrados en la figura 4):

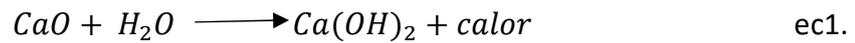
- Agua proveniente del lavado.
- Espumas de depuración
- Agua reciclada proveniente de la evaporación y cristalización.
- Excedente de agua proveniente de la evaporación y cristalización

2. pH.

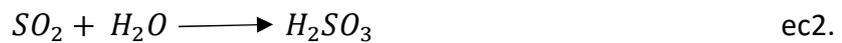
El pH de las aguas residuales procedentes de este tipo de industrias suele estar dentro del intervalo de 3-9.5, pudiendo ser bastante ácido en algunas zonas de la instalación y más bajos en otros procesos. Estos cambios de pH en los jugos de la instalación y las aguas residuales son debidos al proceso de depuración y filtrado del jugo.

En primer lugar, al añadir cal (*OCa*) al jugo para la producción de lechada se genera dihidróxido de calcio y calor (ecuación 1) que aumenta el pH de la solución, provocando esos picos de hasta 9.5 en las aguas residuales provenientes de esta zona.

³ Guías MTD azúcar
pg. 10.



Dentro de este mismo proceso, se continúa con la sulfitación del fluido, proceso que como explicado al principio del punto 3, se basa en la adición de SO₂ gas para la decoloración del jugo. La presencia del dióxido de azufre frente al agua provoca una reacción que genera H₂SO₃ un ácido leve que disminuye el pH básico generado por la cal.



Por último, se realiza la descalcificación del fluido donde las aguas reciben elevados contenidos de magnesio, potasio y amoníaco los cuales disminuyen el pH hasta llegar a los niveles más ácidos del intervalo siendo contrarrestados por el amoníaco que aumenta el pH de la solución a la que finalmente se le proporciona un compuesto de sal (*NaCl*) o (*NaOH*) hidróxido de sodio (este último potenciaría la acidez del fluido).

3. Elevada conductividad.

Al igual que en el pH la conductividad de los afluentes de agua residual de la industria se ve afectada en el proceso de depuración y filtrado. Como queda mencionado en el anterior punto, esta etapa requiere de muchos aditivos como *SO₂*, *CaO* y *NaCl* o *NaOH*. La dilución de estos aditivos en el agua genera iones, potenciando y aumentando drásticamente la conductividad de los afluentes.

4. Contenido en materia orgánica.

Como se ha observado, la producción del azúcar viene de la remolacha, que, a pesar de contener altos contenidos de agua, también contiene altos contenidos en tierra, hojas y otro tipo de contenidos, los cuales se encuentran presentes en las aguas residuales de la industria, resultando en unos elevados contenidos de materia orgánica (DBO y DQO).

Estos contenidos en materia orgánica, variarán según el circuito de agua en el cual se encuentren:

- *Aguas de transporte*: Este afluente posee el mayor contenido en materia orgánica de todo el proceso de producción. Al transportar la remolacha de los

silos de almacenamiento al proceso de lavado y lavarla, el agua se llena de la mayor cantidad de tierra y hojas provenientes de la descarga y almacenamiento de la materia prima. Esto provoca un aumento de la materia orgánica contenida en el agua ya que todas las bacterias, microorganismos, moho y otras sustancias quedan atrapadas en el afluente provocando unos niveles de DQO máximos en la instalación, llegando a ser de 6.500mg/l.

- *Aguas de proceso:* Al añadir tal cantidad de aditivos en el agua, el contenido en materia orgánica se va reduciendo a lo largo del proceso, aunque nunca queda reducido del todo. Por eso los niveles de DQO del agua procedente de este afluente son mínimos en comparación con las aguas de transporte.

5. Sólidos totales, disueltos y en suspensión.

A lo largo del proceso debido al propio almacenamiento de la remolacha como a la creación de espumas y lechada de cal, se hallan una cantidad de sólidos totales en las aguas residuales. Estos sólidos que contiene el afluente son aquellos residuos que permanecen una vez se ha evaporado la parte líquida de una muestra y posteriormente se ha secado a 100°C. Dentro de los sólidos totales se encuentran los sólidos disueltos y sólidos en suspensión. Realizando el proceso anterior filtrando el agua se hallan los sólidos disueltos mientras que sin filtración se hallan los sólidos totales, la diferencia entre ambas muestras secas revela el contenido en sólidos en suspensión del agua residual.

Los sólidos en suspensión muestran turbidez y un aumento en la coloración del agua. Estas características varían su graduación en función del tamaño, la forma y la naturaleza de los sólidos en suspensión.

Además, también se realiza un proceso para la distinción entre sólidos de procedencia orgánica o inorgánica. Para ello, se mantienen a una temperatura de 550°C durante 15 minutos, las cenizas obtenidas representan la cantidad de sólidos inorgánicos y la cantidad de materia volátil mide la cantidad de sólidos orgánicos en la muestra.

6. Materia Inorgánica (fosfatos, nitratos y amoníaco).

Los principales componentes inorgánicos a controlar, que se encuentren en estas aguas residuales son nitrógeno y fósforo (también se encuentran presentes en nitratos y sulfatos) pero también se pueden encontrar carbonatos y sulfatos, cloruros y otras sustancias. La mayor parte procedentes de los aditivos de los procesos de depuración y filtrado, pero también de los fertilizantes que pueda llevar la remolacha. También

podemos encontrar sales minerales determinadas mediante la concentración salina del agua y debidas a la mezcla de aditivos básicos y ácidos a lo largo del proceso.

Cabe destacar la presencia del nitrógeno y los compuestos fosfóricos en el agua debidos en gran parte a los fertilizantes utilizados en la remolacha, ya que sirven de nutrientes para los organismos como las algas. La eutrofización de las aguas trata del crecimiento rápido de algas y plantas acuáticas como consecuencia del enriquecimiento de nutrientes, como nitrógeno y fosforo. En el momento de su muerte, la descomposición provoca un aumento en el consumo de oxígeno en el agua, así como un aumento de la oscuridad de la misma provocada por su turbidez.

Como expresado con anterioridad los componentes inorgánicos más comunes en las aguas residuales procedentes a esta industria son los siguientes:

- *Cloruros y sulfatos*: presentes normalmente en el agua y en residuos generados por humanos y añadidos en el proceso de sulfitación del jugo azucarado.
- *Nitrógeno y fósforo*: en sus diversas formas (orgánicas e inorgánicas) en residuos en la remolacha debidos al uso de los fertilizantes para su planta y recolección.
- *Carbonatos y bicarbonatos*: normalmente presentes en el agua y en los residuos de la lechada de cal.
- *Sustancias tóxicas*: arsénico, cianuro y metales pesados como Cd, Cr, Hg, Pb y Zn que pueden estar presentes en los residuos industriales.

4. DISEÑO BASE DEL SISTEMA DE DEPURACION.

Por todo lo mencionado en los anteriores apartados, para esta industria, se precisa el diseño de una planta de tratamiento para aguas residuales. El objetivo de estas plantas es reducir los niveles de contaminantes y ajustar los parámetros del agua tales como; DQO, pH, sólidos en suspensión, materia inorgánica y conductividad del agua para posteriormente ser utilizada de nuevo.

A pesar de la variabilidad de los parámetros del vertido según cada uno de los efluentes de las instalaciones, se puede considerar unos sistemas básicos de control y de tratamiento que se adapten a las características generales de los afluentes de tal forma que se puedan utilizar como orientación para cada uno de ellos. Así pues, se pueda utilizar una única estación depuradora para tratar todos los afluentes.

Así mismo resulta interesante la creación de un método básico para el diseño de cualquier tipo de EDAR. Así, se hace más sencillo el diseño y dimensionado de estas ya que debido a su gran variabilidad (debida al tipo y cantidad de contaminantes en los afluentes) su diseño puede ser complejo.

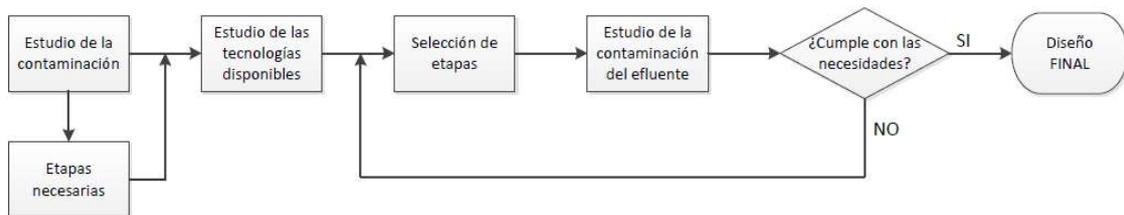


Figura 5: Diagrama de flujo de la metodología del diseño de la EDAR. Fuente: Elaboración Propia.

4.1 Análisis de la contaminación.

Como descrito en los anteriores puntos de la memoria, se caracterizaron las aguas de la industria, analizándose sus contaminantes fundamentales y todos sus afluentes a lo largo de las instalaciones.

Debido a que las concentraciones de los contaminantes son tan dispares y los intervalos de contaminación tan elevados, se procede a diseñar la instalación para un caso en concreto de una instalación de extracción de azúcar de la remolacha. En dicho caso se diseña la EDAR para una entrada de contaminantes específica.

Los parámetros a controlar en la contaminación del agua residual de estas instalaciones quedan establecidos en el punto 3.2 del capítulo uno de la memoria.

4.1.1 Niveles de contaminación de entrada y salida

Se parte de unos niveles de contaminación específicos de una instalación de extracción de azúcar de remolacha concreta. Dichos niveles se encuentran dentro de un intervalo de contaminación máxima, media y mínima que se utiliza para el diseño de la EDAR. Los valores se recogen en la siguiente tabla:

Parámetros	Mínima	Máxima
DQO [mg/l]	2300	3500
DBO [mg/l]	1650	2300
pH	3.5	9
Caudal [m ³ /día]	2481	5954
N total [mg/l]	25	60
P total [mg/l]	2	3

Tabla 2: Parámetros de Contaminación. Fuente: Elaboración Propia.

Con el fin de diseñar de manera correcta la EDAR, se estudia el caso para la contaminación media de los resultados de la tabla anterior utilizando un coeficiente de seguridad de un 25%, de esta forma se asegura la integridad de la depuradora a diseñar. Los resultados son finales son:

Parámetros	Media	Mayorada
DQO [mg/l]	2900	3625
DBO [mg/l]	1975	2468
pH	-	-
Caudal [m ³ /día]	4215	5271
N total [mg/l]	42.5	53
P total [mg/l]	2.5	3.1

Tabla 3: Parámetros Medios y a Diseñar. Fuente: Elaboración Propia

Además, para el correcto diseño de las etapas de depuración de la EDAR se debe cumplir con las normas establecidas en la legislación europea para la contaminación máxima de los efluentes de agua de la industria.

Los niveles de contaminación máxima de vertido de agua depurada son los siguientes:

DQO [mg/l]	Caudal [l]	PH	Conduct. [mg/l]	SST [mg/l]	N [mg/l]	P [mg/l]	NH4 [mg/l]
1.750	3.500	6.0-9.0	5.000	1.000	80	100	25

Tabla 4: Valores máximos según legislación. Fuente: Guía MTD azúcar

Aunque no entra dentro de la normativa, controlar los valores máximos de DBO5 dentro de la industria, es útil conocerlos para el estudio y elección de las etapas de la EDAR.

- DBO₅ máximo de: 1.000 [mg/l]

4.2 Selección de las etapas de depuración.

Estudiadas las necesidades de la EDAR se seleccionan las etapas de las que ha de estar compuesta. Generalmente el agua residual pasa por tres fases de tratamiento, y en caso que sea necesaria mayor descontaminación se pasa por un cuarto tratamiento. Las fases de una EDAR son:

- Línea de aguas donde, el efluente de aguas residuales de la industria entra en la EDAR y tras pasar por todas sus fases se obtiene un afluente de agua depurada que en el caso de estudio puede ser reutilizado en la instalación o será destinado para usos nos domésticos. Los tratamientos principales de la depuración del agua en una EDAR son los siguientes:
 - **Pretratamiento:** En el que se adecua el efluente para poder ser tratado en las fases posteriores.
 - **Tratamiento Primario o físico-químico:** Donde se eliminan principalmente los contaminantes físicos, químicos y sólidos.
 - **Tratamiento secundario o biológico:** Cuya función es reducir la contaminación orgánica del agua.
 - **Tratamiento avanzado:** Este último tratamiento se utiliza cuando se requiere un efluente de una calidad superior o cuando los tratamientos anteriores no son suficientes.
- Línea de fangos: Esta línea es la encargada de recoger todos los residuos o fangos que surgen en la depuración tras eliminarse los contaminantes. Estos fangos se tratan en las siguientes fases:

- Pozos gruesos: El agua queda almacenada en un pozo que con una cuchara bivalva elimina los sólidos de mayor tamaño.
- Desbaste: En este proceso se filtra las partículas sólidas de mayor tamaño mediante el uso de rejillas de distintas dimensiones. La función de este proceso es evitar obstrucciones y proteger equipos, evitar el uso de posteriores depósitos y aumentar la eficacia de los tratamientos posteriores. Las distintas rejillas a utilizar son:
 - Rejillas de gruesos para sólidos mayores de 6mm.
 - Rejillas de finos para sólidos con dimensiones entre los 1.5 - 6mm.
 - Rejillas de extrafinos para sólidos con dimensiones comprendidas entre 0.2 -1.5mm.
- Tamizado: Tiene el mismo objetivo que el desbaste, aunque se utiliza para filtrar las partículas de menor tamaño en el agua. Las rejillas utilizadas en este proceso se denominan microtamices y se encargan de filtrar sólidos de 0.001 - 0.3mm.
- Desarenado: Consiste en un proceso de separación continua del agua y los sólidos en suspensión tales como la grava, la arena y otros minerales de 1mm de espesor mediante canales de flujo horizontal ($v=0.3\text{m/s}$ y $Tr= 1\text{min.}$) o flujo helicoidal ($Tr=3\text{min.}$ y $d >0.15\text{mm}$).
- Desengrasado: Como su propio nombre indica su objetivo es separar grasas, aceites y partículas pequeñas en flotación. Este proceso puede darse de forma continua con el desarenado de tal forma que solo se precisa de un proceso (una línea de proceso formada por varios equipos) para realizar la tarea.
- Balsa de homogeneización: El objetivo de esta balsa es de laminar las puntas del caudal, homogeneizar las cargas orgánicas del agua y equilibrar el pH y los nutrientes del afluente. El proceso beneficia al tratamiento biológico y consta de una obra civil de grandes superficies (ya que requiere la construcción de una balsa). Se recomienda su utilización dadas las siguientes situaciones:
 - Cuando el caudal de punta de la instalación es dos veces superior al medio.

$$\frac{Q_{punta}}{Q_{media}} > 2$$

- Cuando ocurre lo mismo con la DBO punta y la media.

$$\frac{DBO_{punta}}{DBO_{media}} > 2$$

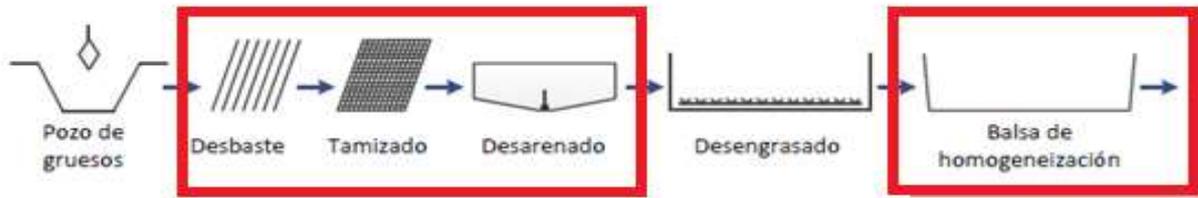


Figura 7: Esquema de las etapas del Pretratamiento. Fuente: Elaboración Propia.

Antes de provocar la entrada de agua a las etapas de la depuradora (pretratamiento) se obliga al agua bruta a circular por unos tornillos de Arquímedes que elevan el fluido eliminando así el uso de bombas en la instalación y aprovechando la gravedad para sedimentar sólidos y reducir la brusquedad del caudal en el canal.

Finalmente, las etapas necesarias del pretratamiento del afluente en la EDAR diseñada para la industria azucarera son las marcadas en la Figura 7.

1. Desbaste.

En esta primera etapa de la depuración, se decide no utilizar un pozo de gruesos, ya que su objetivo es la eliminación de sólidos de grandes dimensiones, tales como ramas de árboles y troncos utilizando una cuchara bivalva de gran tamaño, y los SST de esta industria son de un tamaño menor. Por ello, se decide realizar un primer desbaste.

El objetivo principal del desbaste es dejar circular el agua residual por el resto de los procesos de depuración, reteniendo los sólidos de mayor tamaño. Para ello se instalarán unas rejas de finos mencionadas anteriormente. Estas rejas se instalan a la entrada de la estación, y están formadas principalmente por barras de acero vertical o inclinado, con una separación constante entre barra y barra a lo ancho de todo el canal de agua.

Se decide utilizar una reja de finos ya que posee una luz de 1.5-6mm la cual permite retener piedras de grandes tamaños, pequeñas ramas y hojas sin causar una obstrucción del flujo de agua.



Figura 8: Rejas de Gruesos en Posición Inclinada.

2. Tamizado.

El tamizado consiste en una filtración sobre soporte delgado con el mismo objetivo que la operación de desbaste. Sin embargo, los sólidos en suspensión eliminados con los tamices son de menor tamaño que los que se quedan atrás en las rejillas de desbaste.

Al entrar los vertidos residuales de los efluentes y afluentes provenientes del circuito de alimentación, transporte y limpieza de la remolacha dentro de la EDAR, el elevado contenido en materia vegetal de los vertidos conlleva a un porcentaje alto en sólidos en suspensión en el agua. Con el fin de reducir los SST es imprescindible la disposición de los tamices en la instalación de la EDAR.

Los tamices utilizados están constituidos por una malla de acero inoxidable cuya luz mide 0.5-2mm. Según sus características los que existen son estáticos, rotativos o deslizantes.

- Tamices estáticos: Como su propio nombre indica, son estáticos. Están creados por una malla de pequeña luz que se posiciona de forma vertical perpendicular al caudal del vertido o en una posición inclinada. Estos tamices son muy similares al proceso de desbaste ya que su única diferencia es la malla y la luz del mismo.
- Tamices rotativos: En estos tamices el agua bruta se distribuye a lo largo de todo un cilindro filtrante (tambor), el cual va girando lentamente. Las partículas sólidas quedan entonces adheridas a la superficie mallada mientras el agua limpia cae al interior del cilindro. Estos tamices poseen un sistema de limpieza de las partículas adheridas en los filtros, que, mediante una rasqueta, conduce los sólidos a una bandeja.



Figura 9: Tamiz Rotativo Mostrando flujo de Agua.

- Tamices deslizantes: Son de tipo vertical. Poseen unas bandejas horizontales solidarias a la malla en las que quedan retenidos los sólidos en la parte superior. Los pasos de malla de estos tamices son de 0.2-0.3mm y requieren de una continua limpieza para evitar obstrucciones en el caudal de agua.



Figura 10: Tamiz Deslizante de Gran Caudal.

La instalación que más se adecua al caso de estudio es el tamiz rotativo, pues posee varias ventajas. Como se puede ver en las figuras, tiene un tamaño más reducido que los otros dos tamices. Además, su capacidad de filtraje es mucho mayor frente al resto pudiendo resultar 5 veces superior a los tamices estáticos y su mantenimiento y limpieza

es menor ya que esta automatizada. No obstante, a pesar de tener estas características es un tamiz más caro y su configuración de montaje más complicada.

3. Desarenado.

El desarenado tiene como objetivo eliminar las partículas con mayor densidad que el agua, que no hayan sido retenidas en los procesos de filtrado, sobretodo arenas y piedras de un tamaño menor al milímetro. Gracias a él, se evitan posteriores abrasiones en los equipos de depuración, obstrucciones y sobrecargas. Por ello, teniendo en cuenta el alto contenido en tierra y grava de la materia vegetal (remolacha) en la instalación el desarenado forma una parte esencial en la EDAR a diseñar.

Existen tres tipos de desarenadores fundamentales:

- Desarenador de flujo horizontal: Utilizados en instalaciones de pequeñas poblaciones, consisten en un ensanchamiento del canal del pretratamiento de forma que el caudal reduzca su velocidad y las partículas decanten en su lecho. Este desarenador requiere de un canal paralelo para proceder a su limpieza realizada manualmente (para una medida correcta del caudal se puede instalar un canal Parshall que mantiene la velocidad inicial del agua).
- Desarenador de flujo vertical: Debe estar compuesta por varios canales de diferente anchura que reproduzcan velocidades decrecientes entre el primer y el último canal. El volumen de agua que ha de circular por los canales en forma vertical ha de ser tal que reproduzca el tiempo total de floculación que se requiera. En este desarenador se ha de tener en cuenta que la alteración de la velocidad del caudal y tiempo de retención afectan las formaciones del floculo de arena sedimentados en su lecho.

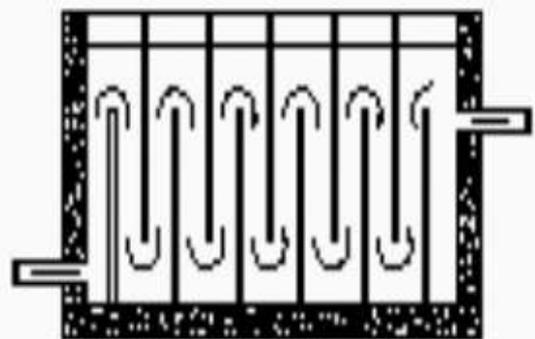


Figura 11: Desarenador de corriente Vertical.

- Desarenador de flujo inducido: Este último tipo de desarenador utiliza aire inyectado al agua creando una corriente en espiral que permite la decantación de las arenas y genera una corriente de fondo. Además, el uso del aire inyectado en la corriente de agua favorece la separación de la materia orgánica reduciendo los niveles de DBO y reduciendo los olores del agua. El problema de este sistema es el alto coste de la instalación y su mantenimiento, ya que además, requiere sistemas de separación de la decantación mediante tornillos de Arquímedes.



Figura 12: Desarenador de Flujo Inducido.

Teniendo en cuenta las características de los tres desarenadores disponibles se decide diseñar la estación depuradora de aguas residuales con un desarenador de flujo vertical por varias razones: Este desarenador precisa de una instalación menos costosa que los otros dos. A pesar de requerir una obra mayor que el desarenador de flujo inducido, la

complejidad de su instalación es menor y su nivel de descontaminación es muy elevado. Y por último posee un mantenimiento muy sencillo.

4. Balsa de homogeneización:

El objetivo de la balsa es regular los caudales de punta del agua bruta, equilibrar su pH y homogeneizar sus contenidos biológicos. Este proceso sería idóneo para todas las EDAR, no obstante debido a su gran inconveniente (la realización de una obra mayor para la creación de una balsa) por carecer de un espacio amplio en las industrias, se ha de clasificar si su uso es realmente necesario o no. Para esta clasificación se requiere la comparación de los niveles de caudal y DBO medios frente a las puntas de la instalación que en el caso de estudio es:

$$- \frac{Q_{punta}}{Q_{media}} > 2$$

$$- \frac{DBO_{punta}}{DBO_{media}} > 2$$

Estos coeficientes se obtienen de la siguiente tabla en la cual se entra por el eje de abscisas con el caudal medio (en este caso se utiliza el caudal máximo a utilizar en intercampaña multiplicado por el factor de seguridad) por segundo que requiere la instalación y trazando una perpendicular hasta cortar con la curva que muestra el coeficiente. En el caso de la instalación su coeficiente es del orden de 3.5, bastante superior al mencionado anteriormente.

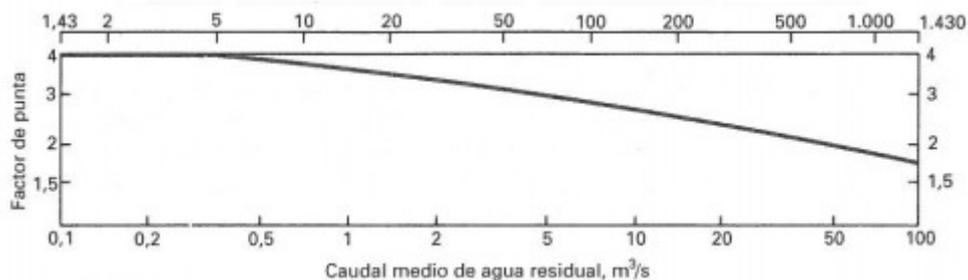


Figura 13: Factor de Punta horario para aguas residuales.

A pesar de que es necesaria una gran superficie para su instalación, se asume la posesión de dicho terreno en el caso ya que resulta muy beneficiosa esta etapa para la industria debido a sus elevados niveles de contenido orgánico (DBO y DQO altos).

En conclusión después de que el agua bruta recorra todas las etapas de pretratamiento la cantidad de sólidos totales en suspensión quedará reducida en torno un 10%.

4.2.1.2 Tratamiento Primario

El tratamiento primario o físico-químico pretender eliminar la materia en suspensión sedimentable en el agua bruta y por ende reducir en parte los organismos que se encuentran en dichos sólidos. Para el correcto funcionamiento de este tratamiento se emplean decantadores donde poder sedimentar la materia por acción de la gravedad.

Por lo general, este tratamiento se divide en dos etapas:

- Decantación primaria, donde el afluente de agua residual entra en un tanque de agua circular, rectangular o cuadrado y se mantiene en condiciones de reposo, de esta forma la materia en suspensión sedimenta mediante la gravedad. Para ello, se requiere de un tiempo de retención del agua dentro del tanque de una media de 2 horas pudiendo llegar hasta las 3 horas. Por lo general cuanto mayor el tiempo de decantación, mayor los sólidos que sedimentan. No obstante, llega un punto en el que la eficiencia de la decantación decrece en cuanto al tiempo de decantación aumenta y por tanto, no resulta rentable sedimentar tanto tiempo.
- Cuando se potencia el afluente con reactivos químicos el agua pasa por un tratamiento de coagulación. El afluente pasa por unos tanques de mezcla rápida que mediante electroagitadores mezclan el agua a depurar con los reactivos químicos dosificados. Más adelante pasa a los tanques de floculación donde los agitadores giran a una velocidad menor para conseguir que los microfloculos se agrupen y sedimenten. Además, este tratamiento ayuda a reducir los sólidos disueltos en el agua provocando que sedimenten en el floculó.

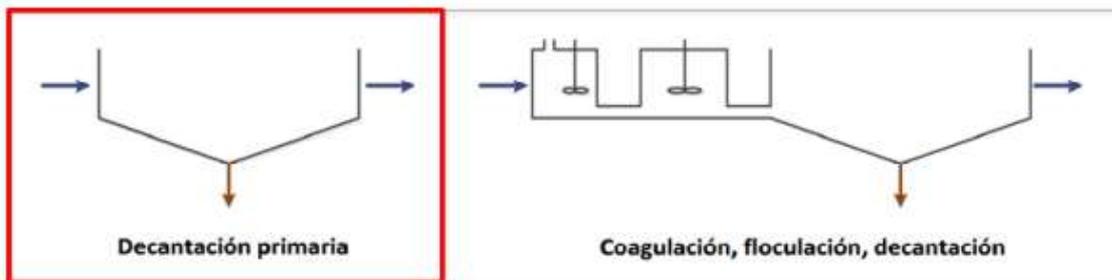


Figura 14: Esquema de Tratamiento Primario. Fuente: Elaboración Propia.

Debido al alto contenido en materia orgánica y alto contenido en sólidos en suspensión procedentes de esta industria. Se decide realizar solo la decantación primaria para el tratamiento primario en esta EDAR. No existe un alto nivel de nitrógenos, fósforos y otros contaminantes como para contemplar el tratamiento de coagulación, floculación y decantación.

Con el uso de la decantación primaria se consigue reducir:

- Sólidos en suspensión en un 60%.
- DBO del agua en 30%.
- Fangos activos.
- Separación del resto de materia flotante.
- Nutrientes como nitrógeno y fósforo en un 10%.

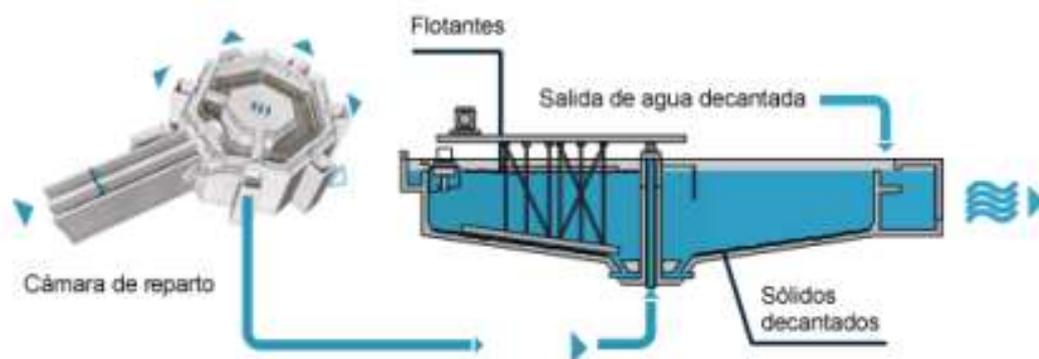


Figura 15: Esquema Decantación Primaria. Fuente: CLED15



Figura 16: Decantador Rectangular: Fuente CEDEX 2014.

4.2.1.3 Tratamiento Secundario.

Es el tratamiento de mayor relevancia en todo el proceso de depuración. El tratamiento consiste en la eliminación de la materia orgánica que está presente en el agua residual mediante un proceso de biodegradación y por tanto reducir así sus niveles de DBO₅ y DQO. Para que esta fase de la depuración sea exitosa, se requiere realizar un estudio de la biodegradabilidad del efluente a estudiar y según esta escoger un tratamiento secundario u otro. Los procesos a utilizar según el agua residual son los siguientes:

- Coagulación, floculación, decantación: Si $\frac{DBO_5}{DQO} < 0,2$, supone que el agua residual no es muy biodegradable y por tanto la mayor parte de su contaminación será inorgánica. Por ello, si el tratamiento primario posee ya de un tratamiento de coagulación, floculación y decantación, este se transformará en una decantación primaria simple con un solo proceso de decantación.
- Lechos bacterianos o biodiscos más decantación: Si $\frac{DBO_5}{DQO} = 0,2-0,4$ se utilizará este tratamiento ya que resulta idóneo para aguas residuales con una carga orgánica ligera.
- Fangos activos más decantación: Este tratamiento se emplea siempre que $\frac{DBO_5}{DQO} > 0,4$. Es un tratamiento excelente a la hora de eliminar altos contenidos de materia orgánica en el agua y trata de eliminarla mediante microorganismos en presencia de oxígeno. En este tratamiento los microorganismos se encuentran

en suspensión en el agua y el oxígeno se suministra mediante turbinas superficiales o difusores sumergidos.

- Reactor biológico anaerobio: Si $DBO_5 > 1800 \text{mg/l}$ es conveniente utilizar este tratamiento ya que es muy útil cuando el contenido en materia orgánica es muy elevado. Este tratamiento requiere de microorganismos que catabolizan y asimilan sus alimentos en ausencia de oxígeno. Este proceso de digestión anaerobia genera un biogás que posteriormente puede ser utilizado como aprovechamiento energético.

Analizando los niveles de contenido orgánico de las aguas provenientes de la industria (niveles mostrados en Tabla 3):

- $DBO_5 = 2468 \text{mg/l}$
- $\frac{DBO_5}{DQO} = 0,681.$

Como se puede observar el cociente entre DBO y DQO revele que la cantidad de materia orgánica biodegradable en el agua es muy elevada, mostrando que los únicos dos procesos que podrían ser válidos para eliminar este contenido orgánico son el uso de fangos activos o el reactor biológico anaerobio. No obstante, los niveles de DBO_5 superan con creces los 1800mg/l, concluyendo por tanto el uso de un reactor anaerobio más un proceso de decantación como tratamiento secundario. Además, como mencionado anteriormente, en este proceso se favorece la creación de un biogás para su posterior reutilización, otro de los objetivos de este proyecto.

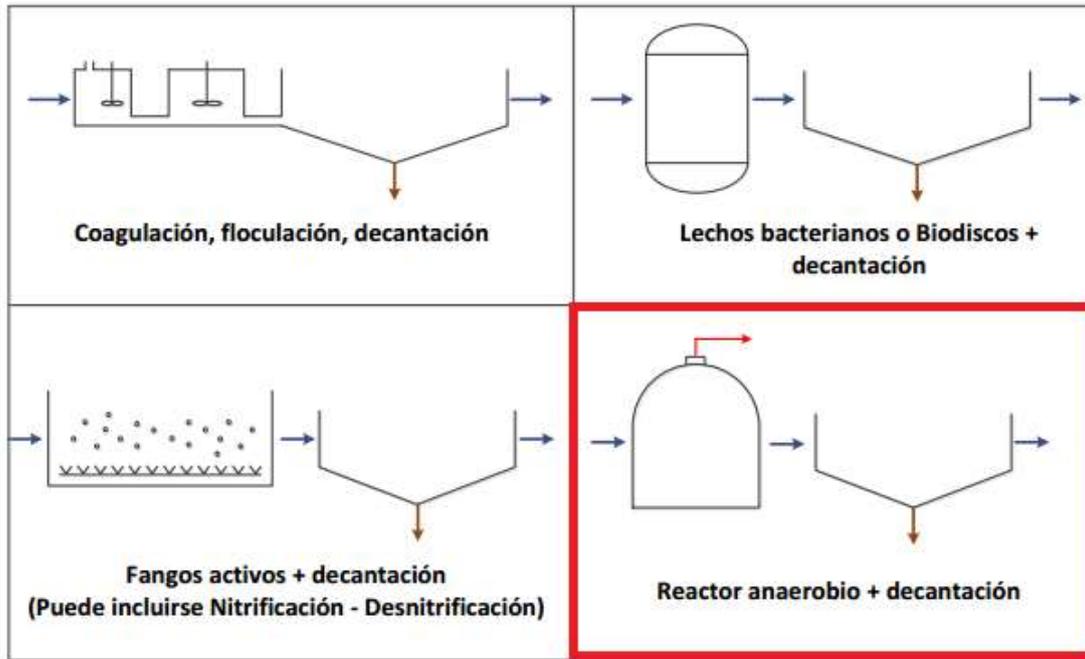


Figura 17: Esquema y Selección de las etapas del Tratamiento Secundario. Fuente: Elaboración Propia.

Este tratamiento trata de un proceso biológico que transcurre ante la ausencia de oxígeno, transformando la materia orgánica en biogás. Este proceso se lleva a cabo en digestores, tanques cerrados, con un volumen útil de llenado para el agua residual y una cámara de gas encima de esta. La estanqueidad entre ambas cámaras es fundamental para que el proceso sea exitoso, ya que se requiere evitar la aireación del agua a tratar.

Para una correcta digestión anaerobia el proceso requiere de la intervención de diversos grupos de bacterias las cuales utilizan de manera secuencial los productos metabólicos generados por cada grupo. La digestión anaerobia involucra tres grupos de bacteria y cuatro fases de transformación:

1. Hidrólisis: bacterias hidrolíticas.
2. Acidogénesis: bacterias fermentativas (mismo grupo que las bacterias anteriores).
3. Acetogénesis: bacterias acetogénicas.
4. Metanogénesis: bacterias metanogénicas.⁴

El uso de reactores de digestión posee numerosas ventajas tales como: bajos costes de inversión, alta eficiencia en el tratamiento, reutilización del biogás como fuente de energía.

⁴ <http://es.slideshare.net/raulcc1950/tratamiento-aerobico-y-anaerobico-de-aguas-residuales>

No obstante, si el agua posee altos contenidos de amonio, fosfatos y azufres, estos quedan en disolución en el agua y se requiere de un tratamiento terciario. Además, como se requieren de tiempos elevados para lograr una completa digestión y eliminación de la materia orgánica.

De los reactores anaerobios existentes, se plantea utilizar un reactor de mezcla continua. Dicho tipo de reactor es el más utilizado con efluentes pertenecientes de materia agrícola y su funcionamiento e instalación es relativamente simple. Son reactores que precisan de calentamiento para la correcta realización de la digestión por parte de los microorganismos y, no requieren de recirculación del afluente.

Para poder tener un tratamiento efectivo del afluente, este tipo de reactores requieren un tiempo de retención elevado, ya que carecen de medios específicos de retención de la biomasa. El tiempo de retención hidráulico crítico (TRC) se alcanza cuando las bacterias son extraídas del reactor a una velocidad mayor a la que éstas se reproducen. Dado que las bacterias formadoras de metano son de más lento crecimiento que las bacterias formadoras de ácidos, las primeras son consideradas como el componente limitante en el proceso de digestión anaerobia. Requieren de unas condiciones de tiempo y temperatura específicas, con valores mínimos alrededor de 3 a 5 días a 35 °C.

Las características operacionales de este proceso son:

- Densidad de carga orgánica (Kg DQO/m³/d): 1 - 6.
- Concentración en el interior (g SSV/l): 2 - 5.
- Concentración en el efluente (g SS/l): 25 - 100.
- Tiempo de retención hidráulico (d): 10 - 30.
- Tiempo de arranque (d): 30 - 90⁵

5

https://es.wikibooks.org/wiki/Ingenier%C3%ADa_de_aguas_residuales/Dise%C3%B1o_de_procesos_en_digesti%C3%B3n_anaerobia

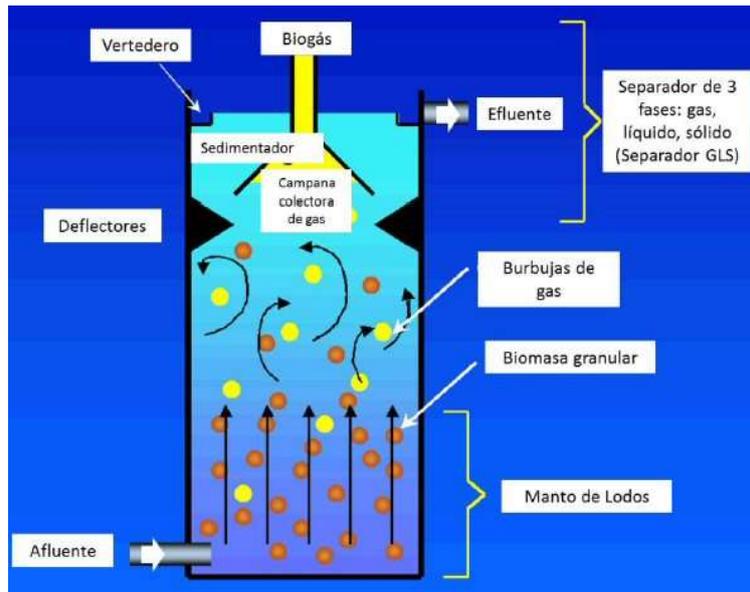


Figura 18: Esquema reactor anaerobio.



Figura 19: Imagen de Reactor de Digestión Anaerobia.

4.2.1.4 Tratamiento Terciario o Avanzado.

Este tratamiento se utiliza cuando se requiere que el efluente de agua tenga una mayor calidad. Es decir, que la concentración de sólidos en suspensión tenga unos niveles mínimos, se requiera de posterior eliminación de tóxicos y reducción de nutrientes.

En este tratamiento se pueden realizar varios procesos:

- Eliminación del exceso de nitrógeno: Para poder realizar esta eliminación se requiere una nitrificación en condiciones aerobias y una posterior desnitrificación con ausencia de oxígeno y presencia de carbono. De esta manera

se crea nitrógeno gas de los nitratos totales en el afluente y se elimina el nitrógeno total en él.

- Eliminación del fósforo: Normalmente se encuentra en los detergentes, fertilizantes residuos humanos y aditivos utilizados en aguas potables. Para su correcta eliminación se requiere de una precipitación química mediante la adición de sales (FeCl_3) o mediante el tratamiento de fangos activos.
- Reducción de sólidos solubles: para una concentración menor de $\text{SS} < 10\text{mg/l}$ se requiere una filtración del agua mediante fritos multicapa de antracita, arena y en ocasiones granate.
- Tratamiento químico: Se utiliza cuando es necesaria una corrección de pH del afluente, una reducción de olores o una precipitación de fósforo.

Aunque estos procesos sean útiles en la depuración de aguas industriales, teniendo en cuenta los bajos contenidos en nitratos totales y fósforo contenidos en el agua de la industria, se puede observar cómo están por debajo de los niveles máximos que puede poseer el afluente de agua y por ende no se aplica un tratamiento avanzado en la EDAR.

4.2.1.5 Conclusión línea de agua.

Como conclusión, se decide finalmente realizar una EDAR cuya línea de aguas poseerá las siguientes etapas:

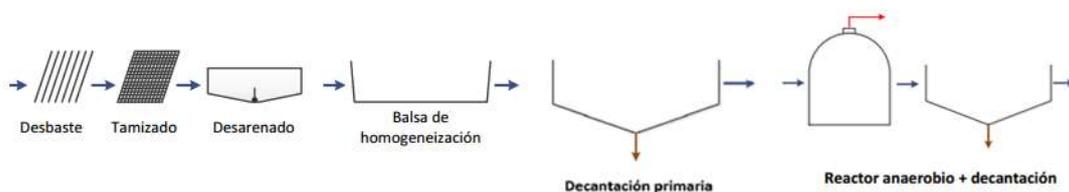


Figura 20: Esquema de las etapas de la línea de agua de la EDAR. Fuente: Elaboración Propia.

Etapas:

- Desbaste
- Tamizado
- Desarenado

- Balsa de homogeneización
- Decantación primaria
- Reactor anaerobio + decantación secundaria.

4.2.2 Línea de Fangos

Como descrito al principio del punto 4.2 la línea de fangos es la encargada de recoger todos los residuos o fangos que surgen en la depuración tras eliminarse los contaminantes, es decir, toda la contaminación sedimentada, y trasladarla de forma segura a los vertederos.

La línea de fangos está formada por las siguientes etapas:

- Espesamiento de fangos: La sedimentación producida a lo largo de la línea de aguas posee más de un 95% de agua, por tanto, ocupando volúmenes muy grandes. Por ello, la etapa de espesamiento, mediante la concentración de los fangos y la eliminación del agua pretende reducir el volumen, pudiendo espesar el contenido en sólidos de la decantación de un 0.8% a un 4% reduciendo así el volumen en una quinta parte.
- Estabilización de los fangos: Este tratamiento se precisa para poder estabilizar los fangos y retirarlos con seguridad. El objetivo del tratamiento es reducir la presencia de patógenos, eliminar los olores y materia volátil y eliminar su potencial de putrefacción. Además, también pretende disminuir la mineralización de la materia orgánica y la concentración de los lodos. Existen tres tipos de digestiones (estabilizaciones) de fangos:
 - **Digestión aerobia**: Esta digestión se utiliza cuando la biodegradabilidad de los lodos es alta y trabaja en la fase de mortandad de los microorganismos. Los lodos se estabilizan en presencia de oxígeno.
 - **Digestión anaerobia**: Al igual que en la línea de agua, esta digestión se utiliza cuando el contenido en material orgánico de los lodos es elevada, y se realiza sin presencia de oxígeno. Con este tratamiento también se produce un biogás el cual puede ser reutilizado para un aprovechamiento energético.
 - **Tratamiento químico**: Este tratamiento se utiliza para eliminar los microorganismos y virus con variación brusca y extrema de pH mediante la adición de ácidos, cloro o cal.

- Deshidratación o secado: Este proceso se puede realizar de forma natural, térmica o mecánica y su objetivo es la eliminación de todo el exceso de agua que contengan los fangos, de forma que se pueda facilitar su retirada y transporte. En función del espacio disponible se utilizará una forma u otra de realizarla.

4.2.2.1 Espesamiento.

Como descrito al principio del punto, el objetivo de este tratamiento es la disminución del volumen y agua de los fangos mediante la concentración de los mismos. Existen dos maneras de realizar este proceso:

- **Espesamiento por gravedad:** El espesado se realiza en un tanque similar al de un decantador, donde se deja decantar y sedimentar los sólidos por su propio peso, reduciendo así su volumen. Además, el exceso de agua de este proceso queda en la parte superior del tanque, pudiendo ser reciclada y devuelta a la EDAR para seguir con el tratamiento. Este tipo de espesamiento solo es útil con los lodos provenientes de la decantación primaria de la EDAR ya que al tener una concentración de humedad elevada su peso es mayor y por tanto su espesamiento por gravedad es plausible.

No obstante, el tiempo de retención de los fangos en el tanque es muy elevado, produciendo malos olores y cantidades considerables de fangos flotantes.

- **Espesamiento por flotación:** Este proceso se utiliza para los fangos menos pesados, sacados de la segunda decantación de la EDAR, donde tienen menor contenido en agua. El principio de funcionamiento del sistema se basa en la inyección de agua presurizada y saturada de oxígeno a un tanque en el que se recolectan los lodos. Con ello, se producen burbujas de aire que se adhieren a los flóculos provocando que floten y que así puedan ser recogidos. El recogido de estos fangos ha de ser rápido ya que la presencia de las burbujas de aire podría desaparecer y por tanto provocar su hundimiento. Para su recolecta el tanque posee rasquetas arriba y abajo del tanque.



Figura 21: Tanque de espesamiento por Gravedad.

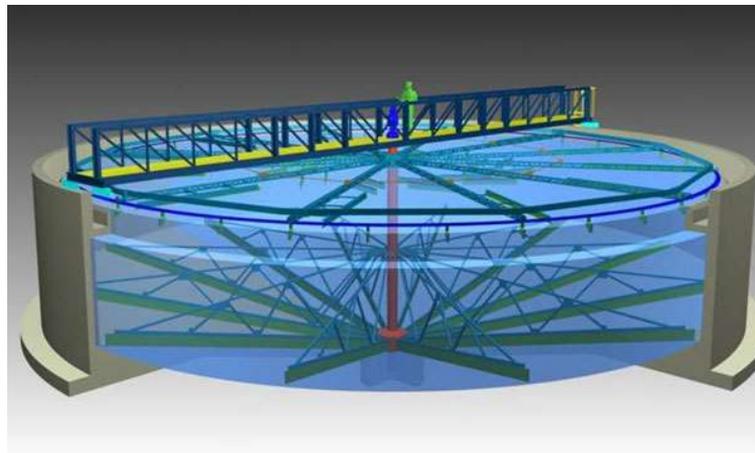


Figura 22: Espesador por Flotación.

4.2.2.2 Estabilización.

Debido a la alta carga en materia orgánica en toda la instalación, se opta por un estabilizador de fangos anaerobio con el que se aprovechará el subproducto de biogás generado como generación energética. La elección de una estabilización anaerobia de fangos nos obliga a utilizar el espesamiento de los mismos por gravedad, para reducir la concentración de oxígeno en el fango para la correcta digestión.

Al igual que en el proceso de digestión anaerobia utilizado en la línea de aguas, se requiere de un grupo de bacterias para poder realizar todo el proceso. Para controlar de forma adecuada el tratamiento, se requiere de un perfecto equilibrio entre las distintas poblaciones de bacterias ya que las bacterias acidogénicas crecen rápido y las metanogénicas más lentamente.

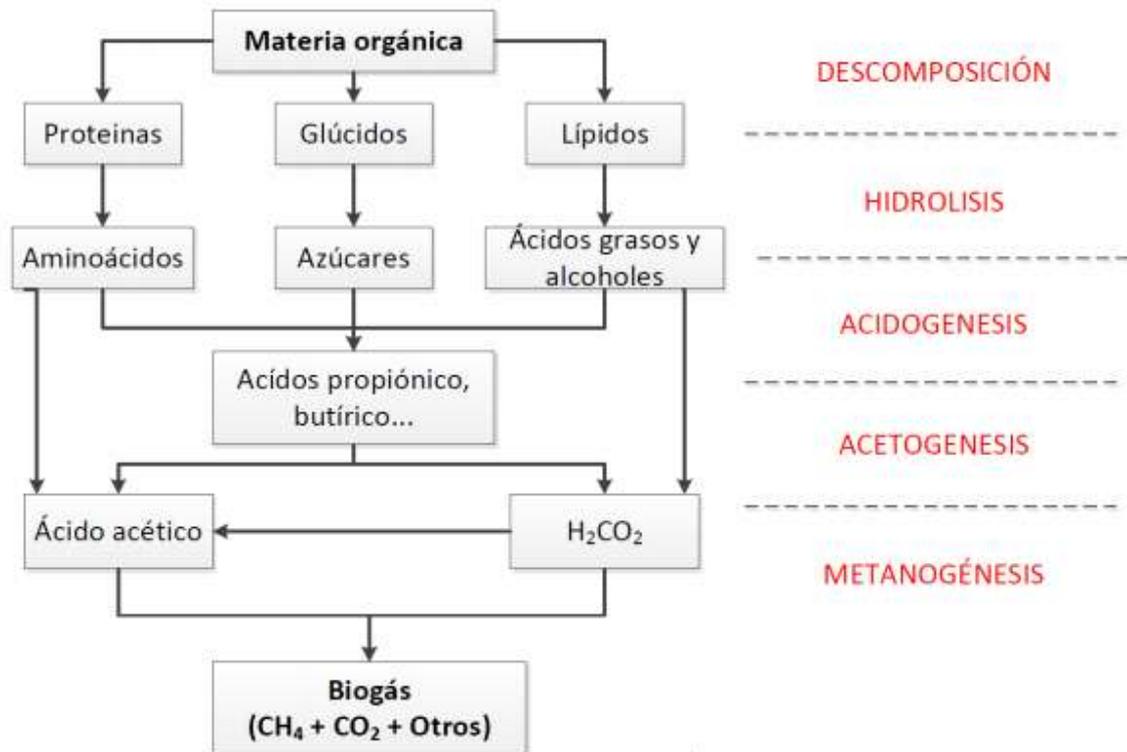


Figura 23: Proceso de Descomposición de Materia Orgánica mediante digestión anaerobia.

Dentro de los procesos mostrados en la parte derecha de la figura 23, la hidrólisis se encarga de la transformación de productos complejos e insolubles en productos sencillos. Las dos siguientes etapas de acidogénesis y acetogénesis transforman los compuestos en ácidos grasos susceptibles de metanización. Por último, el proceso de metanogénesis transforma estos ácidos grasos en metano, dióxido de carbono y otros gases.

Aproximadamente por cada Kilogramo de sólido volátil eliminado materia orgánica eliminada en este proceso de digestión se genera entre 750-1100 l de gas del cual 65% es gas metano, gas que más en adelante se puede reutilizar como fuente de energía para ahorrar costes en la instalación.

Además de la generación de biogás, la digestión anaerobia posee de más ventajas: la deshidratación de los lodos resulta más sencilla, se generan fangos inodoros y se eliminan numerosos patógenos.

No obstante, no todo son ventajas ya que la instalación necesaria para este tratamiento es más costosa, sus procesos de metanogénesis son muy sensibles a cambios leves en temperatura y pH y su tiempo de retención de los lodos es mucho mayor que en el tratamiento aerobio, resultando mayor de 20 días.

Existen cuatro tipos de digestores anaerobios:

1. **Digestor de baja carga:** En este reactor de digestión los lodos no se calientan ni se mezclan, provocando por tanto que solo un tercio de la capacidad del reactor esté en digestión y requiriendo un tiempo de retención de los lodos de 60 días, el mayor de los cuatro.
2. **Digestor de alta carga o CTR:** En este reactor al contrario que en el de baja carga, se posee de dispositivos de mezclado de lodos y de control de la temperatura de los mismos. Con estas mejoras se permite utilizar el volumen total del reactor y reducir el tiempo de retención de los fangos a 15 -30 días.
3. **Digestión en Fase:** Para realizar este proceso se requiere la utilización de ambos reactores mencionados anteriormente colocados en serie. Primero se utiliza el digestor de alta carga donde se recogen sus fangos digeridos y se dirigen al digestor de baja carga. En estos digestores se recoge biogás en ambas fases del proceso.
4. **Digestión separada en fases:** A diferencia del proceso anterior en este tratamiento de digestión se requiere de un control exhaustivo de las condiciones de digestión ya que se requiere de dos digestores en serie. El primero de los digestores (de alta carga) se encarga de realizar los procesos hasta la acidogenesis, mientras que el segundo digestor realiza los siguientes procesos hasta la metanogenesis. Esta digestión permite cargas mucho mayores al resto de digestores y reduce el tiempo de retención total de los fangos a 7 días.

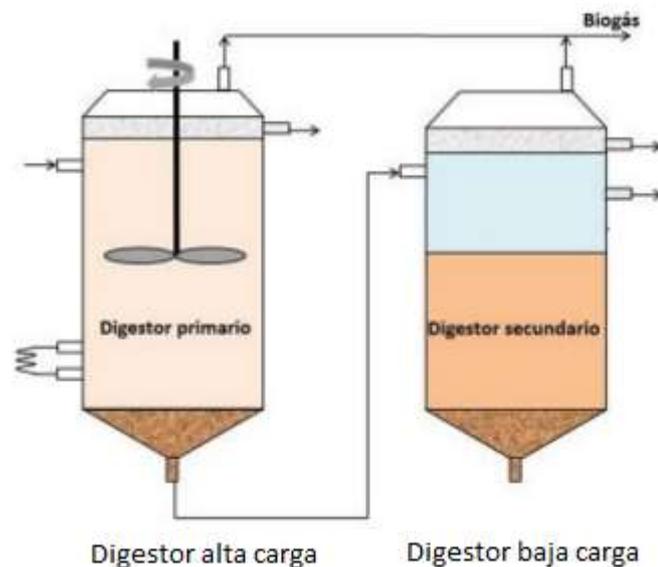


Figura 24: Digestor de Digestión en Fase. Fuente: Elaboración Propia

A pesar de las numerosas ventajas de los digestores en fase y en digestión separada, a la hora de aplicarlos en una instalación real no se obtienen los rendimientos deseados. Esto, es debido a la gran dificultad de la separación de los procesos de digestión de las bacterias y a su costoso control de equilibrio en las diferentes fases. Por ello, se decide utilizar un digestor CTR de alta carga para la realización de la digestión anaerobia de los fangos.

4.2.2.3 Deshidratación.

Por último se realiza la deshidratación del fango para poder ser transportado. Se supone que la superficie de la instalación es lo suficientemente grande como para poder realizar una obra de una dimensión considerable y se decide deshidratar los fangos de forma natural mediante eras de secado.

Las eras de secado están constituidas por una o varias capas de material drenante, dividida en distintos compartimentos y en la que se vierte el fango en espesores de 20-30 cm como máximo. La capa drenante puede estar formada por arenas de espesores de 10cm sobre una capa de grava de 20 cm. Bajo estas capas existe un sistema de drenaje que recolecta el agua filtrada de los fangos debe estar colocado de tal forma que el drenaje de toda la masa del fango se haga de forma homogénea. El agua sobrante filtrada será devuelta al principio de la instalación.

Gracias al drenaje del agua a la zona más profunda del lecho de grava, la capa de fangos sobre la superficie acaba con un porcentaje de humedad menor, permitiendo que el resto del agua se evapore.

Con este proceso se obtiene unos fangos que pierden el 60-70% de la humedad total, 20% por filtración y el otro 40% mediante la evaporación. El tiempo de retención de los fangos en las zanjas ha de ser de unos 15 días.

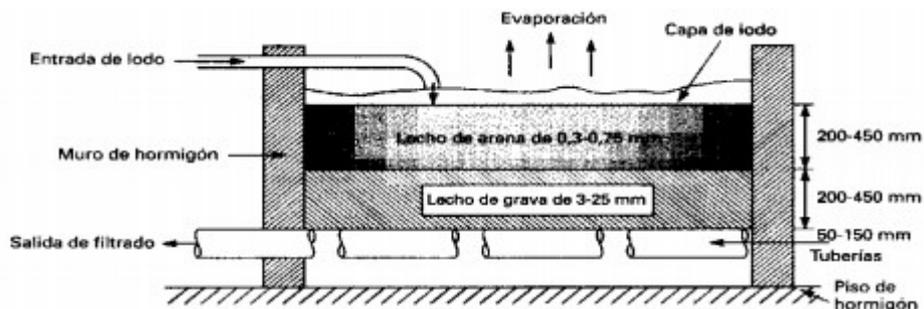


Figura 25: Eras de Secado. Fuente: Apuntes ICAI asignatura Medioambiente.

4.2.2.4 Conclusión línea de fangos.

En conclusión, la línea de fangos de la EDAR a diseñar es la siguiente:

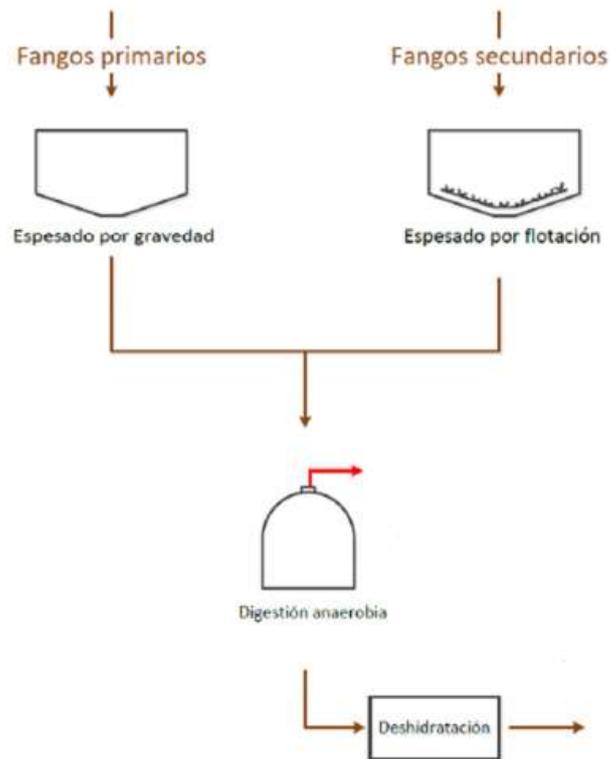


Figura 26: Representación Gráfica de la Línea de Fangos. Fuente: Elaboración Propia.

4.2.3 Etapas de Depuración.

Por último se plantea un esquema completo de la instalación a diseñar:

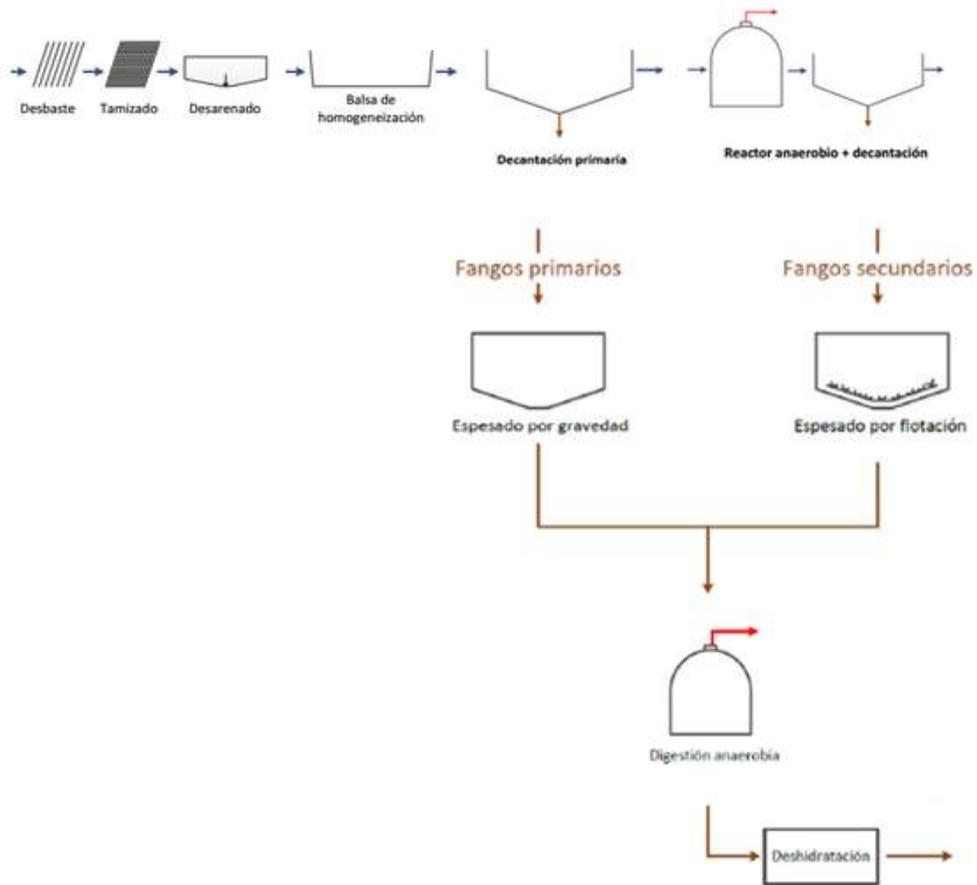


Figura 27: Esquema Completo de la EDAR a Diseñar. Fuente: Elaboración Propia.

Capítulo 2. CÁLCULOS

1. LINEA DE AGUAS

En este apartado se dispone a calcular las dimensiones de la EDAR. Con ello, se procederá a comparar los resultados obtenidos, pudiendo así justificar todas las elecciones de etapas hechas hasta ahora y realizar los cambios que sean necesarios.

Para realizar los cálculos de esta sección del proyecto se sigue el método empleado por “Proyectos de Plantas de Tratamiento de Aguas” de Ricardo Isla de Juana [ISLA05]. Según la etapa a diseñar, el libro muestra un rango de parámetros de salida u otros, que, una vez introducidos y siguiendo las ecuaciones (también proporcionadas por el libro) hallan las dimensiones y características de cada etapa. Por ello, según las especificaciones de caudal y contaminantes de la planta en cuestión (parámetros ya descritos en los anteriores puntos de la memoria), se introducirán los datos pertinentes en cada una de las tablas necesarias para el diseño de la planta (datos siempre en el rango de parámetros escogidos por el libro).

En primer lugar, se realiza un cálculo de la cantidad de caudal de entrada a la depuradora. Para ello se supone que la depuradora de agua en esta industria trabaja dos turnos diarios cada uno de 8 horas, haciendo un total de 16 horas de trabajo diario. Teniendo en cuenta el caudal de agua diario que se utiliza en la instalación, el 25% de coeficiente de mayoración utilizado para el diseño de la planta, el caudal punta hallado en el primer capítulo y suponiendo un caudal constante por hora (se supone esto a pesar de saber que no es cierto puesto que no se posee de datos reales del caudal a cada hora de una fábrica azucarera) se obtiene el caudal de agua por hora máximo que se puede obtener, y por tanto, con el que se va a diseñar la EDAR.

<i>Q diario medio [m3/día]</i>	14400
<i>Q medio 16 horas [m3/h]</i>	900
<i>C_p</i>	3,5
<i>Q punta [m3/h]</i>	3150
<i>Q punta diario [m3/día]</i>	50400

Tabla 5: Caudales Totales: Fuente: Elaboración Propia

Q medio [m3/h]	901
Sobredimensionamiento	1,25
Q diseño [m3/h]	1126,2
Q punta de diseño [m3/h]	3150

Tabla 6: Caudales de Diseño. Fuente: Elaboración Propia

1.1 Dimensionado del Pretratamiento

1.1.1 Desbaste

Para este apartado, se usan rejas de finos colocadas en posición inclinada con respecto al caudal de agua.

REJAS DE FINOS: PARAMETROS DE PARTIDA	
Caudal de diseño (m ³ /h)	1126,2
Caudal máximo (m ³ /h)	3151
Velocidad de paso entre barrotes a caudal de diseño con reja sucia (m/s)	0,9
Número de líneas de desbaste	2
Espesor de los barrotes (mm)	6
Distancia entre los barrotes (Luz)(mm)	10
Resguardo del canal (m)	0,3
Angulo de inclinación de los barrotes (grados)	60
Máxima colmatación entre dos limpiezas (%)	30
Relación profundidad útil/anchura del caudal	1
Metros cúbicos de residuos por 1000 m ³ de agua residual a caudal de diseño	0,01
Metros cúbicos de residuos por 1000 m ³ de agua residual con tormenta	0,2

Tabla 7: Parámetros de Partida Rejas de Finos. Fuente: Elaboración Propia.

RESULTADO DEL CÁLCULO	
Caudal de diseño por la línea (m ³ /h)	563,1
Caudal máximo por línea (m ³ /h)	1575,5
Superficie útil del canal (m ²)	0,344
Velocidad de paso entre barrotes a caudal de diseño con reja limpia (m/s)	0,63
Velocidad de paso entre barrotes a caudal máximo con reja limpia (m/s)	1,76
Velocidad de paso entre barrotes a caudal máx. con reja colmatada (m/s)	2,52
Velocidad de aproximación por el canal a caudal de diseño (m/s)	0,45
Anchura del canal (m)	0,59
Profundidad útil del canal (m)	0,59
Profundidad total del canal (m)	0,89
Producción normal de residuos (m ³ /día) (Gruesos+finos)	0,270
Producción máxima de residuos con tormenta (m ³ /h) (Gruesos+finos)	0,6302

Tabla 8: Resultado del Cálculo de Rejas de Finos. Fuente: Elaboración Propia.

Como se puede comprobar por los resultados, debido al elevado caudal de agua requerido por la industria se precisan de dos líneas de agua separadas para que la velocidad de paso del agua sea la adecuada y la superficie y profundidad del canal no

sean demasiado grandes. Resultando pues, en un caudal con una profundidad total de 0,89 m y una anchura de 0,59 m. Cabe destacar la elevada producción normal de residuos diarios debido a la cantidad de residuos en 1000 m³ de agua, que resulta en 0,27 m³/día.

1.1.2 Tamices

Para realizar el cálculo de los tamices se ha seguido la elección impuesta en el primer apartado, utilizando pues, las tablas y ecuaciones necesarias para el uso de tamices rotativos.

TAMIZ ROTATIVO: PARÁMETROS DE PARTIDA	
Caudal de diseño (m ³ /h)	1126,2
Número de líneas	5
Sólidos en suspensión en el agua a tratar (mg/l)	350
Eliminación de sólidos en suspensión (%)	50
Distancia entre barras (Luz del tamiz) (mm)	1,5
Diámetro del tambor filtrante (m)	0,63

Tabla 9: Parámetros de Partida del Tamiz Rotativo. Fuente: Elaboración Propia.

RESULTADO DEL CÁLCULO	
Caudal de diseño por la línea (m ³ /h)	225,24
Carga hidráulica a caudal máximo (m ³ /m ² de tambor.h)	168,40
Longitud del tambor filtrante (m)	0,800
Superficie del tambor filtrante (m ²)	1,58
Diámetro del tambor filtrante (m)	0,63
Potencia mínima del motor del tamiz (Kw)	0,55
Superficie en planta aproximada ocupada por un tamiz (m ²)	1,61
Peso aproximado del tamiz en vacío (Kg)	285,51
Peso aproximado del tamiz funcionando (Kg)	531,29
Caudal de agua de lavado total a 4 kg/cm ² (m ³ /h)	22,524
Potencia mínima de la bomba de lavado (Kw)	4,91
Producción de fangos en tamices (kg/d de sólidos)	4730,04
Carga hidráulica a caudal de diseño (m ³ /m ² de tambor.h)	142,33

Tabla 10: Resultado del Cálculo del Tamiz Rotativo. Fuente: Elaboración Propia.

En el resultado de los tamices rotativos es importante saber que la potencia máxima del motor del tamiz es de 0,55 Kw. Por tanto, el número de líneas (que es igual al número de tamices) necesarias para el proceso de tamizado viene denominado por este parámetro, cuanto mayor es caudal más líneas son necesarias para reducir el caudal por

tamiz y por tanto la potencia necesaria en sus motores. Por todo esto, se decide finalmente dividir el caudal de agua del desbaste en 5 líneas de agua independientes. Cada tamiz de rotativo colocado en cada una de las líneas poseerá las características calculadas.

Por último, una vez realizado el proceso de tamizado del agua residual, los SS se reducen en un 25% y la DBO un 10%.

1.1.3 Desarenado

En el caso del proceso de desarenado del pretratamiento del agua se procede a diseñar un desarenador de flujo vertical. Al igual que en los apartados anteriores se supone que se tiene espacio suficiente para realizar obras de gran tamaño. Por tanto, dentro de los parámetros de partida se decide dividir el caudal en 30 líneas diferentes, para que la velocidad del agua al entrar en ella sea reducida, y las arenas sedimenten de forma correcta.

DESARENADOR DE FLUJO VERTICAL: PARÁMETROS DE PARTIDA	
Caudal de diseño(m ³ /h)	1126,2
Caudal máximo (m ³ /h)	3151
Velocidad de sedimentación de la arena (m/min)	1,15
Relación profundidad/anchura del canal	1
Velocidad de circulación por el canal a caudal de diseño (m/s)	0,3
Número de Líneas	30
Metros cúbicos de arena por 1000 metros cúbicos de agua residual a caudal de diseño	0,02
Metros cúbicos de arena por 1000 metros cúbicos de agua residual con tormenta	3

Tabla 11: Parámetros de Partida del Desarenador de Flujo Vertical. Fuente: Elaboración Propia.

RESULTADO DEL CÁLCULO

Caudal de diseño por línea (m ³ /h)	37,54
Caudal máximo por línea (m ³ /h)	105,0333
Sección transversal del canal (m ²)	0,034759
Anchura del canal (m)	0,186438
Profundidad útil del canal (m)	0,186438
Longitud teórica del canal (m)	2,918166
Longitud real del canal (m)	5,377248
Volumen unitario (m ³)	0,186909
Tiempo medio de resistencia a caudal de diseño (min.)	0,106771
Tiempo medio de residencia a caudal máximo (min.)	0,106771
Producción normal de arena seca (m ³ /día)	0,540576
Producción máxima de arena seca con tormenta (m ³ /h)	9,453

Tabla 12: Resultados del Cálculo. Fuente: Elaboración Propia.

1.1.4 Balsa de homogeneización.

Para el cálculo de la balsa de homogeneización se precisa de un conocimiento exacto de caudal por hora de la instalación, ya que como dicho en el primer capítulo se utiliza para estabilizar los cambios bruscos de caudal a las horas de funcionamiento de la instalación. En el caso de la estación a diseñar se supone un caudal constante por hora debido a la falta de datos.

REGULACIÓN DE CAUDAL: PARÁMETROS DE PARTIDA

Caudal de 0 a 1 horas (m ³ /h)	0
Caudal de 1 a 2 horas (m ³ /h)	0
Caudal de 2 a 3 horas (m ³ /h)	0
Caudal de 3 a 4 horas (m ³ /h)	0
Caudal de 4 a 5 horas (m ³ /h)	0
Caudal de 5 a 6 horas (m ³ /h)	1126,2
Caudal de 6 a 7 horas (m ³ /h)	1126,2
Caudal de 7 a 8 horas (m ³ /h)	1126,2
Caudal de 8 a 9 horas (m ³ /h)	1126,2
Caudal de 9 a 10 horas (m ³ /h)	1126,2
Caudal de 10 a 11 horas (m ³ /h)	1126,2
Caudal de 11 a 12 horas (m ³ /h)	1126,2
Caudal de 12 a 13 horas (m ³ /h)	1126,2
Caudal de 13 a 14 horas (m ³ /h)	1126,2
Caudal de 14 a 15 horas (m ³ /h)	1126,2
Caudal de 15 a 16 horas (m ³ /h)	1126,2
Caudal de 16 a 17 horas (m ³ /h)	1126,2
Caudal de 17 a 18 horas (m ³ /h)	1126,2

Caudal de 18 a 19 horas (m ³ /h)	1126,2
Caudal de 19 a 20 horas (m ³ /h)	1126,2
Caudal de 20 a 21 horas (m ³ /h)	1126,2
Caudal de 21 a 22 horas (m ³ /h)	1126,2
Caudal de 22 a 23 horas (m ³ /h)	1126,2
Caudal de 23 a 24 horas (m ³ /h)	0
Volumen mínimo de fluido en balsa (m ³)	100
Número de unidades	1
Profundidad útil (m)	3
Relación longitud/anchura	2
Potencia específica de mezcla (vatios/m ³)	5
Aporte específico de aire para evitar septicidad (m ³ aire/h.m ³ balsa)	0,7

Tabla 13: Regulación de Caudal con Balsa de Homogeneización. Fuente: Elaboración Propia.

RESULTADO DEL CÁLCULO	
Caudal efluente coincidente con caudal medio (m ³ /h)	844,7
Volumen acumulado cuando Qentrada>Qmedio (m ³)	-844,7
Volumen acumulado en la hora siguiente (m ³)	-1689,3
Volumen acumulado en la hora siguiente (m ³)	-2534,0
Volumen acumulado en la hora siguiente (m ³)	-3378,6
Volumen acumulado en la hora siguiente (m ³)	-4223,3
Volumen acumulado en la hora siguiente (m ³)	-3941,7
Volumen acumulado en la hora siguiente (m ³)	-3660,2
Volumen acumulado en la hora siguiente (m ³)	-3378,6
Volumen acumulado en la hora siguiente (m ³)	-3097,1
Volumen acumulado en la hora siguiente (m ³)	-2815,5
Volumen acumulado en la hora siguiente (m ³)	-2534,0
Volumen acumulado en la hora siguiente (m ³)	-2252,4
Volumen acumulado en la hora siguiente (m ³)	-1970,9
Volumen acumulado en la hora siguiente (m ³)	-1689,3
Volumen acumulado en la hora siguiente (m ³)	-1407,8
Volumen acumulado en la hora siguiente (m ³)	-1126,2
Volumen acumulado en la hora siguiente (m ³)	-844,7
Volumen acumulado en la hora siguiente (m ³)	-563,1
Volumen acumulado en la hora siguiente (m ³)	-281,6
Volumen acumulado en la hora siguiente (m ³)	0,0
Volumen acumulado en la hora siguiente (m ³)	281,5
Volumen acumulado en la hora siguiente (m ³)	563,1
Volumen acumulado en la hora siguiente (m ³)	844,6
Volumen acumulado en la hora siguiente (m ³)	0,0
Volumen de balsa/s de regulación y homogeneización (m ³)	944,6

Potencia de mezcla de la/s balsa/s (CV)	6,4
Caudal total de aire necesario para evitar septicidad (m ³ /h)	661,3
Volumen unitario útil (m ³)	944,6
Longitud de cada balsa (m)	25,1
Anchura de cada balsa (m)	12,5

Tabla 14: Resultado del Cálculo. Fuente: Elaboración Propia.

Como se puede observar en los datos hallados después del cálculo, la diferencia de volúmenes de agua acumulados entre horas es siempre negativa. Por tanto, se decide prescindir de esta etapa en la depuración ya que no se puede obtener un resultado real y específico con los datos que se poseen.

1.2 Dimensionado del Tratamiento Primario

1.2.1 Decantación Primaria

A la hora de realizar el dimensionado de la decantación primaria de la depuradora, se tiene en cuenta el elevado caudal que posee la instalación. En consecuencia, se decide utilizar 4 decantadores primarios para que la sedimentación sea más eficiente.

DECANTADORES PRIMARIOS: PARÁMETROS DE PARTIDA

Caudal de diseño (m ³ /h)	1126,2
Caudal máximo (m ³ /h)	3151
Velocidad ascensional a caudal de diseño (m ³ /m ² .h)	1,5
Tiempo medio de residencia a caudal de diseño (h)	2,5
Número de líneas	4
Distancia desde el vertedero a la pared interna de la cuba (m)	0,5

Tabla 15: Parámetros de Partida de Decantadores Primarios. Fuente: Elaboración Propia.

RESULTADOS DEL CÁLCULO

Caudal de diseño por línea (m ³ /h)	281,55
Caudal máximo por línea (m ³ /h)	787,75
Superficie del decantador (m ²)	187,70
Diámetro interno (m)	15,46
Volumen cilíndrico útil (m ³)	703,88
Profundidad cilíndrica útil (m)	3,75
Velocidad ascensional a caudal máximo (m ³ /m ² .h)	4,20
Tiempo medio de residencia a caudal máximo (h)	0,89
Longitud de vertedero por decantador (m)	45,42
Carga máxima sobre vertedero (m ³ /m.h)	17,34

Tabla 16: Resultados del Cálculo. Fuente: Elaboración Propia.

De los resultados obtenidos cabe destacar las dimensiones de cada uno de los decantadores a usar. Todos ellos, poseen un diámetro interno de 15,46m y una profundidad útil de 3,75m (menor de 4 metros que es lo recomendado).

Mediante esta decantación se consigue reducir un 33% de la DBO restante, 66% de los sólidos en suspensión, y el 10% de nitratos y fosfatos totales.

Por último, es necesario calcular los fangos producidos por la decantación, ya que posteriormente serán utilizados para el cálculo de las dimensiones de la línea de fangos.

PRODUCCIÓN DE FANGOS PRIMARIOS

Eliminación de sólidos en suspensión (%)	66
Eliminación de DBO (%)	33
Concentración de sólidos en suspensión en la entrada de decantación (mg/l)	1950
Concentración de DBO en la entrada de decantación (mg/l)	2468
Concentración del fango decantado (kg/m ³)	20

Tabla 17: Producción de Fangos Primarios. Fuente: Elaboración Propia.

RESULTADOS DEL CÁLCULO

Producción de fangos primarios (kg/d de sólidos)	23190,71
Producción media de fangos primarios (kg/h de sólidos)	1449,42
Caudal medio de fangos primarios (m ³ /h)	48,31
Concentración de sólidos en suspensión en salida de decantación (mg/l)	663
Concentración de DBO en la salida de decantación (mg/l)	1653,56

Tabla 18: Resultados del Cálculo. Fuente: Elaboración Propia.

1.3 Dimensionado del Tratamiento Secundario

1.3.1 Digestión Anaerobia

Por último, se procede a diseñar el tratamiento secundario de la línea de aguas de la depuradora, el digester anaerobio y la decantación secundaria. Para realizar este dimensionado de forma correcta se procede a utilizar el cálculo de digestión anaerobia para la línea de fangos del libro descrito con anterioridad, cambiando ciertos parámetros de entrada. De esta manera, se consigue calcular el digester.

En la depuradora en cuestión se decide utilizar un digester de alta carga CTR para el proceso. Como descrito en el primer capítulo, en este digester suceden todas las etapas de digestión del agua para su tratamiento. Por tanto, uno de los cambios a realizar dentro de los parámetros es la eliminación de los digestores de segunda fase.

Debido a la gran cantidad de agua a tratar y el tiempo de retención de la misma en los digestores, se decide dividir el agua en 6 digestores y se reduce el tiempo de retención de la misma al mínimo para este tratamiento ($T_r = 3$ días).

En el caso del digester de agua, al digerir un volumen de agua tan elevado, es necesario utilizar un tanque de un tamaño mucho mayor, en este caso se utilizará uno tipo el que emplea Mahou en sus fábricas cuya altura cilíndrica útil se encuentra entre los 40-50m, escogiendo 50m para la altura del proyecto.

DIGESTOR ANAEROBIO: PARÁMETROS DE PARTIDA

Tiempo de retención del digester primario	3
Altura cilíndrica útil del digester primario	40
Altura del fondo cónico del digester primario	2
Número de digestores primarios	2
Sólidos Volátiles Contenidos en el Agua	50
Reducción de volátiles esperada en el Agua	90
Caudal de fangos secundarios	0
Caudal de Agua	1126,2
Sólidos contenidos en los fangos secundarios	0
Sólidos contenidos en los fangos primarios	780
Tiempo de retención del digester secundario	0
Altura cilíndrica útil del digester secundario	0
Altura del fondo cónico del digester secundario	0
Número de digestores secundarios	0

Tabla 19: Parámetros de Partida del Digester Anaerobio. Fuente: Elaboración Propia.

DIGESTOR ANAEROBIO: CÁLCULOS

Caudal de fangos a digerir	900
Sólidos contenidos en los fangos a digerir	780
Concentración de los fangos a digerir	0,866667
Caudal diario de fangos a digerir	14400
Sólidos volátiles contenidos en los fangos a digerir	39
Volumen total de digestores primarios	43200
Volumen unitario de digestor primario	21600
Carga de sólidos volátiles en digestores primarios	0,009028
Diámetro interno del digestor primario	26,00535
Volumen total de digestores secundarios	0
Volumen unitario de digestor secundario	0
Diámetro interno del digestor secundario	0
Carga de sólidos volátiles en digestores 1+2	0,009028
Gas producido por la digestión	741,09
Sólidos contenidos en los fangos digeridos	744,9
Sólidos volátiles contenidos en los fangos digeridos	3,9
Concentración de los fangos digeridos	0,051729
Tiempo de retención de sólidos	3

Tabla 20: Resultados del Cálculo. Fuente: Elaboración Propia.

Una vez hallados los parámetros de dimensionado del digestor, que, como se puede observar en la tabla anterior, se continúa calculando la obtención de biogás obtenida por el proceso, la energía necesaria para realizar el proceso y su diferencia para saber si con ello producimos más energía debida al biogás que la necesaria para que la instalación corra.

DIGESTOR ANAEROBIO: CÁLCULOS

Temperatura del digestor	35
Temperatura del aire a considerar para el cálculo	10
Temperatura del suelo a considerar para el calculo	20
Temperatura del fango alimentado al digestor	34
Altura enterrada de la virola	2
Espesor del hormigón en la cúpula	0,2
Espesor del hormigón en la virola	0,3
Espesor del aislamiento	0,06
Conductividad térmica K del hormigón	1,64
Conductividad térmica K del asilamiento	0,03
Coeficiente global U de la parte enterrada	1
Poder calorífico del gas de digestión	5000
Altura de la cúpula	1
Perdidas de calor en tuberías	10000

Calor necesario para calefacción de edificios	20000
Rendimiento de la producción de calor a partir del gas de digestión	80

Tabla 21: Parámetros de Partida Digestión Anaerobia. Fuente: Elaboración Propia.

DIGESTOR ANAEROBIO: CÁLCULOS

Coeficiente global U de la cúpula	0,4712643
Superficie de la cúpula	534,2903
Calor perdido por la cúpula	6294,800
Coeficiente global U de la virola	0,4581005
Superficie de la virola	3267,9358
Calor perdido por la virola	37426,081
Superficie enterrada	537,39399
Calor perdido por la superficie enterrada	8060,9099
Perdidas de calor por cada digestor	51781,791
Pérdidas totales de calor	103563,58
Calor necesario para el calentamiento del fango alimentado	600000
Calor total necesario para la digestión	703563,58
Calor total necesario	733563,58
Calor teórico disponible del gas de digestión	154393,75
Calor real disponible del gas de digestión	123515
Exceso de calor en las condiciones del cálculo	-610048,5

Tabla 22: Cálculos de la Digestión Anaerobia. Fuente: Elaboración Propia.

Como queda destacado en la última celda de la tabla anterior subrayada en amarillo, en este proceso se generan -610048,5 Kcal/h, necesitando por tanto de energía externa para realizarlo. Esto tiene sentido debido al elevado caudal de agua que llega a la instalación, que a pesar de entrar en condiciones casi idénticas a las que se encuentra durante el proceso, mantener esas condiciones para un volumen tan elevado, requiere un elevado componente energético.

Con este método se reduce finalmente un 95% de la DBO del agua y un 10% de los nitratos y fosfatos totales contenidos por el afluente de agua.

1.3.2 Decantación secundaria

Finalmente se procede a calcular la decantación secundaria de la línea donde se elimina el 10% restante de los sólidos totales contenidos por el afluente, dejando este con un contenido en sólidos menor al 5% y pudiendo reciclar el agua para reutilizarla en la instalación.

DECANTADOR SECUNDARIO: PARÁMETROS DE PARTIDA

Caudal de diseño (m ³ /h)	1126,2
Caudal máximo (m ³ /h)	3151
Velocidad ascensional a caudal de diseño (m ³ /m ² .h)	0,9
Tiempo medio de residencia a caudal de diseño (h)	4
Número de líneas	3
Distancia desde el vertedero a la pared interna de la cuba (m)	0,5

Tabla 23: Parámetros de Partida del Decantador Secundario. Fuente: Elaboración Propia.

RESULTADO DE CÁLCULO

Caudal de diseño por línea (m ³ /h)	375,4
Caudal máximo por línea (m ³ /h)	1050,3333
Superficie del decantador (m ²)	417,11
Diámetro interno (m)	23,05
Volumen cilíndrico útil unitario (m ³)	1501,6
Profundidad cilíndrica útil (m)	3,60
Velocidad ascensional a caudal máximo (m ³ /m ² .h)	2,52
Tiempo medio de residencia a caudal máximo (h)	1,43
Longitud de vertedero por decantador (m)	69,26
Carga máximo sobre vertedero (m ³ /m.h)	15,17

Tabla 24: Resultado del Cálculo. Fuente: Elaboración Propia.

En este caso, se decide realizar el diseño con tres decantadores secundarios de menor tamaño que los decantadores primarios con un diámetro interno de 23,05m y profundidad de 3,6m. Al igual que en la decantación anterior, es de vital importancia realizar el cálculo de los fangos generados en esta decantación.

PRODUCCIÓN DE FANGOS SECUNDARIOS

Eliminación de sólidos en suspensión (%)	66
Eliminación de DBO (%)	33
Concentración de sólidos en suspensión en la entrada de decantación (mg/l)	450
Concentración de DBO en la entrada de decantación (mg/l)	2097,8
Concentración del fango decantado (kg/m ³)	20

Tabla 25: Producción de Fangos Secundarios. Fuente: Elaboración Propia.

RESULTADOS DEL CÁLCULO

Producción de fangos secundarios (kg/d de sólidos)	8027,554
Producción media de fangos secundarios (kg/h de sólidos)	334,48
Caudal medio de fangos primarios (m ³ /h)	16,72
Concentración de sólidos en suspensión en salida de decantación (mg/l)	153
Concentración de DBO en la salida de decantación (mg/l)	1405,526

Tabla 26: Resultados del Cálculo. Fuente: Elaboración Propia.

Al estar el afluente de agua mucho menos contaminado que en la decantación anterior, la cantidad de fangos obtenidos en este proceso es mucho menor, 8027,554 Kg/día, en comparación con la decantación primaria que genera 23190 Kg/día.

2. LINEA DE FANGOS

Al igual que en la línea de agua, se utiliza el libro “*Proyectos de Plantas de Tratamiento de Aguas*” de Ricardo Isla de Juana [ISLA05] para el cálculo y dimensionamiento de las etapas necesarias para el tratamiento de los fangos obtenidos durante la depuración del agua.

2.1 Espesamiento

2.1.1 Espesamiento por Gravedad

La línea de fangos a diseñar, posee un espesamiento por gravedad debido al uso de un tratamiento anaeróbico como estabilizador de los fangos. (yo opino que esta línea es pura paja pero bueno).

ESPEZAMIENTO POR GRAVEDAD

Carga de sólidos (kg/m ² .d)	55
Tiempo de residencia hidráulico (h)	24
Número de unidades	1
Concentración de salida de fangos espesados (kg/m ³)	11,30
Sólidos contenidos en los fangos del decantador primario (kg/d)	179,55
Sólidos contenidos en los fangos del decantador secundario (kg/d)	102,3
Concentración de los fangos primarios (kg/m ³)	10,167
Concentración de los fangos secundarios (mg/l)	297

RESULTADO DEL CÁLCULO

Caudal de fangos primarios (m ³ /h)	0,74
Caudal de fangos secundarios (m ³ /h)	14,352
Sólidos contenidos en fangos primarios + secundarios (mixtos) (kg/d)	281,85
Caudal de fangos primarios + secundarios (mixtos) (m ³ /h)	0,25
Concentración de los fangos mixtos (kg/m ³)	0
Superficie unitaria del espesador (m ²)	5,12
Diámetro interno (m)	2,55
Volumen cilíndrico útil unitario (m ³)	6
Profundidad cilíndrica útil (m)	1,17
Caudal salida de fangos (m ³ /h)	1,04
Velocidad ascensional (m ³ /m ² .h)	0,05

Al tratar un volumen de fangos menor que volumen de agua, se decide utilizar un solo depósito para el espesamiento de los fangos. Con ello, se concluye un tanque de 2,55 m de diámetro y 1,17 metros de profundidad útil.

2.2 Estabilización.

2.2.1 Diseño Digestión Anaerobia

DIEGSTOR ANAEROBIO: PARÁMETROS DE PARTIDA

Tiempo de retención del digestor primario	10
Altura cilíndrica útil del digestor primario	8
Altura del fondo cónico del digestor primario	2
Número de digestores primarios	1
Sólidos Volátiles Contenidos en el fango	50
Reducción de volátiles esperada en el fango	90
Caudal de fangos secundarios	3
Caudal de fangos primarios	6
Sólidos contenidos en los fangos secundarios	7224,3
Sólidos contenidos en los fangos primarios	18552
Tiempo de retención del digestor secundario	0
Altura cilíndrica útil del digestor secundario	0
Altura del fondo cónico del digestor secundario	0
Número de digestores secundarios	0

Tabla 27: Parámetros de Partida Digestor Anaerobio. Fuente: Elaboración Propia.

DIGESTOR ANAEROBIO: CÁLCULOS

Caudal de fangos a digerir	9
Sólidos contenidos en los fangos a digerir	25776,3
Concentración de los fangos a digerir	2864,033
Caudal diario de fangos a digerir	144
Sólidos volátiles contenidos en los fangos a digerir	1288,815
Volumen total de digestores primarios	1440
Volumen unitario de digestor primario	1440
Carga de sólidos volátiles en digestores primarios	8,950104
Diámetro interno del digestor primario	14,54488
Volumen total de digestores secundarios	0
Volumen unitario de digestor secundario	0
Diámetro interno del digestor secundario	0
Carga de sólidos volátiles en digestores 1+2	8,950104
Gas producido por la digestión	24487,58
Sólidos contenidos en los fangos digeridos	24616,37
Sólidos volátiles contenidos en los fangos digeridos	128,8815
Concentración de los fangos digeridos	170,947
Tiempo de retención de sólidos	10

Tabla 28: Resultados del Cálculo del Digestor Anaerobio. Fuente: Elaboración Propia.

En este caso, al tratarse de un volumen mucho menor de materia, se decide utilizar un único reactor primario para todos los fangos generados. Este reactor, finalmente posee unas dimensiones menores que los calculados para la línea de agua, poseyendo un diámetro interno de 14,5m.

Al igual que para la digestión de la línea de aguas, en este caso también se realiza un cálculo de la energía necesaria para realizar el tratamiento y la energía generada por el mismo en función del biogás que genera. Para poder realizar este proceso sin necesidad de un tiempo de retención elevado se decide emplear una temperatura dentro del digestor de 60 °C y se supone una temperatura de entrada del fango alimentado al digestor de 15°C.

DIGESTOR ANAEROBIO: CÁLCULOS

Temperatura del digestor	60
Temperatura del aire a considerar para el cálculo	-5
Temperatura del suelo a considerar para el calculo	15
Temperatura del fango alimentado al digestor	15
Altura enterrada de la virola	2
Espesor del hormigón en la cúpula	0,2
Espesor del hormigón en la virola	0,3
Espesor del aislamiento	0,06
Conductividad térmica K del hormigón	1,64
Conductividad térmica K del asilamiento	0,03
Coeficiente global U de la parte enterrada	1
Poder calorífico del gas de digestión	5000
Altura de la cúpula	1
Perdidas de calor en tuberías	10000
Calor necesario para calefacción de edificios	20000
Rendimiento de la producción de calor a partir del gas de digestión	65

Tabla 29: Parámetros de salida de la Digestión Anaerobia. Fuente: Elaboración Propia.

DIGESTOR ANAEROBIO: CÁLCULOS

Coefficiente global U de la cúpula	0,471264
Superficie de la cúpula	169,2958
Calor perdido por la cúpula	5185,901
Coefficiente global U de la virola	0,458101
Superficie de la virola	274,1652
Calor perdido por la virola	8163,691
Superficie enterrada	218,0167
Calor perdido por la superficie enterrada	9810,753
Perdidas de calor por cada digestor	23160,35
Pérdidas totales de calor	23160,35
Calor necesario para el calentamiento del fango alimentado	270000
Calor total necesario para la digestión	293160,3
Calor total necesario	323160,3
Calor teórico disponible del gas de digestión	5101578
Calor real disponible del gas de digestión	3316026
Exceso de calor en las condiciones del cálculo	2992865

Tabla 30: Resultados del Cálculo de la Digestión Anaerobia. Fuente: Elaboración Propia.

Como se puede observar en la tabla anterior, gracias a este tratamiento se consigue obtener un exceso de calor de 2992865 Kcal/hora. Esto se debe a que la cantidad de materia orgánica a digerir por cada metro cúbico de fango es mucho mayor en comparación con la del agua en el proceso anterior, además, debido a la menor cantidad de fangos se requiere menos energía para aumentar y mantener la temperatura de los fangos.

2.3 Deshidratación.

2.3.1 Eras de Secado

Por último, se procede a calcular las eras de secado de la depuradora.

ERAS DE SECADO	
Caudal de fango a secar (m ³ /d)	11,52
Concentración de sólidos en el fango alimentado (kg/m ³)	25
Concentración de sólidos en el fango seco(kg/m ³)	400
Días anuales de producción de sólidos (d/año)	261
Carga de sólidos media anual (kg/m ² .año)	120
Espesor de la capa de fangos frescos en eras (m)	0,25
Población equivalente servida (habitantes equivalentes)	0
Número de eras de secado	19
Relación longitud/anchura de las eras	2
Dosis de polielectrolito (kg/Ton materia seca)	5

Tabla 31: Parámetros de salida de las Eras de Secado. Fuente: Elaboración Propia.

RESULTADO DE CÁLCULO	
Caudal de fango a secar (m ³ /año)	3006,72
Sólidos a secar en eras (kg/d)	288
Sólidos a secar en eras (kg/año)	75168
Superficie necesaria de eras (m ²)	626,4
Longitud de cada era (m)	8,12015
Anchura de cada era (m)	4,060075
Número de ciclos de secado anuales	19,2
Superficie de era por habitante equivalente (m ² /hab.)	#¡DIV/0!
Volumen anual de torta de fango seco (m ³ /año)	187,92
Consumo de polielectrolito (kg/d)	1,44

Tabla 32: Resultados del Cálculo. Fuente: Elaboración Propia.

Se observa que la anchura de cada era es de 4,06m y su longitud de 8,12m. Esto no supone ningún problema pues como ya se había dicho en el apartado anterior, se supone un espacio suficientemente grande como para poder realizar toda la instalación de la depuración. Una vez extraídos los fangos de las eras de secado después de 15 días poseen el 20% de la humedad total que poseían al principio.

Capítulo 3. ESTUDIO Y CÁLCULO DE LA QUEMA DEL BIOGÁS.

1. INTRODUCCIÓN

Como se ha detallado ya en previos apartados, la utilización de reactores de digestión anaerobia es un punto esencial en la EDAR diseñada debido a su alto contenido en materia orgánica. No obstante, a pesar de haber realizado un cálculo aproximado de la cantidad de energía total neta requerida por cada digestor en función de la cantidad de metano producido, en el capítulo anterior, este no representa la cantidad de biogás real generada en la instalación ni la cantidad exacta de metano producida. Por ello, en este capítulo se procede a realizar un estudio más exhaustivo de la generación del biogás y la cantidad exacta de gas a poder reutilizar, para después emplear su uso de la manera más eficientemente posible.

Una vez calculada la cantidad exacta de metano contenida en el gas generado por la digestión anaerobia, es necesario hallar la cantidad de potencia que podría generar para su reutilización. Por ello, se continuará calculando la potencial cantidad de energía que liberada por el metano y la cantidad exacta a poder utilizar.

Finalmente, se procederá al estudio de la quema de la misma pudiendo reutilizar el gas generando potencia para el uso en la instalación y reducir así el consumo eléctrico de la EDAR y de la fábrica. Dentro de los posibles usos del combustible las tres posibilidades a estudiar en detalle serán: la quema del combustible en motor, su utilización en una turbina de gas y su posible uso en una caldera de vapor. Estos puntos se detallaran en los siguientes apartados del capítulo.

2. CANTIDAD DE METANO GENERADO

2.1 Digestión Anaerobia.

Con el fin de realizar un cálculo más exhaustivo de la cantidad de metano generada, es necesario entender más detalladamente el proceso realizado dentro de la digestión anaerobia.

Como ya se detalló en anteriores apartados, la digestión anaerobia se basa en el proceso fermentativo bacteriano que se produce en el agua a tratar ante la ausencia de oxígeno. Este proceso se caracteriza por la transformación de la materia biológica en el agua a metano y CO₂.



Figura 28: Degradación Biológica de Materia Orgánica.

2.1.1 Etapas de la digestión Anaerobia.

Dentro del proceso de la degradación de la materia orgánica mediante la digestión anaerobia se destacan los siguientes pasos:

- **Hidrólisis:** En este proceso las bacterias hidrolíticas tratan de romper los polímeros orgánicos insolubles y de mayor peso, tales como las proteínas, glúcidos y lípidos, transformándolos en compuestos adecuados (solubles y de menor peso) para que las posteriores bacterias continúen con la digestión.
- **Acidogénesis:** Una vez digeridos los polímeros de mayor tamaño, las bacterias fermentativas absorben los aminoácidos, azúcares y ácidos grasos generando dióxido de carbono, hidrógeno, amonio y ácidos orgánicos.

- **Acetogénesis:** En este proceso, las bacterias convierten los ácidos resultantes en ácido acético, produciendo además, más amonio, dióxido de carbono e hidrógeno.
- **Metanogénesis:** Finalmente, en esta fase se genera el metano (gas utilizado para la generación de energía). La metanogénesis constituye la fase más importante del proceso ya que las bacterias que generan el metano son las más susceptibles ante cambios de pH, temperatura, carga orgánica etc. Por tanto, si no existe un control exhaustivo de todas las condiciones descritas la producción de metano se vería diezmada pudiendo llegar a producir un desequilibrio bacteriano y un colapso del sistema.
- **Sulfurogénesis:** Este proceso no forma parte principal de la generación del biogás. No obstante, en el suceso en el cual el afluente de agua o fangos contenga un alto contenido en sulfuro, las bacterias sulfato reductoras comienzan a competir con las metanogénicas por el sustrato. Este fenómeno produce una alta generación de H_2S y una baja producción de metano, provocando fuertes olores y una inhibición del sistema. Además, en el suceso en el cual comience esta reacción, el H_2S comenzaría a reducirse, aumentando el pH del sistema y por tanto reduciendo la tasa de crecimiento de las bacterias acidogénicas e inhibiendo por completo metanogénesis.

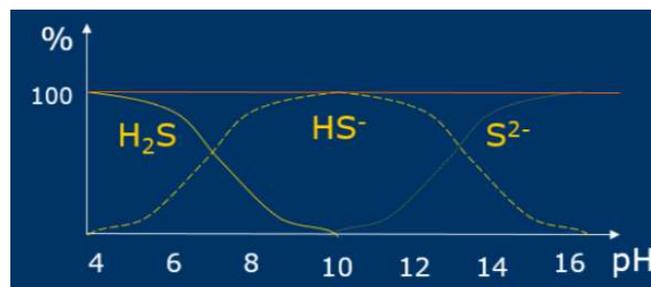


Figura 29: Aumento del pH en Función de la reducción de H_2S . Fuente: Elaboración Propia

A pesar de tener estas cuatro etapas para la generación del biogás se ha de tener en cuenta que a partir del proceso de acidogénesis siempre se está produciendo metano, haciendo difícil la separación de las etapa y teniendo que recoger biogás desde el primer momento. Un buen ejemplo de esto, es la propia degradación de la glucosa en la acidogénesis, la cual sigue la siguiente reacción.



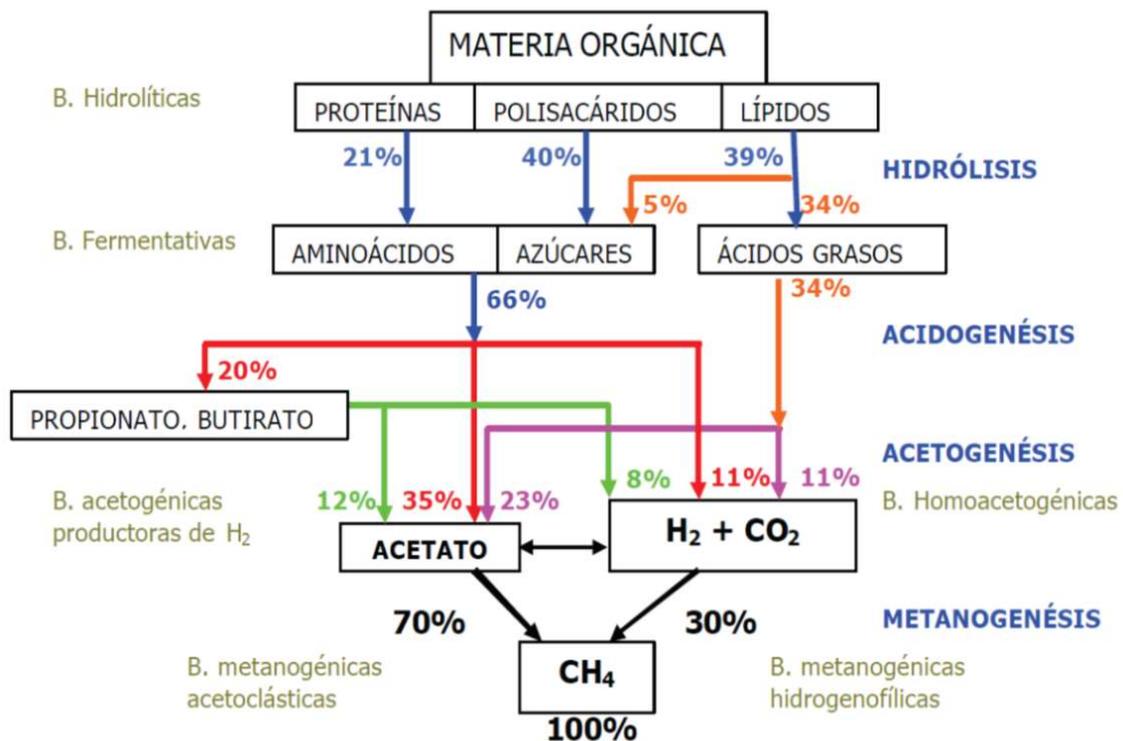


Figura 30: Etapas de la Digestión Anaerobia.

2.1.2 Parámetros de Control.

Finalmente, y como descrito brevemente en el anterior apartado, es de vital importancia destacar el control de los parámetros de este proceso, destacando en primer lugar, el equilibrio bacteriano necesario en el agua. Al ser un ecosistema digiriendo totalmente la materia orgánica del agua, cualquier alteración en el equilibrio del mismo podría ocasionar cualquiera de las etapas descritas de no acabar su digestión y por tanto dejando a la siguiente población bacteriana sin consumo y diezmando la producción de metano de todo el sistema.

Por tanto, los parámetros de mayor control de la instalación han de ser los siguientes:

- **Temperatura:** La temperatura a la que se encuentra el agua/lodos influye directamente en la velocidad de metabolismo de las bacterias y en la solubilidad de los sustratos, cuanto mayor la temperatura (hasta un determinado rango) mayor la velocidad de degradación de la materia. A pesar de esto, los rangos de temperatura habituales para el proceso son entre 30-35°C o 50-55°C. Para el diseño de los digestores en el capítulo anterior se decidió una temperatura de trabajo de 35°C.

- pH: Para una digestión total de la materia orgánica y una maximización de la producción de metano, el afluente de agua/lodos ha de contenerse entre 6 y 8. Esto es debido a que las bacterias metanogénicas se inhiben ante unos pHs distintos a los del intervalo, provocando que la acidogénesis siga su proceso y aumentando los ácidos volátiles en el reactor, pudiendo finalmente eliminar totalmente la reacción.
- Presión: Al igual que la temperatura, la presión también posee una elevada importancia ante la metanogénesis, teniendo un efecto inversamente proporcional a esta, y por tanto disminuyendo la cantidad de metano generada cuanto mayor la presión dentro del digestor.
- Equilibrio Bacteriano: Para garantizar una completa digestión en el reactor se ha de tener en cuenta las siguientes condiciones entre las bacterias.
 - La tasa de crecimiento de las bacterias metanogénicas ha de ser mucho menor que el de las bacterias acidogénicas.
 - La velocidad del proceso de metanogénesis ha de ser, por ende, mucho menor que el proceso acidogénico.
 - Si la tasa de reproducción de las bacterias metano. disminuye, habrá un aumento del pH del reactor, interrumpiendo la reducción de DBO y DQO y generando malos olores.

2.2 Cálculo de la Cantidad de Metano.

2.2.1 Cantidad de DQO.

Como en todos los procesos de depuración, el principal objetivo de la digestión anaerobia es la reducción de la materia orgánica en el agua, es decir, la reducción de los niveles de DQO y DBO del afluente. Por tanto, para saber la cantidad exacta de metano producido, es necesario tener en cuenta estos niveles de DQO a lo largo de toda la EDAR diseñada.

Como se detalló en el dimensionamiento de las etapas de depuración los niveles de DBO quedan reducidos a lo largo del proceso de depuración de la siguiente manera:

- Reducción del 33% de la DBO del afluente en la decantación primaria.
- Reducción del 90% de la DBO del afluente en el reactor de digestión anaerobia (la reducción en los digestores suele ser del 85-95%).

- Reducción del 33% de la DBO restante en la decantación secundaria.

Teniendo en cuenta estas reducciones y conociendo además que la reducción de los niveles de DQO del agua siguen una relación 1:1 con la reducción de la DBO, se llega a las siguientes cantidades de DQO en los digestores utilizados en la instalación.

DIGESTOR LINEA AGUAS	
DQO inicial media (mg/l)	3625
Reducción Dec 1. (%)	33
Caudal agua (m³/día)	14400
Número días digestor	3
DQO total Kg	104922

Tabla 33: DQO de Entrada digestor Línea de Aguas. Fuente: Elaboración Propia

DIGESTOR LINEA FANGOS	
DQO Fangos Dec. 1 (mg/l)	2428,75
Caudal Dec 1. (m³/día)	821,1
DQO Fangos Dec. 2 (mg/l)	253,75
Caudal Dec 2. (m³/día)	401,37
Número días digestor	10
DQO Total Fangos 1 Kg	19942,46625
DQO Total Fangos 2 Kg	1018,476375
DQO Total Digestor Kg	20960,94263

Tabla 34: DQO de Entrada al digestor de Línea de Fangos. Fuente: Elaboración Propia

En las tablas elaboradas anteriormente se ha de tener en cuenta las siguientes notaciones. Donde, para la determinación real de los niveles de DQO que llegan al digestor anaerobio en la línea de aguas, es necesario tener en cuenta la reducción del 33% de estos debidos a la decantación primaria. Por otro lado, en la línea de fangos se ha de tener en cuenta que la concentración del DQO del agua se mantiene constante en los fangos decantados y por tanto se ha de separar el DQO en dos circuitos independientes y después sumarlos en el digestor:

- Decantación primaria: como queda descrito en el anterior párrafo, la concentración de la DQO presente en los fangos se mantiene constante frente al agua y por tanto esta es la misma que en el agua que sale del decantador, es decir, un 67% del total inicial de DQO.
- Decantación secundaria: En este caso se ha de tener en cuenta los fangos provenientes de la segunda decantación donde la DQO ha quedado reducida un 33% en la decantación primaria y un 90% en el digestor. Por tanto, para hallar la

concentración de DQO en los fangos es necesario reducir los niveles de DQO por ambas etapas.

2.2.2 Volumen de Metano Producido.

La remoción de DQO se da en la etapa final metanogénica, donde se forma CH_4 (muy poco soluble). La materia orgánica inicial termina entonces siendo liberada a la atmósfera en forma de CH_4 , reduciendo así el contenido orgánico del efluente.

Como descrito en el anterior apartado, durante el proceso de degradación se libera metano, el cual será posteriormente oxidado para su combustión y aprovechamiento energético.

Para poder evaluar la cantidad de DQO removida de las líneas de agua y fangos, se deben considerar los productos generados (CO_2 , CH_4). En primer lugar se ha de tener en cuenta que el dióxido de carbono se encuentra ya en la forma más oxidada, por tanto, dejando como única la demanda de oxígeno a la destinada para la oxidación del metano.

Estimación de la producción de CH_4 :

$$V_{CH} = \frac{DQO_{CH}}{K(T)}$$

$$K(T) = \frac{K \cdot P}{[R \cdot (273 + T)]}$$

Siendo:

- V_{CH_4} : Volumen de CH_4 producido (L).
- DQO_{CH_4} : La cantidad de DQO susceptible a metanizar. Está cantidad constituye un 90% de la DQO total que entra en el reactor anaerobio (gramos de DQO que remuevo).
- K : Gramos de DQO por 1 mol de CH_4 (64 g DQO/mol CH_4).
- R : Constante de los gases [0,08206 atm.L/(mol.K)].
- P : Presión a la que se realiza la digestión (en atmósferas).
- T : Temperatura a la que se realiza el proceso.

Además, se han de introducir los parámetros de presión y temperatura como condiciones de contorno. En este caso, debido a que la presión es inversamente proporcional al volumen de metano producido se decide realizar la digestión a presión atmosférica (1 atm.), de tal manera que no se reduzca la cantidad de metano producido. No obstante, para la temperatura se decide introducir la temperatura utilizada en los parámetros de diseño de la instalación 35°C, los cuales se encuentran dentro del rango de temperaturas habituales para el proceso.

Volumen de CH₄ Producido (Digestor de Aguas)			
Reducción DQO (%)	DQO eliminada	K(T=35°C) gDQO/LCH₄	VCH₄ (m³)
90	94429,8	2,25322	41908,82382

Tabla 35: Volumen de Metano Producido en la Línea de Aguas. Fuente: Elaboración Propia

Volumen de CH₄ Producido (Digestor de Fangos)			
Reducción DQO (%)	DQO eliminada	K(T=35°C) gDQO/LCH₄	VCH₄ (m³)
90	18864,84836	2,25322	8372,395222

Tabla 36: Volumen de Metano Producido en la Línea de Fangos. Fuente: Elaboración Propia

Como se puede observar en las tablas anteriores, el volumen de metano producido por el digestor anaerobio destinado a la línea de fangos es solo el 19,98% del volumen producido por la línea de aguas. A pesar de ello, cabe destacar que la cantidad de volumen de agua introducida en el digestor es mucho mayor que la de los fangos, y que además para calentar el agua y mantenerla a la temperatura de trabajo, se necesitará de una mayor cantidad de energía.

Finalmente, teniendo en cuenta que el 80% del biogás producido en los digestores contiene metano, se puede obtener la concentración total de los gases producidos en el proceso de la digestión.

BIOGAS	% EN VOLUMEN	VOLUMEN DE GAS (m³)
Metano (CH₄)	80	50281,2190
Dióxido de carbono (CO₂)	19	11941,7895
Nitrógeno (N₂)	< 1,0	565,6637
Oxígeno (O₂)	< 0,1	43,9961
Hidrógeno (H₂)	0,1-0,2	15,7129
Sulfuro de hidrógeno (H₂S)	trazas	3,14257
Cantidad Total de Biogás	100	62851,5238

Tabla 37: Composición Exacta del biogás. Fuente: Elaboración Propia

3. GENERACIÓN ENERGÉTICA

3.1 Capacidad Energética del Metano.

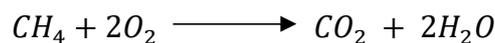
3.1.1 Combustión del Metano.

Existen muchos métodos con los que aprovechar la generación energética del metano. No obstante, como ya se detalló en la introducción del tema, se va a dar especial hincapié en el uso energético en: caldera de vapor, turbina de vapor y motor Diesel. Para poder obtener la energía del metano producido durante la digestión anaerobia en cualquiera de los procesos descritos, es necesario realizar la combustión del mismo.

La combustión es un proceso químico entre combustibles y un material oxidante (aire por norma general), por el cual se libera energía calorífica en una cámara cerrada. Los combustibles (metano para el caso de estudio) se oxidan en un ambiente controlado de temperatura y presión y suelen poseer carbonos e hidrógenos en su composición química, haciendo del metano un combustible idóneo para su combustión.

Una vez introducidos el combustible y el material oxidante dentro de la cámara de combustión, se liberan distintos productos y subproductos de la reacción química en función del rendimiento de la combustión. En función del tipo de oxidante que se utilice se tendrán unos productos u otros:

- Combustión mediante Oxígeno: La combustión ante oxígeno suele obtener un rendimiento completo del proceso y por tanto liberar más energía.



- Combustión mediante Aire: Más sencilla de realizar que la combustión anterior, no obstante, en muchos casos puede resultar en una combustión incompleta por culpa de la ausencia de oxígeno en comparación con el combustible.



- Combustión con Exceso de Aire: Generalmente, la combustión se realiza en exceso de aire para asegurar que todas las moléculas de combustible quedan rodeadas por oxígeno y poder realizar la combustión de una manera más eficiente.



Además, en el caso en el que la combustión del material ha sido completa, el combustible se oxida completamente generando dióxido de carbono y agua además de los productos de la combustión. No obstante, si la combustión es parcial o incompleta, el propio combustible también sale como producto de la reacción química ya que no toda la cantidad del producto se ha oxidado y liberado energía.

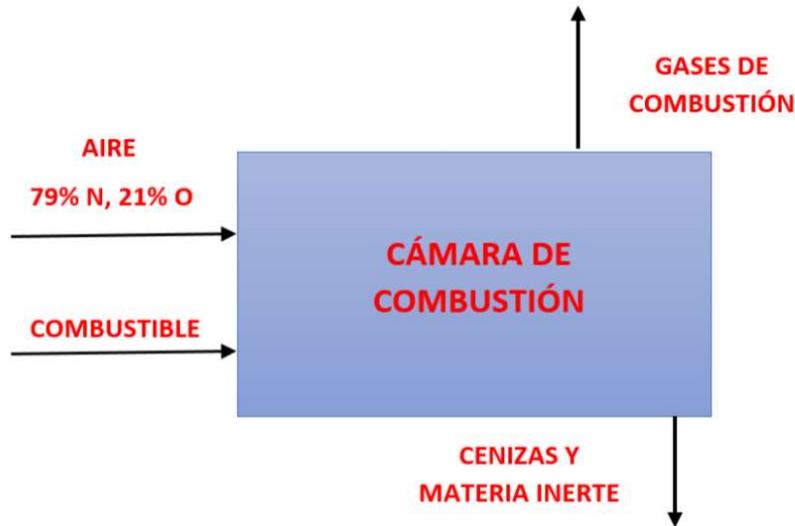


Figura 31: Diagrama de Combustión Fuente: Elaboración Propia.

Finalmente, una vez escogido el oxidante utilizado para la combustión, se requiere hallar la relación de aire – combustible para ser capaz de conseguir la cantidad exacta de oxidante requerida en la combustión. Esta relación se puede obtener mediante el propio peso requerido de oxidante y de combustible o mediante el número de moles y peso molecular de las reacciones estequiométricas realizadas antes.

$$m_{a/c} = \frac{\text{masa de oxidante}}{\text{masa de combustible}}$$

$$m_{a/c} = \frac{n_{\text{aire}} \cdot M_{\text{aire}}}{n_{\text{combustible}} \cdot M_{\text{combustible}}}$$

Utilizando las fórmulas anteriores se puede obtener la relación directa de combustible – aire en función de cada oxidante a utilizar:

	Número de moles	Masa molecular g/mol
Metano	1	16,04
Oxígeno	2	16
Aire	2	28,97
Exceso de Aire (10%)	2,2	28,97

Tabla 38: Número de Moles y Masa molecular según reacción Estequiométrica. Fuente: Elaboración Propia

Oxidante	Combustible	Relación de masa
Oxígeno	Metano	1,995012469
Aire	Metano	3,612219451
Exceso de Aire	Metano	3,973441397

Tabla 39: Relación Másica Aire-Combustible. Fuente: Elaboración Propia

Como se puede observar en la tabla anterior, la relación másica nos muestra lo detallado en párrafos anteriores, donde se requiere un 45% menos de material oxidante utilizando oxígeno para la combustión. A pesar de ello, teniendo en cuenta que el uso del aire es mucho más sencillo, barato y accesible como combustible se utilizara el exceso de aire como combustible para la combustión del metano.

Utilizando la densidad del metano y una vez conocidos su volumen y la relación másica entre los oxidantes y el combustible, se puede hallar utilizando las ecuaciones (3 y 4) la masa total de combustible y oxidante necesarias.

$$M_{CH_4} = V_{CH_4} \cdot \rho_{CH_4}$$

Donde:

- M_{CH_4} : La Masa de CH_4 .
- V_{CH_4} : El Volumen de CH_4 .
- ρ_{CH_4} : La Densidad del CH_4 .

Volumen Línea Aguas (m^3)	Densidad (Kg/m^3)	Masa (Kg)
41908,82382	0,656	27492,18842

Tabla 40: Masa de Metano Producida en la Línea de Aguas. Fuente: Elaboración Propia

Volumen Línea Fangos (m^3)	Densidad (Kg/m^3)	Masa (Kg)
8372,395222	0,656	5492,29127

Tabla 41: Masa de Metano Producida en la Línea de Fangos. Fuente: Elaboración Propia

Con ello se obtienen las siguientes relaciones másicas y las masas de oxidantes:

Oxidante	Relación Másica	Masa Metano L.A. (Kg)	Masa Oxidante L.A. (Kg)
Oxígeno	1,995	27492,18842	54847,2587
Aire	3,612	27492,18842	99307,81778
Exceso de Aire	3,973	27492,18842	109238,5996

Tabla 42: Masa Total de Oxidante requerida para la Línea de Aguas. Fuente: Elaboración Propia

Oxidante	Relación Másica	Masa Metano L.F. (Kg)	Masa Oxidante L.F. (Kg)
Oxígeno	1,995	5492,291266	10957,18956
Aire	3,612	5492,291266	19839,36134
Exceso de Aire	3,973	5492,291266	21823,29748

Tabla 43: Masa Total de Oxidante requerida para la Línea de Aguas. Fuente: Elaboración Propia

3.1.2 Energía Liberada.

El metano, es un combustible que una vez realizada la combustión es capaz de liberar una elevada cantidad de energía. A esta capacidad de energía que la masa de combustible es capaz de liberar debida a una reacción de oxidación se le denomina poder calorífico. Este poder calorífico varía en función del agua formada después de la combustión:

- **Poder Calorífico Superior:** En el caso en el cual el agua formada después de la combustión este en estado líquido. Esto es debido a que el calor de la reacción no está siendo absorbido por el agua resultante y por tanto la cantidad de energía liberada es mayor.
- **Poder Calorífico Inferior:** En este caso, el agua generada se encuentra como vapor. La formación de agua requiere de más energía transformando la misma en vapor y por tanto liberando menos energía a los alrededores, dejando por ende, un poder calorífico inferior al anterior.

	Masa Metano (Kg)	Poder Calorífico Superior. (KWh/Kg)	Poder Calorífico Inferior. (KWh/Kg)
Línea de Aguas	27492,18842	15,4	13,88
Línea de Fangos	5492,291266	15,4	13,88

Tabla 44: Poder Calorífico y Masa de Metano Producida en las Líneas. Fuente: Elaboración Propia.

Con estos poderes caloríficos y siguiendo la siguiente ecuación se hallan la máxima cantidad de energía que se puede obtener mediante la combustión, ya que estos cálculos tienen en cuenta una combustión completa del combustible utilizado.

$$E = P_c \cdot M$$

Siendo:

- E : La energía liberada en KWh.
- M : La masa del combustible.
- P_c : El poder Calorífico del material.

	Energía Generada Superior (KWh)	Energía Generada Inferior (KWh)
Línea de Aguas	423379,7017	381591,5753
Línea de Fangos	84581,28549	76233,00277

Tabla 45: Cantidad Máxima Liberada en el proceso de Combustión. Fuente: Elaboración Propia.

3.2 Reutilización de la Energía.

El aprovechamiento energético del gas generado durante la digestión es uno de los pilares principales de este proyecto, pudiendo así disminuir el consumo energético de la instalación y aprovechando al máximo su potencial. Para ello, existen diversas tecnologías aplicables con las que realizar la combustión del combustible (metano) y aprovechar su poder calorífico, que, debido al gran calor generado por la combustión producirá vapor de agua, siendo por tanto, el PCI⁶. A pesar de existir diversos tipos de posibilidades con los que aprovechar energéticamente el CH₄, como descrito en la introducción del capítulo, se van a estudiar y analizar 3 posibilidades distintas y utilizar la más apropiada.

3.2.1 Turbina de Gas.

En primer lugar se plantea utilizar una turbina de gas para poder generar electricidad y aprovechar el poder calorífico liberado por el metano.

La turbina de gas forma parte de una de las tecnologías más utilizadas y desarrolladas del siglo 20 en cuanto a la generación de energía eléctrica. A pesar de resultar una tecnología contaminante durante sus comienzos durante 1900, fue evolucionando hasta llegar a ser la tecnología preferida para la generación eléctrica en cuanto a su eficiencia económica y su baja contaminación ante el medioambiente.

Las turbinas de gas son uno de los métodos más limpios de generación eléctrica, produciendo un rango de 1-9 partes por millón de NOx. Además, debido a los combustibles utilizados en ellas para la combustión, producen menor cantidades de dióxido de carbono que cualquier otra tecnología no renovable.

En cuanto a su tamaño, existen turbinas de gas desde 500KW hasta los 250MW variando su rendimiento en 70-80%, por tanto obteniendo un rendimiento total de la instalación desde el 40 – 60%. La instalación más eficiente y con la que se consiguen rendimientos del 60% son las centrales de turbina de gas utilizando un ciclo combinado, en el caso de utilizar un ciclo simple de turbina de gas sus rendimientos rondan el 40%.

⁶ PCI: Poder Calorífico Inferior.

3.2.1.1 Ciclo Simple.

En una turbina de gas de ciclo simple, se requiere de un compresor, una cámara de combustión y la turbina de gas. En primer lugar, el oxidante con el que se va a realizar la combustión (en este caso exceso de aire en 10%) es introducido al compresor (1) para ser comprimido y llevado a la cámara de combustión (2) y ser mezclado con el combustible, metano. En este momento de mezcla, comienza a elevarse la temperatura y el volumen de gas (una vez realizada la combustión) que llega a la turbina (3). Una vez sale el gas a alta presión y temperatura de la cámara de combustión, este se expande en la turbina provocando el movimiento de esta y generando energía mecánica que posteriormente se convierte en energía eléctrica. Finalmente los gases salen de la turbina hacia la atmósfera (4). A lo largo de este proceso, existen muchas pérdidas de temperatura debido a que no se aprovecha la elevada temperatura de los gases de escape, haciendo que el rendimiento global de la instalación no sea elevado.

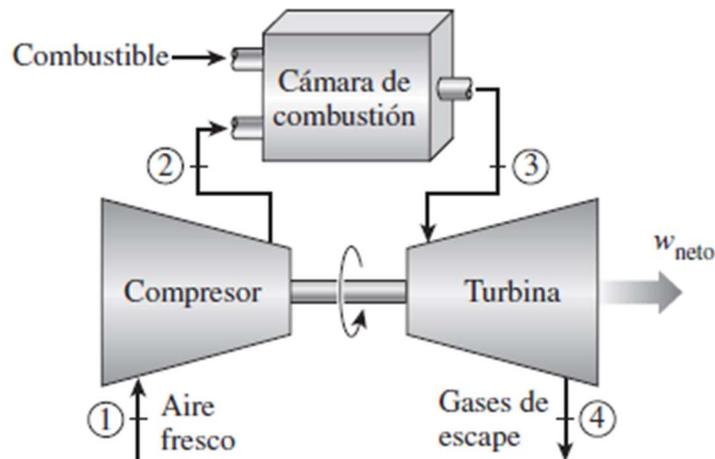


Figura 32: Ciclo Simple de Turbina de Gas.

Al tratarse de la industria azucarera y tratar con una potencia industrial elevada, las turbinas necesarias para construir la instalación deben ser de 250MW, con una relación máxima de compresión de 16:1 y alcanzando una eficiencia total del 40%. Generalmente, con una turbina de gas de 5MW se produce 8MWh de vapor, concluyendo entonces ⁷que con una turbina de 250MW se produce 400MWh de vapor. Por tanto:

Turbina de Vapor (MW)	Energía (MWh)	E. Máxima Gen en CC (MWh)	Nº Turbinas
250	400	457,8245781	1,144561445

Tabla 46: Número de Turbinas Necesarias. Fuente: Elaboración Propia.

⁷ <http://www.energiza.org/tubinasgasmarcho14/124-especial-turbinas-de-gas/973-turbinas-de-gas>

Como se puede observar en la tabla anterior, el número de turbinas necesarias para poder soportar la potencia máxima de vapor producida por una completa digestión del biogás sería de 1,14 turbinas de 250MW. Para soportar dicha potencia se estudia la posibilidad de tener dos turbinas de 250MW y 40MW de potencia trabajando en paralelo.

Turbina de Vapor (MW)	Energía (MWh)
250	400
40	64
Energía Total (MWh)	464

Tabla 47: Energía Máxima producida por las Turbinas de Gas. Fuente: Elaboración Propia.

Como muestra la Tabla 47. el trabajo en paralelo de estas dos turbinas sería capaz de soportar una combustión completa del biogás en la cámara de combustión.

A pesar de sus numerosas ventajas en cuanto a la contaminación, el uso de esta tecnología supone una pérdida de eficiencia energética del 60% pudiendo llegar a ser del 55% en caso de turbinas de aviación, esto es debido a la gran cantidad de calor que es desperdiciada a lo largo de todo el proceso. Además, su construcción requiere de una instalación de grandes dimensiones, gran distribución de ductos para los gases, y un espacio amplio donde colocar todo y conectar la generación eléctrica a la propia red de la instalación azucarera.

Teniendo en cuenta los rendimientos máximos de la instalación, la potencia máxima generada por un ciclo simple sería la siguiente:

Energía Máxima en C.C. (MWh)	Rendimiento Instalación (%)	Energía Eléctrica Generada (MWh)
457,825	40	183,130

Tabla 48: Generación Eléctrica Ciclo Simple. Fuente: Elaboración Propia.

3.2.1.2 Ciclo Combinado.

Con el fin de poder aprovechar parte del calor que se pierde a lo largo del ciclo simple en una turbina de gas, se crea el ciclo combinado. Para ello, se crea un segundo circuito de agua que acciona una turbina de vapor para generar más energía.

En el ciclo combinado se distinguen dos circuitos:

- **Ciclo Gas:** Exactamente el mismo ciclo que el descrito en el anterior punto, donde se mezcla el exceso de aire comprimido con el combustible para realizar la combustión y realizar la expansión en la turbina la cual transforma la energía mecánica en eléctrica en un generador.

- **Ciclo de Vapor:** En este caso se utiliza un segundo circuito de agua, en el cual se recoge todo el gas extraído de la turbina del ciclo simple en una caldera de recuperación, aprovechando así su elevada temperatura (350°C aproximadamente) y generando vapor. Más adelante, este vapor es utilizado para mover una nueva turbina de vapor la cual transforma la energía mecánica en eléctrica en un segundo generador. Este ciclo de vapor utiliza siempre el mismo circuito de agua ya que posteriormente pasa a un condensador el cual condensa el agua para volver a ser bombeada a la caldera de recuperación.

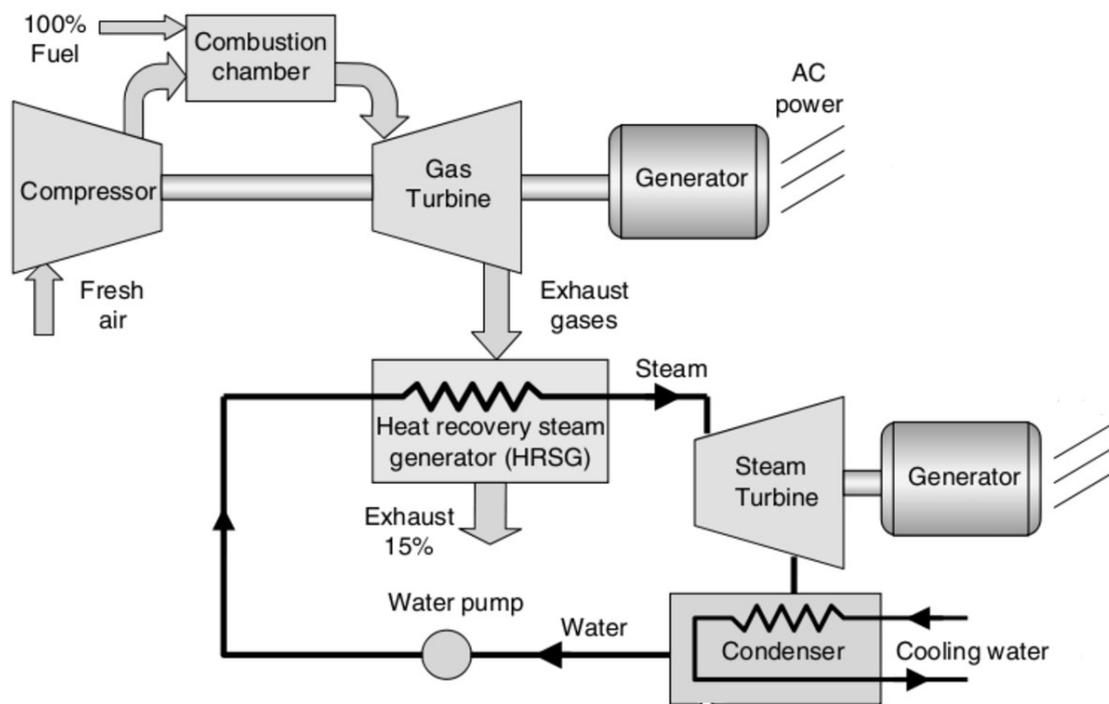


Figura 33: Ciclo Combinado Gas-Vapor.

Gracias pues, a este segundo circuito de vapor, se consigue recuperar parte del calor perdido y por tanto aumentando el rendimiento global de la instalación a un 60%. Cabe destacar que el número de turbinas de gas necesarias para este ciclo combinado sería el mismo con las mismas dimensiones; siendo de dos turbinas de 250MW y 40MW colocadas en paralelo.

Teniendo en cuenta esto, la nueva cantidad de energía eléctrica generada sería:

Energía Máxima en C.C. (MWh)	Rendimiento Instalación (%)	Energía Eléctrica Generada (MWh)
457,825	60	274,695

Tabla 49: Generación Eléctrica del Ciclo Combinado. Fuente: Elaboración Propia.

Al precisar de un nuevo ciclo de vapor en la instalación, esta aumenta enormemente su tamaño y por tanto su inversión, requiriendo de nuevos circuitos de agua en la instalación azucarera y de un espacio mucho mayor. A pesar de esto, la tabla anterior muestra un significativo crecimiento en la energía eléctrica generada de 91,565MWh, y al tratarse de un proyecto de estudio de recuperación de energía se supone un área con unas dimensiones suficientemente grandes como para crear esta instalación. Por tanto, la creación de un ciclo combinado resulta una decisión más factible que un ciclo simple.

3.2.2 Caldera de Vapor.

Al igual que los ciclos con turbinas, esta tecnología también pretende recuperar la toda la energía posible del poder calorífico del metano. Para ello, las calderas de vapor utilizan un proceso de aprovechamiento del calor del combustible de una forma similar al anterior.

Este proceso es muy similar al proceso del circuito de vapor utilizado en el ciclo combinado de turbina de vapor-gas. En primer lugar, el circuito de agua circula por el interior de la cámara de combustión, absorbiendo todo el calor del foco caliente (gases de combustión) al foco frío (agua circulante) posible y convirtiéndose en vapor a una muy alta temperatura (al igual que en el ciclo combinado, en este proceso los gases son expulsados al medio ambiente a la salida de la caldera). Siguiendo el circuito de tuberías, este vapor es nuevamente transportado hasta una turbina de vapor la cual finalmente transforma la energía mecánica de su rotación en energía eléctrica en un generador. Finalmente, el vapor expandido procedente de la turbina de vapor atraviesa un condensador que lo devuelve a su estado líquido, haciéndole circular por una bomba que lo impulsa de nuevo a la caldera.

En particular, la única diferencia entre este proceso y el ciclo de vapor del ciclo combinado, es el aprovechamiento directo de la combustión del combustible para calentar directamente la caldera y aprovechar su poder calorífico. A pesar de ello, en la práctica real se es capaz de conseguir un rendimiento en la caldera de aproximadamente un 70% del calor generado por una combustión completa del combustible.

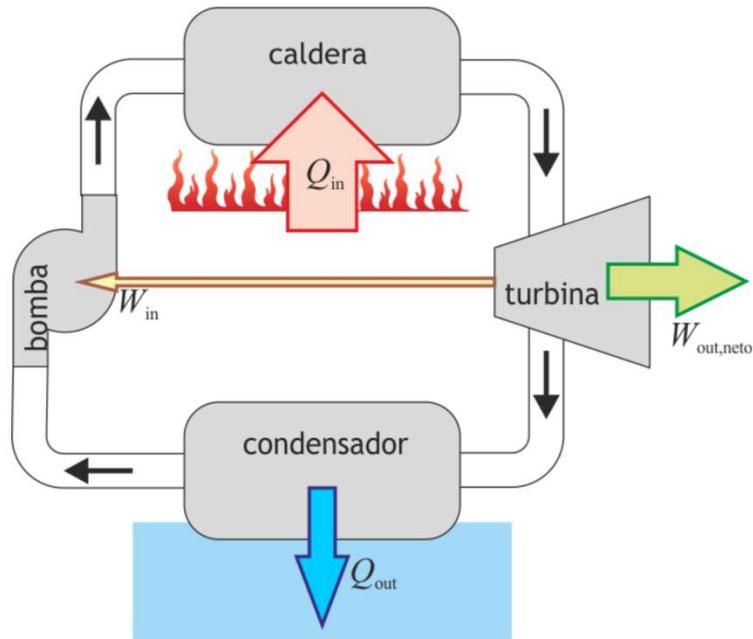


Figura 34: Esquema de Ciclo con Caldera de Vapor.

Teniendo en cuenta el rendimiento de la caldera expuesto anteriormente, el rendimiento máximo de la turbina y suponiendo que no existen pérdidas de calor desde la caldera a esta, se puede hallar el rendimiento total de la instalación. Con este rendimiento se consigue saber entonces el aprovechamiento energético total:

	(%)
Rendimiento Caldera	70
Rendimiento Turbina Vapor	80
Rendimiento instalación	56

Tabla 50: Rendimiento Total de la Instalación. Fuente: Elaboración Propia.

Energía Máxima en C.C.	Rendimiento Instalación (%)	Energía Eléctrica Generada (MWh)
457,8245781	56	256,3817637

Tabla 51: Generación Eléctrica de la Caldera de Vapor. Fuente: Elaboración Propia.

Como se ya podía deducir de la tabla del rendimiento total de la instalación, al ser este mucho menor que el del ciclo combinado, la energía eléctrica generada también lo sería. Dicho esto, como se puede observar en la anterior tabla, la energía generada es mayor que la producida por un ciclo simple con una turbina de gas y a pesar de que su instalación es más aparatosa (debido a la instalación de ambas una turbina, circuito de agua y la caldera), sería la indicada para aprovechar en mayor medida el metano.

3.2.3 Motores Alternativos.

Los motores de combustión interna alternativos, son motores muy utilizados en todo tipo de generación eléctrica, capaces de ser generadores portables, hasta la ser suficientemente grandes como para generar la suficiente electricidad para iniciar la marcha de una instalación. Generalmente estos motores operan haciendo ciclos Diesel utilizando Diesel o derivados del petróleo, pero también son capaces de funcionar con gas natural, propano, gasolina y con una dualidad de combustible que contenga Diesel-gas natural o metano (haciendo también un ciclo Diesel).

El funcionamiento de estos motores es sencillo; el combustible utilizado se coloca en el tanque del motor que va introduciéndose en las cámaras de combustión para que con una mezcla exacta del combustible (Diesel-metano) y aire unidos con una elevada presión, explote, liberando energía. Esta explosión en la cámara de combustión provoca el movimiento de una biela que acciona un cigüeñal que a su vez mueve un alternador transformando la energía mecánica en eléctrica.

No obstante, estos motores alternativos a pesar de ser capaces de generar una potencia de hasta 15MW, poseen un rendimiento muy bajo en comparación con las anteriores tecnologías, llegando a poder generar hasta un 45% de eficiencia eléctrica. Esto es debido a todo el calor desaprovechado de los gases de escape de este método. Una vez hecha la combustión, estos gases transmiten la energía en movimiento e incrementando mucho la temperatura del ambiente y de ellos mismo, y antes de aprovechar esta temperatura son expulsados, para realizar una nueva combustión.

Energía Máxima en C.C.	Rendimiento Instalación (%)	Energía Eléctrica Generada (MWh)
457,8245781	45	206,0210601

Tabla 52: Generación Eléctrica del Motor Alternativo. Fuente: Elaboración Propia.

3.2.4 Cogeneración Eléctrica.

Debido a este déficit de almacenamiento de potencia causado por las pérdidas de calor en los anteriores procesos, surge la idea de la cogeneración eléctrica. Este término se basa en la producción simultánea de dos tipos energía. Normalmente las energías generadas son electricidad y calor, aunque puede ser también energía mecánica y calor. La producción simultánea supone que puede ser utilizada simultáneamente, lo que implica proximidad de la planta generadora a los consumos, en contraposición al sistema convencional de producción de electricidad en centrales termoeléctricas independientes, donde también se desprende calor, pero éste no es aprovechado y ha de ser eliminado al ambiente. Hay que recordar que la termodinámica obliga a la

evacuación de una cierta cantidad de calor en todo proceso térmico de producción de electricidad, ya que todo el calor absorbido no puede transformarse en trabajo.⁸

Con ello, se puede aprovechar el calor no utilizado por el resto de métodos estudiados. No obstante, como su mismo nombre indica, la cogeneración ha de depender de las tecnologías anteriormente descritas para poder así generar la electricidad y además almacenar el calor. Este calor puede ser utilizado más adelante en calderas recuperadoras de calor, intercambiadores de calor o incluso en unidades de absorción que producen frío.

Gracias a esto se pueden obtener unos rendimientos de instalación completa mucho mayores que los anteriores, llegando al 85% en turbinas de gas y vapor, y en un 90% en los motores alternativos.

Tecnología	Energía Máxima en C.C. (MWh)	Rendimiento Eléctrico (%)	Rendimiento Calor (%)	Rendimiento Instalación	Energía Generada (MWh)
Motores y Cogeneración	457,8245	45	45	90	412,0421
Turbina de Gas Cogeneración	457,8245	40	45	85	389,1508
Caldera Vapor Cogeneración	457,8245	56	30	86	393,7291

Tabla 53: Generación Eléctrica con Cogeneración. Fuente: Elaboración Propia.

Como se puede observar la instalación que ofrece un mayor rendimiento energético es la creada por motores alternativos junto con cogeneración. Además de ello, posee diferentes ventajas frente a las demás:

- El **coste de producción** es menor que el resto de las instalaciones sugeridas en el capítulo.
- Su **consumo de combustible** disminuye ya que debido al segundo aprovechamiento energético no se requiere de su funcionamiento durante unos periodos de tiempo tan elevados.
- El **Impacto Ambiental** producido por esta instalación es mucho menor, ya que los gases de escape son aprovechados y se requiere de un menor tiempo de combustión por el combustible.

⁸ <http://www.plantasdecogeneracion.com/index.php/las-plantas-de-cogeneracion>

- **Construcción menos costosa** no se requiere de un amplio espacio para la construcción de la instalación y los motores de cogeneración poseen unas dimensiones mucho menores que las turbinas de generación eléctrica.

Por todas estas razones, se considera la tecnología más óptima para implementarla en la industria azucarera y utilizar tanto su energía calorífica como eléctrica en la instalación. En principio se decide utilizar la energía eléctrica para alimentar a la instalación general y consumir por tanto menos potencia, y el uso de la energía calorífica para la etapa de calentamiento y secado de las cosetas y el azúcar refinado limitando así todo consumo extra innecesario.

Energía Generada (MWh)	
Rendimiento eléctrico (%)	Energía Eléctrica
45	206,02105
Rendimiento Calor (%)	Energía Calor
45	206,02105
Energía Total Generada (MWh)	412,0421

Tabla 54: Generación Total de Energía. Fuente: Elaboración Propia.

Capítulo 4. IMPACTO AMBIENTAL.

1. MATRIZ DE IMPACTO.

Finalmente, se pretende realizar una breve descripción de los efectos nocivos más relevantes que se pudiesen producir en el medio ambiente, ambos, durante la etapa de construcción de la estación de aguas residuales, como durante el funcionamiento de la instalación de azúcar y EDAR.

Con el objeto de analizar los impactos asociados a los impactos ambientales, se utilizan análisis que relacionan la actividad hecha por la instalación con el medio ambiente y se identifica si este está dañando o no, el medio comparado. Por ello, en este caso se ha realizado una identificación de impactos realizados por las acciones llevadas a cabo por la EDAR. Para realizar este método se ha decidido utilizar el método de la *matriz de Leopold* que muestra la interacción entre ambos. Esta matriz muestra de una forma cualitativa el impacto ambiental de la forma descrita anteriormente y cabe destacar que según el tipo de proyecto que se lleve a cabo y las dimensiones de este, también afectan a las dimensiones de la matriz y las acciones que tienen consecuencias negativas con el medioambiente.

El sistema expuesto por la *Matriz de Leopold* consiste en representar en las columnas las actividades realizadas durante el proyecto (en este caso durante su construcción y el funcionamiento de la instalación), y en las filas de la misma matriz los factores ambientales que se considera que están siendo dañados de forma positiva o negativa. En primer lugar se determina el tipo de impacto que se genera en el medio por cada actividad, ya que estos pueden acarrear tanto una acción positiva en el medio (como pueden ser las actividades que alteran el medio socio-económico) como una acción negativa (contaminación de las aguas). Una vez realizado este proceso las interacciones se evalúan con dos números, el primero que indica la magnitud del impacto afectado (número del -10 – 10) y el otro que muestra la importancia de dicha acción (0-10).

Para este proyecto en concreto se ha realizado un análisis cualitativo del medio realizando solo una toma de contacto con las interacciones entre las acciones de la EDAR diseñada y el medioambiente. Por tanto, solo se ha realizado la primera matriz que muestra el impacto positivo o negativo entre ambas.

Por último, se han de definir las actividades realizadas durante todo el proceso y transcurso del proyecto que puedan producir impactos ambientales, tales como: vertidos controlados e incontrolados en las agua y alcantarillado, otro tipo de residuos como partículas sólidas que puedan resultar peligrosas, emisión de gases hacia la atmosfera (en especial debidos a las digestiones), explotación del suelo, el ruido generado, flora y fauna que pueda ser destruida, repercusiones en la vida de la gente, vertidos de combustibles, emisiones de calor debido al funcionamiento de la planta (cogeneración y utilización de la digestión anaerobia)...

Con todo ello se ha realizado la siguiente matriz en la Tabla 55 que sigue el procedimiento descrito y la legislación vigente de la epa para el estudio del impacto ambiental.

Finalmente, observando la tabla se puede concluir que a pesar de que algunas de las acciones posean un impacto negativo alto en ciertos aspectos medioambientales, la instalación diseñada no genera un impacto medioambiental elevado. En primer lugar todos sus vertidos (principalmente de agua) siguen la legislación vigente y reducen su contaminación al máximo para poder ser reutilizados en la propia instalación. Además, reutiliza toda la energía posible del biogás generado en sus digestiones, liberando hacia la atmósfera cantidades pequeñas de Gas del cual se ha realizado una combustión completa.

MATRIZ DE EVALUACIÓN DE IMPACTOS POTENCIALES																		
		ACTIVIDADES	CONSTRUCCIÓN									EXPLOTACIÓN						
			ADQUISICION DEL TERRENO	VIA DE ACCESO	CANAL PLUVIAL	CORTE Y TRATAMIENTO DEL SUELO SOPORTE	CANAL DE LIXIVIADOS	CANAL DE GASES	CONSTRUCCION DE ZANJAS PARA LAS FOSAS	INFRAESTRUCTURA AUXILIAR	RECOLECCIÓN Y TRANSPORTACIÓN	FUNCIONAMIENTO INSTALACION	VERTIDOS ACCIDENTALES	PRODUCCIÓN DE RESIDUOS	GENERACIÓN DE RUIDOS	CANAL DE GASES	PRODUCCIÓN DE OLORES	RECOLECCIÓN Y TRANSPORTACIÓN
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	9
MEDIO BIOFISICO	ELEMENTOS AMBIENTALES																	
	SUELO	TEXTURA Y ESTRUCTURA	A	Yellow	Red	Red	Red		Yellow			Yellow						
		TOPOGRAFIA	B	Yellow	Red	Yellow	Red		Yellow									
		COMPACTACION	C	Red	Yellow	Yellow	Yellow	Green										
	AGUA	CALIDAD	D	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow		Yellow			Green	Yellow	Yellow				
		CAUDALES Y CAUCES	E	Yellow	Yellow	Yellow			Yellow			Green	Yellow	Yellow				
	FLORA	COBERTURA VEGETAL	F	Yellow		Yellow			Yellow					Yellow				

SIMBOLOGIA

Magnitud Impacto negativo positivos

Alta Baja

Red box Green box

Yellow box Blue box

BIBLIOGRAFÍA

- [GMTD] Guía MTD en España Sector Azucarero.
- [EMGM] EDAR Marin Galvin Microbiología.
- [CTMA] Ciencia y Tecnología del Medioambiente.
- [T5AP1] Apuntes ICAI Tema 5 Medioambiente Parte 1.
- [T5AP2] Apuntes ICAI Tema 5 Medioambiente Parte 2.
- [T5AP3] Apuntes ICAI Tema 5 Medioambiente Parte 3.
- Energy Biogas; Digestión Anaerobia disponible en web:
<http://www.ad3energy.com/biogas/digestion-anaerobia/>
- [CMEM] Combustión, Apuntes del Ministerio de Energía y Minas Ecuador. Disponible en web:
<http://www.cds.espol.edu.ec/documentos/apuntes%20de%20combustion.pdf>
- [GFDERTC] Gas-Fired Distributed Energy Resource Technology Characterization.
- [PRC] Potencia y Rendimiento de la Caldera. Disponible en Web:
<https://es.slideshare.net/joseantoniosanchezmarin56/potencia-y-rendimiento-de-la-caldera>
- [RATAR] Apuntes de Reactores Anaeróbicos para el Tratamiento de Aguas Residuales.
- [EBM] Energía de la Biomasa. Disponible en Web:
https://fjarabo.webs.ull.es/Biomasa/Bio04/Bio04_42.htm

