



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

**SELECCIÓN DEL TAMAÑO Y TIPO DE TURBINA A UTILIZAR EN UNA HIDROELÉCTRICA
EN EL RÍO VILLALOBOS**

Karen Yasmín Pérez Villeda

Asesorada por el Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez

Guatemala, mayo de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**SELECCIÓN DEL TAMAÑO Y TIPO DE TURBINA A UTILIZAR EN UNA
HIDROELÉCTRICA EN EL RÍO VILLALOBOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

KAREN YASMÍN PÉREZ VILLEDA

ASESORADA POR EL ING. CARLOS HUMBERTO PÉREZ RODRÍGUEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA MECÁNICA

GUATEMALA, MAYO DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Julio César Rivera Peláez
EXAMINADOR	Ing. Gilberto Enrique Morales Baiza
EXAMINADOR	Ing. José Ismael Véliz Padilla
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

SELECCIÓN DEL TAMAÑO Y TIPO DE TURBINA A UTILIZAR EN UNA HIDROELÉCTRICA EN EL RÍO VILLALOBOS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 29 de noviembre de 2017.



Karen Yasmín Pérez Villeda

Guatemala, 18 de marzo de 2019

Ingeniero
Julio Cesar Campos Paiz
Director de Escuela de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería
USAC

Ingeniero Campos:

Por medio de la presente me dirijo a usted, para a hacer de su conocimiento que, como asesor de la estudiante universitaria, Karen Yasmín Pérez Villeda, con registro académico: 201212662 y CUI: 2298270120115, he revisado el trabajo de graduación titulado: "**SELECCIÓN DEL TAMAÑO Y TIPO DE TURBINA A UTILIZAR EN UNA HIDROELÉCTRICA EN EL RÍO VILLALOBOS**", el cual encuentro satisfactorio.

En tal concepto, **lo doy por aprobado**, solicitándole darle el trámite respectivo. Sin otro particular, me es grato suscribirme,

Atentamente



Carlos Humberto Pérez Rodríguez
INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL
Colegiado 3071

Carlos Humberto Pérez Rodríguez
Ingeniero Mecánico Industrial
Colegiado No. 3071



USAC

TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.071.2019

El Coordinador del Área Complementaria de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado: **SELECCIÓN DEL TAMAÑO Y TIPO DE TURBINA A UTILIZAR EN UNA HIDROELÉCTRICA EN EL RÍO VILLALOBOS** desarrollado por la estudiante **Karen Yasmín Pérez Villeda**, CUI **2298270120115** y Reg. Académico No. **201212662** recomienda su aprobación.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
Coordinador Área Complementaria
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala, marzo 2019



USAC

TRICENTENARIA

Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.111.2019

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y con la aprobación del Coordinador del Área Complementaria del trabajo de graduación titulado: **SELECCIÓN DEL TAMAÑO Y TIPO DE TURBINA A UTILIZAR EN UNA HIDROELÉCTRICA EN EL RÍO VILLALOBOS** desarrollado por la estudiante **Karen Yasmín Pérez Villeda**, CUI **2298270120115** y Reg. Académico No. **201212662** y luego de haberlo revisado en su totalidad, procede a la autorización del mismo.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Julio César Campos Paiz
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala, mayo de 2019

/aej

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 235.2019

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al Trabajo de Graduación titulado: **SELECCIÓN DEL TAMAÑO Y TIPO DE TURBINA A UTILIZAR EN UNA HIDROELÉCTRICA EN EL RÍO VILLALOBOS**, presentado por la estudiante universitaria: **Karen Yasmín Pérez Villeda**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, mayo de 2019

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por ser la fuente de bendiciones en mi vida y darme una vida llena de propósitos.
Mi familia	Porque este logro es de todos.
Mis amigos	Por compartir cada momento especial en esta etapa de mi vida.
A mis catedráticos	Porque mis cimientos son sus conocimientos compartidos en clase.
Compañeros de trabajo	Por tener la confianza en mis aptitudes.
Mi mejor amiga	Joanne Golib. Para motivarte a seguir esforzándote como hasta ahora.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser la historia que me identifica con mi querido pueblo de Guatemala.
Facultad de Ingeniería	Porque me enseñó a estudiar de noche y de día, teniendo presente siempre nuestro lema.
Mi madre	Agda Judith Villeda Álfaro. Por hacerme una mujer diferente a lo que la sociedad establece.
Mis abuelitos	Nelita y Juan Villeda. Por ser mi apoyo, consejeros y estabilidad en mi vida.
Mi tía	Dorita Villeda. Por darme consejos y siempre estar presente en cada etapa de mi vida.
Mi tío	Carlos Villeda. Por ser el papá que necesité en mi infancia.
Mis hermanos	Josué y Kevin. Por siempre tenerlos a mi lado a pesar de cualquier circunstancia.
Mis amigos	Porque siempre estuvieron prestos a ayudarme cuando se los pedía.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. ANTECEDENTES	1
1.1. Microcuencas que forman el Río Villalobos	1
1.2. Ubicación geográfica del Río Villalobos y sus microcuencas.....	2
1.3. Desembocadura del Río Villalobos	4
1.4. Estudios del potencial hidráulico del Río Villalobos	5
2. TURBINAS	7
2.1. Definición de turbina	7
2.2. Clasificación de turbinas	9
2.2.1. Según el grado de reacción.....	9
2.2.1.1. Turbinas de acción	9
2.2.1.2. Turbinas de reacción	16
2.2.2. Según el número específico de revoluciones.....	25
2.3. Criterios para seleccionar turbinas.....	33
3. POTENCIAL HIDRÁULICO Y CONDICIÓN DEL RÍO VILLALOBOS	37
3.1. Medición de gastos hidráulicos	37
3.1.1. Aforo del método del correntómetro	38

3.1.2.	Aforo con linnímetros y limnógrafos	39
3.1.3.	Aforo con flotadores	41
3.2.	Gasto real del Río Villalobos	43
3.3.	Condición del agua del Río Villalobos	46
3.4.	Tratamientos de limpieza para los lodos del Río Villalobos.....	49
3.4.1.	Tratamientos para la eliminación de materia en suspensión.....	50
3.4.1.1.	Desbaste	51
3.4.1.2.	Sedimentación	51
3.4.1.3.	Filtración.....	53
3.4.1.4.	Flotación.....	54
3.4.1.5.	Coagulación y Floculación	56
3.4.2.	Tratamientos para la eliminación de materia disuelta	57
3.4.2.1.	Precipitación.....	58
3.4.2.2.	Procesos electroquímicos	58
3.4.2.3.	Intercambio Iónico	60
3.4.2.4.	Adsorción	61
3.4.2.5.	Desinfección.....	63
3.4.3.	Tratamientos biológicos	64
3.4.3.1.	Procesos biológicos aerobios.....	66
3.4.3.1.1.	Fangos activados: proceso básico ...	66
3.4.3.1.2.	Fangos activados: modificaciones del proceso básico	68
3.4.3.1.3.	Procesos aerobios con biomasa soportada	69
3.4.3.2.	Procesos biológicos anaerobios.....	71
3.4.3.2.1.	Condiciones de operación.....	74
3.4.3.2.2.	Reactores utilizados	75

3.4.3.3.	Procesos biológicos de eliminación de nutrientes.....	79
3.4.3.3.1.	Tratamiento biológico de compuestos con nitrógeno.....	80
4.	SELECCIÓN DEL TIPO Y TAMAÑO DE TURBINA A UTILIZAR EN UNA HIDROELÉCTRICA EN EL RÍO VILLALOBOS.....	85
4.1.	Potencia de la turbina	88
4.2.	Clasificación de la turbina	89
4.2.1.	Velocidad específica de revoluciones	89
4.3.	Dimensiones principales de la turbina	91
4.3.1.	Características del rodete	91
4.3.1.1.	Velocidad de giro del rodete.....	92
4.3.1.2.	Número de álabes del rotor	92
4.3.2.	Diseño del inyector.....	93
5.	BENEFICIOS DE LA UBICACIÓN DE UNA HIDROELÉCTRICA EN EL RÍO VILLALOBOS.....	95
5.1.	Generación de energía eléctrica.....	95
5.1.1.	Potencia instalada.....	95
5.1.2.	Potencia generada	96
5.2.	Clasificación del tipo de central hidroeléctrica	97
5.2.1.	Según el tipo de embalse.....	97
5.2.2.	Según la potencia.....	98
5.2.3.	Según la altura de salto.....	98
5.3.	Impacto en desastres naturales	98
5.3.1.	Contención de basura	99
5.3.2.	Contención de crecidas.....	100

CONCLUSIONES..... 101
RECOMENDACIONES..... 103
BIBLIOGRAFÍA..... 105

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Cuencas del Río Villalobos.....	3
2.	Desembocadura del Río Villalobos en el Lago de Amatitlán	4
3.	Elementos constitutivos de una turbina	8
4.	Turbina Pelton	10
5.	Turbina Pelton	12
6.	Tipos de turbinas Pelton.....	13
7.	Turbina Pelton de eje horizontal.....	13
8.	Turbina Michell Banki	14
9.	Turbina Turgo.....	16
10.	Turbina Francis de eje horizontal	17
11.	Turbina Francis – Radio axial.....	19
12.	Turbina Francis de eje vertical y horizontal	21
13.	Turbina Kaplan	22
14.	Turbina hélice de eje horizontal.....	24
15.	Hidrogrupos con turbinas hélice	25
16.	Variación de tamaño del rodete en función de la velocidad específica y rango de aplicación por caída de las turbinas	33
17.	Selección de turbinas	35
18.	Curva de calibración del linnímetro	40
19.	Ancho del cauce.....	41
20.	Caudales del año 2016 del Río Villalobos	44
21.	Caudales del año 2017 del Río Villalobos	44
22.	Caudales del año 2018 del Río Villalobos	45

23.	Caudales máximos y mínimos de los años 2016, 2017 y 2018 del Río Villalobos.....	45
24.	Proceso de fangos activados	67
25.	Proceso biológico de contacto y estabilización	69
26.	Diagrama de operación típico de un filtro percolador.....	70
27.	Esquema de la ruta de degradación anaerobia	73
28.	Reactor anaerobio de contacto	76
29.	Reactor de manto de lodos y flujo ascendente	77
30.	Tratamiento biológico de compuestos con nitrógeno	80
31.	Proceso biológico de nitrificación y desnitrificación	81
32.	Canal de oxidación.....	82
33.	Embalse para turbina.....	87
34.	Selección del tipo de turbina a utilizar en una hidroeléctrica en el Río Villalobos	88
35.	Velocidad específica de revoluciones	90
36.	Vista lateral del inyector.....	93

TABLAS

I.	Caracterización física de las microcuencas del Río Villalobos.....	1
II.	Ubicación geográfica de las microcuencas del Río Villalobos	3
III.	Parámetros de velocidad específica y caída para diferentes tipos de turbina	32
IV.	Rango de caída para diferentes tipos de turbinas.....	34
V.	Caudal del Río Villalobos en los meses de febrero, marzo y abril del año 2018	43
VI.	Métodos de eliminación de compuestos orgánicos en aguas residuales	49
VII.	Caudales medios mínimos y máximos en m ³ /s.....	86

VIII.	Caudales y salto para entrada a la turbina	88
IX.	Potencia instalada para caudal máximo y mínimo	96
X.	Potencia instalada y generada para caudal máximo y mínimo.....	97

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
cm	Centímetro
KgDQO/m³-día	Kilogramo de demanda química de oxígeno sobre metro cúbico por día
kW	Kilowatt
L/s	Litros sobre segundo
m	Metros
m³/s	Metros cúbicos sobre segundos
m/s²	Metros sobre segundos al cuadrado
m/s	Metros sobre segundo
mg/L	Miligramos sobre litro
mm	Milímetro
pH	Porcentaje de hidrógeno en una sustancia
rpm	Revoluciones por minuto

GLOSARIO

Aditivo	Sustancia química que se añade a una sustancia para que su desarrollo sea más eficiente.
Aerobio	Necesita respirar oxígeno para vivir o desarrollarse.
Aforo	Medición del volumen de agua que fluye por un cauce en un tiempo determinado.
Álabe	Paleta curva de una turbina que le da dirección al flujo que pasa dentro de ella.
AMSA	Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y lago de Amatitlán.
Anaerobio	Se desarrolla sin necesidad de oxígeno.
Calibración	Proceso que se le realiza a un instrumento de medición para saber la exactitud de sus resultados.
Caudal	Magnitud de volumen de un fluido que luye en un cauce en un tiempo determinado.
Cavitación	Formación de cavidades de vapor o gas, cuando la presión del líquido es inferior a la del vapor.

Coagulación	Proceso en que una sustancia pasa de estado líquido a un estado semisólido.
Conducto	Tubo construido para conducir fluidos de un lugar a otro.
Cuenca	Extensión de terreno ancha y no tan profunda, cuyas aguas se vierten en un río, lago o mar.
Embalamiento	Incremento significativo de la velocidad de un generador al reducirse la potencia eléctrica.
Embalse	Depósito artificial de agua; que retiene las aguas de un río o de lluvia.
Energía	Capacidad que tiene la materia para producir un trabajo en forma de movimiento, calor, entre otros.
Estiaje	Nivel más bajo de caudal de un río durante una época del año determinada.
Eutrofización	Acumulación de residuos orgánicos en litoral que causa proliferación de algas.
Eyector	Bomba que sirve para expulsar un fluido a gran velocidad mediante la corriente de otro fluido.
Hélice	Mecanismo compuesto por varias aspas; que al girar desplazan el fluido en el que están.

Lecho	Cauce de un río por donde corren sus aguas.
Oxidación	Mayor presencia de oxígeno en un cuerpo y menor número de electrones de alguno de los átomos.
Reactor	Maximiza la conversión y selectividad de una reacción a un menor costo.
Tobera	Abertura tubular de una turbina; por donde entra el fluido.

RESUMEN

El Río Villalobos es alimentado por nueve microcuencas, las cuales le permiten que tenga un recorrido de 21,8 km partiendo por zonas de la Ciudad capital de Guatemala y terminando en el desemboque que hace al Lago de Amatitlán. Debido a su trayecto este río arrastra desechos de aguas pluviales, industriales, orgánicos, inorgánicos, plásticos, entre otros.

Debido al cauce que lleva el Río Villalobos se busca implementar una central hidroeléctrica para transformar la energía hidráulica del cauce del río a energía mecánica, por medio de una turbina que es una máquina hidráulica cuyo fin es transformar la energía que transportan las aguas del río a una energía de rotación que, acoplada a un generador, permite generar energía eléctrica. Estas máquinas variarán según el grado de reacción del fluido, teniendo así turbinas de reacción como las Pelton y Michell Banki, y, las de acción como las Kaplan, Francis, Turgo, entre otras, variando su selección por el caudal y salto con que se pueda contar en las aguas del Río Villalobos.

Debido a los altos porcentajes de contaminación de las aguas del Río Villalobos; se pueden aplicar distintos tratamientos fisicoquímicos, teniendo sedimentación para desechos en suspensión, adsorción para sólidos disueltos, entre otros. El caudal obtenido del Río Villalobos, luego de colocar un embalse, permite seleccionar una turbina Michell Banki con un tamaño para potencia instalada que clasifica a la central como una minicentral hidroeléctrica. Así también, con la instalación de una central hidroeléctrica y un embalse, se podrá colaborar al medio ambiente por medio de captación de desechos sólidos y contención de crecidas.

OBJETIVOS

General

Seleccionar el tamaño y tipo de turbina a utilizar en una hidroeléctrica en el Río Villalobos.

Específicos

1. Recabar información para proyectar una central hidroeléctrica.
2. Conocer la condición de los sólidos en suspensión que transportan las aguas del Río Villalobos para selección del tipo de turbina a utilizar en una hidroeléctrica en este río.
3. Realizar un estudio de las magnitudes del gasto hidráulico que brinda el Río Villalobos.
4. Aplicar métodos hidráulicos para conocer el tipo y tamaño requeridos para la turbina a utilizar en la hidroeléctrica en el Río Villalobos.
5. Identificar los tamaños y tipos de turbina que se acoplan a las características que ofrece el Río Villalobos.
6. Proyectar los beneficios para la comunidad cercana para la generación de electricidad en la conservación del medio ambiente.

INTRODUCCIÓN

El Río Villalobos es un afluente que no solamente arrastra grandes cantidades de desechos sólidos, sino también disueltos o biológicos hacia el Lago de Amatitlán, esto debido a su recorrido desde zonas de la Ciudad capital de Guatemala, pasando por el Municipio de Villa Nueva, San Miguel Petapa y Villa Canales, teniendo un total de 21,8 km de distancia.

Así mismo, la demanda de energía eléctrica en el país aumenta cada vez más, debido al crecimiento de la población y desarrollo de esta, es por ello que se plantea qué tan eficiente es colocar una central hidroeléctrica en un punto óptimo del Río Villalobos, para así poder generar energía eléctrica por medio una turbomáquina conectada a un generador eléctrico, para también lograr contener la basura que entra al Lago de Amatitlán por medio del Río Villalobos.

La turbomáquina que se requiere para esta aplicación es una turbina que permite transformar la energía hidráulica que transporta las aguas del Río Villalobos en energía mecánica, siendo esta reflejada en la rotación de un eje, para lo cual se requiere conocer el caudal y salto que brinda el Río Villalobos.

El caudal se obtuvo por parte de la división de control, calidad ambiental y manejo de lagos de AMSA, que es la Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Amatitlán, medido por medio del método de correntómetro. La condición del terreno en donde desemboca el Río Villalobos, que es llanura, no permite tener un salto hidráulico alto o significativo de manera natural, por lo cual se plantea contar con un embalse para poder obtener un caudal constante, un salto por diseño y, así también, tratar las aguas previo al ingreso a la casa de

máquinas, ya que estos desechos dañarían drásticamente la estructura mecánica de la turbina, como también de la tubería que conduzca del embalse a la turbina. Con esta aplicación se estaría proveyendo una generación de energía eléctrica para poblaciones aledañas, y también se estaría eliminando en su mayoría el aumento de cargas contaminantes al Lago de Amatitlán, ayudando entonces a la renovación de este, así como a contener crecidas por aguas de lluvias, evitando inundaciones a poblados cercanos.

1. ANTECEDENTES

1.1. Microcuencas que forman el Río Villalobos

El Río Villalobos es una cuenca corta de la República de Guatemala, transcurre por el Departamento de Guatemala, en especial por algunas zonas de la Ciudad Capital, cuenta con una longitud de 21,8 km con un perímetro aproximado de 58 km. Este río se ve incluido en la cuenca del Lago de Amatitlán. Está formado por varios ríos tributarios, en los cuales se pueden mencionar los ríos Platanitos, Molino, Pinula, Las Minas, San Lucas y Parrameño, Tulujá, El Bosque.

Tabla I. **Caracterización física de las microcuencas del Río Villalobos**

Microcuenca	Área (ha) (miles)	%Área	Longitud (km)	Ancho (km)	Perímetro (km)
Platanitos	5 003	13,17	16,00	6,10	43,50
Amatitlán	6 384	16,80	23,35	11,43	44,62
El Bosque	656	1,73	5,05	2,30	13,75
Tulujá	1 130	2,98	6,75	3,90	17,00
Las Minas	5 480	14,36	9,90	6,50	28,00
Villalobos	4 002	10,53	21,80	6,75	58,00
Pinula	4 563	12,00	38,65	3,95	45,00
Molino	4 810	12,66	19,10	4,00	44,50
San Lucas	4 355	11,46	11,35	5,00	34,12
Parrameño	1 639	4,31	10,50	3,00	24,37
Total	38 000	100,00			

Fuente: MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS. *Estudios recientes sobre la contaminación del lago de Amatitlán.* p. 28

1.2. Ubicación geográfica del Río Villalobos y sus microcuencas

El Río Villalobos se empieza a formar en la unión de las microcuencas Molino y San Lucas, a la altura del kilómetro 12,5 que se localiza en la ruta CA-9 al Pacífico. La principal cuenca del Río Villalobos se localiza dentro del sistema montañoso, formado por la faja volcánica del Pacífico que atraviesa el país. La microcuenca Platanitos se encuentra localizada en los municipios de Villa Nueva y San Miguel Petapa, departamento de Guatemala, Guatemala. Este caudal nace al Occidente de la aldea Ramírez, de la unión del Río Mashul y la quebrada del Río Tabón. Por su curso de NO a SO atraviesa la aldea Ramírez y pasa al Sur de la aldea Najerita. La microcuenca San Lucas se forma al Sur de la cabecera San Lucas Sacatépequez, al Este del caserío San José. Su curso va en dirección Oeste a Este, atraviesa la aldea Chacorrall y al Sureste a la aldea Aguacate, recibe el Río Mansilla, al continuar su trayecto al Sur atraviesa el caserío Villalobos, donde se une con el afluente del Río Molino. El Río Molino nace al Norte del municipio de Mixco, Guatemala; de la unión de los ríos Panchocá y Pansalic. El trayecto del Río Molino se encuentra localizado entre los municipios de Mixco, Guatemala y Villa Nueva, departamento de Guatemala. El Río Pinula nace al Sureste del municipio de San José Pinula, su trayecto es hacia el Oeste de la finca La Laguna. La microcuenca recibe las afluencias de las quebradas de Las Flores y La Cuya. El Río Parrameño se origina como Río La Embaulada, su curso es de NO a SE, pasa por la aldea Zorzoyá y al Norte de la Casería La Embaulada, corre al Oeste del caserío El Calvario y al Este del caserío El Carmen donde cambia su curso al Este, luego al Sur del caserío Villalobos, que es donde se da la descarga en el Río Villalobos. El Río El Bosque se encuentra localizado en el municipio de Villa Canales, departamento de Guatemala, el cuerpo de la microcuenca se origina al Este de la finca Candelaria y su movimiento es de SE a NO, en su trayecto atraviesa al Sur la aldea Colmenas y cruza al Sur de la cabecera municipal de Villa Canales, y finalmente descarga en el Río Villalobos.

La microcuenca Las Minas pertenece también al municipio de Villa Canales, departamento de Guatemala, donde luego de realizar su trayectoria descarga en el Río Villalobos. El Río Tuluja nace en el municipio de Villa Canales y recorre 6,4 km en el municipio de San Miguel Petapa, mientras que el municipio de Villa Nueva hace un recorrido de 10,4 km para llevar a cabo su descarga en el Río Villalobos.

Figura 1. **Cuencas del Río Villalobos**



Fuente: AMSA. 2010.

Tabla II. **Ubicación geográfica de las microcuencas del Río Villalobos**

Microcuenca	Latitud	Longitud
Platanitos	14,525556	-90,5875
El Bosque	14,483333	-90,5333
Tuluja	14,4833	-90,5333
Parrameño	14,525556	-90,5875
Las Minas	14,4480	-90,3883
Molino	14,68333	-90,5166
Pinula	14,525556	-90,412778
San Lucas	14,60833	-90,656111

Fuente: elaboración propia.

1.3. Desembocadura del Río Villalobos

La desembocadura del Río Villalobos se da en el Lago de Amatitlán formando un desemboque tipo delta, este es un accidente geográfico ocasionado por la desembocadura de sedimentos fluviales que ahí se depositan, tomando una forma triangular. En los últimos años se observó un crecimiento acelerado de urbanización y deforestación en las márgenes del río; con ello se ha contribuido el proceso de eutrofización del lago. En la desembocadura del Río Villalobos se encuentra una laguna de retención de sedimentos, desarrollada por parte de la Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán (AMSA). El proyecto consiste en colocar una barrera de rocas y suelos, con la finalidad de represar el agua del Río Villalobos en la parte de la desembocadura, formando así la decantación de sedimentos y captación de desechos sólidos, donde se tiene un estimado de 3 millones de libras de basura diaria producidas por los habitantes y; que entran al lago. El Río Villalobos tiene el 80 % de estos residuos.

Figura 2. **Desembocadura del Río Villalobos en el Lago de Amatitlán**



Fuente: AMSA. *Depuración de las aguas residuales del río Villalobos.*

<http://amsa.gob.gt/web/depuracion-de-las-aguas-residuales-del-rio-villa-lobos/>. Consulta: mayo 2017.

1.4. Estudios del potencial hidráulico del Río Villalobos

El Río Villalobos es el mayor afluente del Lago de Amatitlán, donde sus aguas son drenadas del Río Michatoya; hacia el Río María Linda, que desemboca en el Océano Pacífico. El área tributaria de la cuenca del Río Villalobos hasta el sitio de desembocadura es de 321 km² y la longitud más larga del cauce principal es de 40 km, a lo largo del Río Molino. La pendiente media del cauce principal es de 2,6 %, mientras que el 15 % superior y 15 % inferior del mismo tiene una pendiente de 3,5 y 0,5 %, respectivamente.

Al Lago de Amatitlán lo maneja AMSA, ubicada en el kilómetro 22, ruta al Pacífico, Villa Nueva, Guatemala. Incluye la división de control, calidad ambiental y manejo de lagos que aportan un caudal al Lago de Amatitlán, entre estos está el Río Villalobos, su función específica es el monitoreo frecuente en la determinación de caudal de estiaje, parámetros fisicoquímicos, microbiológicos, metales pesados y bioindicadores con macroinvertebrados bénticos del Río Villalobos.

Según los estudios realizados por AMSA, hay una variación drástica de los caudales para época seca y época lluviosa, esto se debe al elevado porcentaje de superficie impermeable, lo cual reduce la capacidad de infiltración de agua en los suelos, convirtiéndose la misma en escorrentía.

2. TURBINAS

2.1. Definición de turbina

La turbina es el equipo que se utiliza para llevar a cabo la transformación de energía hidráulica en energía mecánica, estando acoplada directamente a un generador eléctrico. La turbina es una máquina hidráulica conocida también como turbomáquina motora, por lo que es una bomba rotodinámica que trabaja a la inversa. La turbina absorbe energía del fluido y la restituye en energía mecánica. Los elementos constitutivos de una turbina son análogos a los de una bomba, pero dispuestos en orden inverso:

- Distribuidor: es un elemento estático; que no posee velocidad angular y en este no se produce trabajo mecánico, sus funciones son:
 - Acelerar el flujo al transformar total (turbinas de acción); o parcialmente (turbinas de reacción) la energía potencial del agua en energía cinética.
 - Dirigir el agua hacia el rodete, siguiendo una dirección adecuada.
 - Actuar como órgano regulador de caudal.

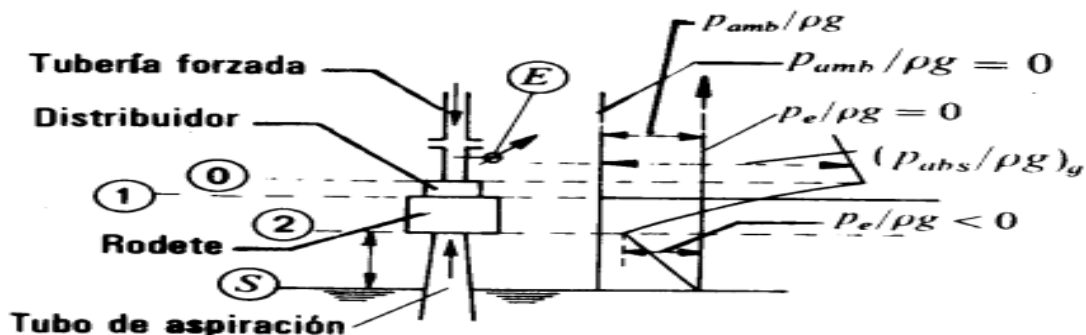
El distribuidor en las turbinas de reacción tiene las siguientes formas: radial, semiaxial y axial y en las turbinas de acción es un inyector.

- Rodete: también se le puede llamar rotor, es un elemento y órgano fundamental de las turbinas hidráulicas; consta esencialmente de un disco provisto de un sistema de álabes, paletas o cucharas, que está animado

por una cierta velocidad angular. La transformación de la energía hidráulica del salto en energía mecánica se produce en el rodete, mediante la aceleración y desviación, o por la simple desviación del flujo de agua a su paso por los álabes.

- Tubo de aspiración: este elemento, muy común en las turbinas de reacción, ocasionalmente se usa en las turbinas de acción. Se instala a continuación del rodete y por lo general tiene la forma de un conducto divergente, puede ser recto o acodado, y cumple las siguientes funciones: recuperar altura entre la salida del rodete y el nivel del canal de desagüe y recuperar una parte de la energía cinética correspondiente a la velocidad residual del agua en la salida del rodete, a partir de un diseño del tipo difusor.
- Carcasa: este elemento tiene la función general de cubrir y soportar a las partes de la turbina. En las turbinas Francis y Kaplan, por ejemplo, tiene la forma de una espiral.

Figura 3. Elementos constitutivos de una turbina



Fuente: MATAIX, Claudio. *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. p. 462

2.2. Clasificación de turbinas

El proceso de conversión de energía hidráulica en mecánica para diferentes rangos de caudales y caídas implica la necesidad de diferentes tipos de turbinas.

2.2.1. Según el grado de reacción

Se clasifican en dos grupos: turbinas de reacción y turbinas de acción. La clasificación se dio así por el concepto de grado de reacción; si el grado de la turbina tiene reacción 0, la turbina entonces pertenece al grupo de acción, por otro lado, si la reacción tiene un valor diferente de 0, la turbina es del grupo de reacción. El cálculo del grado de reacción de una turbina se da por las siguientes formulas:

$$\varepsilon_T = \frac{\text{altura de presión absorbida por el rodete}}{\text{altura total absorbida por el rodete}}$$

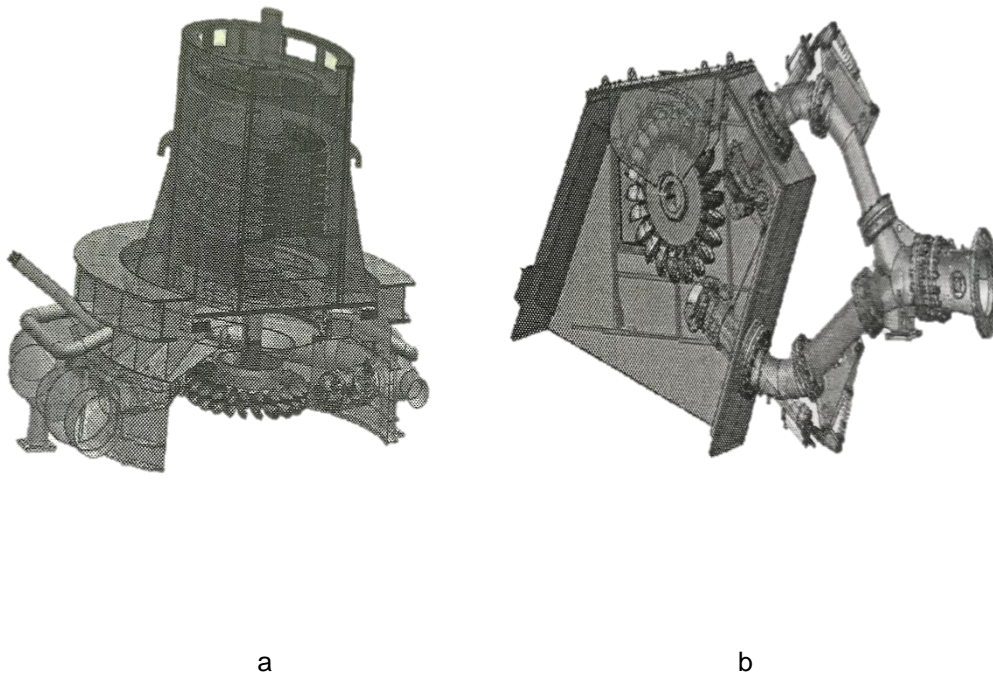
Las turbinas de acción son de admisión parcial, la presión del agua no varía en los álabes. El rodete no está inundado. Se encuentra a presión atmosférica. En estas turbinas el rodete trabaja a presión constante, es decir; $p_1 = p_2$.

2.2.1.1. Turbinas de acción

- Turbinas Pelton: la turbina Pelton fue inventada por Lester Allan Pelton (EE. UU, 1829 – 1908) y patentada en California en 1880. Esta turbina puede definirse como una turbina de acción, de flujo tangencial, de admisión parcial que trabaja a presión atmosférica y está diseñada para condiciones de grandes saltos: 400 – 600 metros y bajos caudales;

además opera eficientemente con cargas parciales. Una ilustración de una turbina Pelton se presenta a continuación:

Figura 4. **Turbina Pelton**



Fuente: ORTIZ, Ramiro. *Pequeñas centrales hidroeléctricas*. p. 335

Según la forma como transforman la energía hidráulica en mecánica, la turbina Pelton puede definirse como una turbina de acción y de flujo tangencial. Los elementos más importantes que forman la turbina Pelton son el distribuidor y el rodete. En este tipo de turbinas no se tiene el tubo difusor, ya que por ser una turbina de acción su rodete trabaja a presión atmosférica. El distribuidor de turbina, como se muestra en las figuras 4 y 5, está constituido por un inyector o por varios inyectores, que pueden llegar a seis; cada uno de ellos consta por lo general de una tobera de sección circular (1) provista de una aguja de regulación (2) que se mueve axialmente, variando así la sección del flujo, como se indica en

la figura 5.a. Se adiciona un deflector (9), necesario para una operación rápida que deja al rodete sin acción del chorro (figura 5.d). De este modo la aguja se cierra en un tiempo mayor, reduciendo de esta forma los efectos del golpe de ariete.

En las turbinas pequeñas que se utilizan en micro centrales se puede prescindir de la aguja y operar con una o más toberas, con caudal constante, manteniéndose en algunos casos la placa deflectora.

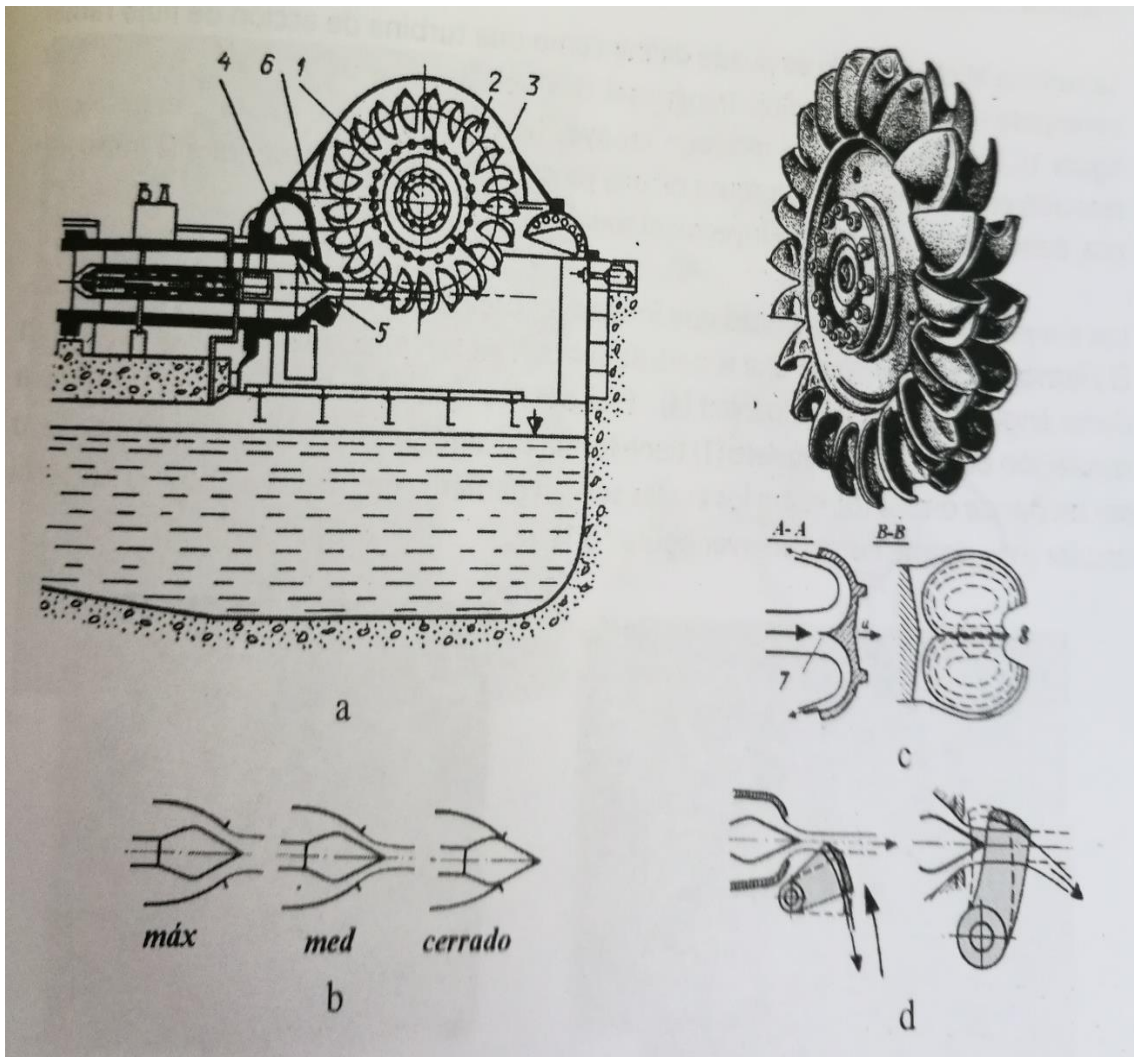
La figura 5.b muestra el corte transversal correspondiente a la posición de la aguja en un eyector para un caudal máximo, medio y totalmente cerrado. De igual forma la figura 5.d presenta el instante en que el deflector empieza a desviar el chorro, hasta el instante en que lo ha desviado totalmente y este ya no impacta en las cucharas (cangilones) del rodete.

El rodete es de admisión parcial (figura 5.a), consta de un disco provisto de una serie de cucharas o (cangilones) montadas en su periferia, en una cifra que oscila entre 12 – 40. Cada cuchara está formada por dos cucharas unidas (figura 5.b), cuyo corte transversal A-A y B-B, corresponde al de dos semicírculos unidos en una superficie de corte (7), la cual divide el chorro del eyector entre las dos cucharas, haciendo que la velocidad cambie de dirección y de magnitud, generando con ello un impulso; que hace girar el rodete. Adicionalmente, en la parte superior de las cucharas se encuentra una ventana (8) que evita que el chorro impacte en la parte posterior de las cucharas. En el rodete las cucharas pueden estar perñadas al disco, unidas por soldadura o fundidas en una sola pieza con el disco.

Sumado a las características técnicas anteriores, las turbinas Pelton, constructivamente pueden ser de eje vertical con 3 a 6 inyectoros y eje horizontal

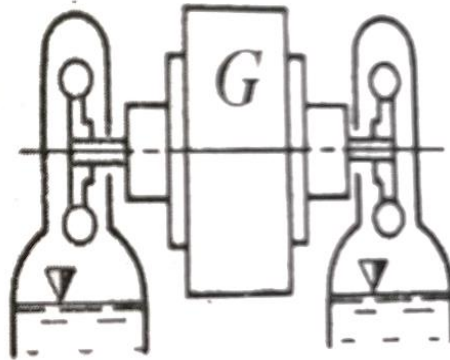
con 1 ó 2 inyectores. Usualmente en pequeñas centrales hidroeléctricas se suelen instalar turbinas de eje horizontal, en una configuración de dos turbinas acopladas a un generador.

Figura 5. Turbina Pelton



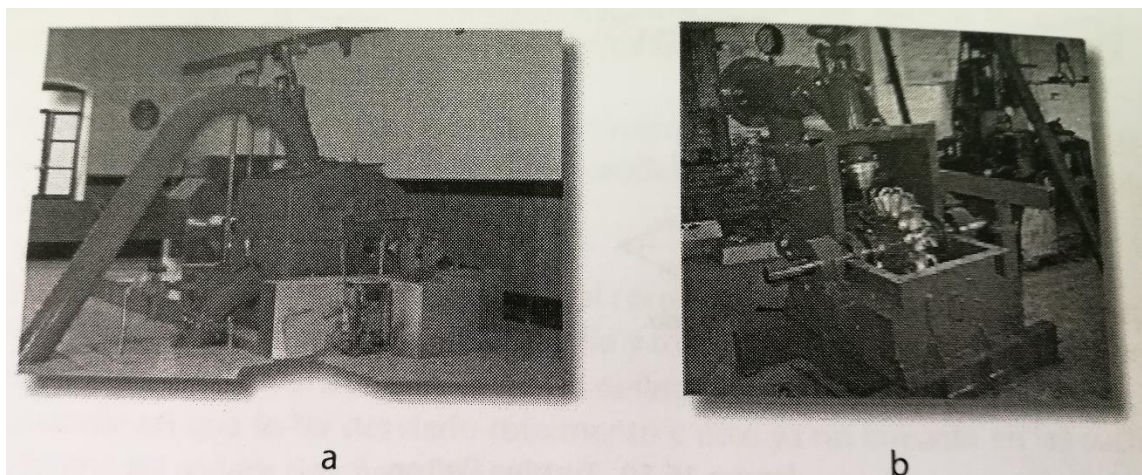
Fuente: ORTIZ, Ramiro. *Pequeñas centrales hidroeléctricas*. p. 337

Figura 6. **Tipos de turbinas Pelton**



Fuente: ORTIZ, Ramiro. *Pequeñas centrales hidroeléctricas*. p. 337

Figura 7. **Turbina Pelton de eje horizontal**



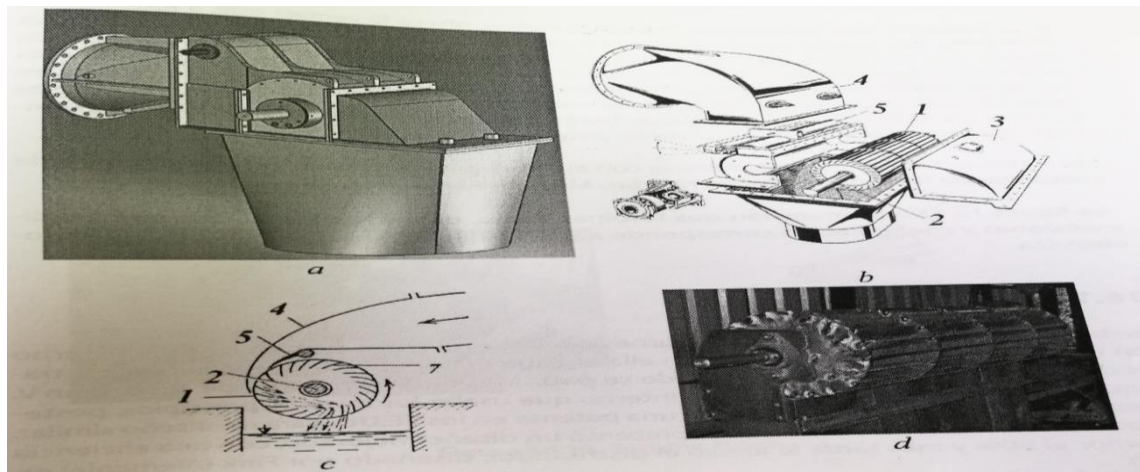
Fuente: ORTIZ, Ramiro. *Pequeñas centrales hidroeléctricas*. p. 338

- Turbina Michell Banki: esta turbina fue inventada y patentada en 1903 por A.G Michell (Australia) y posteriormente, en los años 1917 y 1919, fue estudiada en la Universidad de Budapest por Donat Banki (Hungría).

La turbina Michel Banki se puede definir como una turbina de acción de flujo radial centrípeto – centrífugo, de flujo transversal, de doble acción y de admisión parcial (figura 8). Sin embargo, recientes ensayos han indicado que existe una pequeña reacción en el primer paso, a causa de una presión ligeramente superior a la atmosférica, debido a la cercanía del inyector al rodete.

Los elementos más importantes que forman la turbina son el distribuidor y el rodete. El distribuidor consiste en una tobera de sección rectangular que abarca al rodete en cierto ángulo de admisión parcial (4). Está dotado de una paleta directriz (5) para la regulación del caudal. El rodete (1) tiene forma de tambor o cilindro y está compuesto por un par de discos (6), entre los cuales se fijan periféricamente los álabes (7) de perfil circular y de simple curvatura (figura 8.c).

Figura 8. **Turbina Michell Banki**



Fuente: ORTIZ, Ramiro. *Pequeñas centrales hidroeléctricas*. p. 339

El flujo del caudal en el rodete de la turbina Michell Banki es de sección rectangular, e incide inicialmente sobre una parte de sus álabes, cruza su interior y de nuevo incide al salir del rodete (figura 8.c), de tal forma que el caudal impulsa

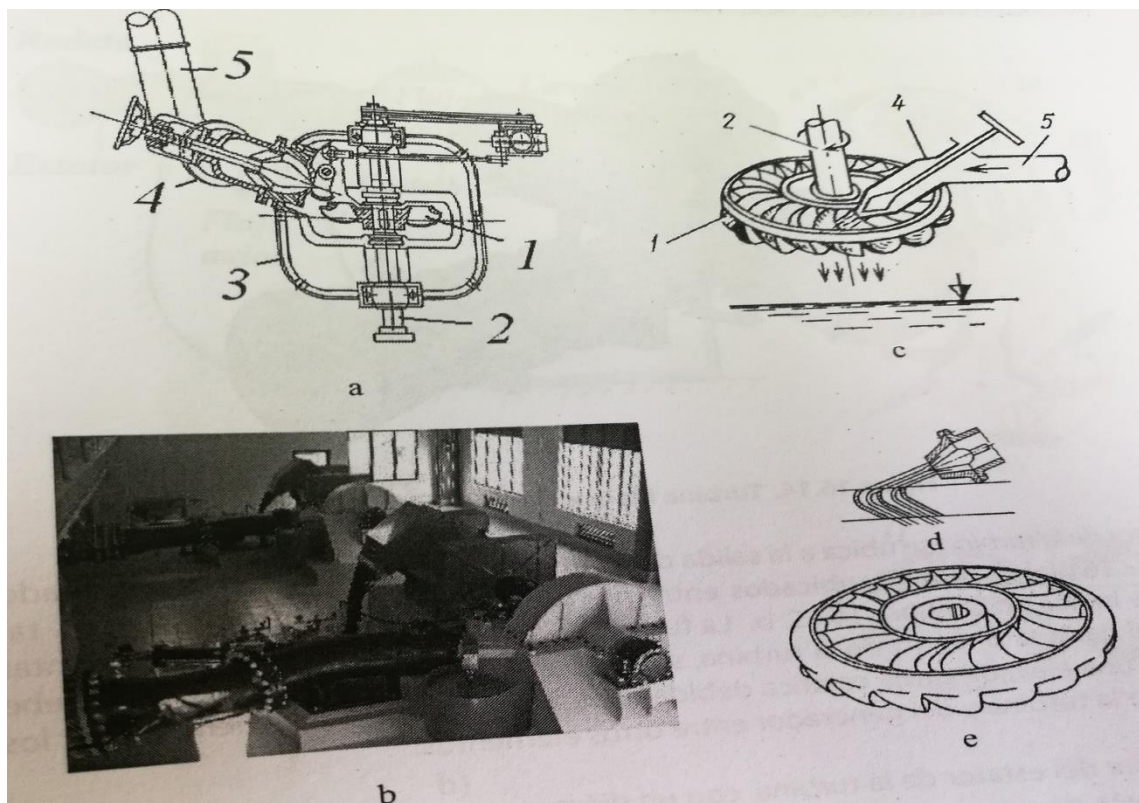
dos veces el rodete. Esta característica también ha hecho que a la turbina Michell Banki, se le llame de doble acción o doble impulso. Adicionalmente a las características anteriores la turbina opera por lo general a presión atmosférica; no obstante, en el caso de saltos bajos suele dotársele de un tubo de aspiración cilíndrico para recuperar parte de la altura de montaje. Esto crea una depresión en el interior, por lo que se debe impedir que el agua inunde el rodete; para ello se utiliza una válvula automática regulada, de manera que permita la entrada de una cierta cantidad de aire al interior de la carcasa. La forma cilíndrica del rodete obliga a que las turbinas Michell Banki sean de eje horizontal, esta característica constructiva permite aumentar la longitud del rodete y de esta forma ajustarse a mayores rangos de caudal.

- Turbina Turgo: esta turbina fue inventada y patentada en 1919 por Eric Cresswell (Gran Bretaña); posteriormente fue perfeccionada en 1936 por E. Jackson (Gran Bretaña). Esta turbina se define como una turbina de acción, de flujo axial y admisión parcial (figura 9), cuyos elementos más importantes son el distribuidor o inyector (4) y el rodete (1). Otros elementos son: la carcasa (3), el eje (2) y la tubería de presión (5). El distribuidor consiste básicamente en un inyector tipo Pelton que proyecta un chorro de agua inclinado respecto al plano del rodete, en un ángulo que oscila entre 20° a $22,5^\circ$ (figura 8.a, c y d). El rodete se asemeja a un medio rodete de las cucharas y es perpendicular al eje (figura 8.e). Si se compara con la turbina Pelton, ofrece la ventaja que, a igualdad de diámetros del rodete, puede operar con un mayor caudal, ya que el chorro de agua ingresa por un lado y sale por el otro, sin interferir en las cucharas adyacentes. De este modo, para un mismo diámetro de chorro y de potencia, el rodete resulta ser más pequeño que el de una Pelton. Adicionalmente posee las siguientes características: igual eficiencia a cargas parciales, escaso riesgo de cavitación, fácil acceso a sus partes y

buena tolerancia a la erosión; sin embargo, debido al chorro inclinado posee un empuje axial, razón por la que se le usa en pequeñas centrales.

Las turbinas Turgo pueden instalarse con eje horizontal o vertical, cubren el campo de aplicación de las turbinas Pelton rápidas, Michell Banki y Francis lenta y normal.

Figura 9. **Turbina Turgo**



Fuente: ORTIZ, Ramiro. *Pequeñas centrales hidroeléctricas*. p. 341

2.2.1.2. Turbinas de reacción

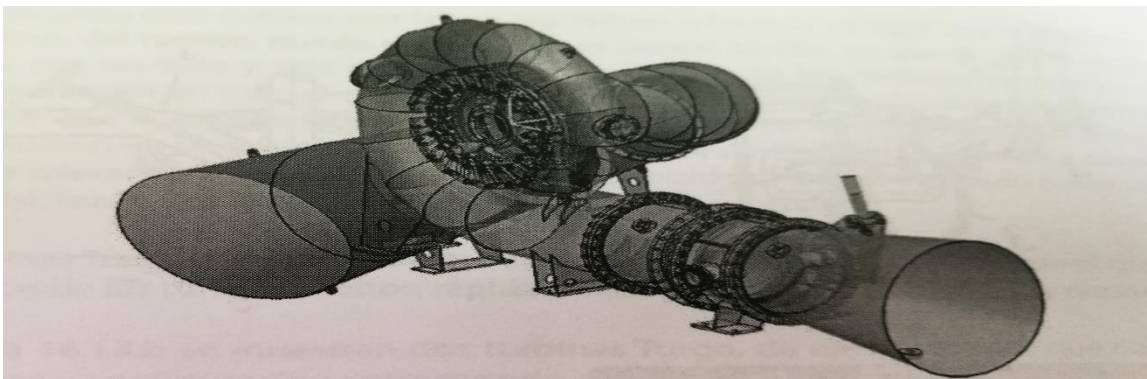
- Turbinas Francis: en 1826 Benoit Fourneyron desarrolló una turbina de flujo externo con una eficiencia cercana al 80 %. En ella el agua era dirigida

tangencialmente a través del rodete de la turbina provocando su giro. Más tarde, alrededor de 1820, Jean V. Poncelet diseñó una turbina de flujo interno que usaba los mismos principios, posteriormente S.B. Howd obtuvo en 1838 una patente en los EE. UU para un diseño similar. Y en 1848 James B. Francis presentó un diseño mejorado, con una eficiencia superior al 90 %.

Estas turbinas son diseñadas para un amplio rango de saltos y caudales, siendo capaces de operar en rangos que van de los 40 – 60 hasta 500 – 700 metros. Esto, junto con su alta eficiencia, ha hecho que este tipo de turbina sea la más ampliamente usada para la generación de energía eléctrica.

Según la forma como transforma la energía hidráulica en mecánica, la turbina Francis puede definirse como una turbina de reacción, de flujo mixto centrípeto y de admisión total cuyo flujo interno es radial y axial. Estas características se ilustran en la figura 10.

Figura 10. **Turbina Francis de eje horizontal**



Fuente: ORTIZ, Ramiro. *Pequeñas centrales hidroeléctricas*. p. 342

La turbina Francis es una turbina de reacción, lo cual significa que el fluido cambia de presión a medida que se desplaza a través de la turbina, entregando su energía. Esto implica la instalación en la turbina de una cámara espiral, un estator y un distribuidor (figura 11.a, b y c).

La cámara espiral (figura 11.a) es la que inicialmente dirige el caudal hacia el estator de la turbina y, según las características de admisión y forma de la cámara espiral, se pueden clasificar de la siguiente forma:

- Por el modo de admisión:
 - Admisión total: cuando entra el agua por todo el contorno del rodete.
 - Admisión parcial: cuando entra el agua por parte del rodete.
 - Admisión interior: cuando el agua entra por el contorno interior del rodete (turbinas centrífugas).
 - Admisión exterior: cuando el distribuidor está colocado en el contorno exterior (turbina centrípeta).

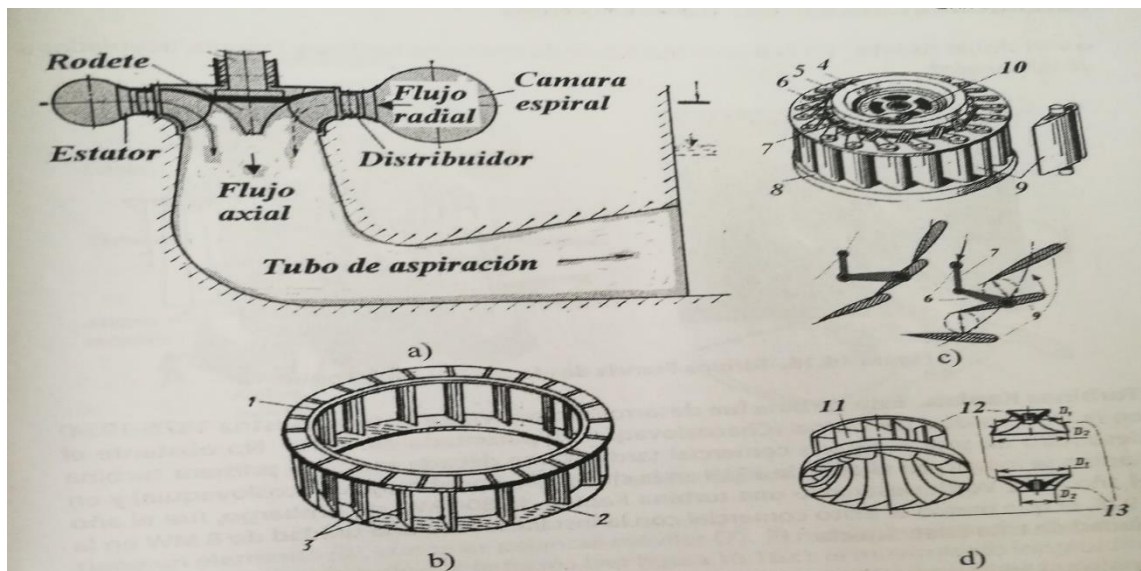
- Por la disposición de la cámara:
 - Cámara abierta
 - Cámara cerrada
 - Cámara cilíndrica
 - Cámara en espiral
 - Cámara cónica
 - Cámara esférica

En turbinas pequeñas que operan con baja caída se puede prescindir de la cámara espiral, trabajando la turbina en la modalidad de cámara abierta o del tipo pozo.

El estator de la turbina se ubica a la salida del caudal de la cámara espiral; está formado por 10 – 16 álabes fijos (3), ubicados entre dos anillos: superior (1) e inferior (2), tal como se indica en la figura 11.b. La función principal del estator es la de orientar el caudal hacia la directriz de la turbina, sin embargo, en grupos de eje vertical debe soportar una elevada carga estática debida al peso y los esfuerzos generados por los rotores de la turbina y del generador, entre otros elementos.

En el interior del estator de la turbina, con un diámetro menor se ubica el distribuidor, el cual consta de una serie de álabes de posición variable y de perfil hidrodinámico (9), que conforman conductos convergentes de tipo tobera. De este modo, el flujo del agua se acelera y orienta hacia el rodete, bajo diferentes ángulos de inclinación, permitiendo una regulación del caudal, que a su vez regula la potencia mecánica en la turbina, el arranque y la parada.

Figura 11. Turbina Francis – Radio axial



Fuente: ORTIZ, Ramiro. *Pequeñas centrales hidroeléctricas*. p. 343

En el distribuidor de la turbina se tienen entre 20 – 32 álabes móviles (figura 11.c), los cuales disponen en su eje superior de una palanca fija (5), y están ubicados y soportados por dos anillos estáticos: inferior (8) y superior (9). Sobre el anillo superior (9) se tiene un anillo móvil (4), en el cual se tienen unas palancas (7) mecánicamente unidas a las palancas de los álabes móviles. La regulación de caudal en el distribuidor se realiza de la siguiente forma (figura 11.c): el movimiento longitudinal de un pistón que esté acoplado en el punto (10) al anillo móvil (4), hace que este gire, generando que las palancas (7) se desplacen y a su vez hagan girar sobre su eje a las palancas fijas de los álabes móviles (6), cuyo resultado es el movimiento de toda la cadena de álabes móviles. Esto conlleva la regulación del caudal que ingresa al rodete de la turbina. En la figura 11.c se ilustra la maniobra de cierre del caudal, la cual se puede realizar en forma manual o automática.

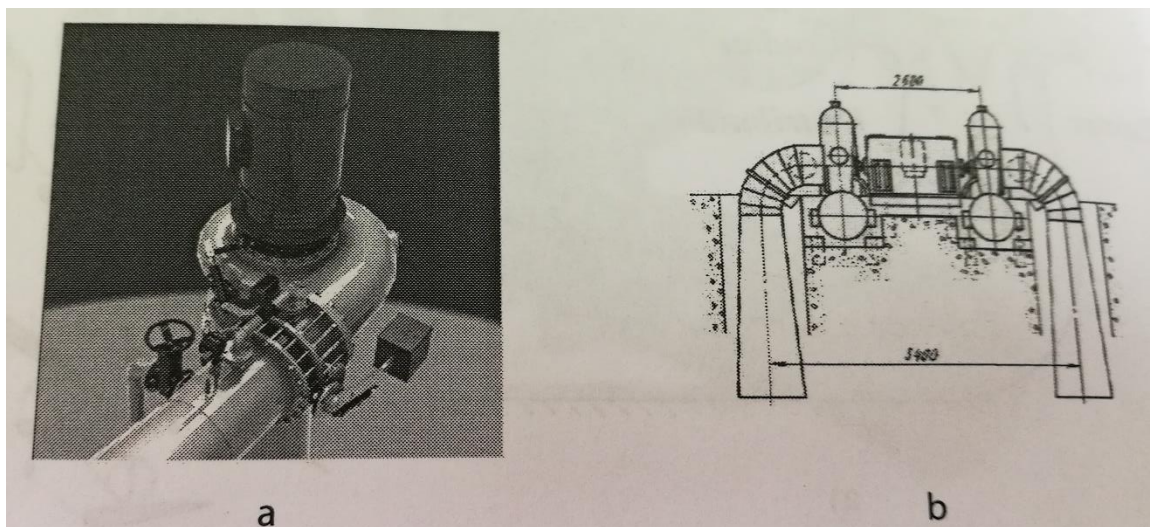
El rodete (figura 11.d) está formado por 14 – 19 álabes fijos (11) colocados entre un disco (12) y una corona exterior (13), los cuales por lo general poseen doble curvatura. En estos el caudal ingresa radialmente por la periferia externa y abandona el rodete en dirección axial para dirigirse hacia el tubo de aspiración. La característica que permite que este tipo de turbina se ajuste a un rango elevado de alturas es la relación entre los diámetros del disco (12) D_1 y de la corona exterior (13) D_2 , tal como se ilustra en la figura 11.d. En este caso las turbinas con un diámetro D_1 mayor que D_2 corresponden a turbinas para bajas caídas, si la relación es cercana a la unidad corresponden a turbinas para caídas medias y en caso contrario corresponden a turbinas para caídas altas.

El tubo de aspiración en su forma básica corresponde a la de un difusor, que puede ser de tipo recto o del tipo acoplado. La adopción de uno u otro de

estos tipos dependerá de la llamada altura de aspiración, cuyo valor se calcula basándose en la teoría de la cavitación.

Adicionalmente a las características técnicas anteriores, las turbinas Francis, además de ajustarse a un rango elevado de alturas, constructivamente pueden ser de eje vertical u horizontal (figura 12). Usualmente pequeñas centrales hidroeléctricas suelen instalar turbinas de eje horizontal, en una configuración de turbinas dobles o con doble rodete. En la figura 12.b se ilustran dos turbinas Francis, acopladas un generador:

Figura 12. **Turbina Francis de eje vertical y horizontal**



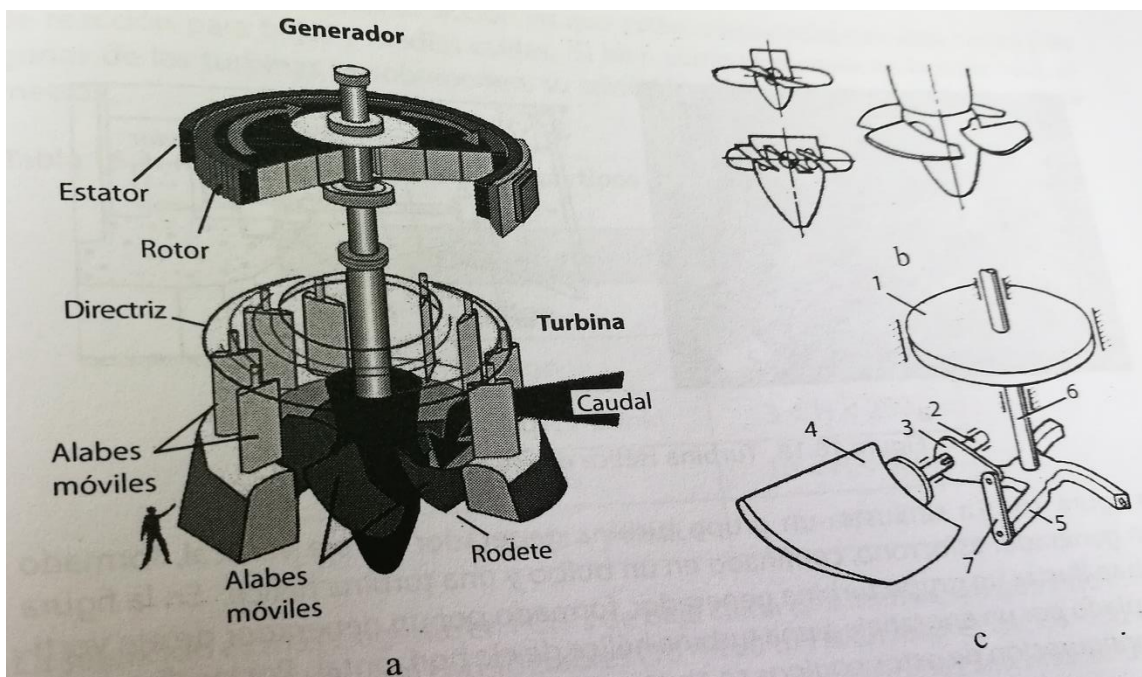
Fuente: ORTIZ, Ramiro. *Pequeñas centrales hidroeléctricas*. p. 344

- Turbinas Kaplan: esta turbina fue desarrollada por Víctor Kaplan (Austria 1876 – 1934) en la Universidad de Burno (Checoslovaquia) y patentada en 1912. No obstante, el desarrollo de una máquina comercial tardaría una década más. La primera turbina Kaplan se instaló en el año de 1919 en la ciudad de Podebrady (Checoslovaquia) y en el año 1922 Voith desarrolló

una turbina Kaplan de 800 kW, sin embargo, fue el año de 1925 el que marcó el éxito comercial con la instalación de una unidad de 8MW en la ciudad de Lilla Edet, Suecia.

La turbina Kaplan puede definirse como una turbina de flujo axial, de reacción y admisión total (ver figura 13.a y b). La principal característica de la turbina Kaplan es el rodete, que tiene álabes de perfil de ala de avión, orientables (móviles) mediante un mecanismo situado en el interior del rodete. El distribuidor es del tipo Fink, similar de las turbinas Francis. Consta además de una cámara espiral de sección circular o rectangular y de un tubo de aspiración del tipo recto o acodado, según el requerimiento de la altura de aspiración. Debido a que los álabes del rotor son orientables (móviles), puede operar con muy buena eficiencia dentro de un amplio rango de caudal.

Figura 13. **Turbina Kaplan**



Fuente: ORTIZ, Ramiro. *Pequeñas centrales hidroeléctricas*. p. 345

Las turbinas Kaplan son turbinas hidráulicas con rangos de caída que van de los 1 – 3 hasta 60 – 70 metros y pueden operar con muy buena eficiencia dentro de un amplio rango de caudal gracias a que los álabes del rotor son orientables (móviles).

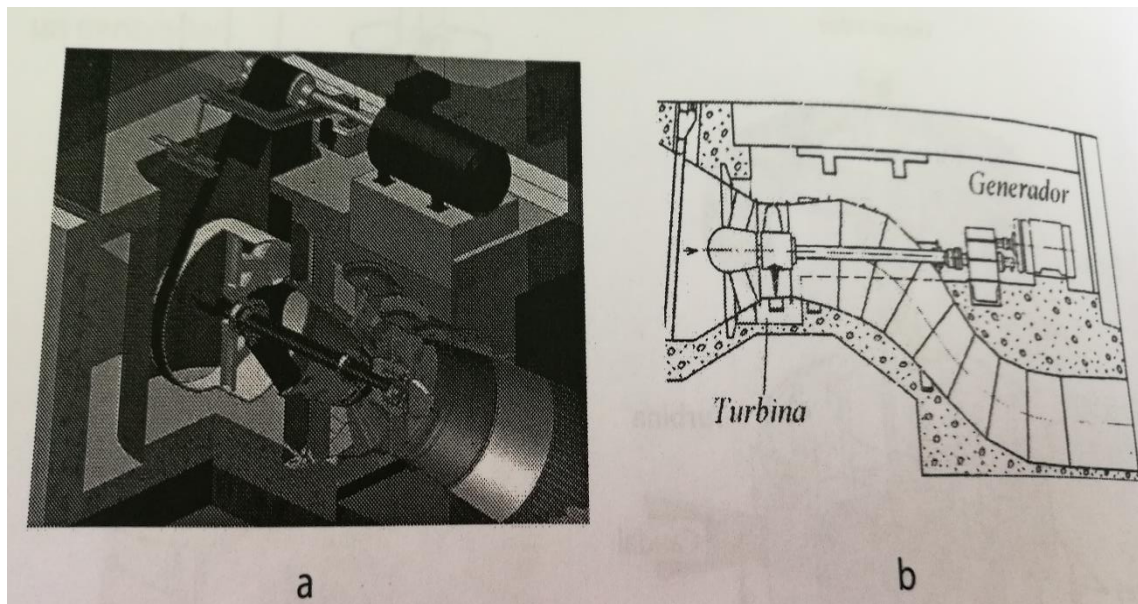
Dado que la turbina Kaplan es una turbina de reacción, los elementos que la conforman son similares a los de la turbina Francis, en particular los siguientes: la cámara espiral, el estator, el distribuidor y el tubo de aspiración (ver figura 13.a).

El rodete de la turbina Kaplan está conformado por 4 – 8 álabes móviles (4) y su número aumenta en función de la altura (figura 13.b y c). En el rodete los álabes están apoyados en un cono hidrodinámico y en cada uno de sus ejes (2) tienen fija una palanca (3). Adicionalmente al interior del rodete se tiene un pistón (1), en cuyo extremo tiene un elemento (5), con unas palancas móviles (7). El movimiento de los álabes del rodete se realiza de la siguiente forma (figura 13.c): el movimiento longitudinal del pistón (1) desplaza la palanca (7) y esta le transmite este movimiento a la palanca fija del álabe (3) y el álabe cambia el ángulo de inclinación; el resultado del desplazamiento del pistón es el movimiento de todos los álabes del rodete. Esta característica le permite a la turbina en su conjunto ajustarse a las condiciones de caída y caudal y con ello trabajar con su máxima eficiencia en un amplio rango de potencia.

- Variantes de la turbina Kaplan:
 - Turbina bulbo: es un tipo de turbina Kaplan de eje horizontal, patentada por Hugenin en 1933, su característica más notable es que su generador está confinado en un bulbo y por sus paredes fluye el caudal.

- Turbina de hélice: esta variante posee un rodete con los álabes fijos, con ello se abarata el rodete, pero decrece la eficiencia a cargas parciales por la imposibilidad de contar con una doble regulación. Este tipo de turbinas se suelen instalar en pequeñas centrales hidroeléctricas y pueden ser de eje horizontal o vertical.
- Turbina de hélice tubular o S, desarrollada y patentada por Khune en 1930. Este tipo de turbina se caracteriza porque la transmisión de potencia al generador se hace mediante una extensión del eje hasta la sala de máquinas, lo cual constituye una dificultad por el alto costo de la obra civil (ver figura 14.b). Sin embargo, este diseño se utiliza con éxito en pequeñas turbinas, donde la extensión del eje es más corta.

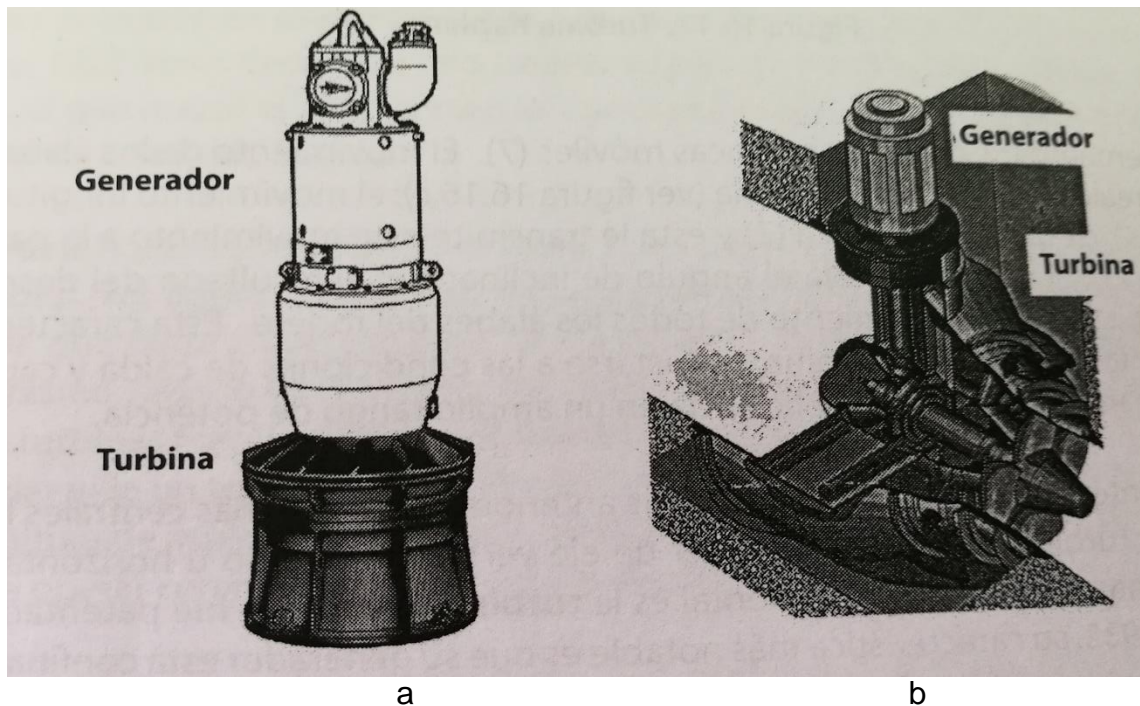
Figura 14. **Turbina hélice de eje horizontal**



Fuente: ORTIZ, Ramiro. *Pequeñas centrales hidroeléctricas*. p. 346

En la figura 15.a se ilustra un grupo de turbina generado de eje vertical, formado por un generador asíncrono, confinado en un bulbo y una turbina hélice. En la figura 15.b se ilustra un grupo de turbina generador, formado por un generador de eje vertical acoplado por un engranaje a una turbina hélice de eje horizontal. Las dimensiones y configuración de estos equipos se ajustan a pequeñas centrales hidroeléctricas.

Figura 15. **Hidrogrupos con turbinas hélice**



Fuente: ORTIZ, Ramiro. *Pequeñas centrales hidroeléctricas*. p. 346.

2.2.2. Según el número específico de revoluciones

Corresponde a un parámetro matemático que describe en forma universal las particularidades de cada una de las turbinas, una descripción detallada de

este parámetro se indicará más adelante. De acuerdo con la velocidad específica las turbinas se subdividen en: lentas, normales y rápidas.

En función del sentido en que se mueve el agua dentro de la turbina se clasifican en:

- Axiales: cuando el agua va paralela al eje
- Radiales: si tiene su movimiento en la dirección del radio
- Centrífuga: cuando el agua va de adentro hacia afuera
- Centrípeta: cuando el agua va de afuera hacia adentro
- Mixtas: cuando el agua entra radialmente y sale axialmente

Por el modo de admisión se clasifican en:

- Admisión total: cuando entra el agua por todo el contorno del rodete
- Admisión parcial: cuando entra el agua por parte del rodete
- Admisión interior: cuando el agua se admite por el contorno interior del rodete (turbinas centrífugas)
- Admisión exterior: cuando el distribuidor está colocado en el contorno exterior (turbina centrípeta)
- Por la posición del eje: eje horizontal, eje vertical o inclinado
- Por la disposición de la cámara: cámara abierta o cerrada

Además, según el perfil de la cámara espiral también se subdividen en cilíndrica, cónica y esférica.

Por el número de revoluciones relativas se subdividen en: normales, rápidas y extra rápidas.

Por el número de rodetes se clasifican en: rodete sencillo, de doble rodete o gemelas.

De acuerdo con la clasificación anterior existen diferentes tipos de turbinas, entre las que tienen mayor implementación para generación de energía en pequeña escala en función de la forma de conversión de energía, se pueden clasificar en

- Turbinas de acción: Pelton, Michel Banki y Turgo
- Turbinas de reacción: Francis y Kaplan

Las dimensiones de una turbina determinan la potencia que entrega en el eje; y la relación matemática entre estos dos parámetros se llama velocidad específica. De hecho, dos turbinas de dimensiones diferentes pueden tener igual potencia en la medida en que sus velocidades sean diferentes. La potencia en el eje de una turbina es el producto entre el momento de fuerza M y la velocidad angular ω :

$$N = M\omega$$

La ecuación anterior indica que, para obtener una potencia dada, el aumento de la velocidad angular hace que se requiera un menor momento, el cual conlleva disminuir las dimensiones de la turbina, dado que este depende del radio de la máquina R y la fuerza aplicada:

$$F: M = FR$$

Como se observa en las demostraciones anteriores, para una misma potencia una máquina con una baja velocidad tendrá un radio mayor,

consecuentemente será voluminosa y una máquina rápida tendrá un menor volumen. Al relacionar las velocidades específicas para los dos casos anteriores la máquina más rápida tendrá una velocidad específica mayor. Esta es una tendencia que se aplica en las turbinas hidráulicas, sin embargo, la potencia de las turbinas también es función del caudal:

$$N = 9,81QH\eta$$

Al aplicar la ecuación anterior a dos turbinas de igual diámetro considerando la caída constante, se deduce que la potencia entregada por cada una de ellas depende del caudal. Por consiguiente, la velocidad específica será mayor en la turbina que tenga mayor capacidad de caudal. De esta forma se puede concluir que la velocidad específica en una turbina se puede aumentar bien sea aumentando la velocidad o la capacidad para turbinar caudal.

Por tal motivo, para comparar dos tipos de turbinas en función de sus velocidades específicas es necesario que estas estén en iguales condiciones de caída y potencia, las cuales corresponden a valores unitarios, obtenidos a través de las leyes de semejanza de las turbinas hidráulicas. Su aplicación inicia a partir de un prototipo de un tipo de turbina, cuyas características son las siguientes:

- Diámetro – D
- Potencia – N
- Velocidad – η y
- Caída – H

Consecuentemente para una turbina semejante a la turbina prototipo, cuyos valores unitarios de caída son $H_s = 1,0$ m y potencia $N_s = 1,0$ l. s (o su equivalente: $N_s = 1,0$ l. s = 0,736 kW), se requiere determinar los parámetros de

velocidad específica n_s y diámetro D_s . Para ello se lleva el siguiente procedimiento:

- Aplicando la relación de semejanza de las velocidades de las turbinas considerando que tiene igual eficiencia hidráulica, se tiene:

$$\frac{n_s}{n} = \left(\frac{D}{D_s}\right) \sqrt{\frac{H_s}{H}} = \left(\frac{D}{D_s}\right) \sqrt{\frac{1}{H}}$$

- Aplicando la relación de semejanza de potencias considerando que tienen igual eficiencia hidráulica, se tiene:

$$\frac{N_s}{N} = \left(\frac{D_s}{D}\right)^2 \left(\frac{H_s}{H}\right) \sqrt{\frac{H_s}{H}}$$

Y simplificando se obtiene:

$$\frac{1}{N} = \left(\frac{D_s}{D}\right)^2 \left(\frac{1}{H}\right) \sqrt{\frac{1}{H}}$$

- La ecuación obtenida a través de la relación de semejanza de las velocidades se eleva al cuadrado:

$$\left(\frac{n_s}{n}\right)^2 = \left(\frac{D}{D_s}\right)^2 \left(\frac{1}{H}\right)$$

Si la ecuación anterior se multiplica por la ecuación obtenida a través de la relación de semejanza de las potencias y se simplifica el diámetro D_s :

$$\left(\frac{n_s}{n}\right)^2 \left(\frac{1}{N}\right) = \left(\frac{1}{H^2}\right) \sqrt{\frac{1}{H}}$$

Con base en la ecuación anterior se puede determinar la velocidad específica de una turbina:

$$n_s = \left(\frac{n}{H}\right) \sqrt{\frac{N}{\sqrt{H}}}$$

No obstante, la velocidad específica de una turbina también se puede determinar a través de ecuaciones experimentales, tales como:

- Para turbinas radiales – axiales:

- Con una caída $H > 200$ m, la velocidad específica equivale a:

$$n_s = \frac{4\,000}{H^{0,6}}$$

- Con una caída $H < 200$ m, la velocidad específica equivale a:

$$n_s = \frac{2\,600}{H^{0,5}}$$

- Para turbinas axiales y diagonales la velocidad específica equivale a:

$$n_s = \frac{2\,300}{H^{0,4}}$$

- Para turbinas axiales tipo hélice y bulbo la velocidad específica equivale a:

$$n_s = \frac{2\,600}{H^{0,4}}$$

- Para turbinas tipo Pelton la velocidad específica equivale a:

$$n_s = (245 - 253)\sqrt{Z_c} \left(\frac{d_c}{D_1}\right)$$

Donde: z_c es el número de eyectores, d_c es el diámetro del chorro y D_1 es el diámetro Pelton.

Con base en la velocidad específica se pueden comparar tipos de turbinas diferentes, e inferir que el disponer de una velocidad específica elevada implica tener turbinas de dimensiones pequeñas, esto parecería ser una fortaleza que debería ser generalizada; no obstante, en la medida en que aumenta la caída aumenta la velocidad del caudal y consecuentemente los riesgos de cavitación. Esto conlleva que exista una limitante por caída para la aplicación de turbinas rápidas (turbinas con una elevada velocidad específica).

Las turbinas se pueden clasificar de acuerdo con la velocidad específica, de la siguiente forma: rápidas, normales y lentas. Esta clasificación coincide con el tipo de turbina, ya que las turbinas axiales son las que tienen una mayor velocidad específica, les siguen las diagonales, las radiales axiales y las más lentas son las tangenciales o turbinas Pelton.

Adicionalmente la limitante por caída hace que el rango de aplicación de las turbinas hidráulicas a la vez coincida con el tipo de turbina y la velocidad específica. Esto permite seleccionar las turbinas según la caída del recurso

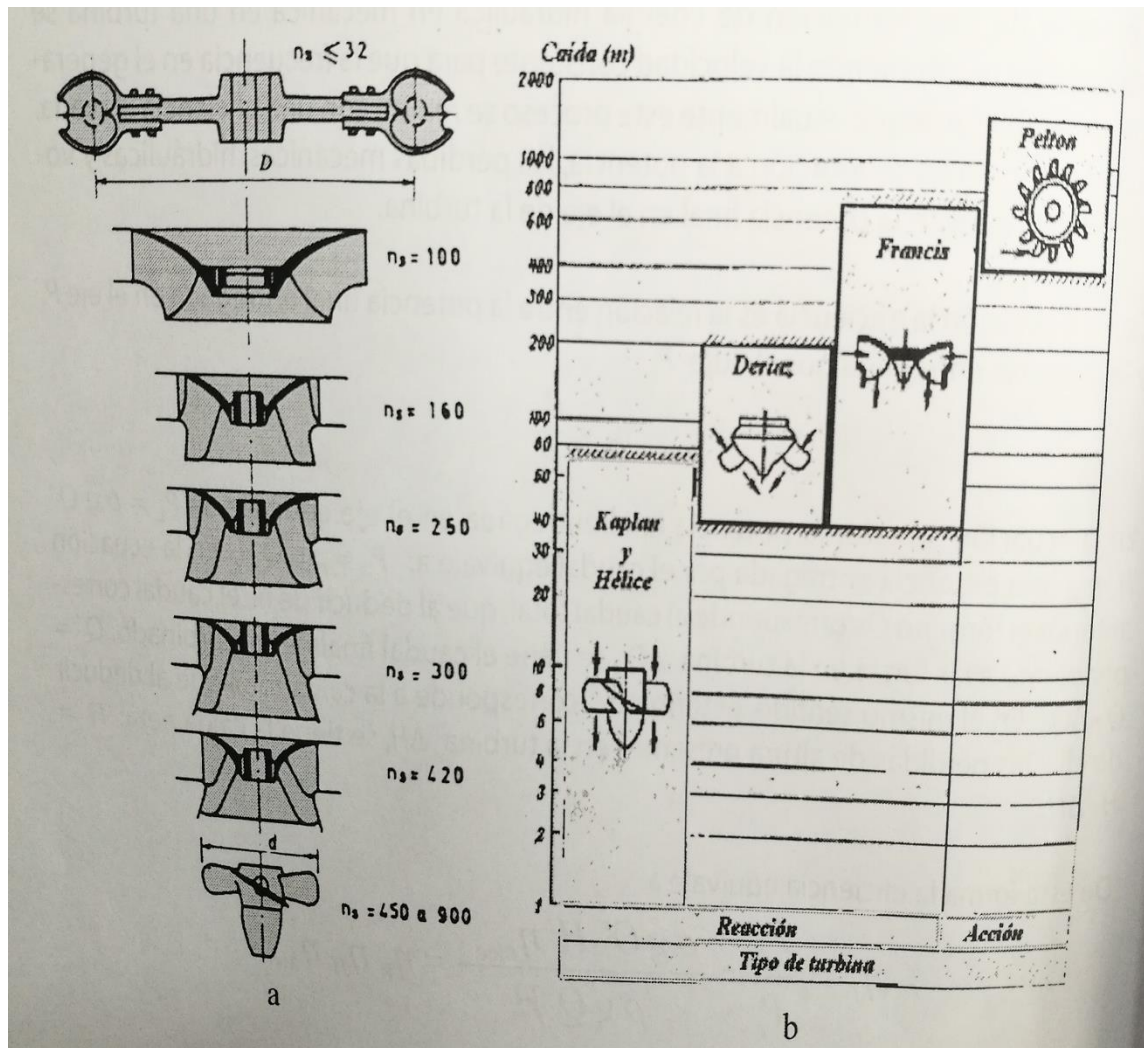
hidroenergético. La tabla III muestra parámetros de velocidad específica y caída según el tipo de turbina y la figura 16 ilustra las dimensiones que toman las turbinas a medida que aumenta su velocidad específica y el rango de aplicación por caída de las turbinas respectivamente.

Tabla III. **Parámetros de velocidad específica y caída para diferentes tipos de turbina**

Tipo de turbina		Velocidad Específica	Rango de aplicación de caída H (m)
Turbina Kaplan y Hélice (Axiales)	Rápidas	1 200 – 750	2 – 12
	Normales	750 – 550	12 – 22
	Lentas	550 – 350	22 – 80
Deriaz (Diagonales)		500 – 300	40 – 220
Francis (Radial - Axial)	Rápidas	400 – 250	20 – 50
	Normales	250 – 150	50 – 120
	Lentas	150 – 70	120 – 600
Pelton (Tangencial)		50 – 10	800 – 2 000

Fuente: ORTIZ, Ramiro. *Pequeñas centrales hidroeléctricas*. p. 330

Figura 16. Variación de tamaño del rodete en función de la velocidad específica y rango de aplicación por caída de las turbinas



Fuente: ORTIZ, Ramiro. *Pequeñas centrales hidroeléctricas*. p. 332

2.3. Criterios para seleccionar turbinas

En lugar de establecer parámetros definitivos para la selección de la turbina hidráulica, se indicarán criterios para su selección, entre los cuales se

encuentran: la caída neta, el caudal, la velocidad específica, cavitación y el costo por unidad.

La caída neta está relacionada con la altura del salto una vez se han deducido las pérdidas hidráulicas. Este parámetro prácticamente determina el tipo de turbina, siendo por excelencia las turbinas de acción las que están relacionadas con altas caídas y las de reacción para bajas y medias caídas. Si bien, como se observa en la tabla IV, algunas de las turbinas se superponen, su selección está condicionada por otros parámetros.

Tabla IV. **Rango de caída para diferentes tipos de turbinas**

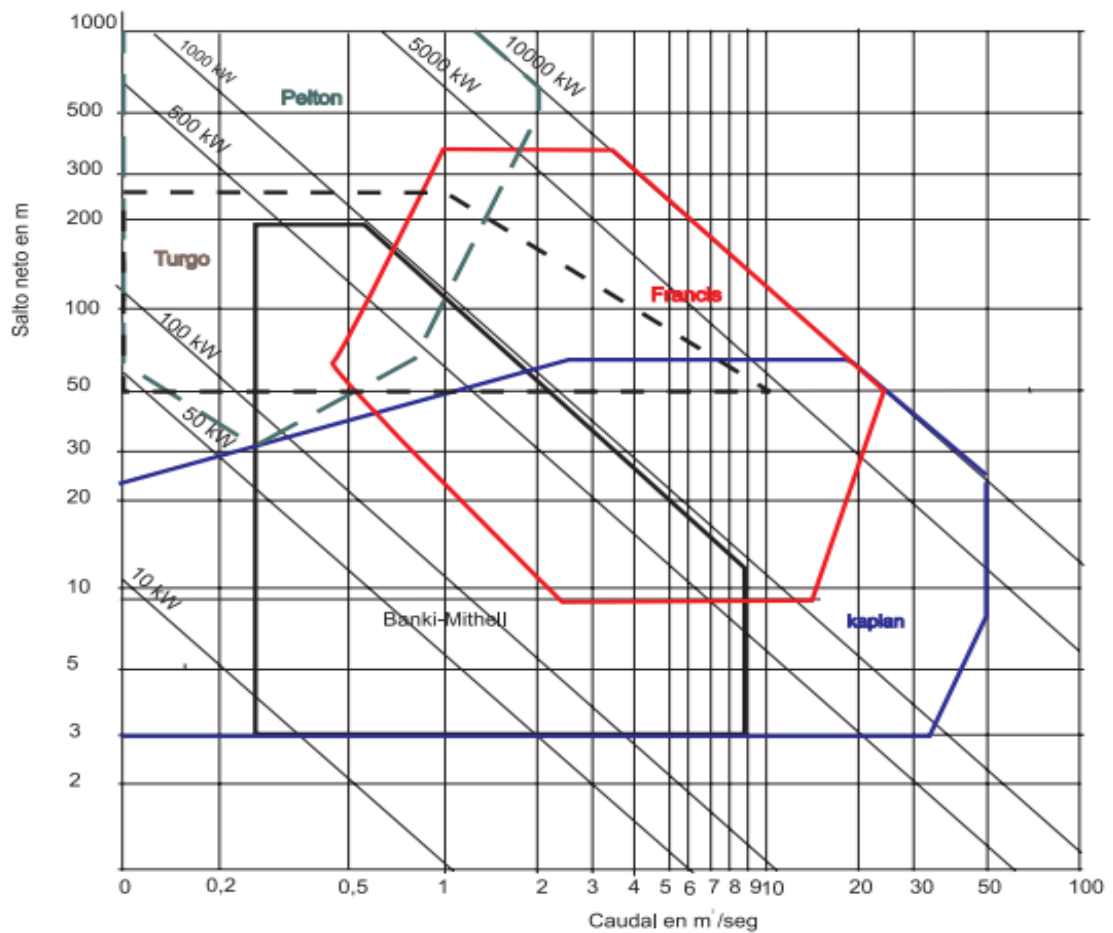
Tipo de turbina		Caída (m)
Acción	Pelton	$50 < H < 1\ 300$
	Turgo	$50 < H < 250$
	Michell-Banki	$3 < H < 250$
Reacción	Francis	$10 < H < 350$
	Kaplan y Hélice	$2 < H < 40$

Fuente: ORTIZ, Ramiro. *Pequeñas centrales hidroeléctricas*. p. 347

La selección es más exigente en Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH's) de baja caída (2 – 5 m), ya que este esquema maneja valores de caudal considerables (10 – 100 m³/s) en rotores de 1,6 – 3,2 metros de diámetro. Estos parámetros hacen que la casa de máquinas sea más voluminosa, debido a las dimensiones de la toma de agua y la conducción a presión, adicionalmente la velocidad mecánica baja de la turbina exige un multiplicador para llevar la potencia al generador. Esto conlleva que las obras hidráulicas tengan un valor representativo superior a los equipos electromecánicos y que en su conjunto este tipo de PCH's sea más costoso.

El caudal es otro parámetro relevante en la selección de la turbina hidráulica, que en conjunto con la caída neta permiten la selección adecuada de la turbina, donde esta relación es el criterio de la velocidad específica.

Figura 17. Selección de turbinas



Fuente: ESHA. *Manual de pequeña hidráulica*.

http://bmghidroconsultores.cl/pdf/documentos/Manual_Hidroenergia_ESHA_Layman.pdf.

Consulta: 26 de febrero de 2019.

3. POTENCIAL HIDRÁULICO Y CONDICIÓN DEL RÍO VILLALOBOS

3.1. Medición de gastos hidráulicos

El aforo de un río también se hace en una sección transversal del curso del agua a la que se llama sección de control. El lugar donde siempre se va a aforar el agua toma el nombre de estación de aforo, que debe reunir ciertos requisitos, entre otros:

- El tramo del río que se escoja para medir el agua debe ser recto, en una distancia de 150 a 200 metros, tanto aguas arriba como agua debajo de la estación de aforo. En este tramo recto no debe confluir ninguna otra corriente de agua.
- La sección de control debe estar ubicada en un tramo en el cual el flujo sea calmado y, por lo tanto, libre de turbulencias, y donde la velocidad misma de la corriente esté dentro de un rango que pueda ser registrado por un correntómetro.
- El cauce del tramo recto debe estar limpio de malezas o matorrales, de piedras grandes, bancos de arenas, entre otros. Para evitar imprecisiones en las mediciones de agua. Estos obstáculos hacen más imprecisas las mediciones en épocas de estiaje.
- Tanto aguas abajo como aguas arriba, la estación de aforo debe estar libre de la influencia de puentes, presas o cualesquiera otras construcciones que puedan afectar las mediciones.
- El lugar debe ser de fácil acceso para realizar las mediciones.

3.1.1. Aforo del método del correntómetro

En un río para determinar el caudal que pasa por una sección transversal, se requiere saber el caudal que pasa por cada una de las subsecciones en que se divide la sección transversal. A continuación se describe el procedimiento para determinar un caudal por medio del método del correntómetro:

- La sección transversal del río donde se va a realizar el aforo se divide en varias subsecciones. El número de subsecciones depende del caudal estimado que podría pasar por la sección: en cada subsección no debería pasar más del 10 % del caudal estimado que pasaría por la sección. Otro criterio es que, en cauces grandes, el número de subsecciones no debe ser menor de 20.
- El ancho superior de la sección transversal (superficie libre del agua) se divide en tramos iguales, cuya longitud es igual al ancho superior de la sección transversal dividido por el número de subsecciones calculadas.
- En los límites de cada tramo del ancho superior del cauce se trazan verticales hasta alcanzar el lecho. La profundidad de cada vertical se puede medir con la misma varilla del correntómetro que está graduada. Las verticales se trazan en el mismo momento en que se van a medir las velocidades.
- Con el correntómetro se mide la velocidad a dos profundidades en el mismo vertical a 0,2 y a 0,8 de la profundidad de la vertical, para lo cual se toma el tiempo que demora el correntómetro en dar 100 revoluciones y se calcula el número de revoluciones por segundo; con este dato se calcula la velocidad del agua en cada una de las profundidades utilizando la fórmula correspondiente, según el número de revoluciones por segundo (n). En el caso de este ejemplo se emplean las siguientes fórmulas:

$$V = 0,2465n + 0,015 \text{ cuando } n \text{ es } < 0,72$$

$$V = 0,2690n + 0,006 \text{ cuando } n \text{ es } > \text{ que } 0,72$$

- Se obtiene la velocidad promedio del agua en cada vertical. La velocidad promedio del agua en cada subsección es el promedio de las velocidades promedio de las verticales que encierran la subsección.
- El área de cada subsección se calculará fácilmente considerándola como un paralelogramo cuya base (ancho del tramo) se multiplica por el promedio de las profundidades que delimitan dicha subsección.
- El caudal de agua que pasa por una subsección se obtiene multiplicando su área por el promedio de las velocidades medias registradas, en cada extremo de dicha subsección.
- El caudal de agua que pasa por el río es la suma de los caudales que pasan por las subsecciones.

3.1.2. Aforo con linnímetros y limnógrafos

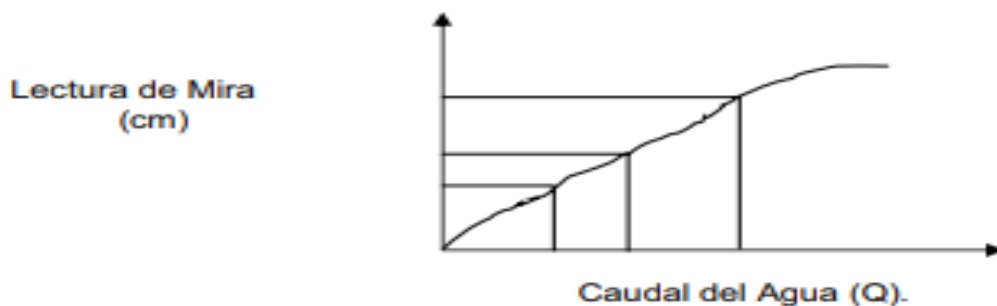
El método que se usa corrientemente para aforar un río es usando linnímetro o limnógrafo, puesto que usar frecuentemente el correntómetro es impracticable por lo difícil y tedioso de realizar las mediciones con este instrumento.

Un linnímetro es simplemente una escala tal como una mira de topógrafo, graduada en centímetro. Se puede utilizar la mira del topógrafo, pero, por lo general, se pinta una escala en una de las paredes del río que debe ser de cemento. Basta leer en la escala o mira el nivel que alcanza el agua para saber el caudal de agua que pasa en este momento, pero previamente se tiene que calibrar la escala o mira. La calibración consiste en aforar el río varias veces

durante el año, en épocas de estiaje y épocas de avenidas, por el método de correntómetro y anotar la altura que alcanzó el agua medida con el linnímetro.

Se hace varios aforos con correntómetro para cada determinada altura del agua. Con los datos altura de agua (h) y del caudal (Q) correspondiente obtenido se construye la llamada curva de calibración en un eje de coordenadas cartesianas.

Figura 18. **Curva de calibración del linnímetro**



Fuente: INRENA. *Manual de hidrometría*. p. 24

El linnímetro siempre debe colocarse en el mismo sitio cada vez que se hace la lectura y su extremidad inferior siempre debe estar sumergida en el agua.

Los limnógrafos pueden ser de metal o de madera. Una escala graduada y pintada en una pared de cemento al costado de una de las riberas del río también puede servir de linnímetro.

Por lo general, aforos de agua se hace tres veces en el día, a las 6 am, 12 del medio día y 6 pm, para obtener el caudal medio diario.

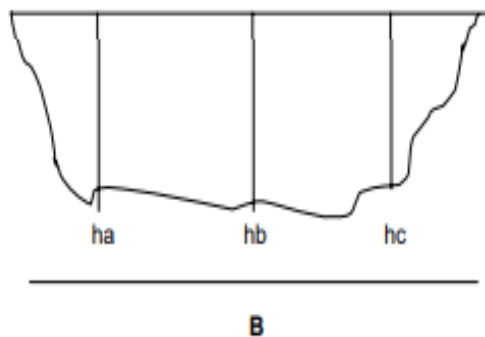
Una mejor manera de aforar el agua es empleando un aparato llamado limnógrafo, el cual tiene la ventaja de poder medir o registrar los niveles de agua en forma continua en un papel especialmente diseñado, que gira alrededor de un tambor movido por un mecanismo de relojería. Los limnógrafos están protegidos dentro de una caseta. Al comprar uno viene acompañado de las instrucciones para su operación y cuidado.

3.1.3. Aforo con flotadores

Este método de aforo con flotadores se utiliza generalmente cuando no se tiene correntómetro y existen excesivas velocidades del cauce, peligros para las personas y para los equipos. La metodología consiste en:

- Cálculo del área de la sección transversal de aforo:
 - Seleccionar un tramo recto del cauce entre 15 m a 20 m.
 - Determinar el ancho del cauce y las profundidades de este en tres partes de la sección transversal.
 - Calcular el área de la sección transversal.

Figura 19. Ancho del cauce



Fuente> INRENA. *Manual de hidrometría*. p. 25

Donde:

Ha, hb, hc: profundidades del cauce

B: ancho del cauce

$$A = B * H$$

Donde:

A: área

H: altura promedio de $(h_a + h_b + h_c) / 3$

- Cálculo de la velocidad: para medir la velocidad en canales o cauces pequeños se coge un tramo recto del curso de agua y alrededor de 5 m a 10 m se deja caer el flotador al inicio del tramo que está debidamente señalado y al centro del curso del agua en lo posible, y se toma el tiempo inicial; luego se toma el tiempo 2, que es cuando el flotador alcanza el extremo final del tramo que también está debidamente marcado; y, sabiendo la distancia recorrida y el tiempo que el flotador se demora en alcanzar el extremo final del tramo, se calcula la velocidad del curso de agua según lo siguiente:

$$V = \frac{L}{T}$$

Donde:

L: longitud del tramo (se recomienda una distancia de 10 m)

T: tiempo de recorrido del flotador entre dos puntos del tramo

V: velocidad en m/s

- Cálculo del caudal:

$$Q = A * V$$

3.2. Gasto real del Río Villalobos

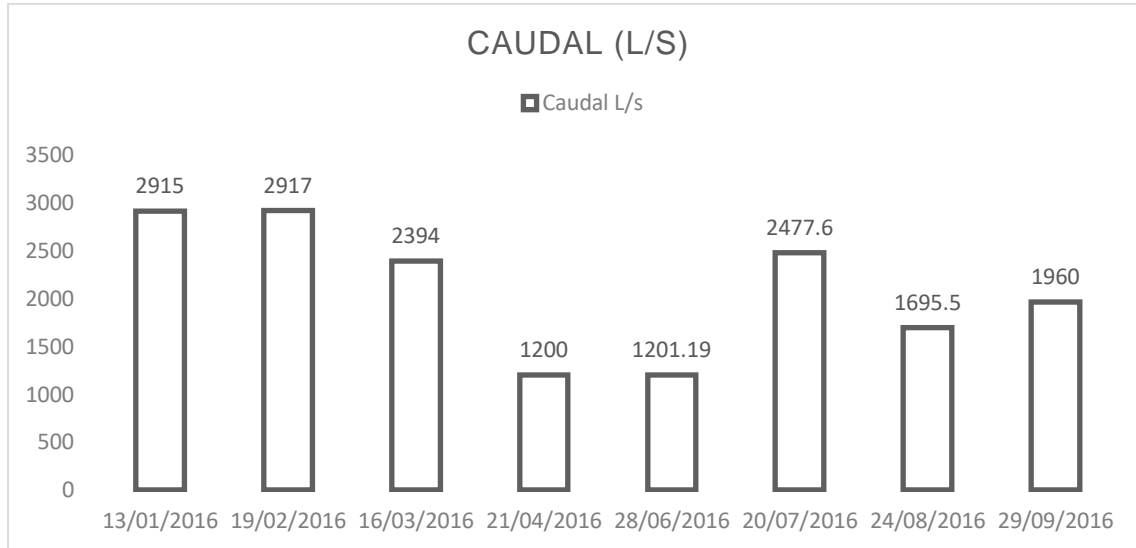
A continuación se muestra un historial de tomas de caudal echas en el Río Villalobos por medio de la División de control, calidad ambiental y manejo de lagos en los meses de verano e invierno de los años 2016, 2017 y 2018.

Tabla V. **Caudal del Río Villalobos en los meses de febrero, marzo y abril del año 2018**

Caudal río Villalobos L/s					
2016		2017		2018	
Fecha	Caudal L/s	Fecha	Caudal L/s	Fecha	Caudal L/s
13/01/16	2,915,00	10/01/17	1,157,40	15/01/18	1,405,00
19/02/16	2,917,00	20/01/17	1,242,10	12/02/18	941,10
16/03/16	2,394,00	20/03/17	1,196,95	13/03/18	1,411,10
21/04/16	1,200,00	19/04/17	1,274,54	09/04/18	1,130,00
28/06/16	1,201,19	08/05/17	1,773,15	09/05/18	1,308,00
20/07/16	2,477,60	19/06/17	1,612,72	11/06/18	1,070,00
24/08/16	1,695,50	10/07/17	1,058,57	10/07/18	1,475,00
29/09/16	1,960,00	07/08/17	1,637,90	14/08/18	1,666,00
		10/10/17	3,690,00	11/09/18	1,575,00
		08/11/17	2,280,00	10/10/18	1,158,00
		05/12/17	2,892,00	15/11/18	1,466,00
				11/12/18	1,598,00

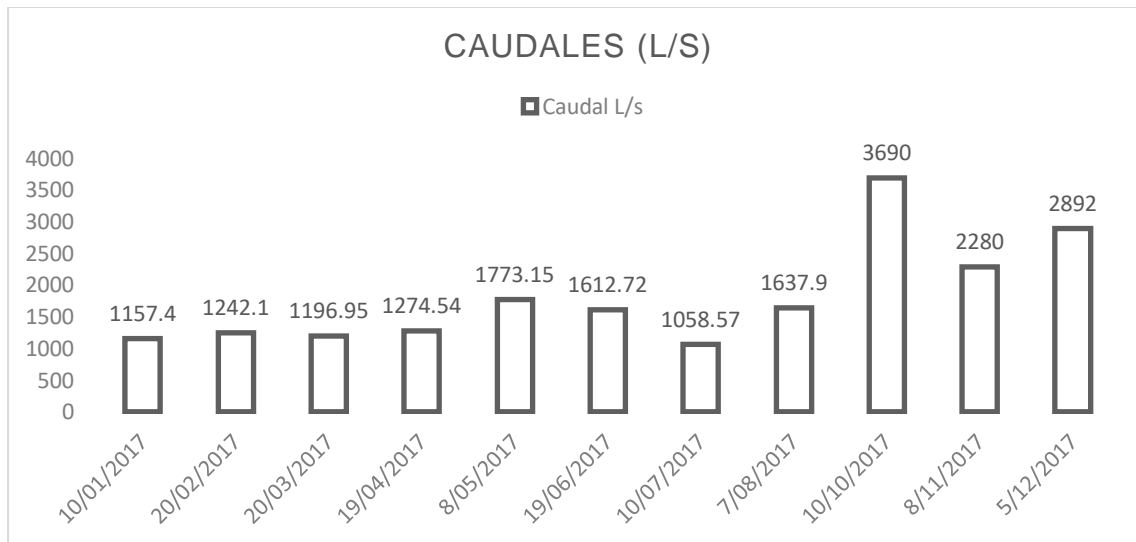
Fuente: AMSA. División de control, calidad ambiental y manejo de lagos.

Figura 20. **Caudales del año 2016 del Río Villalobos**



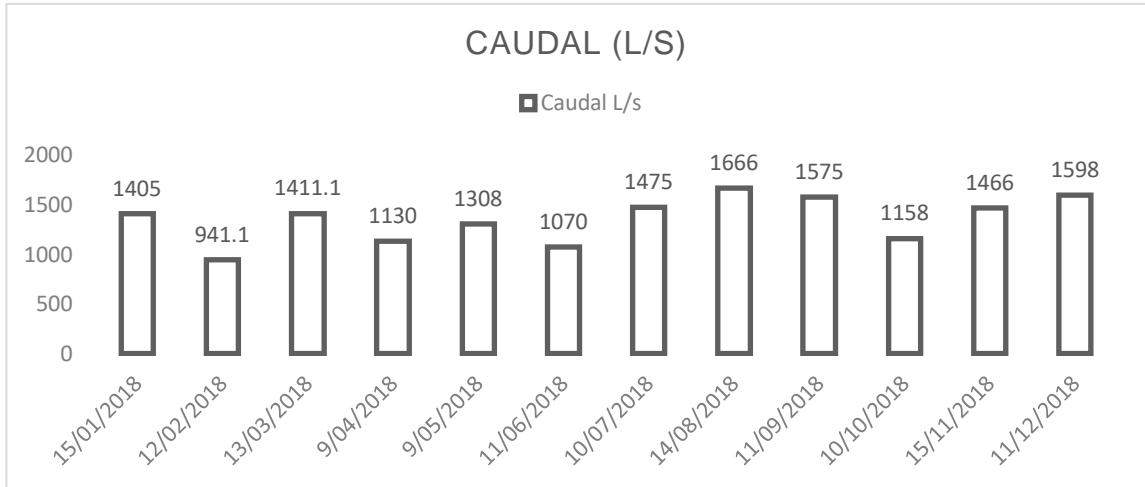
Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Caudales del año 2017 del Río Villalobos**



Fuente: elaboración propia.

Figura 22. **Caudales del año 2018 del Río Villalobos**



Fuente: elaboración propia.

Figura 23. **Caudales máximos y mínimos de los años 2016, 2017 y 2018 del Río Villalobos**



Fuente: elaboración propia.

3.3. Condición del agua del Río Villalobos

El informe del 25 de agosto del año 2017, de la división de control, calidad ambiental y manejo de lagos de AMSA, indica que principalmente la cuenca transporta aguas residuales y desechos sólidos que drenan y se vierten de los poblados circunvecinos.

La carga contaminante tiene un origen en las descargas domésticas e industriales, para lo cual se brinda la carga contaminante en función de la demanda química de oxígeno (DQO) y la demanda biológica de oxígeno (DBO), a pesar que el Río Villalobos recibe la carga contaminantes de todos los ríos que conforman su cuenca, presenta valores bajos de carga contaminante en relación a las microcuencas que le aportan, siendo estos DQO: 44,150 kg/día y DBO: 16,623 kg/día, debido al efecto depurativo que se da por el escurrimiento de las guas a través de todo su cauce fluvial.

Las características fisicoquímicas que tiene el Río Villalobos, iniciando por la concentración de oxígeno en el agua, es aproximadamente de 1,1 mg/L. lo cual es un rango bajo en la saturación de oxígeno, esto debido al exceso de microorganismos dependientes de oxígeno para degradar la materia orgánica.

Con respecto a la determinación de fósforo y nitrógeno en sus diferentes estados oxidativos, se identifica que las sales nitrogenadas son las más abundantes en todos los ríos que aportan al Río Villalobos. De las sales nitrogenadas analizadas, los nitratos y amoníacos representan la mayor parte del nitrógeno total analizado, mientras que el otro fosfato es el compuesto más representativo de fósforo total analizado, por lo cual la relación nitrógeno y fósforo es aproximadamente 22 mg/L.

Otro parámetro que se analiza en los aspectos fisicoquímicos es la conductividad, la cual permite indicar la corriente eléctrica que puede tener el agua en función de la concentración de sólidos dispersos presentes en ella. Los valores de conductividad para los ríos que forman parte de la cuenca del Río Villalobos presentan una conductividad específica que va de los 600 a 900 $\mu\text{S}/\text{cm}$, la microcuenca que presenta valores normales promedio de conductividad es la de Pampumay, que no sobrepasa los 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

El potencial de hidrógeno es conocido cotidianamente como pH, siendo el grado de acidez o basicidad de un cuerpo de agua que se basa en función de los iones de hidrógeno e iones de hidróxido disociados en el agua. Los valores de acidez o basicidad se encuentran estrechamente relacionados con el origen geológico de los suelos y sales disueltas en el agua. El Río Villalobos tiene un pH de 7,67, mientras que las microcuencas están en un rango de 7,55 a 7,90 unidades de pH.

Por último se encuentra la turbidez, este es un parámetro que indica la cantidad de materia sólida suspendida en el agua y se mide a través de la dispersión de la luz reflejada por la materia en suspensión. Los ríos que conforman la cuenca del Río Villalobos presentan valores que van de los 125 a 380 NTU en promedio anual; valores que se encuentran a la vez muy elevados si se toma de referencia al Río Pampumay, el cual presenta valores de promedio anual de 7,50 NTU. El río Villalobos cuenta con una turbidez de 266,89 NTU.

Las características microbiológicas de los ríos que conforman la cuenca del Río Villalobos se caracterizan por presentar altos valores de coliformes fecales, causado por las descargas servidas domésticas, municipales e industriales. Los valores reportados por coliformes fecales para los ríos analizados tienen características de aguas residuales. A pesar de esto, gran parte de estas aguas

son utilizadas para riego y bebedero de animales domésticos, poniendo en riesgo la salud de los animales y las personas que consumen de estos. Las concentraciones de coliformes fecales para los ríos de la cuenca del Río Villalobos representan de 5 a 7 veces más de la concentración del Río Pampumay, siendo aproximadamente de 3,7.

El Río Villalobos cuenta con los siguientes macroinvertebrados bénticos:

- Chironomidae larva
- Psychodidae larva
- Psychodidae
- Stratiomyidae
- Syrphidae
- Chironomidae
- Culcidae

El estudio de espectros copia la absorción atómica para determinar los metales pesados en el agua del Río Villalobos, entre estos se encuentran: Cobre (Cu), Níquel (Ni), Zinc (Zn), Hierro (Fe), Arsénico (As), Cadmio (Cd), Cromo (Cr) y Plomo (Pb). Por lo cual los niveles de contaminación reportados para el Río Villalobos y sus microcuencas presentan un estado ecológico deficiente con organismos indicadores de agua muy contaminada. Esta condición ha permitido que se de paso a la extinción de peces en los más de 500 km de cauce fluvial que se reportan en la cuenca. Por aparte, el estrangulamiento de los ríos debido al crecimiento poblacional desordenado, incremental la vulnerabilidad y riesgo de la población que vive adyacente a los ríos por el crecimiento drástico de sus caudales en temporadas lluviosas.

3.4. Tratamientos de limpieza para los lodos del Río Villalobos

Los tratamientos a los que se deben someter los efluentes tienen que garantizar la eliminación o recuperación del compuesto orgánico en el grado requerido por la legislación que regula el vertido del efluente o para garantizar las condiciones mínimas del proceso en el caso de reutilización recirculación de la corriente para uso interno. El nivel máximo admisible de contaminante puede conseguirse mediante la utilización de diversas técnicas tanto destructivas como no destructivas.

Tabla VI. **Métodos de eliminación de compuestos orgánicos en aguas residuales**

Métodos no destructivos Adsorción (<i>carbón activo y otros adsorbentes</i>) Desorción (<i>stripping</i>) Extracción en fase líquida con disolventes Tecnología de membranas (<i>ultrafiltración, nanofiltración</i>)
Métodos destructivos Tratamiento biológico (<i>aerobio y anaerobio</i>) Oxidación química Incineración Oxidación húmeda catalítica y no catalítica Oxidación húmeda supercrítica Procesos avanzados de oxidación

Fuente: FERNÁNDEZ, Antonio. *Tratamientos avanzados de aguas residuales*. p. 16

En el contexto del tratamiento de contaminantes en efluentes acuosos la aplicación de una técnica no destructiva se entiende como una etapa previa de concentración antes de abordar su destrucción química. El carácter oxidable de la materia orgánica hace que la transformación en compuestos no tóxicos consista, en último extremo, aunque no necesariamente en la mineralización o

conversión del carbono orgánico a dióxido de carbono, sino en la transformación de los contaminantes en sustancias biodegradables que no originen problemas de inhibición de biomasa en tratamientos biológicos convencionales o que permitan la descarga sin originar problemas de ecotoxicidad.

La aplicación de un método u otro depende fundamentalmente de la concentración del contaminante y del caudal de efluente. Determinadas técnicas, como la incineración y algunos tratamientos de oxidación, son utilizables solo cuando la concentración de compuestos orgánicos es elevada y son útiles en efluentes con baja concentración de contaminante.

3.4.1. Tratamientos para la eliminación de materia en suspensión

La materia en suspensión puede ser de muy diversa índole, desde partículas de varios centímetros y muy densas (normalmente inorgánicas), hasta suspensiones coloidales muy estables y con tamaños de partícula de hasta unos pocos nanómetros (normalmente de naturaleza orgánica). También la concentración de estos, tanto en el agua como en el agua una vez tratada, juega un papel fundamental a la hora de la elección del tratamiento más conveniente.

Las operaciones para eliminar este tipo de contaminación de aguas suelen ser las primeras en efectuarse, dado que la presencia de partículas en suspensión suele no ser indeseable en muchos otros procesos de tratamiento. La eliminación de esta materia en suspensión se suele hacer mediante operaciones mecánicas. Sin embargo, en muchos casos, y para favorecer esa separación, se utilizan aditivos químicos, denominándose en este caso tratamientos químicos y físicos.

A continuación se describen las operaciones unitarias más habituales. La utilización de otra es función de las características de las partículas (tamaño, densidad, forma, entre otros), así como de la concentración de estas.

3.4.1.1. Desbaste

Es una operación en la que se trata de eliminar sólidos de mayor tamaño que el que habitualmente tienen las partículas que arrastran las aguas. El objetivo es eliminarlos y evitar que dañen equipos posteriores del resto de tratamientos. Suele ser un tratamiento previo a cualquier otro. El equipo que se suele utilizar son rejillas por las que se hace circular el agua, construidas por barras metálicas de 6 o más mm, dispuestas paralelamente y espaciadas entre 10 mm y 100 mm. Se limpian con rastrillos que se accionan normalmente de forma mecánica.

En otros casos, si el tipo de sólidos lo permite, se utilizan trituradoras, reduciendo el tamaño de sólidos y separándose posteriormente por sedimentación y otras operaciones.

3.4.1.2. Sedimentación

Operación física en la que se aprovecha la fuerza de la gravedad que hace que una partícula más densa que el agua tenga una trayectoria decente, depositándose en el fondo del sedimentador. Esta operación será más eficaz cuanto mayor sea el tamaño y la densidad de las partículas a separar del agua, es decir, cuanto mayor sea su velocidad de sedimentación, siendo el principal parámetro de diseño para estos equipos. A esta operación de sedimentación se le suele denominar también decantación.

Realmente, este tipo de partículas (grandes y densas, como las arenas) se tienen en pocas ocasiones en aguas industriales. Lo más habitual es encontrar sólidos poco densos, por lo que es necesario, para hacer más eficaz la operación, llevar a cabo una coagulación y floculación previa que, como se explicará más adelante, consiste en la adición de ciertos reactivos químicos para favorecer el aumento del tamaño y densidad de las partículas.

- Sedimentadores rectangulares: la velocidad de desplazamiento horizontal del agua es constante y se suele utilizar para separar partículas densas y grandes (arenas). Este tipo de sedimentación se denomina discreta, dado que las partículas no varían sus propiedades físicas a lo largo del desplazamiento hacia el fondo del sedimentador. Suelen ser equipos poco profundos, dado que, al menos teóricamente, este parámetro no influye en la eficacia de la separación, siendo el principal parámetro el área horizontal del mismo.
- Sedimentadores circulares: son más habituales, en ellos el flujo de agua suele ser radial desde el centro hacia el exterior, por lo que la velocidad de desplazamiento del agua disminuye al alejarse del centro del sedimentador. Esta forma de operar es adecuada cuando la sedimentación va acompañada de una floculación de las partículas, en las que el tamaño del flóculo aumenta al descender las partículas, y por lo tanto aumenta su velocidad de sedimentación.
- Sedimentadores lamelares: han surgido como alternativa a los sedimentadores poco profundos, al conseguirse una mayor área de sedimentación en el mismo espacio. Consisten en tanques de poca profundidad que contienen paquetes de placas (lamelas) o tubos inclinados respecto a la base, y por cuyo interior se hace fluir el agua de manera ascendente. En la superficie inferior se van acumulando las

partículas, desplazándose de forma descendente y recogándose en el fondo del sedimentador.

Las partículas depositadas en el fondo de los equipos (denominados fangos) se arrastran mediante rasquetas desde el fondo donde se empujan hacia la salida. Estos fangos, en muchas ocasiones y en la misma planta de tratamiento, se someten a distintas operaciones para reducir su volumen y darles un destino final.

3.4.1.3. Filtración

La filtración es una operación en la que se hace pasar el agua a través de un medio poroso, con el objetivo de retener la mayor cantidad posible de materia en suspensión. El medio poroso tradicionalmente utilizado es un lecho de arena, de altura variable, dispuesta en distintas capas de distinto tamaño de partícula, siendo la superior la más pequeña y de entre 0,15 mm y 0,3 mm. Es una operación muy utilizada en el tratamiento de aguas potables, así como en el tratamiento de aguas para reutilización, para eliminar la materia en suspensión que no se ha eliminado en anteriores operaciones (sedimentación). En aguas industriales hay más variedad en cuanto al material filtrante utilizado, siendo habitual el uso de tierra de diatomeas. También es habitual, para mejorar la eficacia, realizar una coagulación y floculación previa.

Hay muchas maneras de clasificar los sistemas de filtración: por gravedad o a presión, lenta o rápida, de torta o en profundidad.

- Filtración por gravedad: el agua circula verticalmente y en descenso a través del filtro por simple gravedad. Dentro de este tipo es posible hablar de dos formas de una filtración rápida. El mecanismo de la separación de

sólidos es una combinación de asentamiento, retención, adhesión y atracción, por lo que se eliminan partículas mucho menores que el espacio intersticial. Es un sistema muy utilizado en tratamiento para aguas potables.

- Filtración por presión: normalmente están contenidos en recipientes y el agua se ve forzada a atravesar el medio filtrante sometido a presión. También en este caso puede existir filtración lenta, en la que, en la superficie, es por mecanismos físicos y biológicos. Por otro lado, en la filtración rápida se habla de filtración en profundidad, es decir, cuando la mayor parte de espesor de medio filtrante está activo para el proceso de filtración y la calidad del filtrado mejora con la profundidad. Esta filtración a presión se suele utilizar más en aguas industriales.

En la actualidad y en algunas de sus aplicaciones, estos métodos están siendo desplazados por operaciones con membranas, especialmente por microfiltración, de las que se hablará en el capítulo correspondiente.

3.4.1.4. Flotación

Operación física que consiste en generar pequeñas burbujas de gas (aire), que se asociarán a las partículas presentes en el agua y serán elevadas hasta la superficie, de donde son arrastradas y sacadas del sistema. Obviamente, esta forma de eliminar materia en suspensión será adecuada en los casos en los que las partículas tengan una densidad inferior o muy parecida a la del agua, así como en el caso de emulsiones, es decir, una dispersión de gotas de un líquido inmisible, como en el caso de aceites y grasas. En este caso las burbujas de aire ayudan a flotar más rápidamente estas gotas, dado que generalmente la densidad de estos líquidos es menor que la del agua.

En esta operación hay un parámetro importante a la hora del diseño: la relación aire/sólidos, ml/l de aire liberados en el sistema por cada mg/l de concentración de sólidos en suspensión contenidos en el agua a tratar. Es un dato para determinar experimentalmente y suele tener un valor óptimo comprendido entre 0,005 y 0,06.

En el tratamiento de aguas se utiliza aire como agente de flotación, y en función de cómo se introduzcan en el líquido se tienen dos sistemas de flotación:

- Flotación por aire disuelto (DAF): en este sistema el aire se introduce en el agua residual bajo una presión de varias atmósferas. Los elementos principales de estos equipos son la bomba de presurización, el equipo de inyección de aire, el tanque de retención o saturador y la unidad de flotación propiamente dicha, donde tiene lugar la reducción brusca de la presión, por lo que el aire disuelto se libera, formando multitud de microburbujas de aire.
- Flotación por aire inducido: la operación es similar a la de flotación por aire disuelto, pero la generación de burbujas se realiza a través de difusores de aire, normalmente situados en la parte inferior del equipo de flotación, o bien inducidas por rotores o agitadores. En este caso el tamaño de las burbujas inducidas es mayor que en el caso anterior.

Históricamente la flotación se ha utilizado para separar la materia sólida o líquida flotante, es decir, con una menor densidad que el agua. Sin embargo, la mejora en la generación de burbujas adecuadas y la utilización de reactivos para favorecer la operación (por ejemplo, sustancias que disminuyen la tensión superficial) ha hecho posible la utilización de esta operación para la eliminación de materia más densa que el agua. Así se utiliza en el tratamiento de aguas procedentes de refinerías, industria de la alimentación, pinturas, entre otros. Una

típica aplicación es también, aunque no sea estrictamente tratamiento de aguas, el espesado de fangos. En esta operación se trata de “espesar” o concentrar los fangos obtenidos en operaciones como la sedimentación.

3.4.1.5. Coagulación y Floculación

Como ya se ha mencionado, en muchos casos la mayor parte de la materia en suspensión puede estar formada por partículas de muy pequeño tamaño alrededor de 10^{-6} m – 10^{-9} m, lo que conforma una suspensión coloidal. Estas suspensiones coloidales suelen ser muy estables, en muchas ocasiones debido a interacciones eléctricas entre las partículas. Por tanto, tienen una velocidad de sedimentación extremadamente lenta, por lo que haría inviable un tratamiento mecánico básico. Una forma de mejorar la eficacia de todos los sistemas de eliminación de materia en suspensión es la adición de ciertos reactivos químicos que, en primer lugar, desestabilicen la suspensión coloidal (coagulación) y a continuación favorezcan la floculación de estas para obtener partículas fácilmente sedimentables. Es una operación que se utiliza con frecuencia, tanto en el tratamiento de aguas residuales urbanas y potables como también en procesos industriales.

Los coagulantes suelen ser productos químicos que en solución aportan carga eléctrica contraria a la del coloide. Habitualmente se utilizan sales con cationes de alta relación carga/masa junto con polielectrolitos orgánicos, cuyo objetivo también debe ser favorecer la floculación:

- Sales de Fe^{3+} : pueden ser Cl_3Fe o $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, con eficacia semejante. Se pueden utilizar tanto en estado sólido como en disoluciones. La utilización de una u otra está en función del anión, si no se desea la presencia de cloruros o sulfatos.

- Sales de Al^{3+} : suelen ser $Al_2(SO_4)_3$ o policloruro de aluminio. En el primer caso es más manejable en disolución, mientras que el segundo presenta la ventaja de mayor porcentaje en peso de aluminio por kg dosificado.
- Polielectrolitos: pueden ser polímeros naturales o sintéticos, no iónicos (poliacrilamidas) aniónicos (ácidos poliacrílicos) o catiónicos (polivinilaminas). Las cantidades para dosificar son mucho menores que para las sales, pero tanto la eficacia como el costo es mucho mayor.

Por otro lado, la electrocoagulación es otra forma de llevar a cabo el proceso, ampliamente utilizada en el caso de tratamiento de aguas residuales. Consiste en la formación de los reactivos *in situ* mediante la utilización de una célula electrolítica. El ánodo suele ser de aluminio, formándose cationes de Al^{3+} , mientras en el cátodo se genera H_2 , siendo útil si la separación posterior de la materia es por flotación.

3.4.2. Tratamientos para la eliminación de materia disuelta

Al igual que en el caso de la materia en suspensión, la materia disuelta puede tener características y concentraciones muy diversas: desde grandes cantidades de sales inorgánicas disueltas (salmueras), orgánicas (materia orgánica biodegradable en industria de alimentación), hasta extremadamente pequeñas cantidades de inorgánicos (metales pesados), y orgánicos (pesticidas) pero siendo necesaria su eliminación dado su carácter peligroso.

Algunos de estos tratamientos están siendo desplazados por otros más avanzados y emergentes, como son los procesos de oxidación avanzada y las operaciones con membrana, y especialmente en el caso de las aguas industriales.

3.4.2.1. Precipitación

Consiste en la eliminación de una sustancia disuelta indeseable, por adición de un reactivo que forme un compuesto insoluble con el mismo, facilitando así su eliminación por cualquiera de los métodos descritos en la eliminación de la materia en suspensión. Por lo que este proceso se basa en la formación de sales insolubles, o la transformación química de unión en otro con mayor o menor estado de oxidación que provoque la formación de un compuesto insoluble.

Un reactivo de muy frecuente uso en este tipo de operaciones es el Ca^{2+} , dada la gran cantidad de sales insolubles que forma, por ejemplo, se usa esta sal para la eliminación de fosfatos (nutriente). Además, posee cierta capacidad coagulante, lo que hace su uso masivo en aguas residuales urbanas y muchas áreas industriales con características similares.

3.4.2.2. Procesos electroquímicos

Está basado en la utilización de técnicas electroquímicas, haciendo pasar una corriente eléctrica a través del agua (que necesariamente ha de contener un electrolito) y provocando reacciones de oxidación y reducción tanto en el cátodo como en el ánodo. Siendo así se utiliza energía eléctrica como vector de descontaminación ambiental, siendo su costo una de las principales desventajas de este proceso. Sin embargo, como ventajas cabe destacar la versatilidad de los equipos, la ausencia tanto de la utilización de reactivos como de la presencia de fangos y la selectividad, pues controlar el potencial del electrodo permite seleccionar la reacción electroquímica dominante deseada.

Las consecuencias de las reacciones que se producen pueden ser indirectas, como en el caso de la electrocoagulación, electroflotación o

electrofloculación, en que los productos formados por electrolisis sustituyen a los reactivos químicos, y suponen una alternativa con futuro a la clásica adición de reactivos. Sin embargo, la aplicación que está tomando un auge importante es el tratamiento de aguas residuales industriales, a través de una oxidación o reducción directa.

- Oxidación en ánodo: en el ánodo se puede producir la oxidación de los compuestos a eliminar, tanto orgánicos como inorgánicos. Esta oxidación se puede producir directamente por una transferencia de electrones en la superficie del ánodo o bien por la generación de un agente oxidante ínsito. En este último caso se evita manipular agentes oxidantes. Entre las aplicaciones de la oxidación directa cabe destacar el tratamiento de cianuros, colorantes, compuestos orgánicos tóxicos (en algunas ocasiones haciéndolos más biodegradables), incluso la oxidación de Cr (III) a Cr (VI), más tóxico pero que de esta forma puede ser reutilizado. El rango de concentraciones con posibilidades de utilizar este tipo de tratamiento también es muy amplio.
- Reducción en cátodo: la principal aplicación de esta posibilidad es la reducción de metales tóxicos. Se ha utilizado en situaciones no poco frecuentes, de reducción de metales catiónicos desde varios miles de ppm's de concentración hasta valores incluso por debajo de la ppm. Hay una primera etapa de deposición del metal sobre la superficie del cátodo que ha de continuarse con la remoción de este. Esto se puede hacer por raspado, disolución en otra fase, entre otros.

El reactor electroquímico utilizado suele ser de tipo filtro y prensa, semejante a las pilas de combustible. Este sistema permite un crecimiento modular del área. Básicamente cada módulo se compone de un elemento catódico de bajo sobrevoltaje a hidrógeno (Pt, Au, Acero Inoxidable, Ni,) y un elemento anódico que utiliza como base óxidos de metales nobles.

3.4.2.3. Intercambio Iónico

Es una operación en la que se utiliza un material, habitualmente denominado resinas de intercambio iónico, que es capaz de retener selectivamente sobre su superficie los iones disueltos en el agua, los mantiene temporalmente unidos a la superficie y los cede frente a una disolución con un fuerte regenerante. La aplicación habitual de estos sistemas es, por ejemplo, la eliminación de sales cuando se encuentran en bajas concentraciones, siendo típica la aplicación para la desmineralización y el ablandamiento de aguas, así como la retención de ciertos productos químicos y la desmineralización de jarabes de azúcar.

Las propiedades que rigen el proceso de intercambio iónico y que a la vez determinan sus características principales son las siguientes:

- Las resinas actúan selectivamente, de forma que pueden preferir un ion sobre otro con valores relativos de afinidad de 15 o más.
- La reacción de intercambio iónico es reversible, es decir, puede avanzar en los dos sentidos.
- En la reacción se mantiene la electroneutralidad.

Hay una sustancia natural (zeolitas) que tiene capacidad de intercambio, pero en las industrias se utilizan resinas poliméricas de fabricación sintética con muy claras ventajas de uso. Entre las ventajas del proceso iónico en el tratamiento de aguas cabe mencionar:

- Son equipos muy versátiles siempre que se trabaje con bajas concentraciones de sales.

- Actualmente las resinas tienen altas capacidades de tratamiento, resultando compactas y económicas.
- Las resinas son muy estables químicamente, de larga duración y fácil regeneración.
- Existe cierta facilidad de automatización y adaptación a situaciones específicas.

3.4.2.4. Adsorción

El proceso de adsorción consiste en la captación de sustancias solubles en la superficie de un sólido. Un parámetro fundamental en este caso será la superficie específica del sólido, dado que el compuesto soluble a eliminar se ha de concentrar en la superficie de este. La necesidad de una mayor calidad de las aguas está haciendo que este tratamiento esté en auge. Es considerado como un tratamiento de refino, y por lo tanto al final de los sistemas de tratamientos más usuales. Entre los factores que afectan la adsorción están:

- Solubilidad: menor solubilidad, mejor adsorción
- Estructura molecular: más ramificada, mejor adsorción
- Peso molecular: grandes moléculas, mejor adsorción
- Problemas de difusión interna, poder alternar la norma
- Polaridad: menor polaridad, mejor adsorción
- Grado de saturación: insaturados, mejor adsorción

El sólido universalmente utilizado en el tratamiento de aguas es el carbón activo, aunque recientemente se están desarrollando diversos materiales sólidos que mejoran, en ciertas aplicaciones, las propiedades del carbón activo. Hay dos formas clásicas de utilización de carbón activo, con propiedades diferentes y utilizadas en diferentes aplicaciones:

- Carbón activado granular (GAC): se suele utilizar una columna como medio de contacto entre el agua a tratar y el carbón activado, en la que entra por la parte inferior y asciende hacia superior. El tamaño de partícula en este caso es mayor que en el otro. Se suele utilizar para eliminar elementos, especialmente orgánicos, que pueden estar presentes en el agua, y que habitualmente han resistido un tratamiento biológico. Son elementos que, a pesar de su pequeña concentración, en muchas ocasiones proporcionan mal olor, color o sabor al agua.
- Carbón activo en polvo (CAP): este tipo de carbón se suele utilizar en procesos biológicos, cuando el agua contiene elementos orgánicos que pueden resultar tóxicos. También se suele añadir al agua a tratar, y pasado un tiempo de contacto, normalmente con agitación, se deja sedimentar las partículas para su separación previa. Suelen ser operaciones llevadas a cabo en discontinuo.

La viabilidad económica de este proceso depende de la existencia de un medio eficaz de regeneración del sólido una vez agotada su capacidad de adsorción. El GAC se regenera fácilmente por oxidación de la materia orgánica y posterior eliminación de la superficie del sólido en un horno. Las propiedades del carbón activo se deterioran, por lo que es necesario reponer parte de este por carbón virgen en cada ciclo. Por otro lado, el CAP es más difícil de regenerar, pero también es cierto que es más fácil de producir.

Alternativas al carbón activo son las zeolitas, arcillas (montmorillonita, sepiolita, bentonita, entre otras), los denominados absorbentes de bajo costo, procedentes en mayor parte de residuos sólidos orgánicos. Recientemente se están desarrollando derivados de polisacáridos (biopolímeros derivados del almidón). La aplicación del proceso de adsorción es amplia, desde un amplio

abanico de sustancias orgánicas (colorantes, fenol, mercaptanos, entre otros) hasta metales pesados en todos sus estados de oxidación.

3.4.2.5. Desinfección

La desinfección pretende la destrucción o inactivación de los microorganismos que puedan causar enfermedades, dado que el agua es uno de los principales medios por el que se transmiten. Los organismos causantes de enfermedades pueden ser bacterias, virus, protozoos y algunos otros. La desinfección se hace imprescindible para la protección de la salud pública, si el agua a tratar tiene como finalidad el consumo humano. En el caso de aguas residuales industriales, el objetivo puede ser no solo desactivar patógenos, sino cualquier otro organismo vivo, si lo que se pretende es reutilizar el agua.

Para llevar a cabo la desinfección se pueden utilizar distintos tratamientos: tratamiento físico (calor, radiación), ácidos o bases, entre otros, pero, fundamentalmente se utilizan agentes oxidantes, entre los que cabe destacar el clásico Cl_2 y algunos de sus derivados, o bien procesos de oxidación avanzada (O_2 , fotocatalisis heterogénea), estos últimos estudiados en el capítulo correspondiente.

La utilización de desinfectantes persigue tres finalidades: producir agua libre de patógenos u organismos vivos, evitar la producción de subproductos indeseables de la desinfección y mantener la calidad bacteriológica en la red conducción posterior. Los reactivos más utilizados son los siguientes:

- Desinfección con cloro (Cl_2): es el oxidante más ampliamente utilizado. Hay una serie de factores que influyen en el proceso, como lo es la naturaleza y la concentración de organismos para destruir sustancias

disueltas o en suspensión en el agua, así como la concentración de cloro y el tiempo de contacto utilizado. Las sustancias presentes en el agua influyen en gran medida en la cloración; en presencia de sustancias orgánicas, el poder desinfectante es menor. La presencia de amonio consume cloro (formación de cloraminas). El hierro y manganeso aumentan la demanda de este. En este sentido, es importante realizar un estudio de la demanda del cloro, para determinar la dosis del cloro correcta para cada tipo de agua. Además de la dosis es también importante el tiempo de contacto, de manera que el parámetro a utilizar es la expresión C.t: concentración de desinfectante final en mg/l (C) y tiempo de exposición mínimo en minutos (t). Normalmente la expresión utilizada es $C^n \cdot t = \text{constante}$, que para el cloro adopta valores entre 0,5 y 1,5. Sin embargo, una de las principales desventajas de la utilización del cloro como desinfectante es la posibilidad de formación, aunque en cantidades muy reducidas, de compuestos como los trihalometanos.

- Otros compuestos clorados: el hipoclorito sódico, fabricado a partir del Cl_2 es también utilizado como desinfectante en sistemas con menores caudales de trabajo, aunque las propiedades son muy semejantes a las del Cl_2 , más oxidante que el cloro, no reacción con amonio, por tanto, no forma cloraminas y parece ser que la posibilidad de formación de trihalometano es mucho menor. Todas estas ventajas están abriendo nuevas posibilidades a la utilización de este compuesto para la desinfección.

3.4.3. Tratamientos biológicos

Constituyen una serie de importantes procesos de tratamiento que tienen en común la utilización de microorganismos (entre las que destacan las bacterias) para llevar a cabo la eliminación de componentes indeseables del agua,

aprovechando la actividad metabólica de los mismos sobre esos componentes. La aplicación tradicional consiste en la eliminación de materia orgánica biodegradable, tanto soluble como coloidal, así como la eliminación de compuestos que contienen elementos nutrientes (nitrógeno y fósforo). Es uno de los tratamientos más habituales, no solo en el caso de aguas residuales urbanas, sino en buena parte de las aguas industriales.

En la mayor parte de los casos, la materia orgánica constituye la fuente de energía y de carbono que necesitan los microorganismos para su crecimiento. Además, también es necesaria la presencia de nutrientes, que contengan los elementos esenciales para el crecimiento, especialmente los compuestos que contengan nitrógeno y fósforo, por último, en el caso de sistema aerobio, la presencia de oxígeno disuelto en el agua. Este último aspecto será clave a la hora de elegir el proceso biológico más conveniente. En el metabolismo bacteriano juega un papel fundamental el elemento aceptor de electrones en los procesos de oxidación de la materia orgánica. Este aspecto, además, tiene una importante incidencia en las posibilidades de aplicación al tratamiento de aguas. Atendiendo a cuál es dicho aceptor de electrones se distinguen tres casos:

- Sistemas aerobios: la presencia de O_2 hace que este elemento sea el aceptor de electrones, por lo que se obtiene unos rendimientos energéticos elevados, provocando una importante generación de fangos, debido al alto crecimiento de las bacterias aerobias. Su aplicación de a aguas residuales puede estar muy condicionada por la baja solubilidad del oxígeno en el agua.
- Sistemas anaerobios: en este caso el aceptor de electrones puede ser el CO_2 o parte de la propia materia orgánica, obteniéndose como producto de esta reducción el carbono en su estado más reducido, CH_4 . La

utilización de este sistema tendría como ventaja importante la obtención de un gas combustible.

- Sistemas anóxicos: se denominan así los sistemas en los que la ausencia de O_2 y la presencia de NO_3 hacen que este último elemento sea el aceptor de electrones, transformándose, entre otros, en N_2 , elemento completamente inerte. Por tanto, es posible, en ciertas condiciones, conseguir una eliminación biológica de nitratos (desnitrificación).

Teniendo en cuenta todos estos aspectos, existe una gran variedad de formas de operar, dependiendo de las características del agua, así como de la carga orgánica a tratar.

3.4.3.1. Procesos biológicos aerobios

Son muchas las posibilidades de tratamiento:

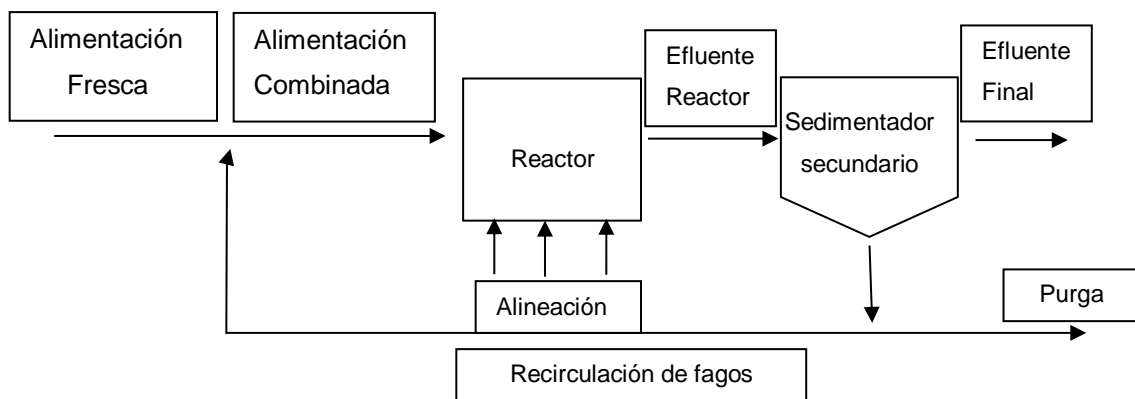
- Cultivo en suspensión: proceso de fangos activados (lodos activados) y modificaciones en la forma de operar: aireación prolongada, contacto-estabilización, reactor discontinuo secuencial (RDS).
- Cultivos fijos: los microorganismos se pueden inmovilizar en la superficie de sólidos (biomasa soportada), destacando los filtros percoladores (también conocidos como lechos bacterianos o filtros biológicos).

3.4.3.1.1. Fangos activados: proceso básico

Consiste en poner en contacto en un medio aerobio, normalmente en una balsa aireada, el agua residual con flóculos biológicos previamente formados es lo que adsorbe la materia orgánica y donde es degradada por las bacterias

presentes. Junto con el proceso de degradación, y para separar los flóculos del agua, se ha de llevar a cabo una sedimentación, donde se realiza una recirculación de parte de los fangos, para mantener una elevada concentración de microorganismos en el interior del reactor, además de una purga equivalente a la cantidad crecida de organismos.

Figura 24. **Proceso de fangos activados**



Fuente: FERNÁNDEZ, Antonio. *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales*. p. 31

Dentro de los parámetros básicos de funcionamiento un muy importante es el de la aireación. La solubilidad del oxígeno en el agua es pequeña (en torno a 8 – 9 mgO₂/l dependiendo de presión y temperatura), por lo que será necesario asegurar el suministro a los microorganismos, utilizando aireadores superficiales, capaces de suministrar 1 kgO₂/kW-h, o bien difusores. El valor mínimo de operación aconsejable de concentración de oxígeno disuelto es de 2 mg/l. El consumo eléctrico en esta operación será importante dentro de los costes de operación del proceso.

Otro parámetro clave en el proceso se refiere al parámetro A/M, algunas veces denominado I (intensidad de carga). Se refiere a la relación entre la carga orgánica alimentada y la cantidad de microorganismos disponibles en el sistema,

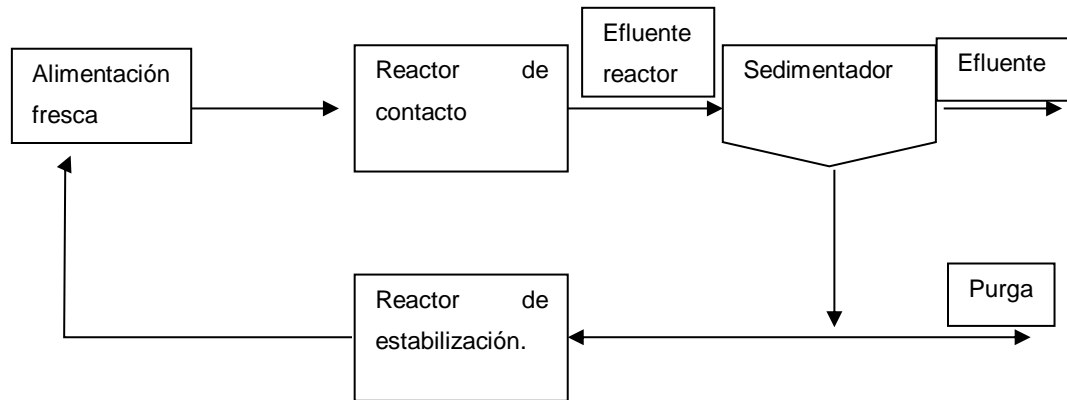
con unidades kgDBO_5 (o DQO) / kgSSV-día . Es un parámetro de diseño fundamental, teniendo un valor óptimo entre 0,3 – 0,6 para las condiciones más convencionales de funcionamiento. Además, tiene una influencia determinante en la buena sedimentación posterior.

La denominada “edad celular” también es un parámetro importante. Se refiere al tiempo medio que permanecen los fangos (flóculos, microorganismos) en el interior del sistema. Esta magnitud suele tener un valor de 5 – 8 días en condiciones convencionales de operación.

3.4.3.1.2. Fangos activados: modificaciones del proceso básico

- Aireación prolongada: se suele trabajar con relaciones A/M más pequeñas (mayores de residencia), consiguiendo mayores rendimientos en la degradación de materia orgánica. Otra ventaja añadida es la pequeña generación de fangos de depuradora. Es interesante su utilización, además, cuando se pretendan eliminar compuestos con nitrógeno simultáneamente con la materia orgánica.
- Contacto estabilización: en el reactor de aireación se suele trabajar con menores tiempos de residencia (sobre una hora) pretendiendo que se lleve a cabo solo la adsorción de la materia orgánica en los flóculos. La verdadera degradación se realiza en una balsa de aireación insertada en la corriente de recirculación de fangos, y donde la concentración de fangos es mucho más elevada que en el primer reactor. Es interesante esta opción cuando buena parte de la materia orgánica a degradar se encuentra como materia en suspensión.

Figura 25. **Proceso biológico de contacto y estabilización**



Fuente: FERNÁNDEZ, Antonio. *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales*. p. 32

- Reactores discontinuos secuenciales (SBR): todas las operaciones (aireación y sedimentación) se llevan a cabo en el mismo equipo, incluyendo una etapa de llenado y terminando con la evacuación del agua tratada. Es una opción muy válida para situaciones en las que se dispone de poco espacio, como ocurre en muchas industrias. Son versátiles en cuanto a las condiciones de operación y habitualmente se utilizan columnas de burbujeo como reactores.

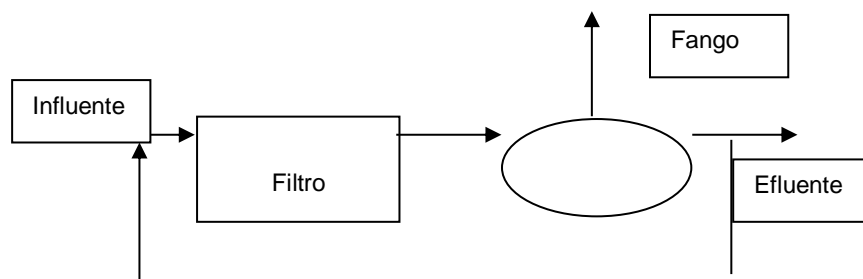
3.4.3.1.3. Procesos aerobios con biomasa soportada

Otra de las formas para conseguir concentraciones suficientes de microorganismos, sin necesidad de recirculación, es favoreciendo su crecimiento en la superficie de sólidos. Se evitan de esta forma los posibles problemas en la sedimentación y recirculación de fangos, frecuente en los procesos clásicos de fangos activados. Sin embargo, el aporte de oxígeno será de nuevo un factor

importante, consiguiéndose en este caso bien en la distribución del líquido, bien por movimiento del sistema.

Filtros percoladores: también denominados filtros biológicos o lechos bacterianos. Son los sistemas aerobios de biomasa inmobilizada más extendidos en la industria. Suelen ser lechos fijos de gran diámetro, rellenos con rocas o piezas de plástico o cerámica con formas especiales para desarrollar una gran superficie. Sobre la superficie crece una fina capa de biomasa, sobre la que se dispersa el agua residual a tratar, que moja en su descenso la superficie. Al mismo tiempo, ha de quedar espacio suficiente para que circule aire, que asciende de forma natural. El crecimiento de la biomasa provoca que parte de los microorganismos se desprendan de la superficie y, por lo tanto, seguirá siendo necesaria una sedimentación posterior para su separación del efluente. En general también se realiza una recirculación de parte del efluente limpio, una vez producida la separación. En estos sistemas la velocidad de carga orgánica es el parámetro más importante, teniendo rangos de aplicación en la industria desde 30 a 10 000 kgDBO₅/día y 100 m³ de reactor, siendo los tamaños muy variables (desde 2 hasta 10 m de altura).

Figura 26. Diagrama de operación típico de un filtro percolador



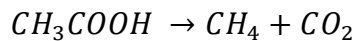
Fuente: FERNÁNDEZ, Antonio. *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales*. p. 34

- Contactores Biológicos Rotatorios (RBC): biodiscos: consisten en una serie de placas o discos, soportados en un eje y parcialmente sumergidos (40 %) en una balsa que contiene el agua residual. El eje junto con los discos gira lentamente. Sobre la superficie de los discos crece la biopelícula, que sucesivamente se moja y entra en contacto con el aire, produciéndose la degradación de la materia orgánica. Son fáciles de manejar y convenientes cuando se trata de pequeños caudales. Normalmente el tamaño es de entre 1 m y 3 m de diámetro, están separados unos 10 cm – 20 cm y con velocidades de giro de 0,5 – 3 rpm.

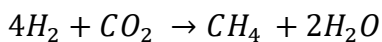
3.4.3.2. Procesos biológicos anaerobios

El tratamiento anaerobio es un proceso biológico ampliamente utilizado en el tratamiento de aguas residuales. Cuando estas tienen una alta carga orgánica se presenta como única alternativa frente al que sería un costoso tratamiento aerobio, debido al suministro de oxígeno. El tratamiento anaerobio se caracteriza por la producción del denominado biogás, formado fundamentalmente por metano (60 % – 80 %) y dióxido de carbono (20 % – 40 %) y susceptible de ser utilizado como combustible para la generación de energía térmica y/o eléctrica. Además, solo una pequeña parte de la DQO tratada (5 % – 10 %) se utiliza para formar nuevas bacterias, frente al 50 % – 70 % de un proceso aerobio. Sin embargo, la lentitud del proceso anaerobio obliga a trabajar con altos tiempos de residencia, por lo que es necesario diseñar reactores o digestores con una alta concentración de microorganismos. Realmente es un complejo proceso en el que intervienen varios grupos de bacterias, tanto anaerobias estrictas como facultativas, en el que, a través de una serie de etapas y en ausencia de oxígeno, se desemboca fundamentalmente en la formación de metano y dióxido de carbono. Cada etapa del proceso, que se describe a continuación, la llevan a cabo grupos distintos de bacterias, que han de estar en perfecto equilibrio.

- Hidrólisis: la hidrólisis es la ruptura de moléculas grandes, solubles e insolubles, en moléculas de menor tamaño que pueden ser transportadas dentro de las células y metabolizadas. En este proceso no se produce metano, y en la mayor parte de los casos supone una etapa que se desarrolla lentamente.
- Formación de ácidos (acidogénesis) y acetato (acetogénesis): los productos finales de la hidrólisis son transformados en ácidos orgánicos de cadena corta, otros compuestos de bajo peso molecular, hidrógeno y dióxido de carbono. Estas bacterias son altamente resistentes a variaciones en las condiciones ambientales. Por ejemplo, aunque el pH óptimo para el desarrollo de su actividad metabólica es 5 – 6, los procesos anaerobios generalmente son conducidos a pH 7, y aún en estas condiciones su actividad metabólica no decae.
- Metanogénesis: la formación de metano, siendo este el último producto de la digestión anaerobia ocurre por dos grandes rutas: la primera de ellas es la formación de metano y dióxido de carbono a partir del principal producto de la fermentación, el ácido acético. Las bacterias que consumen el ácido acético se denominan bacterias acetoclastas. La reacción, planteada de forma general, es la siguiente:



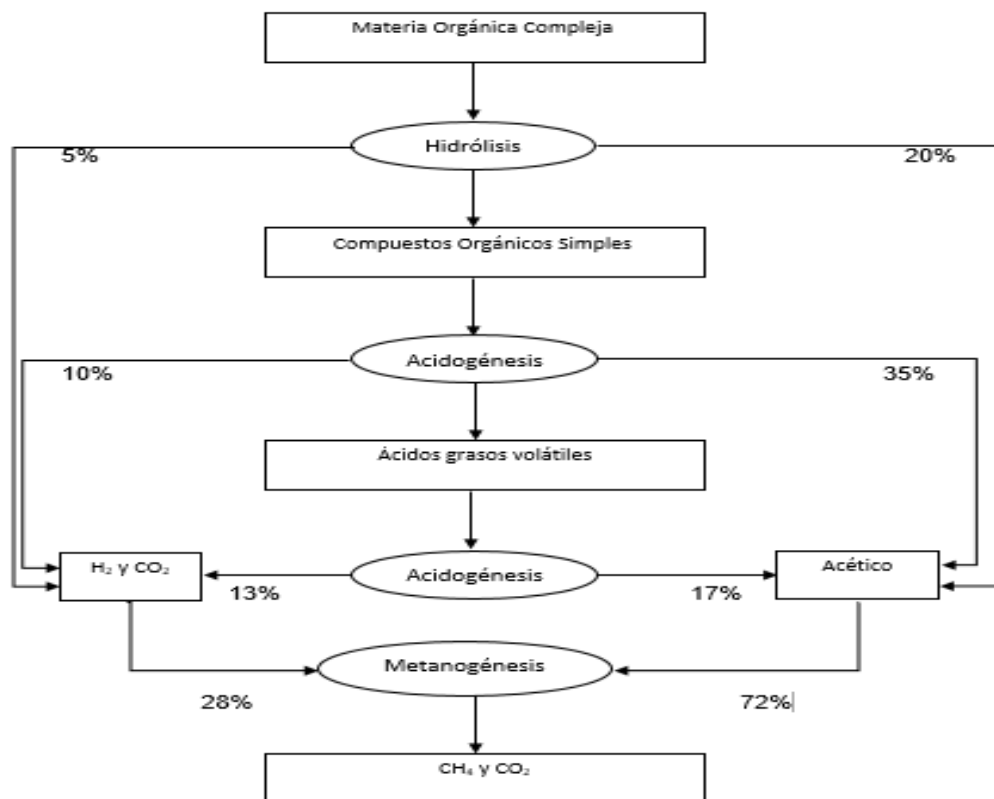
Algunas bacterias metanogénicas son también capaces de usar el hidrógeno para reducir el dióxido de carbono a metano (metanogénicas hidrogenoclastas) según la reacción:



La metanogénesis es la etapa crítica en el proceso de degradación, por las características de las bacterias que la llevan a cabo, y por ser la más lenta de todo el proceso. En buena medida, la digestión anaerobia se ha de llevar a cabo en las condiciones óptimas para el buen funcionamiento de estas bacterias metanogénicas.

Actualmente está ampliamente aceptado que la degradación de la materia orgánica sigue una distribución como la detallada a continuación:

Figura 27. **Esquema de la ruta de degradación anaerobia**



Fuente: FERNÁNDEZ, Antonio. *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales*. p. 36

Entre las ventajas más significativas del tratamiento anaerobio frente al aerobio cabe destacar la alta eficacia de los sistemas, incluso en aguas

residuales de alta carga, el bajo consumo de energía, pequeña producción de fangos y, por tanto, pequeño requerimiento de nutrientes, así como su eficacia ante alteraciones importantes de carga y posibilidad de grandes períodos de parada sin alteración importante en la población bacteriana. Sin embargo, como desventajas caben destacar la baja efectividad en la eliminación de nutrientes y patógenos, generación de malos olores y la necesidad de un postratamiento, generalmente aerobio, para alcanzar los niveles de depuración demandados, así como los generalmente largos períodos de puesta en marcha.

3.4.3.2.1. Condiciones de operación

Tanto las variables físicas como las químicas influyen en el hábitat de los microorganismos. En los procesos anaerobios es importante tener en cuenta la influencia de factores medioambientales. Las bacterias formadoras de metano son las más sensibles a estos factores, por lo que un funcionamiento inadecuado de las mismas puede causar una acumulación de productos intermedios (ácidos) y desestabilizar por completo el sistema. Entre las variables más importantes se encuentran la temperatura, el pH y la disponibilidad de nutrientes.

Por otro lado, la mezcla es un factor importante en el control del pH y en la uniformidad de las condiciones medioambientales. Una buena mezcla distribuye las propiedades tampón a todo el reactor y evita la concentración de metabolitos intermedios que pueden ser causa de inhibición para las bacterias metanogénicas.

Los parámetros de seguimiento y control de un digestor anaerobio pueden situarse en la fase sólida (materiales orgánicos e inorgánicos en suspensión); fase líquida (parámetros fisicoquímicos y composición) y fase gaseosa (producción y composición). Estos parámetros pueden tener diferente significado

y utilidad según la situación particular del equipo, que puede encontrarse en un período de puesta en marcha, en estado estacionario para sistemas continuos o en sistemas discontinuos. Entre los parámetros de operación se pueden mencionar velocidad de carga orgánica, toxicidad, velocidad volumétrica de flujo, tiempo de retención hidráulico, concentración de sólidos volátiles en el reactor, producción de fangos, entre otros.

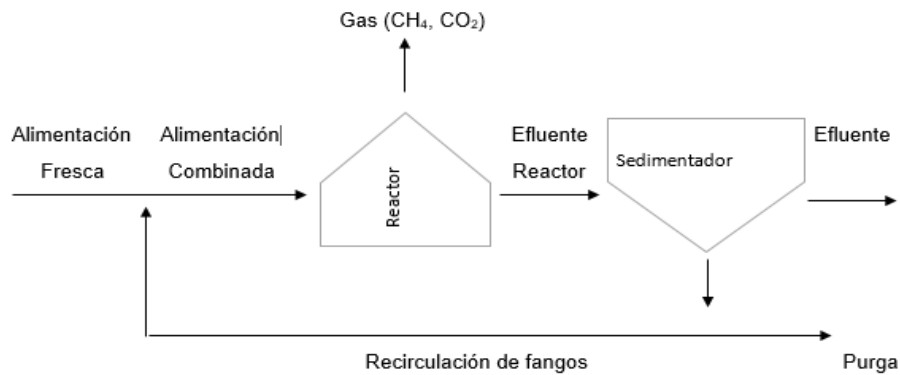
3.4.3.2.2. Reactores utilizados

El desarrollo del tratamiento anaerobio ha sido paralelo al desarrollo del tipo de reactor donde llevar a cabo el proceso. Dado el bajo crecimiento de las bacterias metanogénicas y la lentitud con la que llevan a cabo la formación de metano, es necesario desarrollar diseños en los que se consiga una alta concentración de microorganismos (SSV) en su interior, si se quiere evitar el utilizar reactores de gran tamaño. Para conseguirlo, habitualmente es necesario que el tiempo de retención hidráulico (TRH) sea inferior al tiempo de retención de sólidos (TRS) y esto se puede hacer por distintos medios. A todos estos reactores se les denomina de alta carga, dado que son los únicos que pueden tratar aguas con elevada carga orgánica de una forma viable. Dando un repaso a los más utilizados, es posible hablar de:

- Reactor de contacto: es una mezcla completa con recirculación de biomasa, es el equivalente al proceso de fangos activados aerobio. Consiste en un tanque cerrado con un agitador donde tiene una entrada para el agua residual a tratar y dos salidas, una para el biogás generado y otra para la salida del efluente. Este efluente se lleva a un decantador donde es recirculada la biomasa de la parte inferior del decantador al reactor, para evitar la pérdida de esta. Los principales problemas que

presentan radican en la necesidad de recircular los lodos del decantador y de una buena sedimentación de estos.

Figura 28. **Reactor anaerobio de contacto**

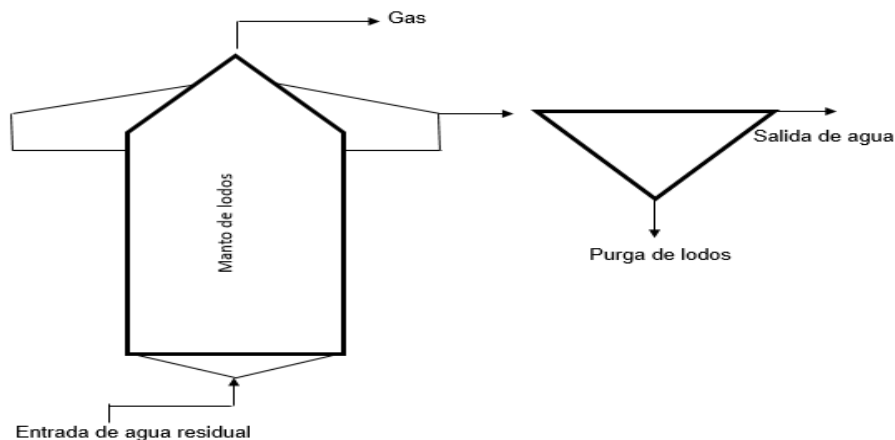


Fuente: FERNÁNDEZ, Antonio. *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales*. p. 37

- Reactor de manto de lodos y flujo ascendente (UASB): estos reactores solucionan el problema de recirculación de lodos al aumentar la concentración de biomasa en el reactor manteniéndola en su interior. Estos reactores fueron desarrollados en Holanda, por el Prof. Lettinga en la década de 1980. Se trata de un reactor cuyo lecho está formado por gránulos de biomasa. Estos gránulos son porosos y con una densidad poco mayor que la del líquido, con lo que se consigue un buen contacto de este con la biomasa. Los reactores suelen tener en su parte superior un sistema de separación de gas, sólido y líquido, puesto que se acumula biogás alrededor de las partículas. Se consigue una alta concentración de biomasa dentro del reactor que conlleva una elevada velocidad de eliminación de materia orgánica con rendimientos elevados de depuración. El agua residual se introduce por la parte inferior, homogéneamente repartida y ascendiendo lentamente a través del manto de lodos (gránulos), siendo estos los principales problemas que tiene que el agua

residual a tratar: que contenga una gran cantidad de sólidos en suspensión y la deficiente mezcla en la fase líquida que se logra. Este último problema se soluciona de una forma eficaz, recirculando parte del gas producido e inyectándolo en la parte inferior de equipo, consiguiendo una expansión del manto de lodos y, por lo tanto, una buena mezcla. A estos reactores se les denomina EGSB (Expanded Granular Sludge Blanket, en español Manta de Lodo Granular Expandido). Habitualmente la relación altura/diámetro es mayor que para los convencionales UASB, siendo capaces de alcanzar mayores cargas orgánicas (10 – 25 kgDQO/m³). También recientemente se ha desarrollado un sistema semejante denominado Circulación Interna (CI). Estos tipos de reactores han conseguido una muy alta implantación en el mercado, mostrándose como los más fiables para todo tipo de aguas residuales de alta carga, especialmente las que tienen un bajo contenido de sólidos en suspensión.

Figura 29. **Reactor de manto de lodos y flujo ascendente**



Fuente: FERNANDEZ, Antonio. Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. p. 38

- Filtro anaerobio (FA): en este caso los microorganismos anaerobios se desarrollan sobre la superficie de un sólido, formando una biopelícula de

espesor variable. El sólido permanece inmóvil en el interior del equipo, habitualmente una columna, constituyendo un lecho fijo. El agua residual se hace circular a través del lecho, bien con flujo ascendente o bien descendente, donde entra en contacto con la biopelícula. Son sistemas tradicionalmente utilizados en muchas depuradoras de aguas residuales industriales con alta carga orgánica. Resisten muy bien alteraciones de carga en el influente. El rango típico en que deben estar las cargas tratadas es desde 5 – 15 kgDQO/m³-día.

- Reactor anaerobio de lecho fluidizado (RALF): son columnas en cuyo interior se introducen partículas de un sólido poroso (arena, piedra pómez, biolita, entre otros) y de un tamaño variable (1 mm – 5 mm) con el objetivo de que sobre su superficie se desarrolle una biopelícula bacteriana que lleve a cabo la degradación anaerobia. Para que las partículas permanezcan fluidizadas (en suspensión), es necesario realizar una recirculación del líquido, para que la velocidad de este en el interior de la columna sea suficiente como para mantener dichas partículas expandidas o fluidizadas. Este tipo de equipos se han comprobado como muy eficaces, al menos en escala laboratorio o planta piloto. Se consiguen muy altas concentraciones de microorganismos, así como una muy buena mezcla en el lecho. Sin embargo, su implantación a nivel industrial no ha alcanzado las expectativas que se crearon.
- Otros tipos de reactores: más que otros tipos de reactores, se hace referencia a distintas formas de operar y de llevar a cabo la degradación anaerobia. Se tiene por una parte los reactores discontinuos secuenciales (SBR, reactor en secuencia de *batch*), equipo en el que de forma secuencial se lleva a cabo el llenado, reacción, sedimentación y evacuación del agua depurada, para volver otra vez a iniciar el ciclo, todo ello en un mismo equipo. Como ventaja fundamental se tiene el menor requerimiento espacio, así como una mayor flexibilidad en la forma de

operar, por ejemplo, en el caso de flujos estacionales, ayudado por la gran capacidad de las bacterias para estas situaciones. Por otro lado, especialmente para el caso en el que la materia orgánica a degradar sea compleja, y en el que la etapa de hidrólisis sea importante, se suele llevar a cabo la degradación en dos etapas, en dos reactores en serie. En el primero se ponen las condiciones necesarias para que se realice la hidrólisis y acidificación de forma óptima, como por ejemplo un pH de 6, esto en formación de metano. El efluente de este reactor, constituido fundamentalmente por ácidos de cadena corta, para al reactor metanogénico, donde las bacterias metanogénicas, mayoritarias, llevarán a cabo la metanización final del residuo. Estos equipos se han puesto en práctica desde hace tiempo, con éxito, incluso para la metanización de la fracción orgánica de los RSU, a menudo mezclados con lodos de depuradoras.

El tratamiento anaerobio, por tanto, constituye una forma eficaz de tratar aguas y residuos de alta carga orgánica, siendo una tecnología madura y contribuyendo no solo a la eliminación de la materia orgánica, sino a su aprovechamiento energético derivado de la utilización del metano producido.

Dependiendo del tipo de agua residual y de otros factores relacionados con cada aplicación particular, una tecnología anaerobia puede ser más apropiada y eficaz que otra.

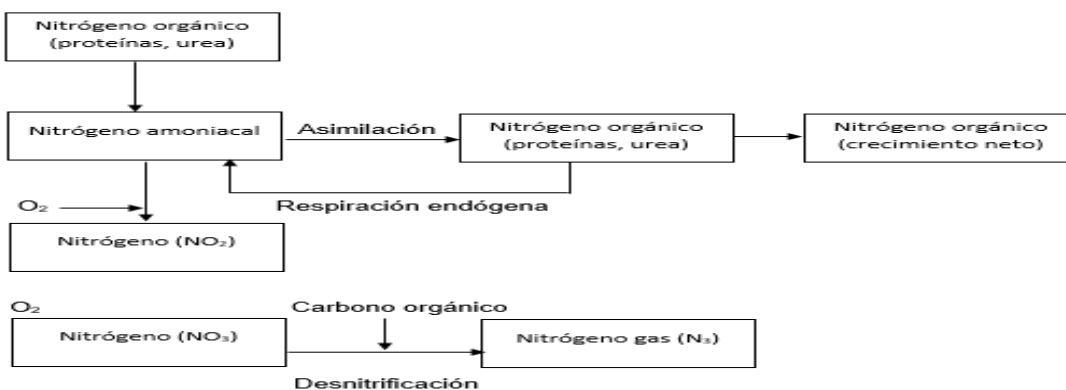
3.4.3.3. Procesos biológicos de eliminación de nutrientes

Otra de las aplicaciones de los tratamientos biológicos es la eliminación de nutrientes, es decir, de compuestos que contienen tanto nitrógeno como fósforo.

3.4.3.3.1. Tratamiento biológico de compuestos con nitrógeno

Los compuestos con nitrógeno sufren una serie de transformaciones como consecuencia de la acción de distintos organismos, como se muestra en el siguiente diagrama. En primer lugar, una serie de bacterias autótrofas (Nitrosomonas y Nitrobacter) son capaces de llevar a cabo una nitrificación, con demanda de oxígeno. A continuación, otra serie de bacterias desnitrificantes llevan a cabo la eliminación de NO_3 , en un sistema anóxico, donde el propio nitrato actúa de aceptor de electrones, siendo en este caso bacterias heterótrofas, es decir su fuente de carbono es materia orgánica. Este proceso en su conjunto es conocido como nitrificación y desnitrificación. De esta forma y en dos reactores consecutivos se puede llevar a cabo la eliminación de compuestos con nitrógeno: primero en un reactor aerobio seguido de otro con condiciones anóxicas, pero en el que será necesario adicionar fuente de carbono para el desarrollo de las bacterias desnitrificantes. El sistema en su conjunto suele ser semejante al proceso de fangos activados, pero utilizando los reactores en las condiciones comentadas.

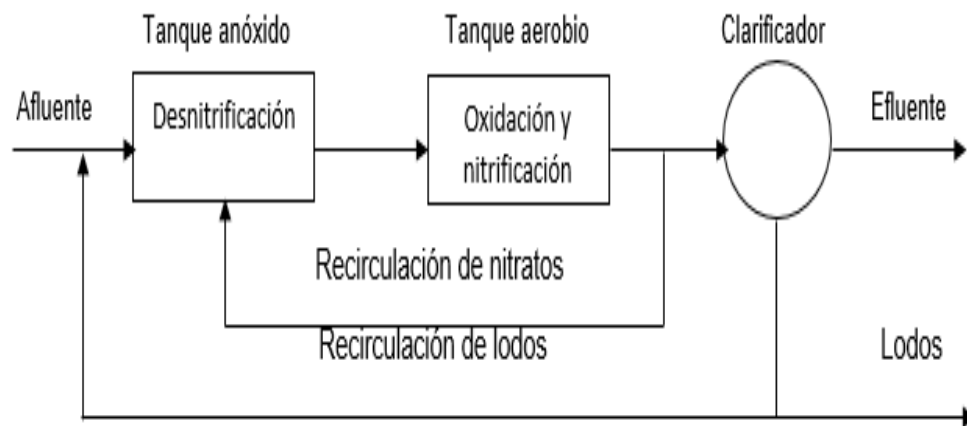
Figura 30. Tratamiento biológico de compuestos con nitrógeno



Fuente: FERNÁNDEZ, Antonio. Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. p. 41

Sin embargo, es muy común la presencia de materia orgánica con materia nitrogenada en aguas residuales, no solo en aguas residuales urbanas, y la tendencia es la eliminación conjunta de ambas contaminantes. En este caso no se puede seguir la secuencia mencionada: en el primer reactor de nitrificación la materia orgánica inactivaría las bacterias nitrificantes, y en el segundo se necesitaría materia orgánica. Para evitar estos problemas es necesario iniciar el proceso con un reactor anóxico, donde la materia orgánica del agua residual actúa como fuente de carbono, pero sería necesario recircular parte del efluente del segundo reactor de nitrificación: en este reactor se producirán nitratos y sería un reactor aerobio. Un esquema del proceso biológico se muestra a continuación:

Figura 31. **Proceso biológico de nitrificación y desnitrificación**

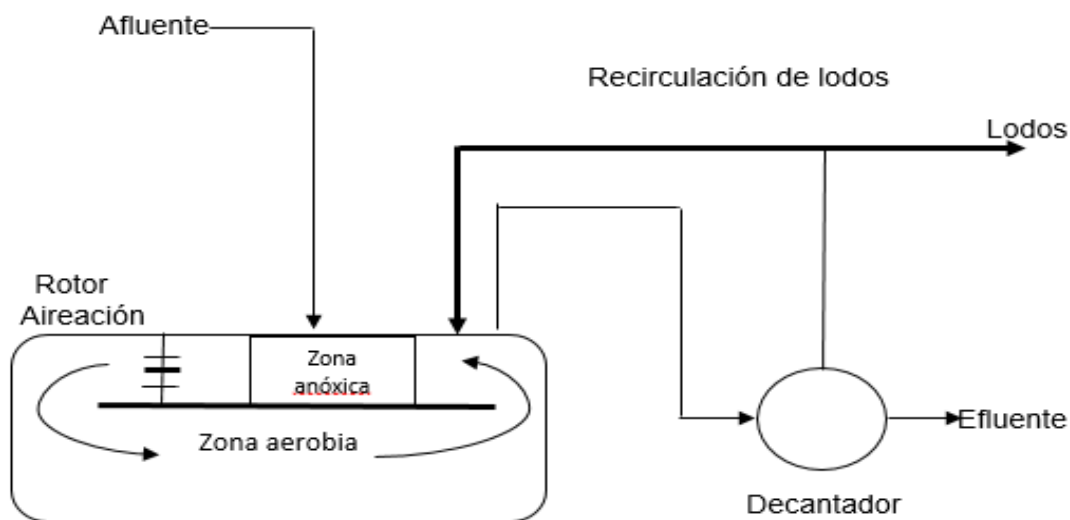


Fuente: FERNÁNDEZ, Antonio. *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales*. p. 42

El proceso es semejante al de fangos activados, pero para que se alcance la nitrificación y desnitrificación es necesario trabajar con relaciones A/M por debajo de 0,15 días, como ocurre en procesos de aireación prolongada. Otra forma de llevar a cabo la eliminación conjunta de compuestos con nitrógeno y materia orgánica utilizando un único reactor es en los denominados canales de

oxidación, en los que tanto el punto de alimentación del agua residual como el de aireación han de tener unas posiciones estratégicas, como se muestra a continuación:

Figura 32. Canal de oxidación



Fuente: FERNÁNDEZ, Antonio. *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales*. p. 42

Aunque la eliminación del fósforo (en forma de fosfato) ha sido tradicionalmente por precipitación con Ca^{2+} , se han desarrollado métodos para su eliminación biológica, más allá de lo que supone la simple asimilación por parte de los organismos para integrarlo en su crecimiento celular. Todavía no está perfectamente descrita la acción de los microorganismos, entre los que son especialmente activos los Acinetobacter.

Los métodos están basados en someter inicialmente a la masa bacteriana a un ambiente anaerobio, donde los microorganismos parece que tienen tendencia a no consumir fósforo para el crecimiento debido a la presencia de

ácido acético. Sin embargo, si posteriormente son sometidos a un sistema aerobio, consumen con “avidez” fósforo, momento en el que se sedimentan y separan. Son muchos los procesos que se han desarrollado, tanto para la eliminación conjunta de fósforo y materia orgánica, como para la materia nitrogenada. En todos ellos el reactor suele ser una balsa alargada, compartimentada de forma que en cada zona se somete a la masa microbiana al ambiente adecuado (anaerobio, anóxico, aerobio).

4. SELECCIÓN DEL TIPO Y TAMAÑO DE TURBINA A UTILIZAR EN UNA HIDROELÉCTRICA EN EL RÍO VILLALOBOS

Para conocer la turbina ideal para una hidroeléctrica en el Río Villalobos se debía conocer el caudal, salto y las condiciones fisicoquímicas de las aguas que transporta este. En el capítulo anterior se definen los caudales mínimos y máximos de los años 2016, 2017 y 2018, por lo que a partir de la figura 23 se tomarán los datos de los caudales mencionados anteriormente para conocer el promedio de los caudales mínimos y máximos de los tres años, en donde cabe mencionar que los valores de caudales mínimos son los caudales en fechas de verano y los valores de caudales máximos son los caudales en fechas de invierno. El caudal promedio mínimo se obtendrá a partir de la siguiente fórmula:

$$Q_{\text{medio mín}} = \frac{Q_{\text{mín 2016}} + Q_{\text{mín 2017}} + Q_{\text{mín 2018}}}{3},$$

Donde:

$Q_{\text{medio mín}}$, = promedio de caudales mínimos

$Q_{\text{mín. 2016}}$ = caudal mínimo del año 2016

$Q_{\text{mín. 2017}}$ = caudal mínimo del año 2017

$Q_{\text{mín. 2018}}$ = caudal mínimo del año 2018

$$Q_{\text{medio mín}} = \frac{1\,200 + 1058,57 + 941,1}{3} = 1\,066,56 \text{ L/s}$$

El caudal promedio máximo se obtendrá a partir de la siguiente fórmula:

$$Q_{\text{medio máx}} = \frac{Q_{\text{máx 2016}} + Q_{\text{máx 2017}} + Q_{\text{máx 2018}}}{3},$$

Donde:

$Q_{\text{medio máx}}$ = promedio de caudales máximos

$Q_{\text{máx. 2016}}$ = caudal máximo del año 2016

$Q_{\text{máx. 2017}}$ = caudal máximo del año 2017

$Q_{\text{mín. 2018}}$ = caudal máximo del año 2018

$$Q_{\text{medio máx}} = \frac{2\,917 + 3\,690 + 1\,666}{3} = 2\,757,67 \text{ L/s}$$

Los caudales se expresan en m³/s por fines de gráficos de selección de turbinas, que se estará detallando más adelante, por lo que se tienen:

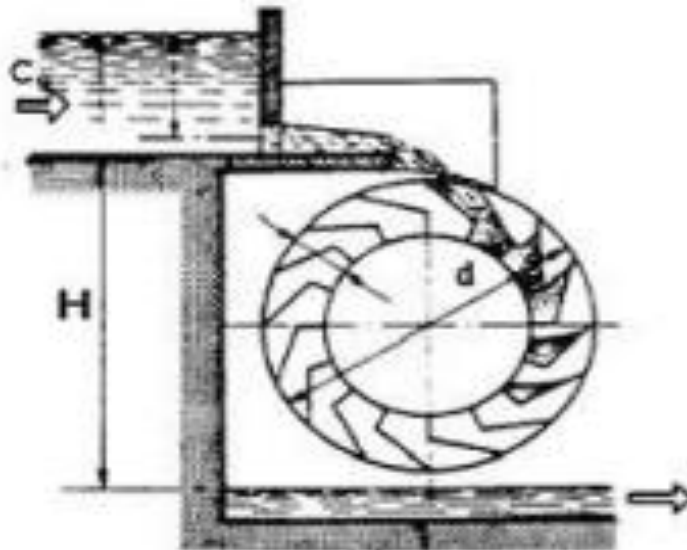
Tabla VII. **Caudales medios mínimos y máximos en m³/s**

Caudales medios	L/s	m³/s
Mínimos/Verano	1 066,56	1,07
Máximos/Invierno	2 757,67	2,78

Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar, los valores del caudal medio de verano son un valor bajo en los meses de verano en Guatemala, esta estación dura alrededor de 5 meses en el país, por lo que se tomará en cuenta la creación de un embalse para poder hacer contención de aguas y de esta manera tener un mayor caudal, ya sea igual o mayor al caudal medio de invierno. Por lo que se plantea un modelo de embalse de la siguiente forma:

Figura 33. Embalse para turbina



Fuente: ACEVEDO, Luisa. *Diseño de una turbina Banki para recolección de aguas y generación de energía de una propiedad agrícola.*

<http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/5770/62124A174.pdf;jsessionid=5662092429514C805182C7EA731C6F45?sequence=1>. Consulta: 26 de febrero de 2019.

Donde:

H = salto (m)

d = diámetro de rodete (m)

Por lo que para el valor de selección de la turbina se tomará un salto igual a 4 m, que se obtendrá del embalse a la entrada del inyector de la turbina, así mismo, teniendo un caudal constante y por medio del vertedero del embalse, se plantea mejorar el caudal de entrada a la turbina a un 50 % más de su valor obtenido por la cuenca del río.

Tabla VIII. Caudales y salto para entrada a la turbina

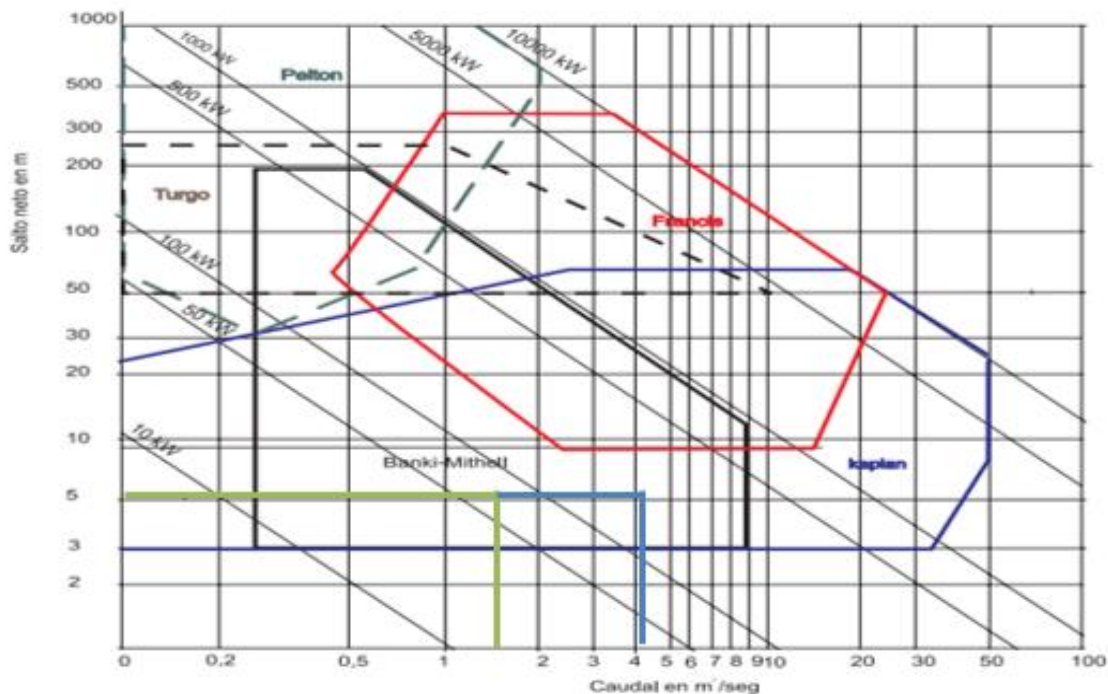
Caudal verano (m³/s)	1,605
Caudal Invierno (m³/s)	4,17
Salto (m)	4

Fuente: elaboración propia.

4.1. Potencia de la turbina

Se va a seleccionar la potencia de la turbina por medio de los valores del salto neto y caudal que ofrece el Río Villalobos y así seleccionar el tipo de turbina según la figura 34.

Figura 34. Selección del tipo de turbina a utilizar en una hidroeléctrica en el Río Villalobos



Fuente: elaboración propia.

De la figura 34 se tienen dos colores de línea, siendo la primera de color verde, que indica el caudal para verano y la azul para caudal de invierno, ambas parten del mismo salto. Ambas entran en la sección de la turbina Michell Banki, por lo que el tipo de turbina será este, con una potencia de diseño de entre 110kW y 50 kW, para caudal de invierno y caudal de verano, respectivamente.

4.2. Clasificación de la turbina

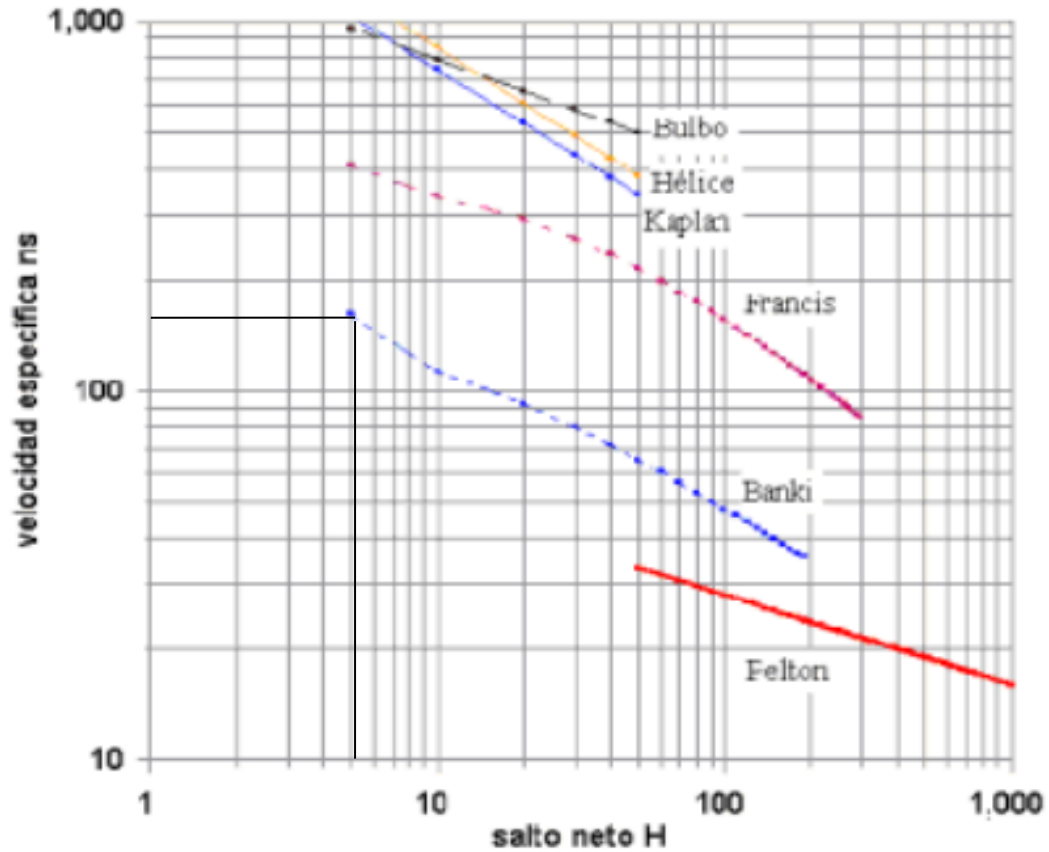
Como se mencionó anteriormente, el tipo de turbina a utilizar será una Michell Banki, por lo cual se tienen las siguientes características:

- Turbina de acción
- Doble acción
- Flujo radial y transversal
- Admisión parcial

4.2.1. Velocidad específica de revoluciones

Para la asignación de la velocidad específica de revoluciones se tomará la figura 35, en la cual con la magnitud de salto neto y el tipo de turbina se clasificará la velocidad específica. Por lo cual los datos a incluir serán el salto neto, que es de 4 m, y el tipo de turbina, que es la aclarada anteriormente como Michell Banki para las condiciones que ofrece el Río Villalobos.

Figura 35. Velocidad específica de revoluciones



Fuente: ESHA. *Manual de pequeña hidráulica*.

http://bmghidroconsultores.cl/pdf/documentos/Manual_Hidroenergia_ESHA_Layman.pdf.

Consulta: 26 de febrero de 2019.

En la intersección de las líneas remarcadas se observa que la velocidad específica está cerca de los 100, se recuerda que esta medida es adimensional, se procede a interpolar y se tiene que la velocidad específica exacta es de 164, para la turbina Michell Banki con un salto de 4 m.

4.3. Dimensiones principales de la turbina

En el capítulo 2 se mostró que la turbina como máquina tiene muchas partes que la conforman, sin embargo cuenta con partes que son primordiales para su funcionamiento, y que en esta sección se determinaran el tamaño de cada una de ellas.

4.3.1. Características del rodete

Para determinar el tamaño del rodete se debe tomar en cuenta los siguientes factores:

- El diámetro del rodete no debe ser muy pequeño dado que se reduce el rendimiento hidráulico.
- Los rodetes grandes tienen una velocidad de embalamiento menor.
- Se debe tomar en cuenta una cierta proporcionalidad entre el diámetro y el ancho de la turbina a fin de evitar los cambios de sección demasiado bruscos entre la tubería y el inyector que provocan fuertes perturbaciones en la vena fluida.
- El diámetro del rodete no depende del caudal.
- Los rangos del diámetro del rodete para una turbina Michell Banki está entre los 200 mm a 500 mm.

Teniendo estos factores en cuenta se decide que el diámetro tendrá un valor de 300 mm.

4.3.1.1. Velocidad de giro del rodete

Para ello se tomará la siguiente ecuación establecida por el *Manual de pequeña hidráulica de ESHA*:

$$n = \frac{38,567\sqrt{H}}{D}$$

Donde:

n = velocidad de giro del rodete (rpm)

H = salto neto (m)

D = diámetro (m)

Por lo cual:

$$n = \frac{38,567\sqrt{4}}{0.3} = 257,11 \text{ rpm}$$

4.3.1.2. Número de álabes del rotor

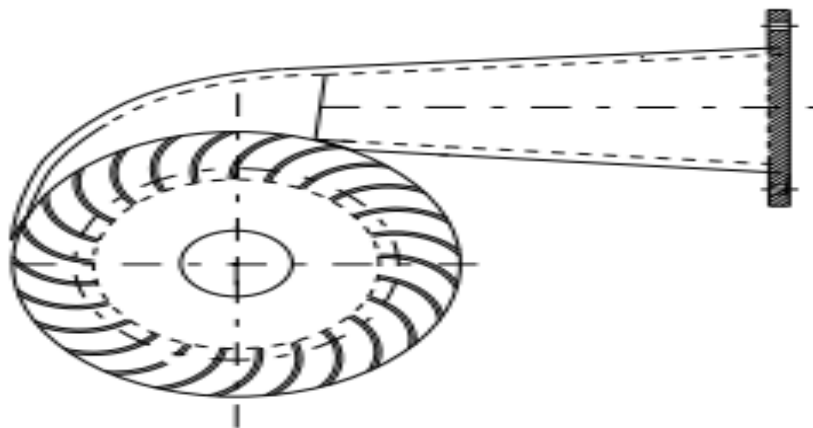
Según investigaciones mostradas en el *Manual de pequeña hidráulica*, el número de álabes del rotor está entre 24 y 30, esto variará con base en el diámetro y condiciones de funcionamiento de la turbina, es decir, altura y caudal. También se debe tomar en cuenta que si se tiene una cantidad reducida de álabes se provocará pulsaciones en la generación de la potencia, y un número elevado producirá una aceleración de la vena fluida con el consiguiente aumento de las pérdidas. Con lo anteriormente detallado se decide que la cantidad de álabes en el rotor será de 26 y en la admisión se tendrá por elección un total de 6 álabes. Por medio de las aportaciones de Sonnek en 1923, para el cálculo del rendimiento de la turbina se dice que el ángulo de la posición de los álabes será de 30°, esto con el fin de que la posición sea la óptima.

4.3.2. Diseño del inyector

Esta parte de la turbina es de suma importancia, ya que es por esta que pasa el caudal que pasa a los álabes de admisión y, luego de estos, pasa al rodete en donde se produce la transformación de energía hidráulica a energía mecánica por medio del giro del eje.

Así mismo, en conjunto con el rodete mejora la eficiencia de la turbina, es por ello por lo que la conducción por medio del inyector debe tener una buena aceleración y distribución uniforme de velocidades. El inyector posee una sección transversal de forma rectangular, que está compuesto por dos caras laterales rectas, que permiten la descarga del caudal sobre todo el ancho del rotor, la cara superior se encarga de guiar el flujo al rodete, poseyendo un ángulo constante en cada punto de la curva y la cara inferior debe tener un ángulo máximo de 5° .

Figura 36. Vista lateral del inyector



Fuente: *Ficha técnica turbina Michell Banki.*

file:///C:/Users/Yasmin%20Villeda/Downloads/Fichatecnica2-Turbina+michell+bankL%20(1).pdf.

Consulta: 04 de marzo de 2019.

A través de diversas pruebas e investigaciones que se han llevado a cabo con el diseño de las turbinas Michell Banki, se ha indicado que los ángulos de admisión del inyector pueden ser desde los 30° hasta los 120°.

5. BENEFICIOS DE LA UBICACIÓN DE UNA HIDROELÉCTRICA EN EL RÍO VILLALOBOS

5.1. Generación de energía eléctrica

Con el uso de una turbina se logra cambiar el movimiento mecánico de la rotación de un eje a generación de energía eléctrica por medio de un generador eléctrico, para esto se calcula la potencia que definirá la central eléctrica para la cual será instalada, como también la potencia que en realidad se generará.

5.1.1. Potencia instalada

La potencia de una central hidroeléctrica es proporcional al salto máximo y al caudal que pasa por la turbina, datos especificados en el capítulo anterior. Se puede comprender dos caudales, siendo el caudal máximo para fechas de invierno y el caudal mínimo para fechas de verano, por lo que para aprovechar de la mejor manera posible el recurso hidráulico al máximo, se determinarán dos potencias y dos turbinas para cada magnitud de caudal, por lo que se calcularán con la siguiente fórmula:

$$P_i = g * Q * H$$

Donde:

P_i = potencia instalada (kW)

Q = caudal (m³/s)

H = salto (m)

g = aceleración por gravedad de 9,8 m/s²

La potencia se verá afectada por un coeficiente de rendimiento típico que se obtiene por minicentrales hidroeléctricas, teniendo un valor de 0,90.

Tabla IX. **Potencia instalada para caudal máximo y mínimo**

Turbina	Caudal (m³/s)	Salto (m)	Coeficiente rendimiento	Potencia (kW)
1	1,65	4	0,90	60
1	4.17	4	0,90	150

Fuente: elaboración propia.

La tabla IX indica que entonces la central hidroeléctrica tendrá una potencia instalada de 60 kW y 150 kW, como potencia nominal de la turbina.

5.1.2. **Potencia generada**

La potencia generada por la turbina da lugar a la potencia instalada por el rendimiento de esta. Por lo cual la fórmula está dada por:

$$P_g = \mu * P_i$$

Donde:

P_g = potencia generada (kW)

μ = rendimiento de la turbina

P_i = potencia instalada (kW)

El rendimiento de las turbinas Michell Banki se puede calcular por medio de la fórmula establecida en 1923 por Sonnek:

$$\mu = 0,886 - 0,264 * \frac{D}{H}$$

Donde:

μ = rendimiento de la turbina

D = diámetro de la turbina (m)

H = salto (m)

$$\mu = 0,886 - 0,264 * \frac{0,3}{4} = 0,8482$$

Partiendo entonces de la fórmula para la potencia generada se tiene la siguiente tabla:

Tabla X. **Potencia instalada y generada para caudal máximo y mínimo**

Turbina	Caudal (m³/s)	Salto (m)	Rendimiento de la turbina	Potencia Instalada (kW)	Potencia generada (kW)
1	1,65	4	0,7422	60	51
1	4,17	4	0,7422	150	130

Fuente: elaboración propia.

5.2. Clasificación del tipo de central hidroeléctrica

Las características principales que tendrá la central hidroeléctrica instalada en un punto óptimo del Río Villalobos se enfocará en lo siguiente:

5.2.1. Según el tipo de embalse

Dado que se requiere tener un embalse para poder tener un caudal constante y una magnitud mayor a la que el afluente ofrece, se clasificará la central como de tipo de central con embalse o regulación. Con esto es posible

almacenar el afluente de la cuenca y que, en el momento de operación regular, el caudal de salida del embalse pase a la entrada de la turbina.

5.2.2. Según la potencia

Los valores que se tienen de la potencia generada por medio de los caudales y del salto máximo serán de hasta 130 kW, por lo cual la central hidroeléctrica tendrá una clasificación para Centroamérica de minicentral hidroeléctrica, ya que esta se encuentra en un rango de los 50 kW hasta 1000 kW, como se puede observar en la tabla X. El caudal mínimo ofrece 51 kW de potencia generada, por lo que se entra en el rango mínimo de las minicentrales.

5.2.3. Según la altura de salto

Esta clasificación es de suma importancia para la minicentral hidroeléctrica, ya que con el salto se determina el tipo de instalación según el aprovechamiento hidráulico, por lo que engloba el canal de derivación, la presa, la tubería forzada y el tipo de turbina. Por lo cual, teniendo un salto proporcional de 4 m para la turbina Michell Banki, se tiene que es una minicentral hidroeléctrica de pequeña altura, ya que este salto es menor o igual a 14,99 metros. Esto entonces ofrece que el terreno sea llano o suavemente ondulado, contar con un embalse que sea de reserva diurna a través del Río Villalobos y con compuertas móviles, que sirvan para que cuando existan crecidas se eviten inundaciones.

5.3. Impacto en desastres naturales

Para el caso de esta minicentral hidroeléctrica, se tiene que la desembocadura del Río Villalobos es el Lago de Amatitlán y, como en el capítulo 3 se hace mención de la calidad del agua que transporta el río en todo su trayecto,

siendo de malas condiciones tanto para el entorno como para el lago, no solo se busca la generación de energía eléctrica, sino también mejorar las condiciones ecológicas del entorno ambiental del Río Villalobos. Por lo que se hará énfasis en los siguientes aspectos:

5.3.1. Contención de basura

En octubre de 2018 Prensa Libre realizó un reportaje del Lago de Amatitlán, haciendo referencia al ingreso de desechos sólidos a través del Río Villalobos, Erick Balcárcel, vocero de AMSA, informa que en época de lluvia la cuenca en una sola lluvia transportó tres mil metros cúbicos de basura, así mismo que en un año entran al lago 45 000 libras de basura, y también aseguró que no cuentan con un sistema de recolección de basura previo a que ingresen al lago.

Al momento entonces de que ingrese el afluente del Río Villalobos al embalse en donde se busca recolectar un volumen de agua para proveer a la turbina, un flujo constante es necesario para realizar procesos no solo de sedimentación de arenas, sino también filtros con que se separen los sólidos en suspensión, o bien, desechos sólidos que transporta el río para evitar que estos dañen la tubería forzada y, los componentes de la turbina. Es por ello que al colocar una central hidroeléctrica en un punto del Río Villalobos previo y cercana a la desembocadura que tiene este con el Lago de Amatitlán, se estaría evitando que en su gran mayoría basura que transporta la cuenca ingrese al lago. Esto mejorando la condición del lago, ya que al ingresar mayores cargas de contaminación es imposible que ocurra el fin que tiene el oxígeno en el agua y que de esta manera el lago pueda limpiarse.

5.3.2. Contención de crecidas

En épocas de lluvia no solo ingresa más carga de desechos sólidos al Lago de Amatitlán, tampoco existe un embalse que regule las crecidas del Río Villalobos, esto provoca inundaciones en aldeas o caseríos aledaños a la desembocadura de este, o bien, cercanos a su trayecto. Es por ello que al momento de instalar una minicentral hidroeléctrica cercana a la desembocadura al Lago de Amatitlán por medio del Río Villalobos, se estaría construyendo un embalse, ya que con este no solo se regularía el caudal para la entrada a la turbina, sino que también, en épocas de lluvias, serviría para contener crecidas, con el fin de derivarlas, ya sea para brindarle un tratamiento al agua y poderla utilizar para sistemas de riego, o bien, para ingresarla al Lago de Amatitlán de una forma limpia.

CONCLUSIONES

1. La turbina que es apta para el caudal del Río Villalobos es Michell Banki con un tamaño de rodete de 300 mm, lo cual brinda una potencia instalada de 150 kW permitiendo clasificar la central hidroeléctrica dentro de las minicentrales hidroeléctricas.
2. Se pudo determinar que para proyectar una central hidroeléctrica en el Río Villalobos, se requieren ciertos niveles específicos de caudal y de salto neto obtenidos del cauce y el salto del diseño del embalse cuando se requiere, o bien, de caída natural de este, y con esto se logra seleccionar un tipo y tamaño de turbina.
3. El agua que transporta el Río Villalobos arrastra grandes cargas de desechos sólidos, transportando desechos orgánicos, plásticos, metales, entre otros. Para 2018 se desembocó al Lago de Amatitlán un aproximado de 45 000 libras de basura.
4. El estudio hidráulico que se utilizó para conocer la magnitud del caudal que transporta el Río Villalobos fue proveído por medio de AMSA, institución que realiza mediciones de aforos una vez por semana utilizando el método del correntómetro.
5. Los tipos de turbina variarán por el grado de reacción del fluido, entre estas están las de reacción y acción, variando en que la presión del fluido es modificada a través de su paso por la turbina o no. Y para identificar el tamaño de la turbina se requiere conocer el caudal que pasará por esta.
6. Colocar una minicentral hidroeléctrica cercana a la desembocadura del Río Villalobos en el Lago de Amatitlán no solo beneficiará a la contención del ingreso de basura al lago, sino que evitará las crecidas por lluvias en

época de invierno, lo cual impediría inundaciones en las aldeas o caseríos alrededor del Lago de Amatitlán.

RECOMENDACIONES

1. La casa de máquinas en donde estarán instalados la turbina y el generador de la central hidroeléctrica debe estar cerca del punto de desembocadura del Río Villalobos en el Lago de Amatitlán, de esta manera se podrá lograr una mayor obtención de caudal.
2. Debido a que el terreno en donde desemboca el Río Villalobos es un terreno plano, se recomienda la construcción de un embalse, en donde se podrá realizar la limpieza de las aguas de este y analizar un rango de salto neto mayor al planteado en esta tesis, para de esta manera obtener mayor energía hidráulica en el caudal y mejorar la potencia generada por la turbina.
3. Cuando existan crecidas por lluvia, es importante instalar sistemas de captación de aguas de lluvias para darles un tratamiento y poder circularlas para riego de áreas verdes municipales.
4. Para la basura recolectada por la limpieza a las aguas que transporta el Río Villalobos se recomienda que se instale una planta de reciclado para los desechos plásticos o metales obtenidos.

BIBLIOGRAFÍA

1. ACEVEDO, Luisa, LÓPEZ, Sebastián, SÁNCHEZ, Sebastián. *Diseño de una turbina Banki para la recolección de aguas y generación de energía en una propiedad agrícola*. [en línea]. <<http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/5770/62124A174.pdf;jsessionid=5662092429514C805182C7EA731C6F45?sequence=1>>. [Consulta: 26 de febrero de 2019].
2. Dirección general de energías. *Manual de pequeña hidráulica*. [en línea]. <http://bmghidroconsultores.cl/pdf/documentos/Manual_Hidroenergia_ESHA_Layman.pdf>. [Consulta: 26 de febrero de 2019].
3. FAJARDO, Ricardo. *Evaluación hidráulica mediante el uso de modelos, del tramo final del Río Villalobos*. [en línea]. <http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0385_MT.pdf>. [Consulta: 01 de mayo de 2017].
4. FERNÁNDEZ, Antonio. *Tratamientos avanzados de aguas residuales*. España. CEIM. 137 p.
5. GARCÍA, Ronaldo. *Río El Bosque, Guatemala*. [en línea]. <<http://www.deguate.com/artman/publish/geo-rios/rio-el-bosque-guatemala.shtml#.WQeg5tIrlIU>>. [Consulta: 01 de mayo de 2017].

6. _____ . *Río Molino, Guatemala.* [en línea].
<<http://www.deguate.com/artman/publish/geo-rios/rio-molino-guatemala.shtml#.WQebxdlrLIU>>. [Consulta: 01 de mayo de 2017].
7. _____ . *Río Pinula, Guatemala.* [en línea].
<<http://www.deguate.com/artman/publish/geo-rios/rio-pinula-guatemala.shtml#.WQeeytlrLIU>>. [Consulta: 01 de mayo de 2017].
8. _____ . *Río Platanitos, Guatemala.* [en línea].
<<http://www.deguate.com/artman/publish/geo-rios/rio-platanitos-guatemala.shtml#.WQeOtdLyvIU>>. [Consulta: 01 de mayo de 2017].
9. _____ . *Río San Lucas, Guatemala.* [en línea].
<<http://www.deguate.com/artman/publish/geo-rios/rio-san-lucas-guatemala.shtml#.WQea3dlrLIU>>. [Consulta: 01 de mayo de 2017].
10. _____ . *Río Villalobos, Guatemala.* [en línea].
<<http://www.deguate.com/artman/publish/geo-rios/rio-villalobos-guatemala.shtml#.WQeW2NlrLIU>>. [Consulta: 01 de mayo de 2017].
11. GARCÍA, Héctor. *Selección y dimensionamiento de turbinas hidráulicas para centrales hidroeléctricas.* [en línea].
<http://www.ingenieria.unam.mx/~deptohidraulica/publicaciones/pdf_publicaciones/SELECYDIMENSIONAMIENTOdeTURBINAS.pdf>
. [Consulta: 24 de febrero de 2019].

12. GUATEPYMES. *Río Parrameño, Guatemala*. [en línea]. <<http://www.guatepymes.com/geodic.php?keyw=2976>>. [Consulta: 01 de mayo de 2017].
13. _____ . *Río Las Minas, Guatemala*. [en línea]. <<http://mapasamerica.dices.net/guatemala/mapa.php?nombre=Rio-Las-Minas&id=3845>>. [Consulta: 01 de mayo de 2017].
14. _____ . *Río Tuluja*. [en línea]. <http://travelingluck.com/North+America/Guatemala/Guatemala/_3588176_R%C3%ADo+Tuluj%C3%A1.html>. [Consulta: 01 de mayo de 2017].
15. MATAIX, Claudio. *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. 2a ed. Ediciones del Castillo, S.A. 1986. 461 p.
16. ORTIZ, Ramiro. *Pequeñas centrales hidroeléctricas*. 1a ed. Colombia. Ediciones de la U, 2011. 384 p.
17. PÉREZ, César. *Contaminación por desechos sólidos en el lago de Amatitlán supera la del año pasado*. [en línea]. <<https://www.prensalibre.com/ciudades/contaminacion-por-desechos-solidos-en-el-lago-de-amatitlan-supera-a-la-del-ao-pasado/>>. [Consulta: 04 de marzo de 2019].
18. SCHMALBALCH, Ricardo. *Laguna de retención de sedimentos en desembocadura del Río Villalobos*. [en línea]. <<http://www.iecaiberoamerica.org/component/k2/item/406-laguna->

de-retencion-de-sedimentos-desembocadura-del-r%C3%ADo-villalobos.html>. [Consulta: 01 de mayo de 2017].

19. Soluciones prácticas, ITDG. *FICHA TÉCNICA TURBINA MICHELL BANKI*. [en línea]. <file:///C:/Users/Yasmin%20Villeda/Downloads/Fichatecnica2-Turbina+michell+bankL%20(1).pdf>. [Consulta: 04 de marzo de 2019].
20. UCA. *Centrales hidroeléctricas*. [en línea]. <http://www.uca.edu.sv/facultad/clases/ing/m200018/doc1.pdf>. [Consulta: 04 de marzo de 2019].
21. VÁSQUEZ José. *Microhidroeléctrica tipo Michell Banki, funcionamiento, mantenimiento y componentes*. [en línea]. <http://www.biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0550_M.pdf>. [Consulta: 04 de marzo de 2019].

