



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

ESTUDIO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA PEQUEÑA HIDROELÉCTRICA, EN UN BENEFICIO HÚMEDO DE CAFÉ

José Adolfo Santos Solares

Asesorado por el Ing. Francisco Javier González López

Guatemala, octubre de 2006

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA
PEQUEÑA HIDROELÉCTRICA, EN UN BENEFICIO
HÚMEDO DE CAFÉ**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

JOSÉ ADOLFO SANTOS SOLARES
ASESORADO POR EL ING. FRANCISCO JAVIER GONZÁLEZ LÓPEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2006

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Gustavo Benigno Orozco Godínez
EXAMINADOR	Ing. Gustavo Adolfo Villena Vásquez
EXAMINADOR	Ing. Carlos Francisco Gressi López
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

ESTUDIO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA PEQUEÑA HIDROELÉCTRICA, EN UN BENEFICIO HÚMEDO DE CAFÉ,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Mecánica Eléctrica, el 21 de abril de 2006.

José Adolfo Santos Solares

ACTO QUE DEDICO A:

**DIOS, LA VIRGEN MARÍA
Y SANTO HERMANO PEDRO**

MIS PADRES

José Adán Santos Martínez
Catalina Solares Samayoa

MIS HERMANOS

Raquel, Eriberto, César, Miguel,
Sergio y Ligia

CUÑADOS Y SOBRINOS

AMIGOS Y COMPAÑEROS

AGRADECIMIENTO SINCERO A:

EI ING. FRANCISCO JAVIER GONZÁLEZ LÓPEZ

MIS PADRES

MIS HERMANOS

Todas la personas que me brindaron su apoyo, para la realización de este trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XV
OBJETIVOS	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. BENEFICIOS HÚMEDOS DE CAFÉ	
1.1. Historia y datos	1
1.2. Proceso del café	2
1.3. Clasificación de los Beneficios	3
1.4. Maquinaria utilizada en los Beneficios	4
1.5. Necesidades energéticas de un Beneficio	5
1.5.1. Iluminación	6
1.5.2. Fuerza	6
1.5.3. Otros usos de energía	7
1.6. Fuentes de energía renovable con que cuentan los Beneficios	7
1.6.1. Hidráulica	9
1.6.2. Solar	11
1.6.3. Eólica	11
1.6.4. Biomasa	13
1.6.5. Térmica	13
1.7. Generación de energía eléctrica híbrida	14
1.8. Aprovechamiento al máximo del recurso de agua	16
1.9. Ventajas al utilizar Hidroenergía	16

2. PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

2.1. Hidroeléctricas	18
2.1.1. Historia y datos	19
2.1.2. Clasificación de las hidroeléctricas	20
2.2. Tipos de pequeñas hidroeléctricas	22
2.2.1. Pico hidroeléctrica	23
2.2.2. Micro hidroeléctrica	25
2.2.3. Sistemas de agua fluyente	27
2.2.4. Sistemas de presa	28
2.5. Elección del lugar y estudio de los parámetros útiles (caudal y altura de caída disponibles, potencia)	28
2.6. Turbinas hidráulicas	30
2.7. Generadores eléctricos	36
2.7.1. Generadores de CC	40
2.7.2. Generadores de CA	41
2.8. Reguladores de voltaje	46
2.8.1. Reguladores de CC	47
2.8.2. Reguladores de CA	49
2.9. Bancos de baterías	50
2.10. Inversores	52
2.11. Obra civil	55
2.12. Equipamiento electromecánico	57

3. IMPLEMENTACIÓN DE UNA MICRO HIDROELÉCTRICA EN EL BENEFICIO HÚMEDO DE CAFÉ LA PRESA

3.1. Cuantificación de energía	61
3.1.1. Medición del caudal de agua	62

3.1.2.	Obtención de la altura de caída	64
3.1.3.	Energía potencial de un tanque lleno	65
3.1.4.	Cálculo de potencia eléctrica a ser generada	67
3.1.5.	Pérdidas al convertir la energía potencial a eléctrica	68
3.2.	Capacidad de cubrir las necesidades de energía del Beneficio	70
3.2.1.	Potencia de los motores utilizados en el Beneficio	71
3.2.2.	Potencia para los servicios de iluminación	73
3.3.	Micro central, equipamiento y construcción	74
3.3.1.	Turbina y generador, necesidades del equipo	74
3.3.2.	Regulador de voltaje, banco de baterías e inversor	80
3.3.3.	Otros dispositivos y material eléctrico	83
3.3.4.	Disposición de la micro central y obra civil	83
3.3.5.	Operación	88
3.3.6.	Mantenimiento	90
4.	ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA MICRO HIDROELÉCTRICA	
4.1.	Inversión inicial	93
4.2.	Gastos de operación y mantenimiento	96
4.3.	Reducción de costos de operación en el Beneficio	97
4.4.	Recuperación de inversión	98
	CONCLUSIONES	101
	RECOMENDACIONES	105
	REFERENCIAS	107
	BIBLIOGRAFÍA	111
	ANEXOS	115

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Clasificación general de las fuentes de energía	7
2	Esquema de una micro hidroeléctrica	10
3	Esquema de una planta solar	11
4	Esquema de una planta eólica	12
5	Esquema que integra generación eléctrica de tres formas (hidráulica, eólica y solar)	15
6	Vista aérea de una micro hidroeléctrica	17
7	Esquema de una instalación hidroeléctrica (con represa)	19
8	Pico hidroeléctrica con turbina Francis a muy poca altura y gran flujo	24
9	Potencia de micro hidroeléctricas según caída y caudal	26
10	Sistema de micro turbina Axial y gráfica de potencia	27
11	Cuadro de acción (selección) de las turbinas	31
12	Arreglos típicos de micro turbinas Kaplan y Pelton	33
13	Arreglos típicos de hidroturbinas Banki	35
14	Arreglo vertical de turbina Francis, con forma de caracol en espiral	36
15	Generador eléctrico elemental y característica de magnetización	38
16	Generador con turbina sumergible (con hélice)	39
17	Diagrama general de carga de una batería	51
18	Vista de planta de una micro hidroeléctrica	56

19	Sistemas de transmisión por fajas y engranajes	57
20	Vista en explosión del conjunto rodete-eje y vista anterior de un sistema con turbina Pelton de dos chorros y un motor utilizado como generador integrado	58
21	Esquema de tablero para control básico de generación	59
22	Pérdidas al convertir energía	70
23	Dimensiones principales de la turbina Pelton	75
24	Generador de CC	79
25	Tipos de generadores de CC	79
26	Vista de planta y fotografía del Beneficio de café La Presa	85
27	Elementos de obra civil para una micro hidroeléctrica	87
28	Costo de la micro central de 1kW	95
29	Medición del caudal de agua en canal o vertedero	120
30	Medición de la altura de caída con nivel	125
31	Hidrografía de Guatemala	132

TABLAS

I	Máquinas y aplicaciones en Beneficios	5
II	Impacto ambiental de distintas fuentes primarias según su aplicación	9
III	Clasificación de las mini hidroeléctricas	22
IV	Mediciones del caudal utilizando un recipiente de capacidad conocida	63
V	Mediciones de presión utilizando manguera y manómetro	64
VI	Requerimientos de energía del Beneficio	71
VII	Tiempos de despulpe del café	72
VIII	Requerimientos del equipo para la micro central	77
IX	Potencia de salida (vatios continuos) del sistema turbina- generador elegido	80
X	Caudal respecto de la altura del nivel H	119
XI	Coeficientes de flotación	121
XII	Proyectos hidroeléctricos en Guatemala.....	132

LISTA DE SÍMBOLOS

CA	corriente alterna
CC	corriente continua
CD	corriente directa
Cd	cadmio
E	energía
g	gravedad (9.81 m/s ²)
gal	galón
gpm	galones por minuto (caudal)
H	altura de caída
h	hora
Hz	hertzios (<i>hertz</i> , frecuencia)
HP	caballo de fuerza (<i>Horse Power</i>)
I	corriente (Amperios)
J	julio (<i>joule</i> , energía)
kW	kilovatio (mil vatios)
l	litros
l/s	litros por segundo (caudal)
lb	libra
M	masa
MW	megavatio (millones de vatios)
m	metro (longitud)
min	minuto
Ni	níquel

P	potencia
PG	potencia generada
Pb	plomo
plg	pulgada
Pre	presión
Pre_{ma}	presión manométrica
psi	libra por pulgada cuadrada (<i>pound per square inch</i>)
P_t	potencia teórica
qq	quintales (peso)
s	segundos (tiempo)
T	tiempo
t	instante
U	energía potencial
V	voltio (voltaje)
Vol	volumen
W	vatio (<i>watt</i> , potencia)
”	símbolo de pulgadas (diámetro)
ρ	densidad de una sustancia, masa por unidad de volumen

GLOSARIO

Alternador	Máquina eléctrica que transforma la energía mecánica en energía eléctrica de CA.
Altura de caída (Salto)	Diferencia de cota entre el canal a cielo abierto a la entrada de la tubería y a la salida de ésta; se mide en metros (m).
Altura natural disponible	Diferencia de cota entre el canal a cielo abierto, en la sección de entrada de la toma y el canal a cielo abierto, en la sección hídrica de salida de los materiales de desagüe de la central.
Altura útil bruta	Diferencia de cota entre la lámina de agua en la toma o en el pozo piezométrico y la lámina de agua, en el punto donde se restituye al río u otro depósito el caudal ya turbinado.
Altura útil neta	Es la parte de salto útil bruto efectivamente utilizado por las turbinas hidráulicas, esto es, sin las pérdidas de carga a lo largo del recorrido.
Beneficio húmedo de café	Ingenio o hacienda en donde se procesa café maduro, obteniendo café en pergamino y utiliza agua para tal efecto. Para usos prácticos únicamente le llamaremos Beneficio.

Boca toma	Dique construido para coleccionar agua de un río o quebrada, y donde entra el agua para la tubería de transporte.
Café	Semilla de la planta llamada Cafeto, que al secarla, tostarla y hervirla, produce una bebida estimulante también llamada Café.
Café en pergamino	Es la semilla del café sin su pulpa, miel, mucílago y humedad, listo para almacenar y transportar al mercado.
Canal a cielo abierto	Superficie del agua de una sección de un canal, curso de agua, etc., que esté a la presión atmosférica.
Caudal	Volumen de agua que atraviesa una sección en la unidad de tiempo; se mide en litros por segundo (l/s) o en metros cúbicos por segundo (m^3/s).
Caudal máximo derivable	Es el caudal máximo que las tomas y el transporte a la central, pueden respectivamente captar y transportar.
Caudal medio utilizable	Es el caudal que en media es utilizado por el sistema en un período de tiempo que suele ser un año.

Cavitación	Es el fenómeno de formación de vapor que se produce cuando un líquido fluye por regiones donde, a causa de las altas velocidades del flujo, la presión estática absoluta es menor que la presión de vapor correspondiente a la temperatura del líquido.
Desarenador y cámara de carga	El desarenador y/o cámara de carga tiene la función de decantar los sólidos en suspensión para evitar que ingresen a la tubería de presión y causen desgaste innecesario en la turbina. También ofrece una reserva mínima de agua para el trabajo de la misma.
Desarrollo sostenible	El desarrollo sostenible es el desarrollo que satisface las necesidades del presente, sin comprometer la habilidad de las generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades.
Energías renovables	Las energías renovables son formas de energía no consumible, en particular la energía hidroeléctrica, eólica y solar (tanto térmica como fotovoltaica), la biomasa y la energía geotérmica.
Estiaje	Nivel más bajo o caudal mínimo que en ciertas épocas del año tienen las aguas de un río, estero, laguna, etc., por causa de la sequía.

Generador	Generador eléctrico, es una máquina capaz de convertir energía mecánica en energía eléctrica.
Ladera	Declive de un monte o de una altura, en el cual el terreno es inclinado (también llamada falda).
Mucílago	Sustancia viscosa, de mayor o menor transparencia, que se halla en ciertas partes de algunos vegetales.
Orografía	Parte de la geografía física que trata de la descripción de las montañas. Conjunto de montes de una comarca, región, país, etc.
Punto de recepción	Lugar a donde llega el agua en el Beneficio y el tubo es acoplado a la turbina hidráulica.
Punto de toma	Lugar de donde se obtiene el agua para ser llevada hasta el punto de recepción del Beneficio.
Recurso renovable	Un recurso renovable es aquel que no se agota, gracias a su capacidad de regeneración.
Tanque	Recipiente de gran tamaño, normalmente cerrado, destinado para contener líquidos o gases.

RESUMEN

Esta tesis está enfocada a las micro hidroeléctricas aplicadas específicamente a los Beneficios húmedos de café, en donde se considera se tiene el potencial para generar energía eléctrica por medio del agua que éstos llevan desde los ríos o manantiales hasta ellos.

Primeramente, se estudian los Beneficios húmedos de café, describiendo sus instalaciones, tipos, funcionamiento interno, equipos que utilizan, fuentes y usos de energía. Se estudian las posibilidades de generar energía eléctrica en un Beneficio y se señalan las más factibles, concluyendo que la mejor opción es la micro hidroeléctrica. Luego, se estudian las hidroeléctricas en general, profundizando en las pequeñas, dando una clasificación y enfoque a las micro hidroeléctricas, explicando con detalles las necesidades de equipo eléctrico, obra civil, generadores, turbinas y disposición. También se dan las bases para calcular la potencia eléctrica en función de la altura de caída y el caudal de agua con que se cuenta, basándose en tablas de valores de fabricantes y análisis físico.

En el tercer capítulo se diseña una propuesta de proyecto para la implementación de una micro hidroeléctrica en un Beneficio, el cual es un caso real, que puede sufragar las necesidades energéticas de cualquier Beneficio que no cuente con el servicio eléctrico. Fueron efectuadas mediciones y cálculos para indicar que los elementos pueden ser alimentados, también explica cómo puede aumentarse la generación de energía. En este caso, se propone construirla en un Beneficio que cuenta con el servicio eléctrico, para el cual se hizo un análisis económico, y así saber cuándo se recupera la inversión.

OBJETIVOS

- **General**

Brindar los lineamientos teóricos y prácticos necesarios para la implementación y puesta en marcha de una micro hidroeléctrica en un Beneficio húmedo de café.

- **Específicos**

1. Dar a conocer los tipos de generadores y turbinas que se pueden utilizar para diseñar una micro hidroeléctrica, y obtener resultados óptimos.
2. Promover el aprovechamiento máximo del recurso de agua que es utilizada en los Beneficios.
3. Proporcionar soluciones claras y concretas a los propietarios de Beneficios de café, para las necesidades energéticas de éstos.
4. Calcular el tiempo de recuperación de inversión y demostrar que es factible, económicamente hablando, construir una pequeña hidroeléctrica en un Beneficio húmedo de café.
5. Demostrar que un Beneficio húmedo de café tiene la capacidad de sufragar las necesidades de energía de sus instalaciones, o por lo menos, cubrir parte de éstas, generando energía eléctrica con el agua que es llevada hasta él.

INTRODUCCIÓN

El tema del trabajo surge a raíz de la necesidad del aprovechamiento de los recursos renovables con que se cuenta en nuestro medio, en lugar de los no renovables y contaminantes, como por ejemplo los ríos y los manantiales que son utilizados por los Beneficios húmedos de café. Una gran cantidad de ríos y fuentes de agua son utilizadas por los Beneficios para procesar el café maduro y obtener café en pergamino o en oro, para poder almacenarlo. El agua es utilizada para despulpar y lavar el café, luego es depositada en fosas para que sea filtrada por la tierra o tratada para su purificación.

La mayor parte de los propietarios de Beneficios no saben de la potencial fuente de energía con que cuentan, sólo por el hecho de llevar agua de un punto a otro por efecto de la gravedad, ya que esto podría utilizarse para mover las turbinas de un generador y así por lo menos poder generar la energía necesaria para la iluminación, u otros usos internos de operación; dependiendo de la cantidad de agua con que se disponga, podría incluso vender energía eléctrica a viviendas aledañas.

En muchos casos, estos Beneficios se encuentran en lugares remotos y aislados entre las fincas para estar cerca de las fuentes de agua o donde se cosecha el café, por lo que no cuentan con un servicio de electricidad y tienen que generar su propia energía, ya sea con plantas de energía eléctrica a base de diésel o gasolina, plantas solares o eólicas.

Si por ejemplo en un lugar donde utilicen energía para iluminación nocturna, colectada durante el día por celdas solares, almacenada en un sistema de baterías, y en ese lugar no cuentan con la suficiente agua como para generar energía en forma continua, se puede utilizar esta generación de energía para cargar el sistema de baterías en días que no haya suficiente sol, en la noche o utilizarlo como un cargador auxiliar. Si el caudal de agua fuera lo suficientemente grande, la energía generada podría utilizarse para hacer funcionar secadoras de café eléctricas, los motores de las bombas lavadoras, motores de despulpadoras u otro tipo de maquinaria que puedan utilizar.

La versatilidad que nos da la energía eléctrica, para poder operar cualquier tipo de mecanismos por medio de motores, es la ventaja principal por la cual se desea generar energía eléctrica, en lugar de utilizar la fuerza mecánica del agua para impulsar los mecanismos directamente, puesto que existían Beneficios que por medio de la fuerza directa del agua, hacen girar turbinas en las que sus ejes le dan el movimiento necesario a la maquinaria para el despulpe.

La idea del desarrollo de este tema es para dar información a los propietarios de Beneficios de cómo aprovechar el recurso del agua con que ya cuentan, puesto que para ellos es indispensable el uso de agua, llevándola desde la fuente hasta sus instalaciones, generalmente por gravedad. Este caudal de agua que llega al Beneficio puede ser utilizado para generar energía eléctrica y ser utilizada para su propio servicio; esto ayudaría en gran medida al propietario para reducir los costos de operación, aunque este tendría que realizar una inversión inicial, se llegó a la conclusión que, sí, es factible la implementación de una micro hidroeléctrica en un Beneficio, siendo la mejor opción, siempre y cuando se tenga el agua necesaria.

El tema de micro hidroeléctricas está cobrando importancia, por la necesidad de diversificar la generación de energía, pudiendo realizar estos proyectos de forma local y ayudar al desarrollo de las comunidades rurales. En algunos países como España, se imparten cursos de micro hidroeléctricas en las universidades. En Guatemala, ese tema está comenzando a difundirse, pero existen fundaciones nacionales e internacionales que financian este tipo de proyectos en las áreas rurales.

Los sistemas capaces de generar energía de forma limpia y sostenible, han tenido un gran crecimiento, debido al empuje recibido por la confirmación de los problemas causados por los cambios climáticos y la disminución de los recursos a los que se enfrenta nuestro planeta. Se prevé que estos sistemas cobren más importancia, pues en muchos países se han aceptado las obligaciones de reducción de emisiones que producen el cambio climático, según lo expuesto en el Protocolo de Kyoto.

La utilización de la energía potencial del agua disponible entre una cota superior y una inferior, encontró aplicación hace siglos; con los molinos de agua, ha sido posible la utilización de una fuerza proporcionada por la naturaleza para realizar tareas diversas. Desde finales del siglo XVIII, la utilización de los recursos hídricos ha sido la forma más común de producción de energía eléctrica. Sin embargo, no ha sido hasta hace pocos años cuando se le ha atribuido el valor añadido, respecto a otros tipos de producción de energía, de los beneficios medioambientales que supone su reducido impacto por la no emisión de sustancias contaminantes a la atmósfera, en oposición a la combustión del carbón o el petróleo.

La tecnología en el campo hidroeléctrico ha llegado en la actualidad a su plena madurez, aún así, existen posibilidades de empleo del recurso hidroeléctrico a pequeña escala, que pueden presentar interés para realidades locales y con un uso de la energía diferente de la industrial. Es el caso de la utilización de los saltos de agua de los acueductos (si se gasta energía para bombear el agua a un cierto desnivel, por qué no recuperar una parte en la fase de caída), o de pequeñas turbinas (de pocos kW a pocas decenas de kW) colocadas en arroyos o quebradas de montaña, para el suministro de localidades en las montañas, también en canales de riego o Beneficios.

Un objetivo de esta tesis es ofrecer a las Administraciones Públicas, a los encargados de la planificación de asuntos energéticos, urbanos y medio ambientales, a los profesionales y a todos los que juegan un papel fundamental en el desarrollo de sistemas integrados de energía, medio ambiente y tierras, un instrumento de análisis y evaluación para la utilización de sistemas de producción descentralizada de energía eléctrica, que contribuyan, dentro del ámbito local, a disminuir la utilización incontrolada de combustibles fósiles y de recursos no renovables. También es dirigida a los usuarios finales, esto es, a los propietarios de Beneficios y consumidores que quieran mantenerse actualizados en el tema de tecnologías, incluso para necesidades domésticas y que, con sus decisiones, pueden influir sobre el mercado.

1. BENEFICIOS HÚMEDOS DE CAFÉ

1.1. Historia y datos

Desde que se comenzó a cultivar la planta del cafeto en el continente africano, hasta la actualidad, las personas han buscado la manera de almacenar y comercializar el fruto de esta planta. Durante la segunda mitad del siglo XVIII se comenzó a cultivar el café en Guatemala, pero fue hasta mediados del siglo XIX cuando se cultivó para ser comercializado, pues hasta entonces en Guatemala se utilizaba el café más como medicina que como bebida; entonces se construyeron Beneficios húmedos de café y con ellos se comenzaron a buscar fuentes de energía, que proporcionaran la potencia necesaria para mover mecanismos de despulpe del café. La primer potencia utilizada fue la del hombre, luego la de animales (bueyes o caballos), después las corrientes de agua para hacer girar grandes turbinas y mover directamente los mecanismos, luego con motores de combustión hasta llegar a los motores eléctricos.

Guatemala produce 28.5 millones de quintales de café en cereza y tiene un total de 485 mil 849 Manzanas del territorio sembradas con café, en el año 2005 (Referencia 1). Por contar con variedad de micro climas, Guatemala produce diversos tipos de café: estrictamente duro, duro y semiduro; prime y extraprime (Referencia 2).

1.2. Proceso del café

Al fruto del café se le quita la pulpa, la miel y el mucílago, dejando la semilla limpia, luego es secada, de esta manera está lista para almacenar o transportar, se le llama grano en pergamino, el cual aún tiene una cascarilla que al ser removida se le conoce como grano en oro, lo siguiente es tostarlo y molerlo; de esta manera se cuece con agua y se obtiene la estimulante bebida que también llamamos café. Generalmente el fruto del café se corta maduro (también se le conoce como café en cereza), es despulpado lo más pronto posible, para evitar que se fermente y el grano no tome color ni olor desagradables, luego se deja que fermente un poco en pilas especiales (en mediciones hechas nos dio un promedio de 24 h), hasta que el mucílago se desprenda, entonces es lavado y secado; por esta razón muchos de los Beneficios se construyen dentro de las fincas o cerca de donde se cosecha el café, de tal manera que muchas veces, se encuentran en lugares alejados de los pueblos y por ende no cuentan con el servicio de energía eléctrica, en algunos casos.

Se le llama Beneficio húmedo de café porque necesita del agua para efectuar el despulpe y lavado del café, la idea es eliminar todo indicio de humedad del café para poder ser almacenado y luego transportado; en realidad se prefiere con un porcentaje de humedad de 10 al 12% del grano en oro (Referencia 3). Comercialmente se dice que por cada 4.7 quintales de café maduro, se obtiene 1 qq de café en pergamino (un rendimiento del 22% aproximadamente), aunque puede ser más o menos proporción, dependiendo de la calidad del fruto. En mediciones hechas para una partida de café de montaña (de alto rendimiento), despulpado y secado, al ser basculado el producto en pergamino, obtuvimos un rendimiento del 24%.

El café es colocado en pilas de depósito con fondo inclinado, cuando se despulpa se le agrega agua para que baje por canales a un sifón que sirve para separar el café vano, es pasado por las máquinas despulpadoras, luego se deposita en piletas para que se fermente (el tiempo de fermentación varía según la calidad del café, el agua con que se despulpe y la cantidad de café), en donde es lavado a máquina o manualmente, una forma es revolver el café en el agua y elevarlo con una bomba a una torre para que al bajar por gradas se le desprenda el mucílago, después se vierte en los correteos para quitarle natas o café vano, es conducido hasta la sección de patio donde se esparcirá y se secará al sol (en mediciones hechas, aproximadamente 5 días, dependiendo del grosor que tenga al estar tendido y la radiación solar), volteándolo constantemente para que el secado sea uniforme; al estar seco es encostado y se almacena en bodegas libres de humedad.

Este proceso debe ser meticulosamente supervisado, para que el producto sea de la mejor calidad, y si se desea tener una certificación a nivel mundial para exportación, pues Guatemala compite en el mercado internacional por calidad y no por cantidad.

1.3. Clasificación de los Beneficios

En Guatemala existen Beneficios grandes, medianos, pequeños y muy pequeños, dependiendo de la cantidad de café que puedan procesar, pero en este estudio lo que nos interesa es la energía eléctrica que se puede generar con sus propios recursos, específicamente generar energía eléctrica por medio del agua que es llevada hasta estos.

La clasificación de la Hidroeléctrica dependerá de la cantidad (caudal) de agua y la altura de la cual se tome hasta donde se utilice (caída), no importando la cantidad de café que procese; el tipo de Hidroeléctrica que se estudia es llamada micro hidroeléctrica, se le llama así por la generación de poca potencia eléctrica, siendo impulsada por poco caudal de agua a poca altura de caída, orientada para pequeños empresarios que no tienen la capacidad económica de desarrollar proyectos grandes y necesiten sufragar sus necesidades de energía.

En relación a su ubicación y forma de procesar el café, la disposición más común de un Beneficio es, construirlo de manera que el café pase por todas las partes de los procesos impulsado por la acción de la gravedad, ayudado con el agua, por lo que se construyen típicamente en una ladera, comenzando desde donde se toma el agua, el tanque para almacenar agua, luego la pila de café maduro, sifón, máquinas despulpadoras, pilas de fermentación, correteos y por último los patios.

Otra disposición de los Beneficios, es cuando no se tiene ladera para que el proceso se impulse por gravedad, entonces es necesario utilizar bombas de agua, para impulsar el café con el agua para los distintos procesos; también están los clasificados como ecológicos, los cuales no utilizan agua para el despulpe, únicamente para lavar el café.

1.4. Maquinaria utilizada en los Beneficios

En un Beneficio pueden ser utilizadas varios tipos de maquinas para una misma aplicación, algunas son manuales, otras utilizan motores y en otros casos son sustituidas por personas.

Tabla I. **Máquinas y aplicaciones en Beneficios**

Máquina	Aplicación
Motores	<ul style="list-style-type: none"> • Mover despulpadores • Mover bandas transportadoras
Bombas	<ul style="list-style-type: none"> • Retorno de agua para despulpe • Drenar desechos • Vaciar depósitos • Lavar café despulpado (desmuciladoras)
Calentadores	<ul style="list-style-type: none"> • Secadoras de café

Las maquinas eléctricas o de combustión más importantes y comunes que se utilizan en los Beneficios son las que se muestran en la tabla I.

1.5. Necesidades energéticas de un Beneficio

En un Beneficio se podría utilizar la energía eléctrica para servicios domésticos de las personas que laboran en él y por lo tanto viven allí, la iluminación para bodegas, oficina y toda el área de patios en donde se seca el café al sol, posiblemente alimentar los motores de la parte mecánica, las bombas de agua y también para secadoras artificiales de café.

La carga eléctrica que representa un Beneficio, para una acometida eléctrica es la suma de las potencias de las máquinas utilizadas, iluminación, tomacorrientes, etc.

1.5.1. Iluminación

La iluminación es indispensable en los patios para secar café en un Beneficio, por razones de seguridad, ya que el producto queda expuesto al aire libre y puede ser robado si la persona que cuida no tiene una buena visibilidad, también es indispensable para realizar trabajos nocturnos, pues es necesario cuando se necesitan optimizar los procesos y obtener la mejor calidad del producto, puesto que cada parte del proceso debe ser minuciosamente revisado, para saber el momento exacto del cambio de un estado a otro, si se desea la mejor calidad del café. También es necesario tener iluminación en el área de bodega, vivienda y oficina, porque son áreas cerradas, operando también en horarios nocturnos.

1.5.2. Fuerza

Los requerimientos de energía en el área de maquinas son de gran potencia, y se necesita una generación de energía grande con relación a lo que se estudia aquí; está es la aplicación que es difícil llenar su requerimiento, pero se calculará que elementos son capaces de ser alimentados. En las áreas de bodega, vivienda, oficina y área de máquinas, es factible colocar tomacorrientes para conexiones de aparatos y equipos de bajo consumo de potencia, para los cuales se espera llenar sus requerimientos de energía.

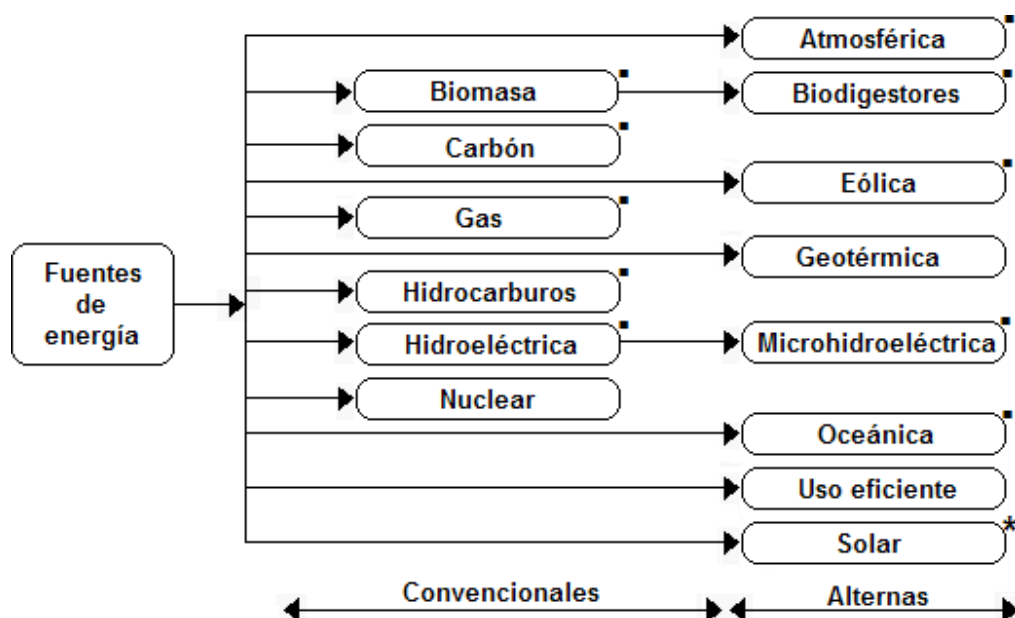
1.5.3. Otros usos de energía

Pueden ser secadoras eléctricas de café, ventilación en el área de bodega, conexiones para servicio domestico, en el área de vivienda designada para los trabajadores del Beneficio, conexiones en el área de oficina, etc.

1.6. Fuentes de energía renovable con que cuentan los Beneficios

En los Beneficios se cuenta con algunas fuentes de energía, por lo que se podría generar energía eléctrica, para consumo en sus instalaciones.

Figura 1. Clasificación general de las fuentes de energía



La figura 1 indica las fuentes convencionales de energía, son las que comúnmente se utilizan hoy en día y las alternas producen poca energía eléctrica a nivel mundial, además están en fase de experimentación y crecimiento. Otra clasificación es la fuente de energía renovable y no renovable, de las cuales nos interesa en este estudio las renovables.

Fuentes renovables: La única fuente renovable de energía que hoy contribuye significativamente a nivel nacional y mundial es la hidráulica. Sin embargo, desde hace tiempo se vienen investigando otras fuentes renovables, como la energía solar, la eólica y la biomasa, entre otras.

Tomando en cuenta los efectos y riesgos que caracterizan a las distintas fuentes primarias de energía, en la tabla II (Referencia 4), se propone una calificación de las fuentes de energía, según su impacto ambiental en una escala que va de 1 (la menos contaminante) a 10 (la más contaminante). En la siguiente clasificación indica la micro hidroeléctrica con un impacto ambiental de 3, esto es en el peor de los casos y si se extrajera una cantidad bastante significativa del arroyo o manantial y no siendo devuelta al cauce del río. En el caso de estos Beneficios, el agua ya es llevada hasta ellos y es utilizada, por tal razón y porque tampoco el agua es contaminada en el turbinado, se considera que el impacto ambiental al implementar una micro hidroeléctrica, en los Beneficios representa el mínimo valor de impacto ambiental, en la escala anterior; es más, podría hacerse conciencia a los interesados en mantener los caudales y cuidar el agua.

Tabla II. **Impacto ambiental de distintas fuentes primarias según su aplicación**

Fuente	Aplicación	Impacto Ambiental
Solar directa	Calefacción local	1
Solar directa	Producción de electricidad	2
Solar fotovoltaica	Producción de electricidad	3
Biomasa	Combustible	7
Biomasa	Producción de electricidad	7
Eólica	Producción de electricidad	4
Hidroeléctrica	Producción de electricidad	5
Micro hidroeléctrica	Producción de electricidad	3
Térmica oceánica	Producción de electricidad	2
Carbón	Producción de electricidad	10
Petróleo	Combustible	9
Petróleo	Producción de electricidad	8
Gas natural	Combustible	7
Gas natural	Producción de electricidad	7
Nuclear	Producción de electricidad	6

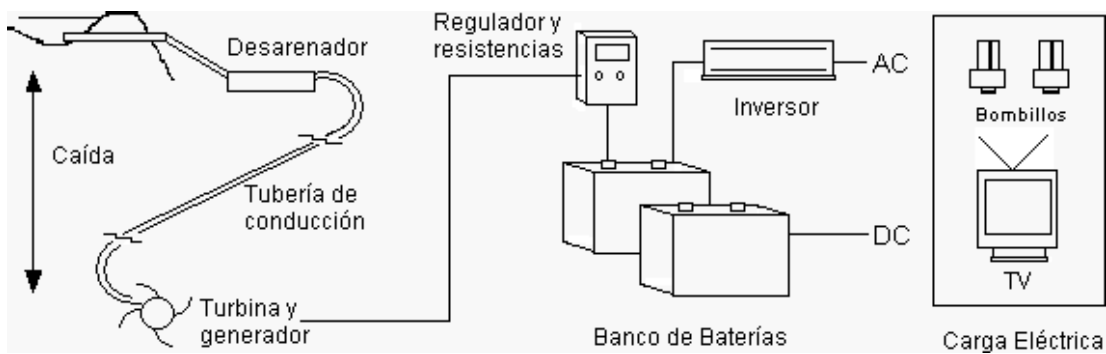
1.6.1. Hidráulica

Con el agua que es llevada desde los ríos o manantiales hasta los tanques de almacenamiento del Beneficio, conociendo la altura de caída y el caudal con que se cuenta, al ser suficiente, se puede implementar una micro hidroeléctrica.

Es práctico utilizar un pequeño generador, o un motor como generador y una turbina para construir la hidroeléctrica, pudiendo así generar energía en pequeña escala (véase la página 61). En la figura 2 se observa el esquema básico de una micro hidroeléctrica, también véase las figuras 6 en la página 17, 8 en la 24, 10 en la 27 y 18 en la 56.

El agua tiene una elevada energía específica; es 800 veces más densa del aire (Referencia 5): el empuje que ejerce sobre las palas de la turbina es mucho mayor que la del viento. Con esto aprovecharía al máximo el recurso del agua, y además de ayudar introducir la generación de energías renovables en el área rural, contará con los beneficios de exención de impuestos, que otorga el gobierno de la republica de Guatemala (véase los anexos 6, 7 y 8 en las páginas 127, 129 y 131 respectivamente).

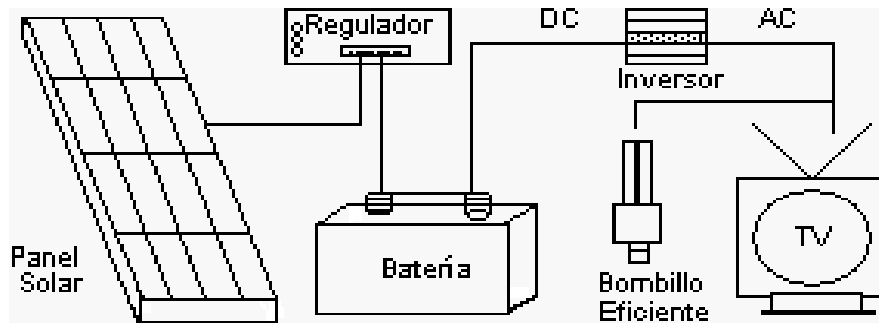
Figura 2. Esquema de una micro hidroeléctrica



1.6.2. Solar

Es posible generar electricidad con una serie de tecnologías que, en último término, dependen de los efectos de la radiación solar, incluyendo los vientos y el agua que llega a las montañas, la cual baja al mar. La conversión directa de la radiación luminosa a energía eléctrica se logra mediante el uso de las celdas solares. Por medio de paneles de varias celdas solares, colocados en los techos, para generar energía eléctrica, teniendo como fuente la luz solar; un esquema se muestra en la figura 3. Esta es una opción bastante factible.

Figura 3. Esquema de una planta solar



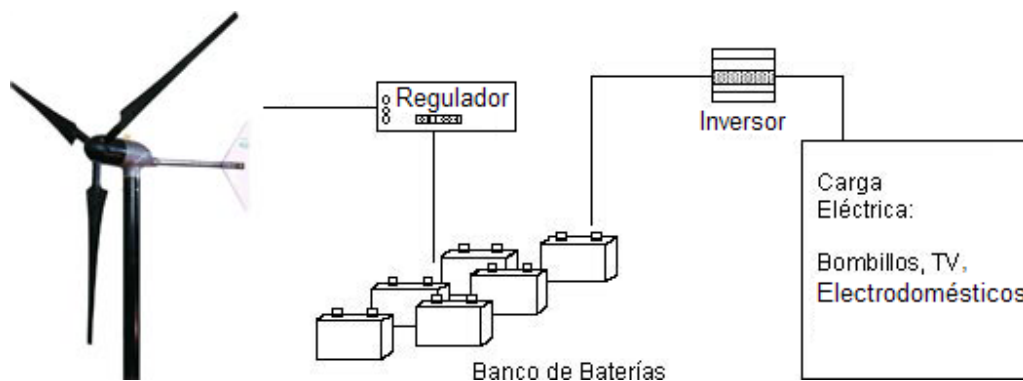
1.6.3. Eólica

Los sistemas eólicos consisten, en hélices conectadas mecánicamente a un generador eléctrico, para la producción de la energía eléctrica (o las hélices conectadas directamente a un sistema mecánico para bombear agua, moler granos, etc.). La fuente de energía es el viento natural, que se genera por la diferencia de temperatura, ocasionada por el calentamiento de la superficie terrestre, donde el flujo del aire se dirige de las altas a las bajas presiones.

Mientras el gradiente de presión (o temperatura) sea mayor, la velocidad del viento será mayor. Estos fenómenos involucran las masas de aire frío en los polos y las calientes en las zonas ecuatoriales, son influidos por la rotación de la tierra y la orografía del terreno. La potencia generada (PG) es proporcional al cubo de la velocidad del viento (v), es decir $PG = k(v)^3$, donde k es una constante de proporcionalidad, por lo que la velocidad del viento, toma un papel relevante en la generación eléctrica.

La mayoría de las instalaciones de generadores eólicos en nuestro país, son relativamente pequeñas, con molinos en una configuración que aprovecha los cambios en la dirección del viento. Con una turbina eólica, el viento que sopla sobre el Beneficio y sus alrededores, acoplada a un generador eléctrico, podemos obtener energía eléctrica; la figura 4 muestra un esquema de este tipo. El problema con un sistema de este tipo es que la velocidad del viento es irregular, máxime entre montañas y ríos en donde se encuentran muchos Beneficios de este tipo.

Figura 4. Esquema de una planta eólica



1.6.4. Biomasa

La biomasa es toda la materia orgánica que está formada por la pulpa de café, arbustos, árboles, pastos, cultivos, residuos y desechos orgánicos, tanto forestales como industriales y urbanos. Las plantas captan la radiación solar y por medio de la fotosíntesis, transforman el CO₂ en carbohidratos, que se pueden usar posteriormente para producir energía.

Las potencialidades del uso de la biomasa, no se quedan únicamente en la pulpa de café, las leñas, el bagazo de caña, etc., sino que se encuentran en el procesamiento de los residuos y desechos orgánicos, tales como los agrícolas, la basura, los estiércoles de animales, los desechos agroindustriales y los procesos químicos, pero estos aún son incipientes.

Emanación de gas: El gas metano que produce la fermentación de la pulpa, o la de aguas servidas para lavar y despulpar el café, también puede ser manejado, colocándolo en contenedores especiales y así aprovecharlo para combustión, no sólo en servicios de calor directos, sino también para implementar un generador de energía eléctrica, por combustión de gas.

1.6.5. Térmica

El calor que es generado por la fermentación de pulpa en los depósitos, puede ser aprovechado para generar energía eléctrica, con generadores de calor, dándole un buen manejo a estos desechos y colocándolos en depósitos especiales.

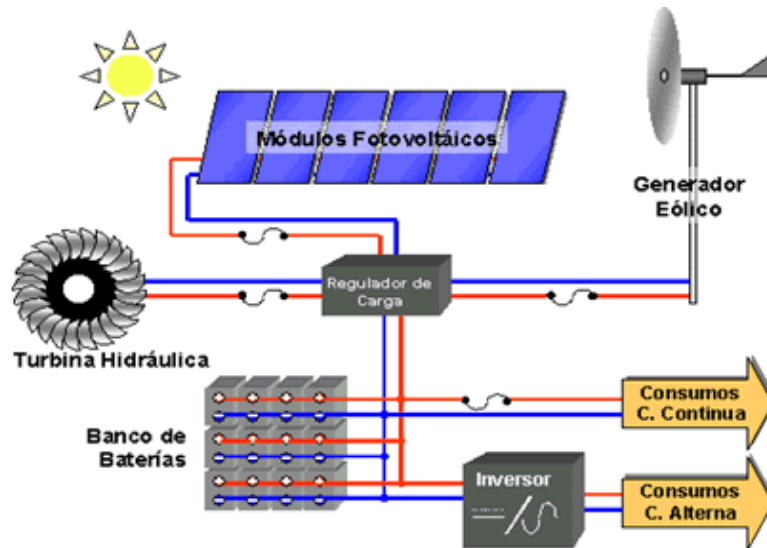
También se podría transferir el calor directamente, para usos específicos como secar el café. Por medio de la luz solar, es posible utilizar paneles térmicos e implementarlos en secadoras de café.

El aprovechamiento de la radiación solar tiene una historia tan antigua como el mismo hombre. El calentamiento de los materiales y su transmisión a otros medios, es una rutina que sentimos todos los días en nuestros alrededores. La termoelectricidad fue utilizada en las partes alejadas de unión soviética, en la década de 1920 para accionar radios; el equipo era un bimetálico de barras, con un extremo en la chimenea para conseguir calor y el otro extremo hacia afuera en el frío (también podría ser una termo copla). Su aprovechamiento más directo data de los años 50, con industrias artesanales para el calentamiento de agua de uso doméstico. En la actualidad se encuentran compañías que fabrican y experimentan, diferentes tipos de colectores solares para el calentamiento de agua, refrigeración, secado de granos, cocinas solares, climatización de edificios, etc.

1.7. Generación de energía eléctrica híbrida

Las formas de generación de energía eléctrica anteriormente expuestas, son irregulares en un Beneficio, si no se tiene una cantidad bastante grande de recurso de la fuente, pero en casos de Beneficios medianos o pequeños que están mal ubicados, en relación a los recursos naturales, hay algunos que no se tienen durante todo el tiempo; es por eso que sería necesario implementar un sistema de baterías para ser cargadas, generando en corriente directa, para luego convertirla por medio de inversores de corriente directa, a corriente alterna, elevando el voltaje de 12 o 24V a 120V o 240V.

Figura 5. Esquema que integra generación eléctrica de tres formas (hidráulica, eólica y solar)



En un afán de aprovechar la máxima energía en forma práctica, podría implementarse un sistema con generación de energía eléctrica fotovoltaica, eólica e hidráulica, entre otros; conectados a un regulador de voltaje, para cargar un arreglo de baterías (acumuladores) de 12 Voltios, así tendríamos energía constante para usos de corriente continua; y para utilizar corriente alterna en 120V a 60Hz, se coloca un inversor de voltaje (véase la página 80), tal como se muestra en la figura 5. La generación de energía eléctrica en baja potencia, es comúnmente en corriente directa, por la eficiencia y la construcción de los generadores.

1.8. Aprovechamiento al máximo del recurso de agua

Muchas personas que cuentan con suficiente agua para utilizarla en riegos, Beneficios húmedos de café o que simplemente la tienen pero no la utilizan, pueden aprovechar este recurso para generar energía eléctrica, pues saben que las hidroeléctricas utilizan agua para ello, pero piensan que es muy difícil generarla utilizando la energía potencial del agua, entonces no saben que pueden generar energía con el poco caudal de agua y la poca altura de donde es tomada. Es factible implementar una muy pequeña hidroeléctrica, ya que en el mercado se encuentran generadores integrados, con turbinas de baja potencia, que generan energía eléctrica con poco caudal de agua y poca altura de caída, siempre y cuando no bajen de ciertos límites; estas son útiles en consumos bajos de energía. En la figura 8, 9 y 10 (véase las páginas 24, 26 y 27), se muestran los valores de operación de algunas turbinas hidráulicas con su generador.

1.9. Ventajas al utilizar Hidroenergía

Al implementar una micro hidroeléctrica en un Beneficio, aprovecharía al máximo el recurso del agua, reduciría los costos de operación, introduciría nuevas tecnologías, ayudando así al desarrollo rural e incrementará los puntos de certificación del café que procesa, en el mercado internacional, mejorando así los precios de venta del café. También gozaría de la exención de impuestos que otorga el gobierno de Guatemala, por generar con recursos renovables, conservando el medio ambiente (ver anexos 7 y 8, en las páginas 129 y 131) y generaría su propia energía.

2. PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

Los Manantiales o caudales que forman riachuelos y cascadas, que son utilizados por los Beneficios, pueden aprovecharse para impulsar turbinas y generar energía eléctrica. La figura 6 muestra un esquema aéreo de una instalación micro hidroeléctrica.

Figura 6. Vista aérea de una micro hidroeléctrica



2.1. Hidroeléctricas

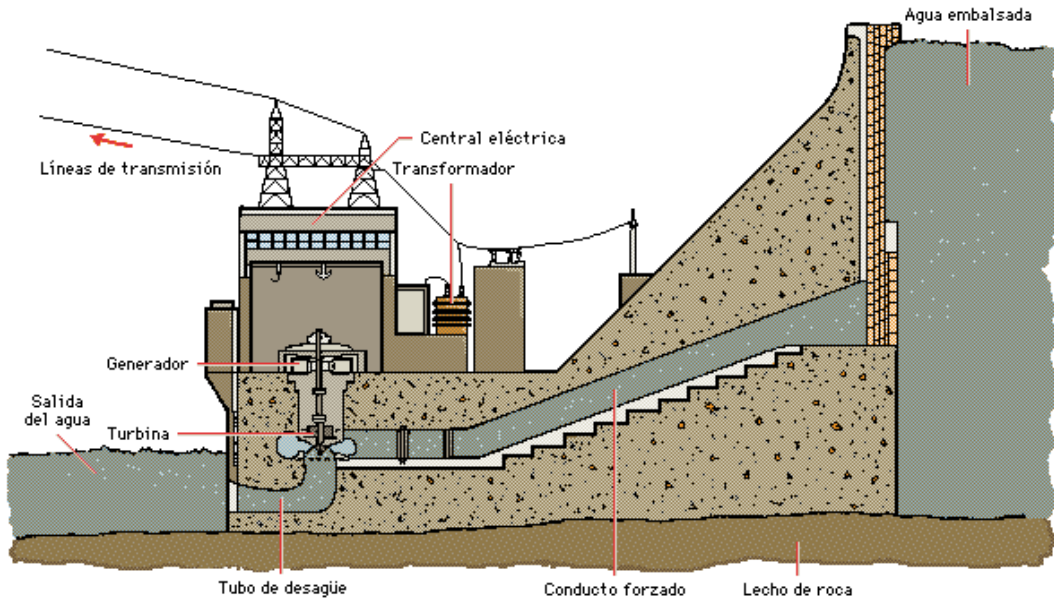
Una central hidroeléctrica es aquella que genera electricidad, mediante el aprovechamiento de la energía potencial del agua, embalsada en una presa o colectada en tanques de carga, situados a más alto nivel que la central.

Se genera electricidad liberando un flujo controlado de agua a alta presión, a través de un conducto forzado desde la presa hasta la sala de máquinas; el agua impulsa unas turbinas que mueven los generadores, y producen así una corriente eléctrica, generalmente en CA; a continuación, esta corriente elevada de baja tensión, pasa por Transformadores elevadores de tensión, que la convierten en corriente reducida de alta tensión. La corriente se transporta por cables de alta tensión hasta las subestaciones eléctricas, donde se reduce la tensión, para ser utilizada por los usuarios.

La tecnología de las principales instalaciones, se ha mantenido igual durante el siglo XX. Las centrales de gran potencia dependen de un embalse de agua, contenido por una presa para que el caudal de agua se controle, y se pueda mantener casi constante. El agua se transporta por unos conductos o tuberías forzadas, controlados con válvulas y turbinas, para adecuar el flujo de agua con respecto a la demanda de electricidad. El agua que entra en la turbina, sale de la sala de máquinas por el tubo de desagüe, para devolverla a los ríos o ser reutilizada.

Los generadores están situados justo encima de las turbinas, y conectados con árboles verticales, en algunos casos, y en otros de forma horizontal. La figura 7 (Referencia 6) muestra un ejemplo de Hidroeléctrica con represa, para almacenamiento de agua.

Figura 7. Esquema de una instalación hidroeléctrica (con represa)



2.1.1. Historia y datos

La primera central hidroeléctrica se construyó en el año 1880, en Northumberland, Gran Bretaña. El renacimiento de la energía hidráulica se produjo por el desarrollo del generador eléctrico, seguido del perfeccionamiento de la turbina hidráulica, y debido al aumento de la demanda de electricidad a principios del siglo XX.

En todo el mundo, la hidroelectricidad representa aproximadamente, la cuarta parte de la producción total de electricidad; su importancia sigue en aumento, ya que es un recurso renovable y no contamina el medio ambiente.

Los países en los que constituye fuente de electricidad más importante son Noruega (99%), República Democrática del Congo (97%) y Brasil (96%) (Referencia 6). En Guatemala tan sólo un 39% de la energía eléctrica generada, no depende de la utilización de combustible y el 34% de energía eléctrica es generada por potencia hidráulica (Referencia 7). En algunos países se han instalado centrales pequeñas, con capacidad para generar entre un Kilovatio y un Megavatio. En muchas regiones de China, por ejemplo, estas pequeñas presas son la principal fuente de electricidad. Otras naciones en vías de desarrollo están utilizando este sistema, con buenos resultados. El INDE y el Ministerio de Energía y Minas de Guatemala, impulsa el estudio, gestión de financiamiento y construcción de pequeñas hidroeléctricas con capacidad menor a los 10MW; se considera que con los proyectos que se tienen propuestos, en el año 2020, la utilización de energías renovables aportará un 60% del total de la electricidad que se consume en Guatemala (Referencia 8). Para la certificación turística en Guatemala, se deben desarrollar proyectos socioculturales y ambientales, tomando en cuenta las micro hidroeléctricas (Referencia 9).

2.1.2. Clasificación de las hidroeléctricas

Las dos características principales de una central hidroeléctrica, desde el punto de vista de su capacidad de generación de electricidad son: la potencia, que es función del desnivel existente, entre el nivel medio del embalse y el nivel medio aguas abajo de la presa, del caudal máximo turbinable, además de las características de la turbina y el generador; la energía es garantizada, en un lapso de tiempo determinado, generalmente un año, que es función del volumen útil del embalse y de la potencia instalada.

Desde el punto de vista de su concepción arquitectónica, las centrales pueden ser clasificadas en: centrales al aire libre, al pie de la presa, o relativamente alejadas de esta y conectadas por medio de una tubería a presión; centrales en caverna, generalmente conectadas al embalse por medio de túneles, tuberías a presión, o por la combinación de ambas.

Desde el punto de vista de como utilizan el agua para la generación, se pueden clasificar en:

- Centrales a filo de agua. Utilizan parte del flujo de un río para generar energía eléctrica, operan en forma continua, porque no tienen capacidad para almacenar agua o no disponen de embalse. Turbinan el agua disponible en el momento, limitadamente a la capacidad instalada. En estos casos las turbinas pueden ser de eje vertical, cuando el río tiene una pendiente fuerte, u horizontal cuando la pendiente del río es baja.
- Centrales acopladas a uno o más embalses, que es el tipo más frecuente.
- Centrales mareomotrices, utilizan el flujo y reflujo de las mareas, pueden ser ventajosas en zonas costeras, donde la amplitud de la marea es grande y las condiciones morfológicas de la costa, permiten la construcción de una presa que corta la entrada y salida de la marea en una bahía; se genera energía tanto en el momento del llenado, como en el momento del vaciado de la bahía.
- Centrales mareomotrices sumergidas, utilizan la energía de las corrientes submarinas.
- Centrales que aprovechan el movimiento de las ondas, este tipo de central es objeto de investigación, desde la década de los 80.

La modalidad con que se opera una central hidroeléctrica, puede variar a lo largo de su vida útil. Las centrales pueden operar en régimen de: generación de energía de base, o en períodos de punta. Estas a su vez se pueden dividir en: centrales tradicionales o centrales reversibles (Referencia 10).

2.2. Tipos de pequeñas hidroeléctricas

Mini-hidráulica es el término con el que la UNIDO (Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial), denomina a las centrales hidroeléctricas de potencia inferior a 10 MW. Dentro de la mini-hidráulica, puede realizarse la clasificación que muestra la tabla III (Referencia 11).

Tabla III. **Clasificación de las mini-hidroeléctricas**

Clasificación	Potencia
Pico centrales	$P < 5 \text{ kW}$
Micro centrales	$P < 100 \text{ kW}$
Mini centrales	$P < 1000 \text{ kW}$
Pequeñas centrales	$P < 10000 \text{ kW}$

Según la (OLADE) Organización Latinoamericana de Energía, clasifica las centrales generadoras como "micro centrales" hasta un límite de 50 kW, "mini-centrales" de 50 a 500 kW y "pequeñas centrales hidroeléctricas" de 500 a 5000 kW.

La clasificación de los sistemas de mini-hidráulica es una convención útil para reflejar diferentes modalidades de funcionamiento. Para aspectos prácticos en esta tesis, se le llamará micro hidroeléctrica a las centrales con potencias inferiores a 100 kW, abarcando el nombre de pico hidroeléctricas.

En Guatemala es libre la construcción de mini generadoras eléctricas, según la ley general de electricidad (véase anexo 6 en la página 127).

Otra forma de clasificar las centrales hidroeléctricas, se basa en su funcionamiento en relación con la modalidad de toma y acumulación de las aguas:

- Centrales de agua fluente y
- Centrales de flujo regulado.

La energía hidroeléctrica se puede utilizar en las siguientes aplicaciones:

- Sistemas *off-grid* o *stand-alone*: sistemas no conectados a la red. Normalmente se trata de pico centrales al servicio de usuarios, que consumen pocos kilowatios.
- Sistemas *on-grid* o *grid-connected*: sistemas conectados a la red eléctrica. Normalmente son micro sistemas creados para el autoconsumo, que pueden ceder la energía sobrante producida a la red. (Referencia 5).

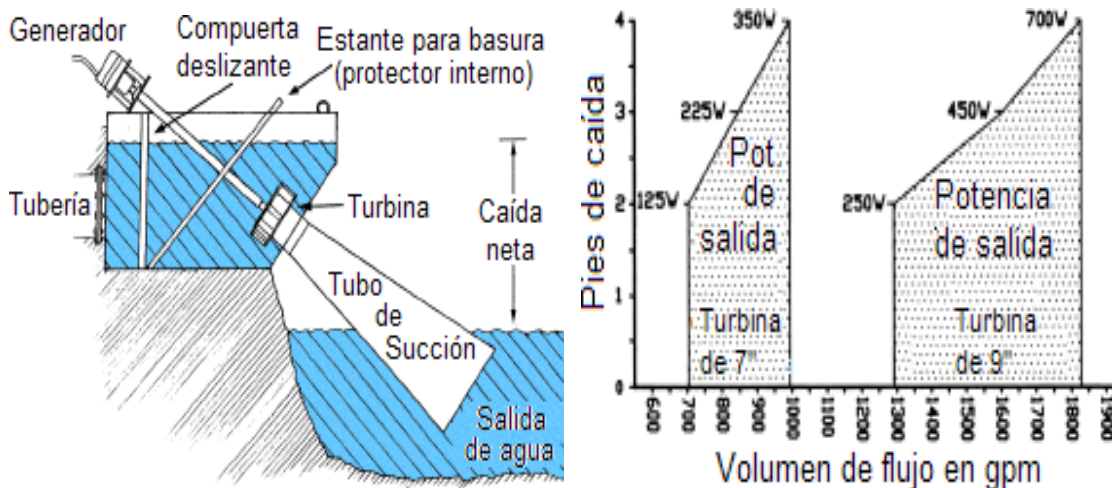
2.2.1 Pico hidroeléctrica

Pequeñas fuentes de agua pueden generar suficiente energía, para suplir las necesidades básicas de electrificación: iluminación y radio o televisión. Un sistema con solo 50 vatios de potencia, podría generar suficiente energía durante un día de trabajo para mantener encendidos 6 bombillos eficientes, durante más de seis horas ($50 \text{ W} * 24 \text{ h} = 1200 \text{ Wh}$) (Referencia 12). Estos sistemas generan en corriente directa, y requieren de un banco de baterías para almacenar la energía producida (al hablar de estas mencionaremos micro hidroeléctricas).

Requiere obras civiles sencillas, una bocatoma que puede ser construida con piedras, para desviar una porción de la quebrada fuera de su cauce, un desarenador construido a partir de un tanque plástico de 250 litros de capacidad, provisto de rejilla de limpieza, una red hidráulica constituida por manguera de polietileno, y una pequeña caseta que alberga la turbina y el equipo electrónico de regulación, control y el banco de baterías. Opcionalmente puede instalarse un inversor, para convertir la energía almacenada en corriente alterna a 120 V de CA, que permita el uso de electrodomésticos de uso común. Un ejemplo de pico hidroeléctrica, se muestra en las figuras 6 (véase la página 17).

La figura 8 muestra una pico hidroeléctrica, con pequeña caída pero gran caudal de agua, utilizando turbina Francis, proporcionada por la empresa ABS Alaskan inc. (Referencia 13); también véase las figuras 9 y 10 (véase las páginas 26 y 27).

Figura 8. **Pico hidroeléctrica con turbina Francis a muy poca altura y gran flujo**



2.2.2. Micro hidroeléctrica

Los sistemas micro hidroeléctricos aprovechan los recursos hídricos, sin deteriorar el medio ambiente. Sus obras civiles son de bajo impacto ambiental, pues en la mayoría de casos no requieren de represas que inundan tierras fértiles, o de reservas naturales. Por el contrario promueven la conservación de las cuencas, ya que crean conciencia en los usuarios, de la importancia del agua y su conservación, debido a la íntima relación que existe entre el caudal de agua y la cantidad de energía generada. La micro hidroenergía hace uso de un recurso natural renovable de una forma sostenible, facilita la regionalización de la producción, representan una forma de generación distribuida que permite producir la energía cerca del consumidor. Las aplicaciones micro hidráulicas tienen un impacto ambiental muy bajo. Los sistemas de pequeño tamaño ocupan poco espacio y son poco visibles, a menudo están integrados en sistemas hídricos ya existentes y por tanto, tienen un gran valor en términos de sostenibilidad de la generación eléctrica.

El esquema básico de los aprovechamientos hidroeléctricos comprende una bocatoma sencilla, desarenador rectangular, cámara de carga, tubería de presión, casa de máquinas y equipo turbo-generador (véase figura 2 en la página 10, figura 6 en la página 17, figura 8 en la página 24, figura 9 en la página 26, figura 10 en la página 27 y figura 18 en la página 56).

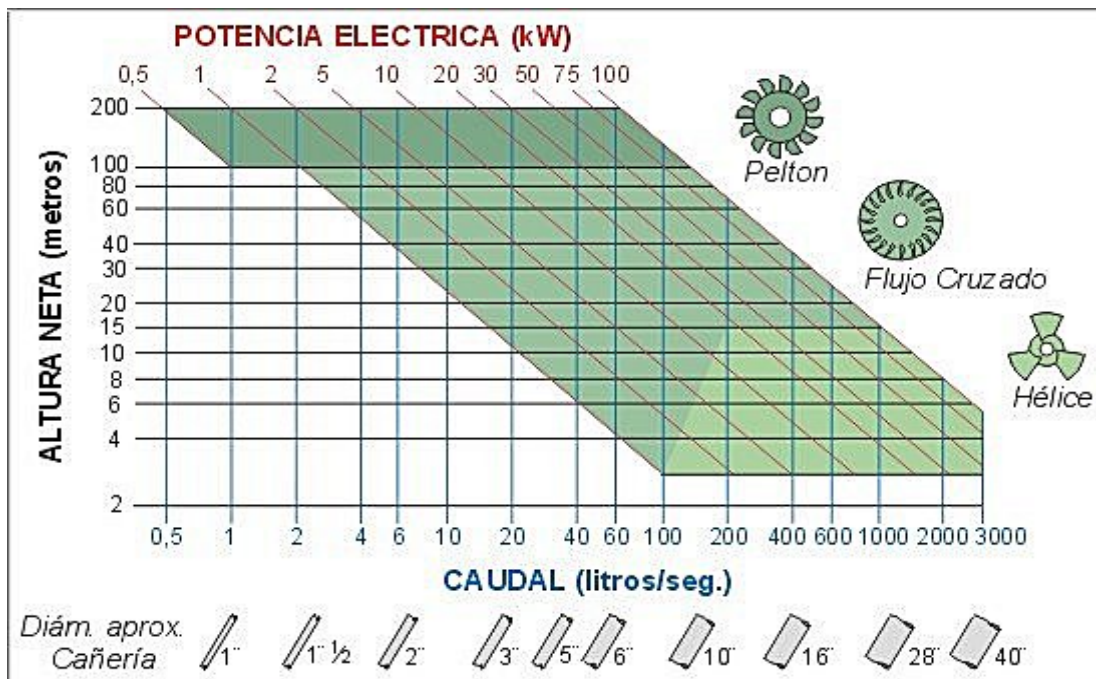
La potencia que se puede obtener de una instalación, a igualdad de caudal y salto, depende del rendimiento global de transformación de una instalación hidroeléctrica, que es el resultado del producto de al menos, los cuatro siguientes rendimientos parciales:

- Rendimiento hidráulico.

- Rendimiento volumétrico de la turbina.
- Rendimiento mecánico de la turbina.
- Rendimiento eléctrico del generador.
- Rendimiento de la transformación, si es utilizado.

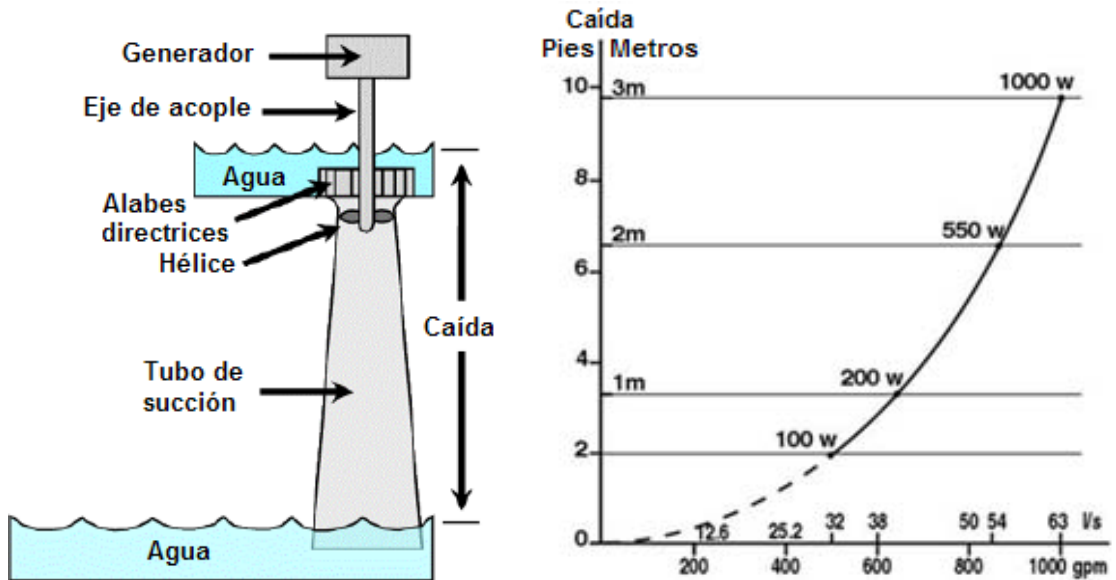
Adicionalmente podría ser necesario instalar una red de baja o media tensión para interconexión eléctrica con el centro de consumo.

Figura 9. **Potencia de micro hidroeléctricas según caída y caudal**



La figura 9 indica la potencia que puede obtenerse al conocer la altura de caída y el caudal de agua, de un micro sistema de turbina-generador y la figura 10 muestra una micro turbina axial, con su gráfica de potencias de salida, ambos proporcionados por la empresa de generadores Savoia (Referencia 14).

Figura 10. Sistema de micro turbina Axial y gráfica de potencia



2.2.3. Sistemas de agua fluvente

Un sistema de agua fluvente se considera como el agua que es tomada a filo de agua en un río, o sea que no se construye una represa para retener toda el agua, y absorber la máxima cantidad posible de un río, sino que se hace una pequeña poza con un dique, ya sea con piedras, sacos de arena, cemento o plásticos hinchables, tomando una parte del agua y dejando que el río continúe.

Los pequeños diques se hacen cuando no se necesita demasiada agua, o porque no se puede apoderar del agua que fluye en el río, pues hay más personas que necesitan de ella. Centrales de agua fluvente son las que no están reguladas, el caudal varía durante el año en función del régimen hidrológico del curso de agua. Ejemplos de este sistema se muestra en las figuras 6 (véase la página 17) y 18 (véase la página 56).

2.2.4. Sistemas de presa

Un sistema de presa es cuando se bloquea el cauce de ríos o manantiales, para extraer la mayor cantidad de agua de ellos. Esto es necesario cuando se requiere generar gran potencia en hidroeléctricas grandes, y almacenar el agua para el verano. Son los embalses destinados a usos hidroeléctricos u otros fines, y en los que se pueden regular las aguas a través de un depósito de regulación diario, semanal o mensual. Las centrales situadas aguas abajo de estos, son las llamadas Centrales de flujo regulado. La entidad de la regulación está relacionada a la capacidad de acumulación del depósito. Un ejemplo de este sistema se muestra en la figura 7 (véase la página 19).

Aunque estos sistemas son de gran tamaño y de efectos significativos en las áreas en donde se construyen, la ley general de electricidad (véase anexo 6) da lugar a la proliferación de estas, es más el gobierno de Guatemala las promueve (véase anexo 8 en la página 131) y se otorgan incentivos por generar energía eléctrica con recursos renovables (véase anexo 7 en la página 129). Esto es siempre y cuando no se dañen al medio ambiente ni a personas, etc.

2.5. Elección del lugar y estudio de los parámetros útiles (caudal y altura de caída disponibles, potencia)

La elección del lugar se realiza basándose en:

- La disponibilidad de terrenos (control de las propiedades o de vínculos).
- La accesibilidad del lugar (si es mayor la accesibilidad es menor el impacto).
- La evaluación de los parámetros de referencia (caudal y salto disponible).

Una vez elegido el lugar que cumpla los requisitos adecuados, se pasa a la determinación del caudal de agua y del salto de caída. Cuando se tengan estos valores, el cálculo de la potencia se obtiene de la siguiente ecuación de potencia (Referencia 15):

$$P_t = g * \eta_t * \eta_g * Q * H$$

P_t = potencia teórica en W.

g = aceleración de la gravedad (9.81 m/s²).

η_t = rendimiento de la turbina hidráulica (entre 0.75 y 0.90 para turbinas grandes, para pequeños tamaños entre 0.5 y 0.7).

η_g = rendimiento del generador eléctrico (entre 0.92 y 0.97 para generadores de regular tamaño, y para pequeños tamaños un promedio de 0.85).

Q = caudal de agua turbinable en litros por segundo (l/s).

H = desnivel disponible en la presa entre aguas arriba y aguas abajo (metros).

En una central hidroeléctrica se definen:

Potencia instalada: Es la potencia nominal del generador o los grupos generadores instalados en la central.

Potencia media: Es la calculada mediante la ecuación de potencia anterior considerando el caudal medio disponible y el desnivel medio disponible.

Como hemos visto, los elementos que permiten elegir un lugar para la realización de una instalación hidroeléctrica, se refieren al salto y al caudal disponible:

- La evaluación del salto se puede realizar con un altímetro; la evaluación del caudal es bastante compleja ya que requiere un estudio del régimen del curso de agua que se quiere aprovechar, pero cuando se necesita poco, basta con saber cual es el nivel de estiaje y si se tiene constante (véase anexo 5, p.125).

- El caudal se puede medir de forma empírica. Se puede determinar por puntos la forma de la sección hídrica de interés, calcular el área (producto del ancho del canal a cielo abierto, de la sección por un valor de altura media de la corriente), de forma paralela medir la velocidad de la corriente mediante un flotador, y multiplicar los dos términos medidos experimentalmente (véase anexos 2, 3 y 4 en páginas 119, 121 y 123, respectivamente).

En el caso de potencias más grandes (mayores de 10 kW) para tener un cuadro de la potencialidad de la instalación, hace falta realizar un estudio hidrológico, que se puede efectuar con métodos directos o indirectos. Los primeros permiten calcular el caudal de la sección de interés, mediante mediciones experimentales, o utilizando las series temporales de los datos hidrológicos disponibles sobre el curso de agua. Los segundos calculan el caudal a través de la transformación flujos (o sea basándose sobre el estudio de las precipitaciones), o por extrapolación respecto a cursos de agua cercanos, se requeriría además sacar la curva media de duración de caudales.

2.6. Turbinas Hidráulicas

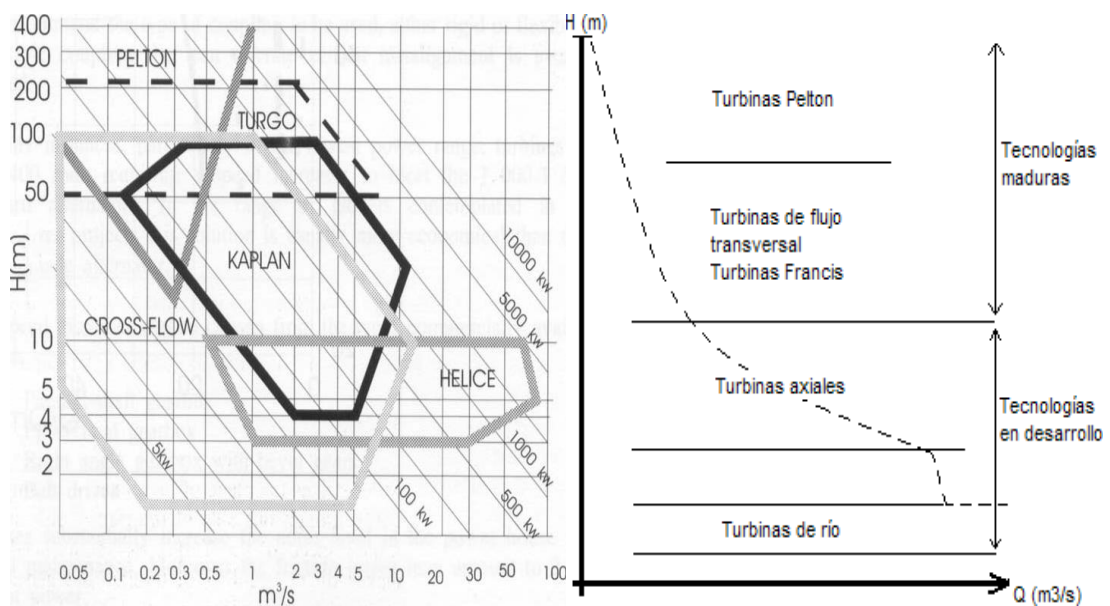
La Turbina Hidráulica es un motor rotativo que convierte en energía mecánica, la energía de una corriente de agua. El elemento básico de la turbina es la rueda, rotor o rodete, que cuenta con palas, hélices, cuchillas o cubos colocados alrededor de su circunferencia, de tal forma que el fluido en movimiento produce una fuerza tangencial, que impulsa la rueda y la hace girar. Esta energía mecánica se transfiere a través de un eje, para proporcionar el movimiento de una máquina, un compresor, un generador eléctrico o una hélice. También son llamadas primotores o motores primarios.

El tamaño de la micro turbinas, varía entre 100 y 300 mm de diámetro, en aplicaciones comunes, cada uno de los componentes es fabricado por separado, y con procesos aplicados de acuerdo a las necesidades, excepto la pelton que se fabrica en una sola pieza y se utiliza acero inoxidable, bronce o aleaciones (Referencias 11 y 16).

La elección de la turbina adecuada se realiza a través de normogramas, en los que la introducción de los datos de proyecto (salto y caudal de agua disponibles), permite extrapolar la tipología de turbina más adecuada y el tamaño en términos de potencia. Cada turbina tiene su propio rendimiento, en función del régimen de utilización de esta.

En cuanto a su modo de funcionamiento, se pueden clasificar en dos grupos: turbinas de acción y de reacción. La figura 11 indica las áreas de acción entre salto y caudal de las turbinas.

Figura 11. Cuadro de acción (selección) de las turbinas



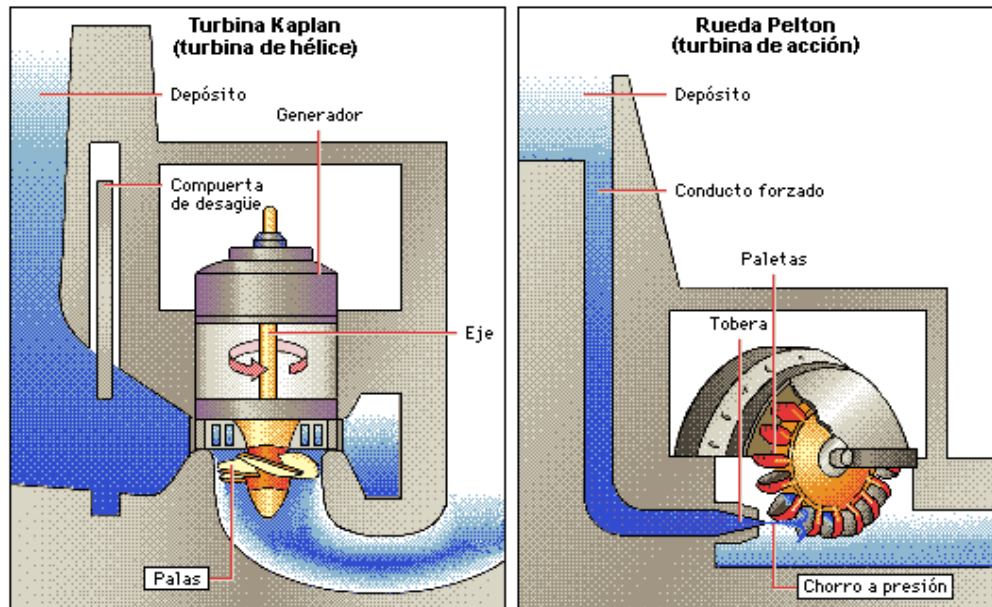
TURBINAS DE ACCIÓN: Las turbinas de acción aprovechan únicamente la velocidad del flujo de agua, mientras que las de reacción aprovechan además la pérdida de presión que se produce en su interior. La energía del agua que sale del distribuidor, es totalmente cinética (la transformación de energía potencial a cinética, se produce al pasar a través de una aguja, que provoca un estrechamiento del diámetro del conducto forzado). A lo largo de todo el recorrido a través del rodete, el fluido está a presión atmosférica.

El tipo de turbina de acción más conocido y utilizado en la práctica es la turbina Pelton, que se emplea generalmente para saltos de agua de gran altura (más de 50 m), pero existen otros como la turbina Turgo y la de flujo cruzado (también conocida como turbina Ossberger o Banki-Mitchell).

TURBINAS DE REACCIÓN: la energía del agua que sale del distribuidor es en parte cinética y en parte de presión (la transformación de potencial a cinética que se produce en el distribuidor no es completa: el agua sale con una velocidad inferior a la de las turbinas de acción, pero con una presión no nula).

Las turbinas de reacción trabajan completamente sumergidas en el agua y tienen en su parte final un difusor. Los principales tipos de turbina de reacción son los siguientes: turbina Francis, Deriaz, Hélice, Kaplan, Axiales (Tubular y Bulbo). La turbina Francis es muy utilizada en saltos de altura media (5 a 100 m) y la turbina Kaplan lo es en los saltos de baja altura (<10 m). La figura 12 a la izquierda (Referencia 6), muestra un arreglo para la turbina Kaplan.

Figura 12. Arreglos típicos de micro turbinas Kaplan y Pelton



Micro turbina Pelton: Es una turbina de acción, adecuada para sistemas con salto alto, hasta unos centenares de metros. Es muy parecida a las turbinas utilizadas en los sistemas de tamaño más grande, y puede ser de eje horizontal o vertical, con hasta 6 chorros y palas de doble cuchara. Generalmente todas las partes mecánicas principales están hechas de acero inoxidable. La figura 12 a la derecha (Referencia 6), muestra un arreglo para la turbina Pelton.

Ventajas: funciona a la presión atmosférica (no ofrece problemas de estanqueidad o de cavitación); de fácil y sólida construcción, ocupa poco espacio y tiene un rendimiento óptimo; número de giros relativamente bajo (adaptable a saltos incluso muy elevados).

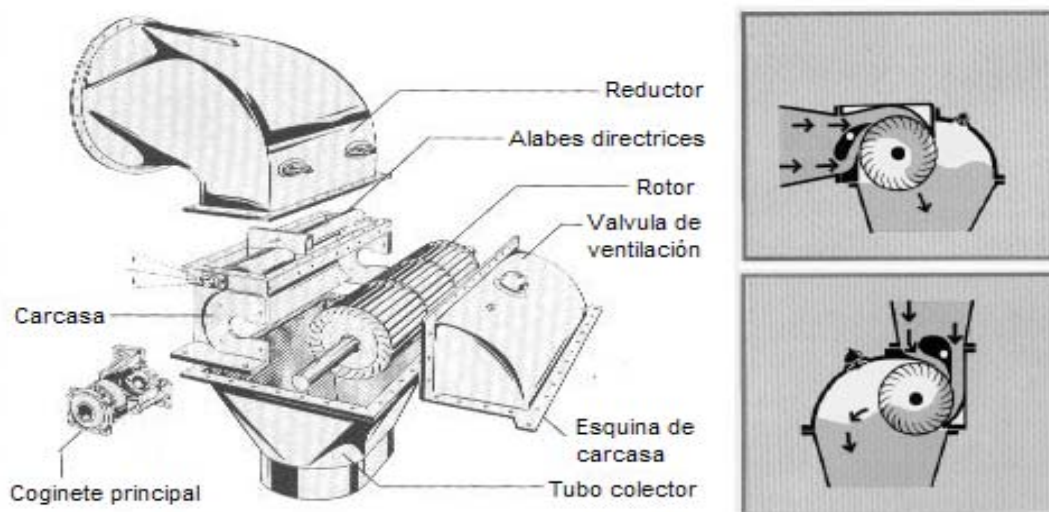
Micro turbina Turgo: Es una turbina de acción parecida a una Pelton y apta para saltos de 30 a 300m. Los constructores la aconsejan para situaciones con variaciones importantes de flujos y aguas turbias. Es más eficiente para remover mayores rangos de agua del sistema, con mínima pérdida de presión reversa que la pelton (más elaborada). La figura 23 (véase la página 75) muestra en la parte inferior derecha una turbina Turgo.

Micro turbina de flujo radial o cruzado: Es apta para instalaciones de bajo y mediano salto, desde pocos metros hasta aproximadamente 100, y caudales de 20 a 1000 l/s aproximadamente. Se utiliza exclusivamente en sistemas de pequeña potencia. Se están realizando pruebas con prototipos más innovadores, pero actualmente los modelos más extendidos son los llamados Michell Banki; véase la figura 13 (Referencia 14).

Se trata de una máquina de entrada radial del agua, caracterizada por una doble acción del fluido sobre las palas, regulación del caudal de 0 a 100%, garantizada por un especial sistema y transmisión del movimiento al generador, gracias a una correa dentada. Generalmente los componentes metálicos están hechos de acero inoxidable.

Las ventajas e inconvenientes de las turbinas de flujo cruzado son parecidas a las de las turbinas Pelton, excepto porque tienen un menor rendimiento. Se fabrican con mayor facilidad y se pueden adaptar incluso a saltos inferiores que las Pelton.

Figura 13. Arreglos típicos de hidroturbinas Banki

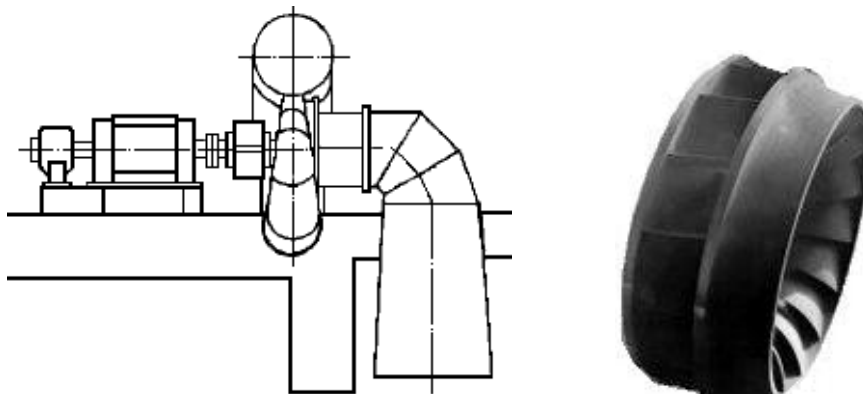


Mini turbina Francis: La Francis es una turbina de reacción para potencias con límite inferior alrededor de los 100 kW: por esto se denomina mini turbina. La aplicación de turbinas de reacción en instalaciones pequeñas es más problemática que la utilización de las de acción. A pesar de ello, en las aplicaciones pequeñas se utilizan turbinas tipo Francis, aptas para saltos medianos (de una decena a unos centenares de metros). Estas turbinas son muy parecidas a las turbinas para instalaciones más grandes.

Ventajas: aprovechan todo el salto disponible hasta el canal de desagüe, tienen una velocidad de rotación alta, apta para saltos medianos-pequeños y no estrictamente relacionada con la entidad del salto, sino al contrario, variable con el grado de reacción; es posible utilizarla para aplicaciones a sistemas en cámara libre para saltos muy pequeños. La figura 14 muestra la turbina Francis en configuración vertical (Referencia 11).

Inconvenientes: su construcción es compleja, tiene problemas de estanqueidad (por la diferencia de presión entre las parte superior e inferior del rodete), de cavitación (por la depresión del difusor), de fricción y desgaste (debidos a la velocidad del agua contra las palas), por eso casi no se utilizan en micro hidroeléctrica, sólo cuando son cantidades grandes de caudal.

Figura 14. **Arreglo vertical de turbina Francis, con forma de caracol en espiral**



2.7. Generadores eléctricos

Son máquinas eléctricas que transforman la energía mecánica en energía eléctrica. Una máquina eléctrica es un artefacto que puede convertir bien sea energía mecánica en energía eléctrica, o bien energía eléctrica en energía mecánica, esto quiere decir que los generadores son maquinas reversibles, que pueden ser utilizados como motores y viceversa. Casi todos lo motores prácticos y generadores convierten energía, de una forma en otra, por la acción de un campo magnético (véase figura 15 en la página 38).

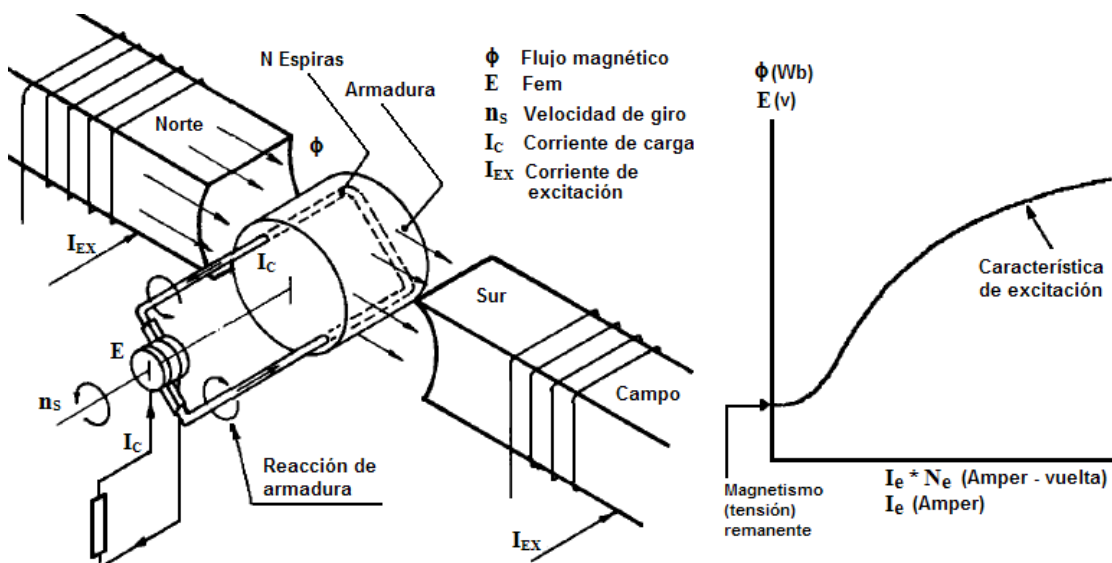
Los generadores eléctricos son bastante comunes, porque la potencia eléctrica es una fuente de energía limpia y eficiente. Casi todas las máquinas eléctricas rotan alrededor de un eje llamado el árbol de la máquina. Por razón de la naturaleza rotatoria de las máquinas, es muy importante tener una comprensión básica del movimiento rotacional. La ecuación que nos permite calcular la potencia producida por un generador eléctrico es: $P = \tau * \omega / 7.04$, donde la potencia P esta en vatios, si las dimensionales del momento de torsión τ esta en libras por pies, y la velocidad angular ω en revoluciones por minuto (Referencia 17).

Los generadores se impulsan mediante una fuente de potencia mecánica, que suele llamarse motor primario del generador. El motor primario para un generador puede ser una turbina hidráulica, turbina de vapor, un motor diésel, un motor eléctrico, etc. Puesto que la velocidad del motor primario afecta la salida del voltaje del generador, y como los motores primarios pueden variar significativamente en sus características de velocidad, se acostumbra a comprobar las regulaciones de voltaje, y las características de salida de los diferentes generadores, suponiendo una velocidad constante en el motor primario. Prescindiendo del tipo de origen de la potencia, todos los motores primarios tienden a comportarse en forma similar: mientras la potencia que entregan aumenta, la velocidad a la cual giran disminuye. La disminución de la velocidad es en general no lineal, pero casi siempre se incluye alguna forma de mecanismo regulador, para volver lineal la disminución de la velocidad, en un aumento en la demanda de potencia.

El recalentamiento de los embobinados es un problema muy grave en un motor o en un generador, por esta razón una máquina nunca debe sobrecargarse, a menos que sea absolutamente necesario.

Las máquinas para usos generales tienen generalmente un factor de servicio. El factor de servicio se define como el cociente de la potencia máxima real de la máquina, a la potencia nominal indicada en la placa.

Figura 15. **Generador eléctrico elemental y característica de magnetización**



Los generadores eléctricos, por el tipo de corriente eléctrica que generan, pueden ser de CC o de CA, su construcción básica es como en la figura 15. Dependiendo de su presentación en el mercado, los generadores acoplados con turbinas hidráulicas para micro hidroeléctrica pueden ser:

Estacionarios: esta presentación indica que el sistema estará anclado al piso, conectando la turbina con el generador indirectamente por medio de poleas y fajas, engranajes, etc. Es necesario instalar un sistema de multiplicación, si las velocidades nominales de giro de la turbina y el generador son diferentes, se pueden utilizar correas dentadas o convencionales en V. El resto del sistema se acopla directamente.

Portátiles: son sistemas que pueden ser llevados de una forma práctica, en cualquier momento a cualquier parte, únicamente conectando o desconectando el tubo de entrada de agua, y colocando el desagüe a donde se verterá el agua utilizada.

De ensenada en tubería: en estos, la turbina se encuentra en medio del paso del agua en la tubería, pero se fabrica una sección del tubo en forma de seno, para que la turbina pueda absorber la energía, y trasladarla por medio del eje al generador.

Sumergibles: este tipo de generadores vienen también integrados con su turbina, pero se sumergen en las corrientes de los ríos o canales. No necesitan de altura de caída ni caudales trasladados en tubería, sino que se colocan en contra de la corriente para que su hélice gire; un ejemplo de estos se muestra en la figura 16 (Referencia 14).

Figura 16. **Generador con turbina sumergible (con hélice)**



2.7.1. Generadores de CC

Los generadores de CC son máquinas que proporcionan a su salida, voltaje en corriente continua (o corriente directa CD). Hay cinco tipos principales de generadores de CC, que se clasifican según la forma en que se produce su flujo de campo:

Generador con excitación externa: en este tipo generador, el flujo de campo se origina en una fuente de potencia externa, independientemente del generador en si mismo.

Generador en derivación: en un generador en derivación, el flujo de campo se obtiene al conectar el circuito de campo directamente, a través de los terminales del generador.

Generador serie: en un generador serie, el flujo de campo se produce conectando el circuito de campo en serie, con el inducido del generador.

Generador compuesto acumulativo: en este tipo de generador, el campo en derivación y el campo en serie están presentes y sus efectos se suman.

Generador compuesto diferencial: en este tipo de generador, tanto el campo en derivación como el campo en serie, se encuentran presentes, pero sus efectos se restan.

Estos tipos de generadores de CC se diferencian en la característica de sus terminales, y por consiguiente, en las aplicaciones en que se van a utilizar (véase figura 25 en la página 79).

Los generadores de CC se comparan según sus voltajes, potencia nominal, eficiencias y regulaciones de voltaje. Las regulaciones de voltaje (RV) se establecen mediante la siguiente ecuación: $RV = [(V_{sc} - V_{pc})/V_{pc}] * 100$, donde, V_{sc} es el voltaje del terminal del generador sin carga, y V_{pc} es el voltaje del terminal del generador a plena carga. Es una medida aproximada de la forma de la característica voltaje-corriente del generador; una regulación de voltaje positiva significa una característica de caída de voltaje, y una regulación de voltaje negativa significa una característica de elevación de voltaje.

El voltaje E generado en el interior de un generador de CC, se expresa por medio de la siguiente ecuación: $E = K\phi\omega$, lo que significa que E es directamente proporcional al flujo de magnetización del generador (ϕ), y a su velocidad de rotación (ω), donde K es una constante que depende de la construcción de la máquina (Referencia 17).

2.7.2. Generadores de CA

Los generadores de CA son máquinas que convierten energía mecánica en energía eléctrica de CA. Hay dos clases principales de máquinas de CA, las sincrónicas y las de inducción. Las máquinas sincrónicas son motores y generadores cuya corriente de campo la suministra una fuente externa de potencia de CC, mientras que las máquinas de inducción son motores y generadores cuya corriente de campo se suministra mediante inducción magnética (acción transformadora), dentro de sus embobinados de campo. La frecuencia del pulso eléctrico alterno, depende directamente de la velocidad de giro de la máquina, y cumple con la relación: $f \text{ (Hz)} = n \text{ (rpm)} * p \text{ (polos)} / 120$.

Las máquinas de CA difieren de las de CC, en que los embobinados del inducido están siempre localizados en el estator, mientras que los embobinados de campo están localizados en el rotor. El campo magnético giratorio originado en los embobinados de campo de una máquina de CA, induce un sistema trifásico de voltajes de CA en los embobinados del inducido, localizados en el estator (Referencia 17).

Generadores sincrónicos: los generadores sincrónicos o alternadores son máquinas sincrónicas, que se usan para convertir potencia mecánica en potencia eléctrica de CA.

Si en un generador sincrónico, se aplica al embobinado del rotor una corriente continua, se producirá un campo magnético en el rotor, entonces, el rotor del generador se impulsará por medio de un motor primario, lo cual producirá un campo magnético rotatorio dentro de la máquina. Este campo magnético rotatorio, inducirá un sistema trifásico de voltajes dentro del embobinado del estator del generador. El rotor de un generador sincrónico es esencialmente un gran electroimán. Los polos magnéticos del rotor pueden ser de construcción saliente o no saliente. Los rotores de polo no saliente se usan normalmente para rotores de dos y cuatro polos, mientras que los de polo saliente se utilizan normalmente en rotores de cuatro o más polos (Referencia 17).

Un flujo de CC debe alimentar el circuito de campo del rotor, puesto que este está girando, se necesita un arreglo especial para llevar la fuerza de CC a su embobinado de campo; hay dos métodos comunes para suministrar esta fuerza de CC:

- Suministrarle al rotor la potencia de CC desde una fuente externa de CC, por medio de anillos de rozamiento y escobillas.

- Suministro de potencia de CC desde una fuente de CC especial, montado directamente en el eje del generador sincrónico.

El comportamiento de un generador sincrónico bajo carga varía enormemente, dependiendo del factor de potencia de la carga y de si el generador está funcionando sólo o en paralelo con otros generadores sincrónicos. Es difícil encontrar un generador sincrónico que alimente su propia carga, independientemente de otros generadores, esa situación se encuentra solamente en aplicaciones especiales, tal como en generadores de emergencia, la mayoría en paralelo.

Generador de Inducción (Motor como Generador): los embobinados amortiguadores de un motor sincrónico, podían desarrollar un momento de torsión de arranque sin necesidad de suministrarles una corriente de campo externa. De hecho los embobinados amortiguadores trabajan tan bien, que un motor podría construirse sin el circuito de campo principal de CC correspondiente. Una máquina que sólo tiene embobinados amortiguadores se denomina máquina de inducción. Tales máquinas se llaman así porque el voltaje del rotor (que produce tanto la corriente como el campo magnético del rotor), es inducido en el embobinado del rotor, en lugar de conectarse físicamente por medio de conductores. La característica que distingue un motor de inducción, es que no se necesita corriente de campo de CC para ponerlo a funcionar.

Aunque es posible usar una máquina de inducción, bien como motor o bien como generador, tiene muchas desventajas como generador y por ello se usa raramente como tales. Una máquina de inducción tiene físicamente el mismo estator que una máquina sincrónica, con diferente construcción de rotor.

Hay dos tipos diferentes de rotores de máquina de inducción, que se pueden colocar dentro del estator: a uno se le llama rotor de jaula de ardilla o simplemente rotor de jaula y el otro se llama rotor devanado.

Como carece de un circuito de campo separado, un generador de inducción no puede producir potencia reactiva. De hecho la absorbe, por lo cual se le debe conectar todo el tiempo una fuente externa de potencia reactiva, para mantener el campo magnético de su estator. Esta fuente externa de potencia reactiva, debe controlar también el voltaje terminal del generador. Sin corriente de campo, un generador de inducción no puede controlar su propio voltaje de salida. Normalmente, el voltaje del generador se mantiene por medio del sistema de potencia externa, al cual está conectado.

La mayor ventaja de un generador de inducción es su simplicidad. Un generador de inducción no necesita un circuito de campo separado, y no tiene que ser accionado continuamente a una velocidad fija. Mientras la velocidad de la máquina tenga un valor mayor que la velocidad angular de sincronía, para el sistema de potencia al cual está conectada, funcionará como generador. Cuanto más grande sea el momento de torsión aplicado al eje (hasta cierto punto), más grande será la potencia de salida resultante. El hecho de que no necesite regulación muy elaborada, hace de este generador una buena alternativa para molinos de viento, micro hidroeléctrica, sistemas de recuperación de calor y fuentes similares de potencia suplementaria, conectadas a un sistema de potencia existente. En tales aplicaciones, la corrección del factor de potencia, puede proporcionarse por medio de condensadores y el voltaje terminal del generador puede controlarse, mediante el sistema de potencia externo al conectarse en paralelo.

También es posible que una máquina de inducción funcione como un generador aislado, independiente de cualquier sistema de potencia, mientras haya condensadores disponibles para proporcionar la potencia reactiva requerida por el generador, y por cualquier carga conectada. Tienen pequeño tamaño por kilovatio de potencia de salida.

Como consecuencia de la naturaleza de la característica momento de torsión-velocidad de la máquina, la frecuencia de un generador de inducción varía con el cambio de cargas; pero como esta característica es muy pendiente en la franja de funcionamiento normal, la variación de la frecuencia total está limitada generalmente, a menos del 5%. Esta variación es bastante aceptable en muchas aplicaciones de generadores de trabajo aislado, o de emergencia (Referencia 17).

En los últimos años la utilización de generadores de inducción se ha incrementado, en sistemas aislados de micro hidroeléctrica, utilizando algunas veces como motores o como generadores, generalmente para bajas potencias. Sus ventajas son su robustez (deben tener en la placa IP), más baratos, pueden usarse de segunda mano, entre otras. Por lo general, los motores de inducción se encuentran disponibles en unidades de 2, 4 y 6 polos; los motores de 2 polos no son aconsejables por su alta velocidad (Referencia 16). Se pueden usar bombas roto dinámicas, invirtiendo el flujo y rotación, siendo una de las opciones más económicas.

NOTA: La charcaza de los generadores debe ser conectada a tierra para protección contra descargas eléctricas.

2.8. Reguladores de voltaje

Con el nombre de reguladores se designan los convertidores directos CC/CC y los convertidores directos CA/CA de la misma frecuencia. Hasta hace unos años la regulación en CC exigía el empleo de vibradores mecánicos (para pequeñas potencias) y de grupos convertidores rotativos. En éstos se alimentaba un motor de CC a expensas de la fuente y se acoplaba mecánicamente a un dínamo. La regulación en CA se ha venido haciendo tradicionalmente, mediante el transformador de tomas y el auto transformador de relación de transformación variable de forma continua, los cuales tienen una acusada limitación operativa, frente a la que ofrecen la gran ventaja de su robustez eléctrica y de su simplicidad.

Los semiconductores han hecho posible un nuevo tipo de regulador cuyas principales ventajas sobre los convencionales son:

- Mejores características eléctricas (respuesta más rápida, mejor estabilidad, etc.),
- Mayor fiabilidad y vida,
- Menor mantenimiento,
- Ausencia de arco eléctrico.

Los reguladores operan fundamentalmente como un interruptor estático, que se abre y se cierra continuamente, dejando pasar así más o menos potencia del generador a la carga. Por su practicidad y aplicación, nos interesan mayormente los reguladores electrónicos.

Reguladores electrónicos: algunos circuitos reguladores proporcionan una tensión de salida inferior a la de la entrada, pero hay otros que actúan como elevadores. Para su actuación necesitan un circuito de mando. El circuito de mando elabora la información proporcionada por el circuito de potencia, y genera las señales de disparo a los transistores o tiristores, con una fase y una secuencia convenientes (Referencia 18).

Los reguladores son aplicados para mantener en niveles aproximadamente estables, los voltajes de salida de los generadores, ya sea en CC o en CA.

2.8.1. Reguladores de CC

Estos pueden ser disipativos o no disipativos:

Reguladores de CC disipativos: la potencia que entrega la fuente es (o puede ser) muy superior a la consumida por la carga. La diferencia de ambas se disipa en el regulador. Es obvio que el rendimiento es bajo y que sólo se utilicen para las más bajas potencias (hasta varios kilovatios). Su empleo está justificado por su sencillez y su alta fiabilidad. El elemento de base es el transistor.

Hay dos tipos de reguladores disipativos:

- El regulador serie: se monta en serie con la carga y lleva a cabo el control acomodando la tensión entre sus extremos (entre colector y emisor). El rendimiento es tanto menor cuanto menor es la tensión de salida. La potencia es disipada en el transistor para el que debe elegirse cuidadosamente un disipador, el cual es relativamente grande.

La impedancia de salida de un regulador serie es baja, y proporciona una buena estabilidad estática y una buena estabilidad dinámica. La protección contra sobrecargas y cortocircuitos, se logra de una manera muy simple, gracias a la capacidad intrínseca de bloqueo del transistor, actuando sobre la base. El regulador serie puede operar en un amplio campo de tensiones de entrada y de cargas.

- El regulador paralelo: se monta en paralelo con la carga y actúa drenando más o menos intensidad. El regulador paralelo tiene más limitaciones que el serie. Se usa para las más bajas potencias, y cuando la intensidad en la carga y la tensión de entrada varían muy poco. No obstante, para resistencias internas altas conviene el paralelo. El regulador paralelo tiene una impedancia de salida superior al serie. Su circuito de mando es más complicado. Una ventaja a su favor es que no necesita protección adicional contra sobrecargas. Con un cortocircuito a la salida, el transistor no disipa nada, pues su tensión colector-emisor es nula (hipótesis de elemento ideal). Esta característica es la más deseable, y casi por la que aún se emplea el regulador paralelo.

Reguladores de CC no disipativos: son los más importantes por su elevado rendimiento, y por ser campo de aplicación del tiristor. En ellos la potencia proporcionada por el generador, es muy poco superior a la consumida por la carga. La diferencia se disipa en el circuito, por no ser ideales los componentes. Así pues el rendimiento es casi la unidad.

Un regulador no disipativo consta de un interruptor conectado en serie con la carga, que se cierra y se abre con una cierta cadencia. Por consiguiente sus circuitos son similares a los de los interruptores estáticos de CC, con la particularidad de que su frecuencia de actuación es mucho más alta.

Normalmente la carga es inductiva, además suele montarse en serie con ella, una inductancia de filtro para alisar la intensidad, por lo tanto, es necesario un diodo de circulación libre. Cuando el generador tiene una inductancia de salida no despreciable es preciso conectar a la entrada del regulador un condensador en paralelo cuya misión es doble:

- Limita las sobre tensiones generadas por la inductancia del generador de CC, en el instante en que la intensidad se anula bruscamente.
- Actúa como almacenador de energía y reduce el rizado en el generador.

(Referencia 18).

2.8.2. Reguladores de CA

Son convertidores directos CA/CA de la misma frecuencia. Gracias al paso natural por cero de la intensidad, los tiristores no necesitan bloqueo forzado y resultan unos circuitos muy simples y fiables. Atendiendo a la técnica de control empleada, puede establecerse la siguiente clasificación:

Control de fase: el control se efectúa dentro de cada semiciclo dejando pasar una parte del mismo.

Control integral: el control se efectúa dejando pasar un número entero de semiciclos.

Atendiendo a los límites máximos puede establecerse esta otra clasificación:

Reguladores totales: permiten la máxima variación, es decir, desde el valor de la tensión del generador hasta cero. En cualquier momento, el valor instantáneo de la tensión de salida, es el de la tensión del generador o cero.

Reguladores diferenciales: la tensión de salida tiene un margen más estrecho de variación, y se necesita un auto transformador. El valor instantáneo de la tensión de salida, es bien el de la tensión máxima, o bien el de la tensión mínima (Referencia 18).

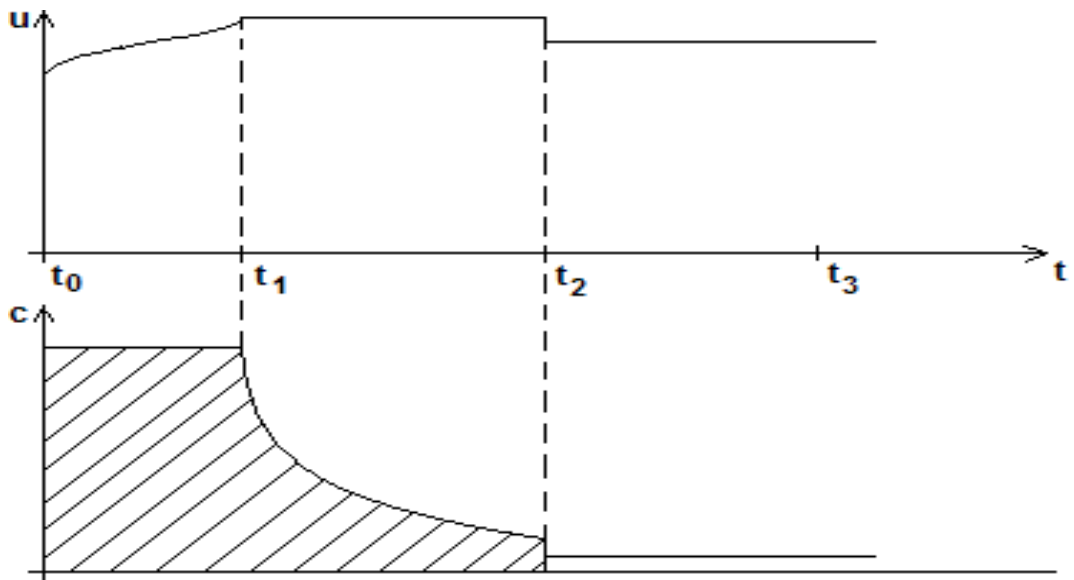
2.9. Bancos de baterías

Se le llama así a una o más de baterías conectadas en paralelo, para obtener la suma de las potencias del grupo de baterías. Lo que nos interesa es la carga de las baterías, y es lo que se analizará en detalle.

CARGA DE BATERÍAS: puede hacerse a expensas de una CA o de una CC. En el primer caso se emplean rectificadores, y en el segundo reguladores de CC. Lo más normal es que la alimentación sea de CA, sobre todo para grandes potencias. En la figura 17, se muestra el diagrama general de carga de una batería (Referencia 19), el cual consta de tres regímenes:

Régimen de intensidad constante: la intensidad de carga es constante, su valor suele estar comprendido entre 0.1 C - 0.2 C, para baterías de Pb, y entre 0.2 C - 0.4 C, para baterías de Ni-Cd, donde C, es el número de amperios-hora (Ah) de la batería. La tensión parte de un bajo valor y va creciendo lentamente hasta llegar a $u(t_1)$, llamada tensión de carga profunda, este valor suele estar comprendido para las baterías de Pb, entre 2.4 - 2.7 V/elemento, y para las de Ni-Cd, entre 1.6 - 1.7 V/elemento.

Figura 17. Diagrama general de carga de una batería



Régimen de tensión constante: durante el tiempo $t_2 - t_1$ [3h - 20h según el tipo de batería y el valor de $u(t_1)$], se mantiene la tensión constante, la intensidad de carga (i_c) va decreciendo de forma natural. Hasta el instante t_2 los amperios-hora, suministrados a la batería son proporcionales al área rayada en la figura 17, en la cual se observa que la mayor parte se aporta en el régimen de intensidad constante.

Régimen de flotación: la tensión de carga se baja al valor $u(t_3)$ en el instante t_2 y se mantiene constante. Para el Pb el valor típico es de 2.2 V/elemento, y para el Ni-Cd de 1.4 V/elemento, este régimen no es propiamente de carga, sino para compensar las fugas de la batería. Si no existiera, ésta se iría descargando lentamente con el transcurso del tiempo, el régimen de flotación se mantiene permanentemente, hasta que tiene lugar la siguiente descarga de la batería.

Para baterías pequeñas la carga se simplifica. Hay casos en que el régimen de tensión constante no existe, y otros en que no hay limitación de intensidad. El rectificador da en su salida la tensión de flotación durante todo el tiempo de carga, al comienzo de la cual la intensidad sólo está limitada por las resistencias internas del rectificador y de la batería. Esta limitación podríamos hacerla con dos formas de circuitos monofásicos sencillos: limitación por resistencia y limitación por bobina (Referencia 19).

2.10. Inversores

Los inversores estáticos son circuitos que producen una tensión o intensidad alterna, a partir de una fuente de corriente continua. La solución clásica a este problema ha consistido en un motor de CC acoplado a un generador de CA, cuando la potencia manejada era de más de 2 kVA (Referencia 20). Con potencias menores se han empleado circuitos en los que la interrupción alternativa de la corriente, se conseguía a base de vibradores electromecánicos o de tiratrones.

La aparición de los transistores de potencia y los tiristores (electrónica de potencia), ha facilitado enormemente la solución de esta función, promoviendo la proliferación de circuitos diversos con muy buenas características, que hubieran sido de difícil realización con los medios clásicos. En general, presentan instalación más fácil y funcionamiento menos ruidoso que los inversores rotativos, mayor duración que los inversores con vibradores, y mejor rendimiento que los inversores con tiratrones.

El estudio de los inversores con semiconductores puede hacerse desde varios puntos de vista:

- Configuración del circuito de potencia,
- Funcionamiento como fuente de tensión o de intensidad,
- Método de síntesis de la onda de salida,
- Método de excitación de base en los inversores con transistores,
- Funcionamiento dependiente o independiente de la red de CA en inversor con tiristores,
- Método de bloqueo en los inversores con tiristores.

Los transistores y tiristores son semiconductores que se consideran como interruptores unidireccionales, que se abren y se cierran instantáneamente en los momentos requeridos, para el correcto funcionamiento del circuito.

Configuración del circuito de potencia: se entiende por tal la disposición general que adopta el circuito de potencia, incluyendo la fuente de CC y la carga, haciendo caso omiso de los circuitos de excitación y bloqueo (estos últimos en el caso de emplear tiristores). Suelen distinguirse tres configuraciones:

- Con transformador de toma media,
- Con batería de toma media,
- Configuración en puente.

Corresponden a las tres formas más razonables de realizar la función de inversión de tensión o corriente, suministrada por la fuente de CC con los medios disponibles hoy en día, en la electrónica de potencia.

El inversor como fuente de intensidad: casi todas las cargas de corriente alterna (instrumentos, hornos eléctricos, motores, etc.), están preparados para funcionar alimentados con una fuente de tensión, y la red de distribución de 60 Hz, se comporta aproximadamente como tal.

Por la red de distribución de 60 Hz, la mayor parte de los inversores se diseñan para funcionar como fuentes de tensión, y en muy contados casos como fuentes de intensidad. Un ejemplo típico de esta última variante es la alimentación de motores de CA, mediante intensidad y frecuencia controladas, para regular su velocidad. El funcionamiento del inversor como fuente de corriente, proporciona una protección intrínseca al motor y al propio inversor, contra excesiva intensidad en el arranque, sobrecargas y cortocircuitos.

Regulación de la tensión de salida: en algunos casos, la tensión de salida depende de la batería exclusivamente, en los circuitos reales existe una pérdida de tensión en los semiconductores y en el cableado, que aumenta ligeramente con la carga, esto es particularmente cierto en la configuración de transformador de toma media, debido a la resistencia de los devanados.

Un requerimiento muy común de los inversores prácticos, es la posibilidad de mantener constante el valor eficaz de la tensión de salida, frente a variaciones de la tensión de entrada y de la corriente de carga, o incluso poder variar la tensión de salida entre márgenes más o menos amplios. Las soluciones existentes para este problema se pueden agrupar en tres procedimientos:

- Control de tensión continua de entrada,
- Regulación interna en el propio inversor,
- Regulación de la tensión de salida.

El último consiste en disponer a la salida del inversor un auto transformador de relación de espiras regulable, bien mecánicamente mediante escobillas, o eléctricamente mediante tiristores o triacs.

Filtrado de la tensión de salida: cuando se requiere reducir la distorsión armónica de la tensión de salida de un inversor de frecuencia fija o poco variable, entre otros procedimientos puede disponerse un filtro de salida que permita el paso de la onda fundamental y lo impida a los armónicos.

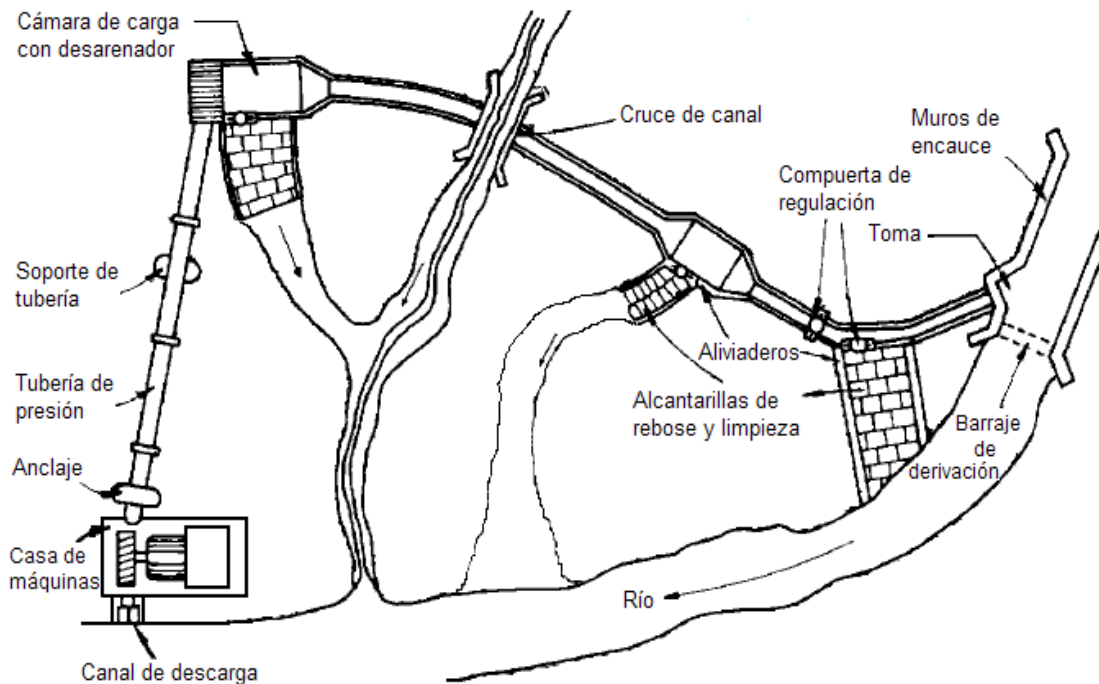
2.11. Obra civil

La necesidad de hacer construcciones de obra civil es mínima, en una micro hidroeléctrica, puesto que los pequeños generadores con su turbina se pueden encontrar en una sola pieza, con su entrada para acoplar un tubo, y su salida necesita un pequeño colector de agua, para depositarla donde se desea.

En la toma de agua si es de un manantial, es necesario construir una pila pequeña para retener el agua y un desarenador, con una salida de acople a un tubo, el diámetro del tubo depende de la cantidad de agua que se extrae; si es de un río, se construye un pequeño dique, con salida de acople a un tubo. En la parte donde entra el agua a la toma, debe hacerse una caja de concreto enrejada o con malla para evitar que entre basura, piedras o animales a la tubería, también debe hacerse un pequeño tanque o canal abierto, con desarenador al salir de la toma de agua, para decantar piedras y separar basura.

La tubería debe colocarse lo más tendida posible, de modo que se tenga un desnivel uniforme, y si es necesario disminuir el diámetro del tubo, para forzar el agua y tener mayor presión en la desembocadura; para esto se necesita tubo de PVC o metálico, evitar utilizar manguera, porque las uniones no se pueden hacer muy seguras y no soportan mucha presión. Deben instalarse llaves de paso antes de conectar el tubo a la turbina, y en la entrada de agua. Otra solución sencilla y a menudo utilizada para saltos de 1 a 10 m, consta de turbinas de sifón: desde el dique, el agua es colectada y canalizada directamente a través de la turbina instalada sobre el dique, pero necesita más caudal. El generador con la turbina deben colocarse en base de cemento, asegurada con pernos y atornillada, evitando el movimiento y vibraciones; el tubo que se acopla a la turbina debe asegurarse separadamente antes del ensamble, para evitar que la presión del agua los separe. Un listado de las obras civiles necesarias, se observa en la figura 18 (Referencia 22).

Figura 18. Vista de planta de una micro hidroeléctrica

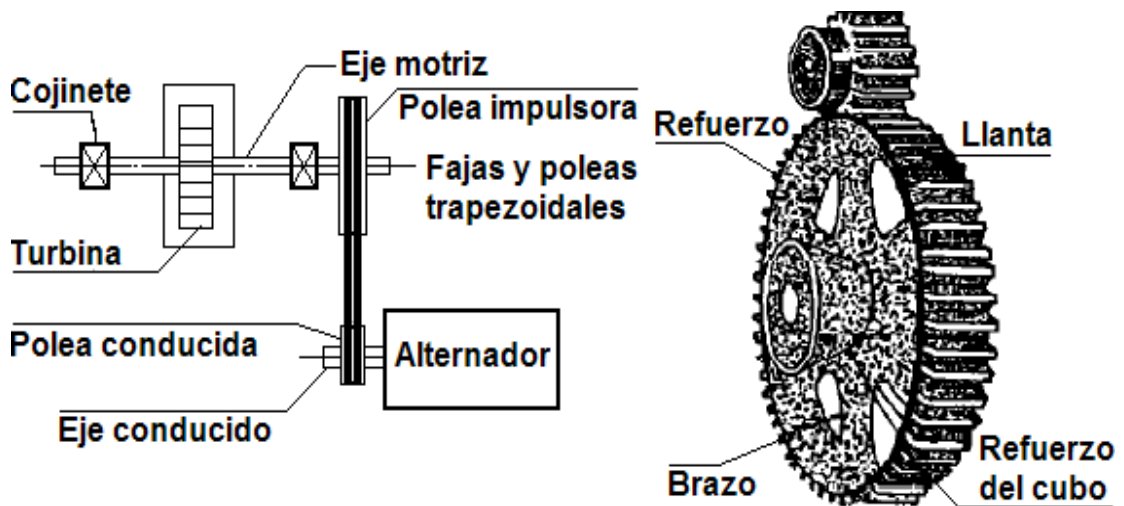


Por seguridad es necesario construir un cuarto sólo para el generador y el demás equipo eléctrico, con el sistema de baterías, debe separarlos en un área contigua, encerrado, cementado y techado.

2.12. Equipamiento electromecánico

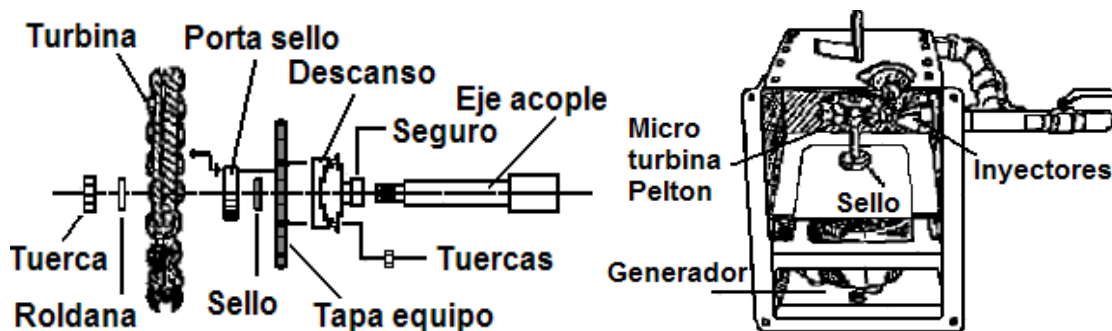
En primer lugar es necesario el generador, acoplado con su turbina hidráulica, que es la fuente eléctrica, el regulador para cargar baterías, el sistema de baterías a cargar, el inversor de corriente directa a corriente alterna y *Circuit Braker* (cortacircuitos), además elementos para instalaciones eléctricas como cable, conectores, cajas, etc. Podría implementarse un controlador de descarga que alerta, sobre un bajo nivel de energía del banco de baterías por medio de luces indicadoras y alarmas sonoras (Referencia 21).

Figura 19. **Sistemas de transmisión por fajas y engranajes**



Por ser de baja potencia los generadores muy pequeños, se fabrican para CD en 12, 24 o 48 V, pero la salida de voltaje no será constante si la entrada de agua no es constante, ni se mantiene la misma presión, al no tener un control directo en el flujo de agua, es necesario un regulador de voltaje a la salida, para cargar las baterías; el sistema de baterías puede ser una o varias, si se cargan acumuladores de 12V en paralelo, se tendrá más potencia. La figura 19 muestra los sistemas de transmisión de fuerza, y la figura 20 los sistemas acoplados (Referencia 22).

Figura 20. **Vista en explosión del conjunto rodete-eje y vista anterior de un sistema con turbina Pelton de dos chorros y un motor utilizado como generador integrado**

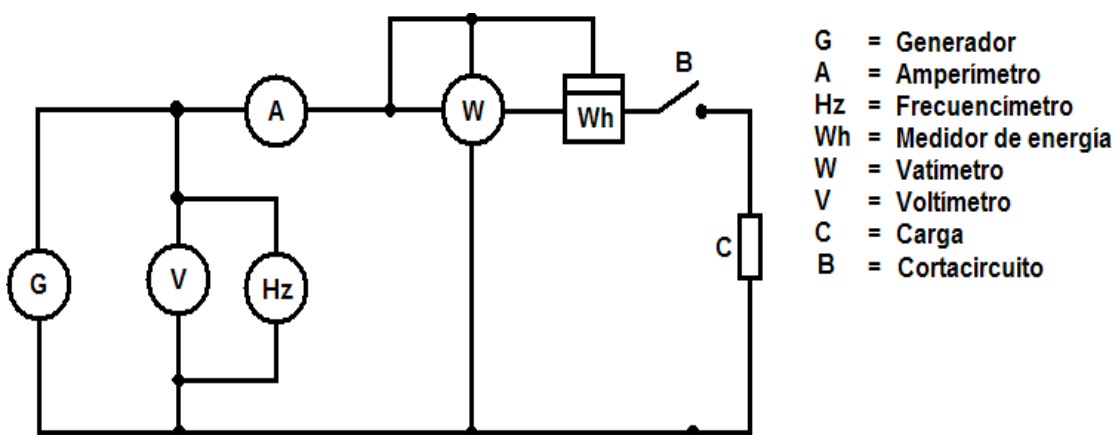


Al cargar baterías se almacena energía, y puede ser usada de forma constante. Las baterías comunes almacenan energía en CD y en 12V, pero los usos comunes en nuestro medio son de 120 V en CA a 60 Hz, entonces es utilizado un convertidor de CC a CA y de 12 a 120V, al cual se le llama inversor; a su salida es colocado un *Circuit Broker*, para proteger al equipo de cortocircuitos que se puedan dar en las instalaciones eléctricas. El resto del equipo eléctrico que un Beneficio utilice, dependerá de sus necesidades de aplicación.

Lo anterior es para generación en CD, pero si se tiene la suficiente altura de caída con un buen caudal, para mantener constante la salida de un generador CA, entonces no sería necesario el banco de baterías, ni el inversor, pero necesitaríamos un regulador de voltaje de CA, aparte de una buena regulación del flujo de agua a la entrada. Para esto se utilizan comúnmente generadores sincrónicos con imán permanente, o motores como generadores (de inducción).

Existen componentes electrónicos, como centralitas de control automático (aparato que conecta una o varias líneas telefónicas), que permiten un funcionamiento a caudal constante, separando en resistencias de carga, los eventuales picos de energía en exceso. Estos sistemas sustituyen a los de regulación electromecánica, que generan complicaciones y problemas. Los sistemas electrónicos de control y supervisión modernos, pero sencillos, permiten, mediante un software, que comunica directamente con el teléfono GSM, en forma de mensajes SMS (*Short Message System*), pedir y obtener informaciones a distancia de la instalación, y enviar órdenes al sistema. La figura 21 muestra el circuito eléctrico de una micro hidroeléctrica (Referencia 22).

Figura 21. Esquema de tablero para control básico de generación



3. IMPLEMENTACIÓN DE UNA MICRO HIDROELÉCTRICA, EN EL BENEFICIO HÚMEDO DE CAFÉ LA PRESA

El Beneficio La Presa, se encuentra ubicado el municipio de Santa Cruz Naranjo, del departamento de Santa Rosa, en el cual se tiene la intención de implementar una micro hidroeléctrica. El problema es que cuenta con poco caudal de agua, y poca altura de caída, pero es constante. El propietario desea realizar el estudio, para saber si es factible construir el sistema, económicamente puede hacerla, y si es suficiente el agua o debe traer más caudal de agua, o desde mayor altura.

Se realizaron mediciones, cálculos y observación de las posibilidades, para indicar al propietario que debe hacer, para implementar una micro hidroeléctrica en su Beneficio.

3.1. Cuantificación de energía

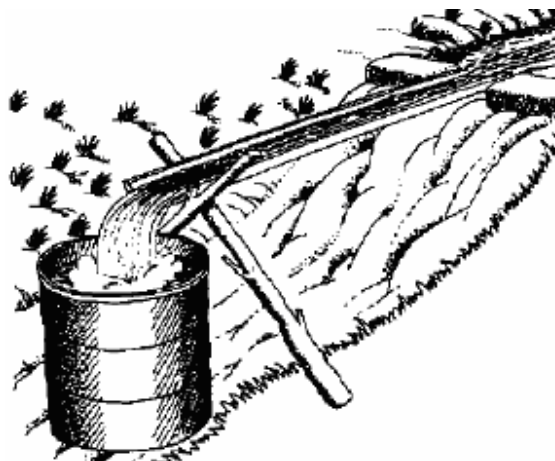
Para saber cuanta energía eléctrica neta se puede producir, con el recurso del agua que tiene el Beneficio, es necesario efectuar mediciones del caudal de agua que se tiene en el punto de recepción, y la altura de caída desde el punto de toma particularmente, aunque se puede calcular por medio de otros datos, como la presión que se tiene en el punto de recepción, la velocidad y el caudal del agua, entre otras.

3.1.1. Medición del caudal de agua

El caudal de agua que llega al tanque de almacenamiento del Beneficio, ha sido constante a lo largo de los años desde que este se construyó (hace 20 años), se toma una parte del agua de un manantial al inicio de una quebrada (punto de toma), con una manguera de 1/2" de diámetro, pero el resto es tubería de PVC hasta el Beneficio, con un diámetro interno de 2". La medición del caudal se realizó en el mes de marzo y abril, cuando se espera el nivel más bajo del agua (época de estiaje); se realizaron mediciones de cuanto es el máximo que puede extraerse del manantial, sin dejar que el agua deje de correr en la quebrada en su nivel más bajo, estimando un caudal mucho mayor del que ahora extrae, pudiendo instalar en el punto de toma hasta un tubo de 2" y fácilmente tener un caudal en el punto de recepción de 2.5 l/s. Tomando en cuenta que el propietario del Beneficio, cuenta con los permisos para extraer el agua, que utiliza desde hace mucho tiempo. Es importante mencionar que el agua que pasa por la turbina y no se utiliza para otra función, se canalizará al cauce del río, para que pueda ser útil a otras personas río abajo.

En el punto de recepción se realizó el aforo del agua que llega hasta ese punto, llevando la desembocadura desde donde esta actualmente hasta el punto donde se planea ubicar el generador. Como ya existe una tubería instalada, que lleva el agua desde el punto de toma hasta el punto de recepción, se procedió a llenar un recipiente de 20 litros, midiendo el tiempo que tarda en llegar a la marca de 20 litros; de las que se obtuvieron 3 promedios de mediciones. La medición puede realizarse de distintas formas, algunas de ellas se muestran en los anexos 2, 3 y 4 (véase pp. 119, 121 y 123 respectivamente). Las mediciones realizadas para este caso, se muestran en la tabla IV.

Tabla IV. Mediciones del caudal utilizando un recipiente de capacidad conocida



Volumen litros (l)	Tiempo de llenado segundos (s)
20	7.8
20	8.1
20	8.12

El promedio de las mediciones para el tiempo es calculado y luego se divide entre el volumen de agua: $T = (7.8 + 8.1 + 8.1)/3 = 8 \text{ s}$

$$Q = \text{Vol}/T = 20 \text{ l}/8 \text{ s} = \mathbf{2.5 \text{ l/s}}$$

$$Q = 2.5 \text{ l/s} = (2.5 \text{ l/s}) \cdot (1000 \text{ cm}^3/\text{l}) \cdot (1 \text{ m}^3/10^6 \text{ cm}^3)$$

$$Q = \mathbf{0.0025 \text{ m}^3/\text{s}}$$

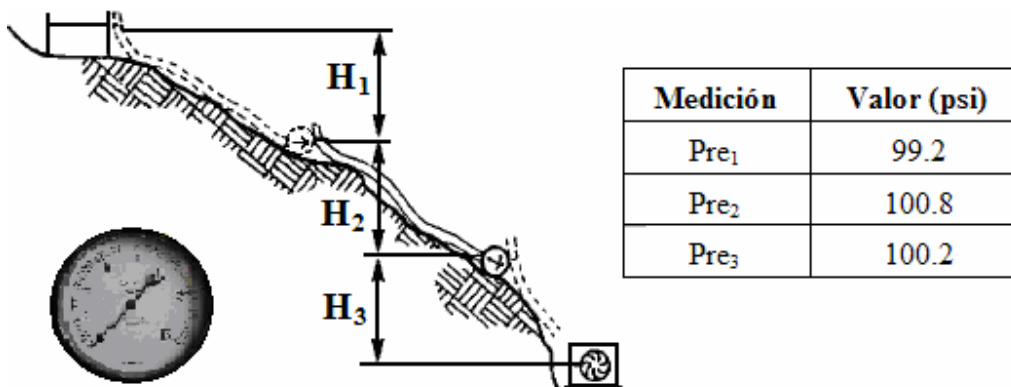
Como se explico antes, el caudal de agua puede aumentarse, obteniendo como mínimo 2.5 l/s (0.0025 m³/s), y obtener un considerable aumento en él, por lo que la potencia a generar, podría aumentarse de la misma manera que el caudal (véase pagina 67).

3.1.2. Obtención de la altura de caída

Una forma práctica de medir la altura de caída, es midiendo la presión hasta el punto de recepción, utilizando el sistema de manómetro. La ley de fluidos nos dice que la presión en un fluido varía con la profundidad H , de acuerdo con la expresión $Pre = Pre_{atm} + \rho gH$, donde Pre es la presión absoluta, Pre_{atm} es la presión atmosférica ($1 \text{ atm} = 1.013 \times 10^5 \text{ N/m}^2 = 14.7 \text{ psi}$) y ρ es la densidad del agua ($1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ y 1 atm), se supone constante. Pero la presión que medimos con el dispositivo conectado al tubo, es la presión **manométrica**, entonces tenemos la expresión $Pre_{ma} = Pre - Pre_{atm} = \rho gH$ (Referencia 23).

Si suponemos que el agua es limpia, no es viscosa e incompresible, que el movimiento del fluido es estacionario, sin turbulencia y conociendo el hecho de que la presión en un líquido, es la misma para todos los puntos que tengan la misma altura, no importando la forma ni los altibajos del recipiente; entonces la altura se tomará constante, por razones prácticas, tanto estática como dinámicamente.

Tabla V. Mediciones de presión utilizando manguera y manómetro



Como en este caso ya se tiene instalada la tubería, desde el punto de toma hasta el punto de recepción, entonces llenamos la tubería de agua, y medimos la presión en punto de recepción, efectuando varias mediciones de los que obtenemos 3 promedios que se observan en la tabla V.

El promedio de la presión es de 100 psi, o su equivalente al convertir dimensionales (véase anexo 1 en la página 117),

$$Pre = 100 \text{ psi} * (1 ((\text{kg} \cdot \text{m} / \text{s}^2) / \text{m}^2) / 1.45 \times 10^{-4} \text{ psi})$$

$$Pre = 689655.17 \text{ kg} / (\text{s}^2 \cdot \text{m})$$

entonces aplicando la ecuación de la presión, y despejando la altura de caída, al introducir los valores correspondientes obtenemos:

$$H = Pre_{ma} / \rho g = (689655.17 \text{ N} / \text{m}^2) / (1 \times 10^3 \text{ kg} / \text{m}^3 * 9.81 \text{ m} / \text{s}^2)$$

$$H = (689655.17 \text{ kg} / (\text{s}^2 \cdot \text{m})) / (9810 \text{ kg} / (\text{m}^2 \cdot \text{s}^2))$$

$$\mathbf{H = 70.3 \text{ m.}}$$

Al efectuar la medición de la altura de caída del agua, se obtuvo que es de 70 m. Esta altura es poca con relación al caudal de agua con que se cuenta y es posible que no se pueda generar mucha energía. La medición del salto puede hacerse de muchas formas, en el anexo 5 (véase la página 125), se muestra la medición de altura de caída con nivel. Por ser los medidores de presión más comunes, los valores están dados en psi.

3.1.3. Energía potencial de un tanque lleno

La energía potencial, es la capacidad que una masa tiene de realizar un trabajo, al ser atraída por la gravedad de la tierra (g) hacia su centro (en todo caso de pasar de una altura a otra, respecto del suelo).

En el caso del Beneficio La Presa, cuenta con un tanque de concreto que tiene en su interior 3m de ancho, 3m de largo y 2m de profundidad en promedio, con un pequeño desnivel hacia el tubo de salida en el fondo. Habiendo obtenido el caudal de agua, utilizaremos ecuaciones físicas (Referencia 23), para calcular la energía potencial del agua, que se tendría en el tanque lleno y cuanto tarda en llenarse; primero calculamos su volumen:

$$\text{Vol} = 3 \text{ m} * 3 \text{ m} * 2 \text{ m} = 18 \text{ m}^3.$$

densidad (ρ) del agua (20°C y 1 atmósfera)= $1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$

$$\text{Masa} = \rho_{\text{agua}} * \text{Vol} = 1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3 * 18 \text{ m}^3 = 18 \times 10^3 \text{ kg}.$$

Luego calculamos la Energía potencial (U) = $M * H * g$, para 10 metros:

$$U = 18 \times 10^3 \text{ kg} * 10 \text{ m} * 9.81 \text{ m/s}^2 = 1765800 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2 = 1.7658 \times 10^6 \text{ J},$$

si $1 \text{ J} = 2.778 \times 10^{-7} \text{ kWh}$, entonces convertimos las dimensionales:

$$U = 1.7658 \times 10^6 \text{ J} * 2.778 \times 10^{-7} \text{ kWh/J}$$

$$\mathbf{U = 0.491 \text{ kWh.}}$$

Esto significa que el tanque almacena 0.491 kWh de energía, y que podría descargarse hacia un sistema de turbina-generador, para cargar baterías o utilizar la potencia mientras se descarga. La idea sería construir un tanque igual al que ya se tiene, unos metros arriba en la ladera, donde se encuentra el Beneficio (en este caso se puede hacer).

Para casos prácticos, sería útil, cuando almacenamos agua en tanques de depósito, y se quiere saber cuanta potencia eléctrica se puede generar al vaciar un tanque, instalando el generador en un punto a menor altura. Es posible tener hasta 15 m de caída (según medición realizada), con el caudal que se desee, al hacer otro tanque igual más arriba en la ladera, para colocar la turbina de modo que la salida del agua del tanque de arriba llene el tanque que estaría más abajo.

Si el caudal que se lleva hasta el tanque actualmente es de 2.5 l/s (0.0025m³/s), sin esperar interrupciones, para llenar el tanque se tardaría:

$$T = \text{Vol}/Q = 18 \text{ m}^3/0.0025 \text{ m}^3/\text{s} = 7200 \text{ s} * (1 \text{ h}/1600\text{s})$$

$$T = 4.5 \text{ h.}$$

Estos datos son útiles, si no se tuviera el caudal de agua suficiente para mantener en funcionamiento constante el generador, se podría implementar el sistema de manera que, se descargue el tanque cuando esté lleno y se puedan cargar baterías con esta descarga.

3.1.4. Cálculo de Potencia eléctrica a ser generada

A partir de la energía potencial del agua, esto es con el caudal y la altura de caída que se tiene, en el punto de recepción, se puede obtener la potencia eléctrica, aplicando la teoría de conservación de la energía (la potencia de entrada es igual a la potencia de salida), restando las pérdidas de la turbina y el generador o multiplicando su eficiencia.

La potencia teórica (P_t) de una central micro hidroeléctrica, se mide generalmente en kilovatios (kW), y se calcula mediante la fórmula de potencia (véase pagina 29):

$$P_t = Q \text{ (l/s)} \times H \text{ (m)} \times 9.81 \text{ (m/s}^2\text{)} = 2.5 \text{ (l/s)} \times 70 \text{ (m)} \times 9.81 \text{ (m/s}^2\text{)} = 1.717 \text{ kW.}$$

Debido a que la turbina tiene su propia eficiencia, para estos tamaños comprendida entre el 50% y el 70% (véase la página 29), la potencia mecánica (P_m) efectiva es igual a:

$$P_m = P_t \times \text{eficiencia mecánica} = 1.717 \text{ kW} \times 0.6 = 1.03 \text{ kW.}$$

Finalmente, para obtener la potencia eléctrica P_e , se aplica otra reducción tomando el rendimiento del generador eléctrico, aproximadamente del 85% (véase la página 29), y se obtiene de la siguiente manera:

$$P_e = P_m \times \text{eficiencia eléctrica} = 1.03 \text{ kW} \times 0.85 = 0.876 \text{ kW}$$

$$\mathbf{P_e = 0.88 \text{ Kw.}}$$

3.1.5. Pérdidas al convertir la energía potencial a eléctrica

Las pérdidas aquí son en su mayor parte en la turbina y en el generador, aunque también están en juego otros factores, como la resistencia de la tubería, aire, poleas, etc. Considerando las demás pérdidas despreciables, únicamente tomaremos las pérdidas de la turbina y el generador de forma sobredimensionada, pues en los siguientes datos ya están incluidas. El fabricante indica las pérdidas como un factor multiplicativo en el rendimiento (eficiencia en porcentaje), de cada uno de ellos, para las turbinas hidráulicas de regular tamaño está entre 0.75 y 0.90, pero en turbinas pequeñas entre 0.5 y 0.7 (0.6 en promedio), y para los generadores eléctricos de regular tamaño está entre 0.92 y 0.97 (Referencia 11), pero en generadores pequeños un promedio de 0.85 (véase la página 29).

En el caso de la tubería debe asegurarse de manera que en las uniones no hayan fugas, y que el resto del tubo no este en lugares donde puedan ser rotos por personas o animales. Es conveniente colocar tubo de PVC o metal y evitar el uso de manguera, pues en ella existe el inconveniente de que las uniones no quedan muy seguras, y además son para poca presión. Se debe evitar que entren impurezas o basura al tubo.

Al generar energía en CC y teniendo la potencia a la salida del generador, existen pérdidas en el regulador de voltaje para cargar las baterías, pero estas son muy pequeñas, aproximadamente del 1% (véase la página 80); también las baterías pierden energía por la ionización del aire en sus terminales, pero la despreciamos al ser muy poca. En este sistema, el inversor sería el que consume energía al convertir el voltaje de CC a voltaje de CA, aproximadamente un 10% en inversores electrónicos (véase la página 81). Por último se pierde energía en los conductores de corriente eléctrica, para transportar la energía de un punto a otro, al ser cortas las distancias, estas pérdidas son despreciables. Las pérdidas grandes se exageran y las pequeñas se desprecian.

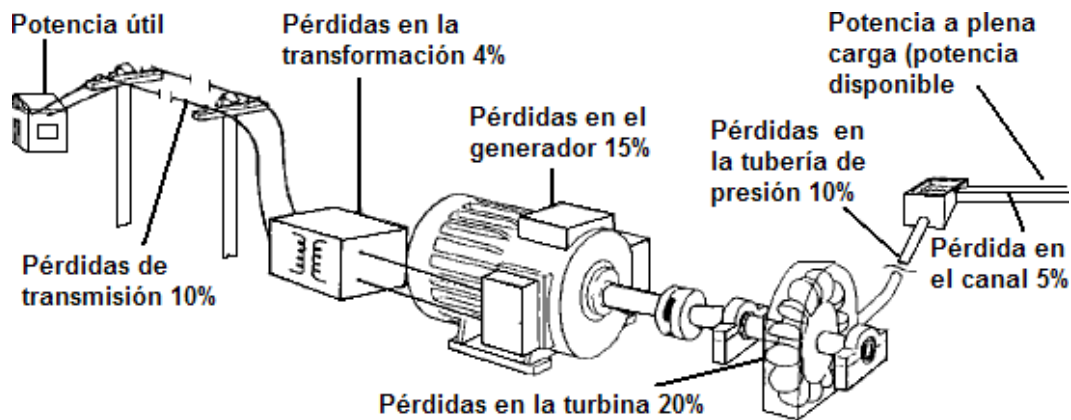
Entonces, el rendimiento en este sistema sería:

$$0.6 * 0.85 * 0.99 * 0.9 = 0.454,$$

por lo que el porcentaje de pérdida, es el complemento de uno ($1 - 0.454 = 0.556$), que es el 55.6% de pérdida, desde donde se tiene el agua hasta el consumo final. La eficiencia de una central micro hidroeléctrica es pequeña, en este caso podríamos decir que es un poco más del 50%, porque se necesitan dispositivos de conversión, las turbinas son muy pequeñas y se tiene muy poco caudal de agua.

Las eficiencias de la turbina y generador, son tomadas de información común en nuestro medio, de datos por separado y en comparación a los grandes sistemas, pero actualmente existen fabricantes que han desarrollado pequeños sistemas integrados muy eficientes (Referencia 16), y que dejan atrás a los rendimientos tomados en este estudio, que son un poco pesimistas. Al medir la presión en el punto de toma, hay un 80% en la presión estática y un 20% en la caída de succión dinámica (Referencia 13). En la figura 22 tenemos un esquema de la pérdidas en una micro central (Referencia 22).

Figura 22. Pérdidas al convertir energía



3.2. Capacidad de cubrir las necesidades de energía del Beneficio

La potencia que es posible generar con las condiciones que actualmente se tienen y el agua que es llevada al Beneficio es efectivamente de 880 W, lo que nos daría de energía en 24 horas:

$$24 \text{ h} * 880\text{W} = 21120 \text{ Wh.}$$

La energía que puede generarse en un día sería:

$$\mathbf{E = 21.12 \text{ kWh.}}$$

Con esto podríamos utilizar la energía generada, para alimentar la iluminación, tomacorrientes, la bombas y el motor de despulpe, como se verá al calcular los requerimientos de potencia, de fuerza e iluminación.

Los requerimientos de energía están dados en la tabla VI, y son calculados más adelante (véase las páginas 72, 73). Aquí se ve que se pueden cubrir todos los requerimientos de energía, si en temporada alta se genera energía la mayor parte del tiempo (mínimo 18 horas), para mantener óptima la carga del banco de baterías.

Tabla VI. Requerimientos de energía del Beneficio

SERVICIO	ENERGÍA (kWh)
Iluminación	7.44
Fuerza en el despulpe	7.264
Lavado del café	0.38
Tomacorrientes	0.67
Total	15.77

3.2.1. Potencia de los motores utilizados en el Beneficio

El motor utilizado para dar movimiento al sistema de despulpe, es un motor diesel de 2 HP, la bomba de retorno es de gasolina de 1 HP, la bomba de drenar desechos es de diésel de 2.2 kW, y la bomba de lavar café es eléctrica de 1/2 HP. Como el mayor consumo de potencia se lleva a cabo en el despulpe, la potencia utilizada en ese momento, es la del motor diesel (2 HP) más la potencia de la bomba de retorno (1 HP), que en total es de 3HP. En el caso de la bomba de drenar desechos y la bomba de lavado, por lo regular se operan en otros momentos, de forma separada, son operadas por las mismas personas que realizan el trabajo de despulpe.

En temporada alta o mayor cosecha, en este Beneficio se despulpa un promedio de 200 quintales de café maduro por día. Se realizaron mediciones para saber cuanta energía es necesaria para procesar el café, y se obtuvieron los datos mostrados en la tabla VII.

Tabla VII. **Tiempos de despulpe del café**

Cantidad de café (qq)	Tiempo (min)
39.05	39
52.73	50
55.1	54

El promedio de la cantidad de café es de 48.96 qq, y el promedio del tiempo es 47.67 min, por lo tanto la tasa de despulpe se calcula así:

$$48.96 \text{ qq}/47.67 \text{ min} = 1.027 \text{ qq/min.}$$

Si se despulpan 200 qq/día, entonces el tiempo de despulpe es:

$$200 \text{ qq}/(1.027 \text{ qq/min}) = 194.73 \text{ min} * (1\text{h}/60\text{min}) = 3.25 \text{ h.}$$

Si 1 HP = 0.746 kW (véase anexo 1, en la página 117), entonces en el despulpe se consume la energía bomba de retorno, más el motor diésel, la cual llamaremos **energía de despulpe**; entonces le cambiamos dimensionales:

$$E_D = 3 \text{ HP} * (0.746 \text{ kW}/1 \text{ HP}) * 3.25 \text{ h}$$

$$E_D = 7.264 \text{ kWh,}$$

que es la energía necesaria para el despulpe de un día, en la temporada alta.

La bomba eléctrica que se utiliza para **lavado**, es de 0.5 HP, que es en kW:

$$0.5 \text{ HP} * (0.746 \text{ kW}/\text{HP}) = 0.373 \text{ kW.}$$

Para lavar café, se efectuaron mediciones y se calculó un promedio de 19.1 min, para lavar 62.39 qq de café maduro, lo cual nos da la siguiente tasa:

$$62.39 \text{ qq} / 19.1 \text{ min} = 3.27 \text{ qq /min},$$

y para 200 qq sería:

$$200 \text{ qq}/(3.27 \text{ qq/min}) = 61.2 \text{ min}/(1 \text{ h}/60 \text{ min}) = 1.02 \text{ h}.$$

Si la bomba se tiene ese tiempo en operación, para el lavado se gastaría la siguiente energía de lavado:

$$E_L = 0.373 \text{ kW} * 1.02 \text{ h}$$

$$E_L = \mathbf{0.38 \text{ kWh.}}$$

3.2.2. Potencia para los servicios de Iluminación

La iluminación del Beneficio está distribuida de la siguiente forma:

- Dos bombillas de 60 W, para la bodega.
- 8 reflectores de 75 W, para iluminar los patios de secado de café al sol.
- Una bombilla de 60 W para la cocina, una de 60 W para la oficina, una de 60 W para el dormitorio, una de 40 W para el baño, una de 60 W para el área de pesa (balanza), una de 60 W para el corredor, una de 60 W para el área de despulpe, una de 60 W para el área de lavado, una de 60 W para la caseta de la bomba de retorno.

En la noche es necesario mantener encendidos los reflectores de los patios para la seguridad, por lo que se consume $8 * 75 \text{ W} = 600 \text{ W}$, por toda la noche (12 h, de 6 PM a 6 AM), que sería una energía de $600\text{W} * 12\text{h} = 7200\text{Wh} = \mathbf{7.2\text{kWh}}$ y un promedio de 3 lámparas de 60 W encendidas 4 h entre las tres, que es: $60\text{W} * 4 \text{ h} = \mathbf{0.24 \text{ kWh.}}$

En total el requerimiento de energía para iluminación para un día sería:

$$E_I = 7200 \text{ Wh} + 240 \text{ Wh}$$

$$E_I = 7.44 \text{ kWh.}$$

3.3. Micro central, equipamiento y construcción

Como la potencia que se puede generar de energía eléctrica es poca, entonces lo más adecuado es generar en CC, pues es difícil regular eficientemente un generador en CA, por lo tanto es necesario colocar un banco de baterías para cargarlo con un regulador de voltaje, y un inversor para tener voltaje de CA, adicionalmente a la turbina y generador, también hay que tomar en cuenta el material eléctrico de la instalación y la obra civil.

En base al cuadro de acción de las turbinas, sabemos que la más adecuada por los datos que tenemos es una turbina Pelton, o una Turgo, acoplada a un generador de CC, por medio de engranajes, pues la velocidad del generador es mayor al de la turbina.

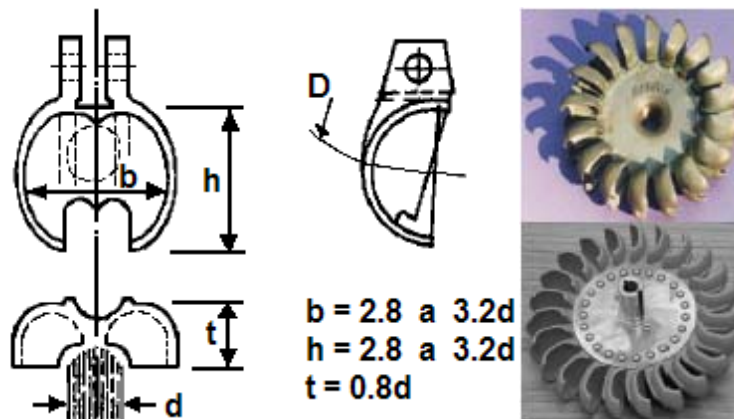
3.3.1. Turbina y generador, necesidades del equipo

Para diseñar una turbina pelton, necesitamos obtener el número específico de revoluciones, donde N es el número de revoluciones a la cual girará la turbina, y es de 2000 rpm al menos, para un generador de CC; Q está en m³/s y H en metros (Referencia 22). Se calcula Nq:

$$N_q = N * \sqrt{(Q)} / H^{3/4} = 2000 * \sqrt{(0.0025)} / (70)^{3/4} = 4.13 \text{ rpm},$$

que es la velocidad de rotación de una turbina prototipo, cuyo modelo semejante opera bajo parámetros unitarios. De este modo el modelo N_q representa la velocidad de rotación en rpm del modelo, cuando: $Q = 1 \text{ m}^3/\text{s}$ y $H = 1 \text{ m}$. Es costumbre llamar “lentas” a las turbinas Turgo y Pelton, porque estas turbinas operan con buena eficiencia, en centrales donde el salto es grande y el caudal pequeño. En la figura 23 (Referencia 22), se muestran las dimensiones principales de la turbina Pelton y aplicables a la Turgo.

Figura 23. Dimensiones principales de la turbina Pelton (Turbinas Pelton y Turgo)



Para encontrar las dimensiones de la turbina Pelton realizamos el siguiente procedimiento (Referencia 23):

1) Velocidad del chorro a la salida del inyector $C = \varphi\sqrt{(2gH)}$, donde usaremos un promedio de del coeficiente de velocidad (φ) de 0.97 (que esta entre 0.95 y 0.99) por ser una turbina lenta, entonces: $C = 0.97\sqrt{(2(9.81)(70))} = 35.95 \text{ m/s}$.

2) Diámetro de cada chorro $d = 0.55 \sqrt{(Q/(\sqrt{H}))}$, pero por ser 2 chorros, el caudal se divide en dos: $Q = (0.0025 \text{ m}^3/\text{s})/2 = 0.00125 \text{ m}^3/\text{s}$. Entonces

$$d = 0.55 * \sqrt{((0.00125 \text{ m}^3/\text{s})/(\sqrt{70} \text{ m}))} = 0.00672 \text{ m} = 6.72 \text{ mm}.$$

Y este sería el diámetro del cada inyector.

3) Diámetro Pelton o del rodete $D = (37 \text{ a } 39) * \sqrt{(H)/N}$, por ser una turbina lenta, se toma de 37 el factor multiplicativo y $N = 2000$ al menos, por ser un generador de CC.

$$D = 37 * \sqrt{(70)/2000} = 0.155 \text{ m} = 155 \text{ mm}.$$

4) Número de cucharas: $Z = (1/2) * (D/d) + 14 \text{ a } 16$

$$Z = 0.5 * (155 \text{ mm}/6.72 \text{ mm}) + 14 \text{ a } 16 = 11.53 + 8 \text{ a } 10$$

$$Z = 20 \text{ a } 22 \text{ cucharas}.$$

5) Altura de montaje mínima $H_m = 10d + H/2000$

$$H_m = 10 * 0.00672 \text{ m} + 70 \text{ m}/2000$$

$$H_m = 0.1022 \text{ m}.$$

6) Dimensiones de la cuchara, asumiendo que la máxima eficiencia ocurra en el punto de diseño y tomando los datos de la figura 23 (véase la página 75), los cálculos dan:

$$b = 2.8d = 2.8 * 6.72 \text{ mm} = 18.816 \text{ mm},$$

$$h = 2.8d = 2.8 * 6.72 \text{ mm} = 18.816 \text{ mm},$$

$$t = 0.8d = 0.8 * 6.72 \text{ mm} = 5.376 \text{ mm}.$$

En el caso de micro sistemas, el mercado no ofrece muchos modelos de turbinas, y en generadores de CA son sincrónicos de imán permanente o de CD. En estos casos es muy conveniente utilizar motores de inducción como generadores o dinamos de automóviles, que es una opción económica.

Tabla VIII. **Requerimientos del equipo para la micro central**

Generador	
Tipo de generación	CC
Potencia Nominal	0.9 kW
Velocidad de giro nominal	2000 RPM
Voltaje de salida	12 V
Protección IP	>= 5, protección contra agua
Turbina	
Tipo	Pelton o Turgo
Diámetro	150 a 200 mm
Velocidad de giro nominal	2000 RPM
Diámetro interno de inyector o tobera	6.8 mm
Numero de cucharas	20 a 22
Configuración	Horizontal
Número de chorros	2
Regulador de voltaje	Electrónico para mantener fijos 12 V DC
Inversor	
Potencia mínima continua	2500 W de potencia continua
Entrada de voltaje	12 V DC
Salida de voltaje	120 V CA, onda senoidal
Baterías	Acumuladores de Pb, 12 V DC
Cortacircuito	20 A

Los requerimientos de equipo para adquirir el equipo, se muestran en la tabla VIII. Del sistema turbo-generador elegido, podemos ver las potencias de salida que se pueden obtener, según la altura de caída y caudal en la tabla IX (Referencia 14).

El rango de valores de caudal y salto dentro de los cuales elegir en el mercado (específicamente la empresa Savoia), se puede ver en la figura 11 (véase la página 31). La potencia nominal será de 880 W, a 2000 RPM, en 12 V CD, y turbina tipo Pelton, elegida en base al caudal y salto que se tienen en la figura 9 (véase la página 26).

Para construir una micro hidroeléctrica con el caudal y caída que se tiene, podríamos utilizar generador CC como el mostrado en la figura 24 (o un pequeño motor eléctrico de inducción usado como generador), y una pequeña turbina Pelton o Turgo, aproximadamente de 150 a 200 mm de diámetro de 24 cucharas. También se dividirá el tubo en el punto de recepción a 2 chorros, con un distribuidor y dos inyectores (toberas) de 7 a 10 mm de abertura (material Technyl para que sea liviana) (Referencia 22). Se coloca un distribuidor de tubos más reducidos, para que la turbina sea impulsada en más de un punto, esto en un diseño para aprovechar la máxima fuerza del agua, dejando la salida del agua en el punto donde haya perdido toda su fuerza; también es útil cuando haya menos agua, se puede cerrar uno de los chorros y funcionar con un solo inyector.

La figura 25 muestra las configuraciones de conexión del generador de CC (Referencia 22), la figura 24 muestra un motor que puede ser usado como generador.

Figura 24. **Generador de CC**

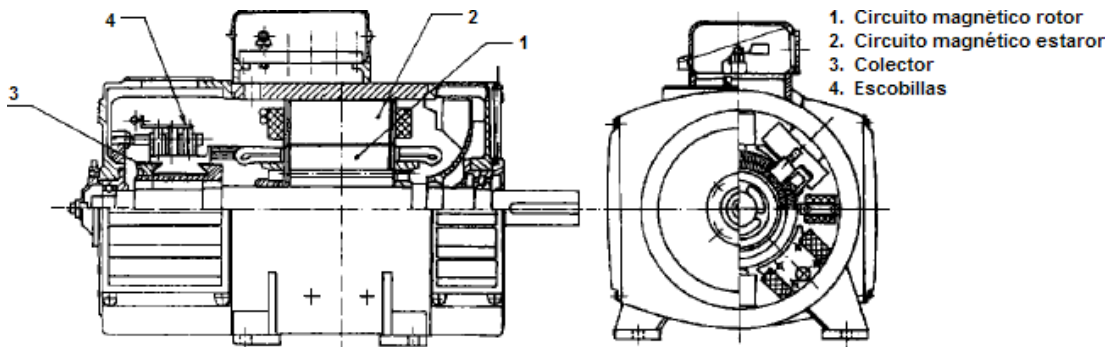
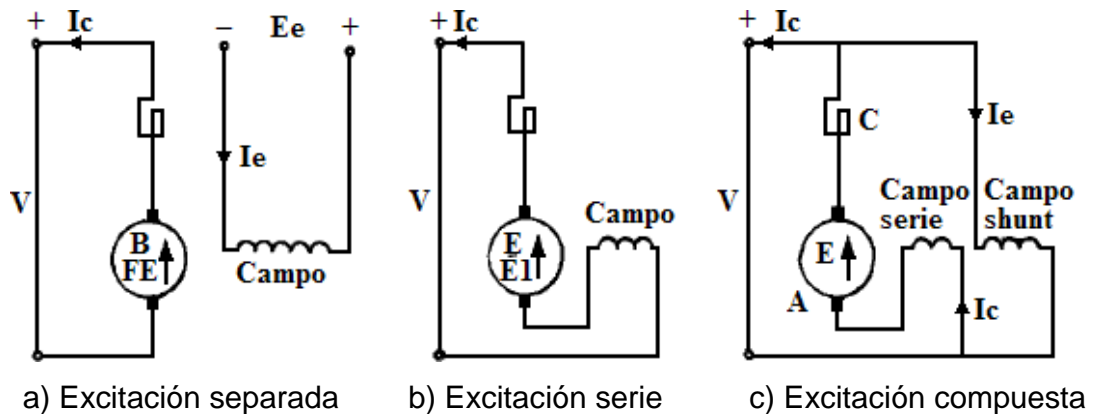


Figura 25. **Tipos de generadores de CC**



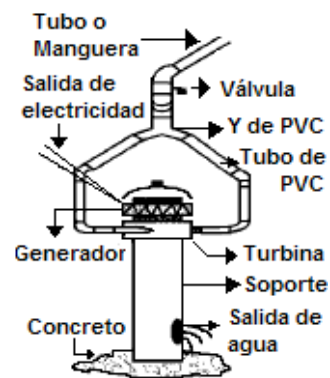
El sistema de turbina-generator elegido tiene las siguientes características (Referencia 14):

- Modelo *Stream Engine* 1000W,
- Potencia continua máxima de 1 kW, las potencias según caudal y salto en la tabla IX,
- Sistema con turbina Turgo y generador de CC con imanes permanentes,
- Voltaje de salida 12 VCD con regulador para cargar baterías,
- Aplicación generación para carga de baterías,
- Permite acumular carga en baterías, tipo descarga profunda, hasta 24 kWh/día
- Puede obtener voltaje en CA agregando un inversor,
- Diámetro interno del tubo de entrada 1.5",

- Dimensiones: 400 x 400 x 300 mm,
- Peso: 18 kg,
- Precio: US\$1700.00.

Tabla IX. **Potencia de salida (vatios continuos) del sistema turbina-
generador elegido**

Potencia	Flujo litros/minuto (galones/minuto)					
	40 (10)	80 (20)	150 (40)	300 (75)	400 (100)	600 (150)
Caída m (pies)						
3 (10)		20	50	90	120	
6 (20)	15	40	100	180	230	350
15 (50)	45	110	230	450	550	800
30 (100)	80	200	500	940	1000	
60 (200)	15	400	900	1000		



La tabla IX muestra las potencias de salida del generador, conociendo la altura de caída y el caudal de flujo con que se cuenta, a la derecha se muestra la forma en que se instalará el sistema turbina Turgo y el generador de CC, con dos chorros y la turbina en configuración horizontal.

3.3.2. Regulador de voltaje, banco de baterías e inversor

Podemos conseguir en el mercado reguladores electrónicos para 12 V, que nos mantenga constante el nivel de voltaje, para cargar un banco de baterías, por lo general el porcentaje de regulación es del 1 % (Referencia 24). En algunos sistemas de generación que se pueden encontrar a la venta, estos ya traen integrado el regulador de voltaje, como el sistema que aquí fue elegido.

Las baterías pueden ser acumuladores con celdas de plomo (Pb) que se utilizan en los automóviles, estas tienen una larga vida, cuestan poco, se encuentran en cualquier lugar, fácil mantenimiento y son recargables. Podemos tomar las comunes de aproximadamente 50 Ah que almacenan hasta un valor de energía de 600 Wh, en 12 V. Según nuestro requerimiento de energía mínimo que es de 15.774 kWh (iluminación y fuerza), necesitaríamos como mínimo 26 baterías; para cargar esa cantidad de baterías en un día, necesitaríamos un caudal que sería suficiente para colocar un generador de CA. Entonces lo más sencillo de cubrir es el requerimiento de iluminación, que es de 7.440 kWh. El número de baterías es $7.440 \text{ kWh} / (600 \text{ Wh/batería}) = 12.4$ baterías, suponiendo que se puede aprovechar al máximo su energía almacenada, y que se puedan cargar en el tiempo sin uso, aún así, si se mantiene cargando constantemente, mantendríamos el nivel medio de carga o al máximo. Pero el que indica el límite de la potencia a entregar es el inversor. También deben comprarse los conectores de los bornes de las baterías, para conectarlas en paralelo.

La función del inversor es convertir la CC de 12 V, del banco de baterías a 120 V de CA con una frecuencia de 60 Hz. En el mercado se encuentran inversores electrónicos para este fin, son confiables si no se excede el límite de carga; la empresa Savoia distribuye inversores SPI de alta tecnología; elegimos el inversor que necesitamos, y sea capaz de arrancar el motor de despulpe, que es el que más potencia demanda.

El inversor cuenta con las siguientes características (Referencia 24):

- Modelo 2500AC.
- Gran capacidad de aumento: Provee 2500 vatios continuos y 4000 vatios pico de potencia para arrancar cargas difíciles.

- Integrado voltímetro y amperímetro: Indica el voltaje que recibe de la batería y el amperaje sacado.
- Protección de los circuitos contra Alto/bajo voltajes: Protege al inversor de cualquier entrada de voltaje que exceda los 14.7 VCD o sea menor de 10.5 VCD.
- Protección contra cortocircuito: Automáticamente el inversor se desconecta hasta que el cortocircuito es removido.
- Alarma de batería baja/desconexión: Tono audible y led indicador si la entrada de voltaje es menor de 11 voltios CD.
- Caja resistente al clima: La caja de aluminio anodinado provee máxima durabilidad y disipación de calor.
- Protección contra sobrecarga: Desconexión automática si la potencia demandada excede los 2500 vatios.
- Desconexión térmica/led de alta temperatura: Led indicador y desconexión automática si la temperatura externa excede los 150 grados Fahrenheit.
- Gran capacidad de entregar corriente: arranca cargas difíciles como lámparas, motores y otras cargas inductivas.
- 3 años de garantía de fábrica.
- Eficiencia optima del 90%.
- Ejemplo de aplicaciones: Computadoras, máquinas de fax, televisores, videograbadoras, hornos de micro ondas, refrigeradoras, pequeños motores, bombas, etc.
- Corriente entregada sin carga < 0.6 Amperios.
- Voltaje de salida de 120 V CA en onda senoidal.
- 2 Receptáculos de CA de 1500 Vatios máximo c/u.
- Protección: 2 cortacircuitos de 15 Amperios.
- Peso: 6.6 libras, largo: 17 pulgadas, ancho: 9 pulgadas, alto: 6 pulgadas.
- Precio US\$500.00.

3.3.3. Otros dispositivos y material eléctrico

Adicionalmente a la generación de la energía, se colocaría un cortacircuito con caja, a la salida del inversor aunque este ya tenga su protección interna, luego se dispondrá a conectar la instalación eléctrica del Beneficio (si existe, de lo contrario se implementará una). La protección del cortacircuito se calcula de la siguiente forma: $I = 2500 \text{ W} / 120 \text{ V} = 20.83 \text{ A}$. Para verificar la carga de energía que tienen las baterías, podría colocarse un controlador de carga para que indique con luz o sonido, la necesidad de cargar las baterías, similar a los utilizados en la carga con paneles solares. Además se tienen los otros elementos como los siguientes (Referencia 22):

- Toberas,
- Válvula de bola para corte rápido,
- Tubería y unión a tubería de presión,
- Manómetro de entrada 0-8 bar,
- Voltímetro 0 - 12 V y 0 - 240 V,
- Amperímetro > 80 A,
- Cables de conducción AWG #12 y de bornes para baterías,
- Cortacircuito 30 A.

3.3.4. Disposición de la micro central y obra civil

Según la forma en que está construido el Beneficio La Presa, el cuarto de máquinas se dispone de mejor forma a la par del tanque de almacenamiento de agua, como esta construido en una falda (ladera), entonces arriba de él para que el agua de salida del cuarto de máquinas llene este tanque.

La bocatoma ya existe pero es necesario formalizarla y construir un corto canal abierto a un desarenador, y a la cámara de carga. También ya existe una tubería instalada de 2" de diámetro, totalmente bajo tierra, desde el punto de toma hasta el punto de recepción, pudiendo conectar fácilmente la salida de la cámara de carga hasta el punto de recepción; se colocarán válvulas a la entrada y a la salida.

La disposición de los elementos es como se muestra en la figura 2 (véase la página 10), figura 18 (véase la página 56), la vista de planta y el Beneficio La Presa en la figura 26 (véase la página 85).

Para calcular las dimensiones del desarenador, cámara de carga y la casa de máquinas, lo haremos de la siguiente manera (Referencia 22):

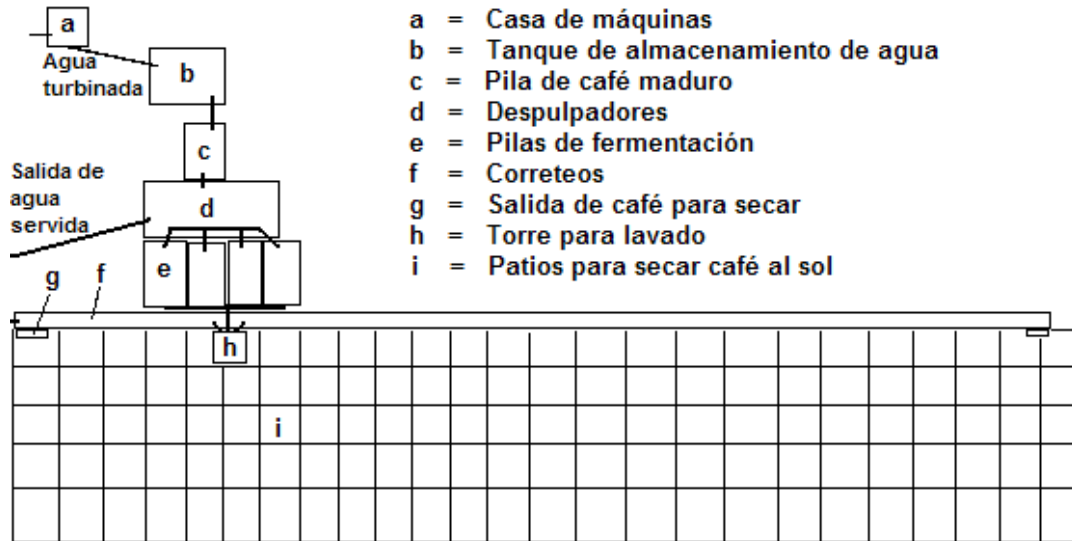
1) Longitud de decantación $L_d = (V_h/V_d) * d_d * f$, donde f es el factor de seguridad, y se recomienda de 2 a 3, la profundidad de decantación se toma de valores razonables ya utilizados de $d_d = 0.5$ m, una velocidad de decantación $V_d = 0.03$ m/s, para partículas de arena de 0.3 mm de diámetro, que en la mayoría de las centrales es suficiente decantar las partículas de más de este tamaño. La velocidad horizontal del agua (V_h), será baja puesto que la zona de decantación del desarenador, tiene una gran sección transversal, se recomienda $V_h = 0.2$ m/s, en la mayoría de los casos.

$$L_d = (0.2 \text{ m/s} / 0.03 \text{ m/s}) * 0.5 \text{ m} * 2 = 6.6 \text{ m}$$

El ancho se calcula con la siguiente ecuación, $W = Q / (V_h * d_d)$.

$$W = 0.0025 \text{ m}^3/\text{s} / (0.2 \text{ m/s} * 0.5 \text{ m}) = 0.025 \text{ m}$$

Figura 26. Vista de planta y fotografía del Beneficio de café La Presa



2) En el caso de una turbina Pelton, el espacio entre las rejillas “S”, no debe ser mayor que la mitad del diámetro del inyector. Si se usa una válvula de aguja debe ser un cuarto de éste.

$$S = d/2 = 6.72 \text{ mm} / 2 = 3.36 \text{ mm.}$$

3) Para determinar la profundidad del tanque colector del desarenador, sobre la base de una razonable frecuencia de vaciado. Diferentes mediciones establecen que un río transporta sedimentos a razón de 0.05 kg/m^3 a 0.2 kg/m^3 , durante todo el año. Una frecuencia de vaciado razonable (T horas) durante casi todo el año, cuando la cantidad de sedimentos transportada es 0.05 kg/m^3 , sería una vez por semana. En una semana la bocatoma absorberá una determinada cantidad de sedimento: $Q * T * 0.05 \text{ kg/m}^3 = 0.0025 \text{ m}^3/\text{s} * 3600 \text{ s/h} * 24 \text{ h/día} * 7 \text{ días/semana} * 0.05 \text{ kg/m}^3 = 76.5 \text{ kg/semana}$.

La densidad de la arena es de 2600 kg/m^3 y suponemos una densidad de acumulación del 50%, entonces el volumen del sedimento es:

$$\text{Volumen del sedimento} = 76.5 \text{ kg} / (2600 \text{ kg/m}^3) = 0.03 \text{ m}^3,$$

y multiplicado por dos (50% de densidad de acumulación) es de 0.06 m^3 . De aquí obtenemos la profundidad de recolección:

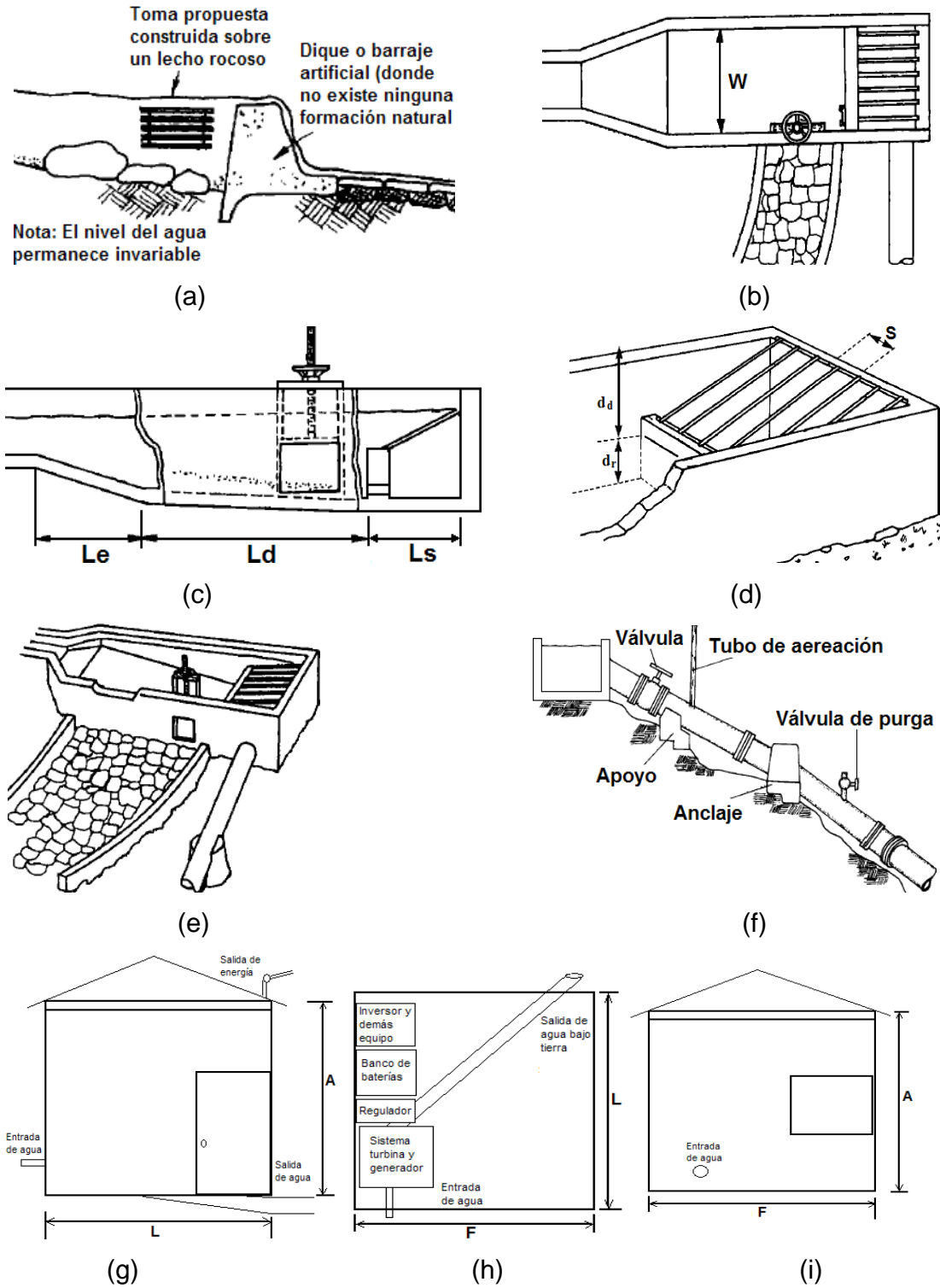
$$dr = \text{Capacidad del tanque} / (W * Ld)$$

$$dr = 0.06 \text{ m}^3 / (0.025 \text{ m} * 6 \text{ m}) = 0.4 \text{ m},$$

con la profundidad de decantación antes establecida: $dd = 0.5 \text{ m}$.

La figura 27 (Referencia 22) muestra como deben construirse los elementos civiles de la micro hidroeléctrica y sus medidas: (a) vista lateral de bocatoma, (b) planta de cámara de carga, (c) vista lateral de cámara de carga, (d) rejilla de cámara de carga, (e) cámara de carga que integra el desarenador, (f) tubería forzada, y casa de máquinas: (g) vista frontal, (h) planta y (i) vista lateral.

Figura 27. Elementos de obra civil para una micro hidroeléctrica



4) La longitud de entrada y salida (Le y Ls) debe ser 2.5 veces el ancho de la zona de decantación si es que se quiere evitar la turbulencia en el agua. Entonces,

$$Le \text{ y } Ls = 2.5 * W = 2.5 * 0.025 \text{ m} = 0.0625 \text{ m}.$$

5) Para las dimensiones de la casa de máquinas tomamos en cuenta las dimensiones de los dispositivos que se colocarán dentro y un espacio razonable para que las personas caminen libremente adentro. El sistema turbo-generador mide 0.4 x 0.4 x 0.3 m, el inversor mide 17" de largo y las 12 baterías estarán en una estantería de cuatro en cada piso, por lo que 2 x 2 m para el área del cuarto es suficiente, incluyendo espacio adicional entonces se proponen las siguientes medidas:

$$A = 2.5 \text{ m}, L = 2 \text{ m}, F = 2 \text{ m}.$$

Las dimensiones del desarenador y cámara de carga, las duplicaremos como mínimo en su capacidad para realizar mantenimiento cada dos semanas, pero pueden hacerse mayores todas las medidas, pues los resultados obtenidos son los mínimos, también se construirá otro desarenador en el canal de la bocatoma, antes del de la cámara de carga.

3.3.5. Operación

La operación del sistema requiere de una persona que se capacite en el funcionamiento del equipo, que pueda leer, seguir instrucciones, tomar precauciones y resolver problemas. Se espera que el funcionamiento del generador sea continuo, y la carga de las baterías sea profunda y lenta.

Las funciones del operador son en general (Referencia 22) las siguientes:

1. Poner en marcha la turbina bajo condiciones normales,
2. Parar la turbina bajo condiciones normales,
3. Vigilar el funcionamiento del grupo hidro-generador,
4. Llenar el registro diario de funcionamiento y ocurrencias,
5. Realizar maniobras para el reparto de energía eléctrica y en caso de que la turbina esté acoplada a una máquina, maniobrar sobre la turbina de acuerdo a los requerimientos de la máquina acoplada o movida,
6. Paralizar la turbina en caso de anomalías, detectar la causa y proceder a eliminarla, cuando se trate de ocurrencias menores,
7. Conocer el funcionamiento de los sistemas de protección y normalizar la turbina (desbloquearla) después de actuar,
8. Llevar a cabo acciones de mantenimiento periódicas y programar su repetición,
9. Realizar las maniobras para un adecuado llenado de la tubería,
10. Saber regular la cantidad de agua en la bocatoma y en la cámara de carga,
11. Realizar inspecciones en los diferentes componentes de la micro central para la detección de fallas o posible ocurrencia de falla,
12. Realizar instalaciones y reparaciones eléctricas menores, en tomas de corriente eléctrica, focos, interruptores, etc.,
13. En caso de accidentes, saber proporcionar primeros auxilios,

3.3.6. Mantenimiento

El mantenimiento en una central de este tamaño es mínimo, puesto que el personal que labora en el Beneficio tiene experiencia en el manejo de maquinaria, ellos mismos pueden revisar las partes mecánicas, limpiar la turbina y la cubierta que la contiene, engrasar los ejes, etc., constantemente debe verificar que el equipo esté bien sujeto a la base y bien ajustado. El mantenimiento al generador y al equipo eléctrico debe hacerlo personal especializado. Será necesario hacer un chequeo completo de la instalación cada año, cuando se dispone a operar el Beneficio, antes de comenzar la cosecha de café, y llevar el generador a mantenimiento o cuando haya alguna anomalía.

Debe leer y seguir las instrucciones del manual de operación del equipo para evitar daños a este, y asegurar una larga vida útil. También debe limpiar constantemente la bocatoma, canal, desarenador, cámara de carga, válvulas, entrada y salida de la tubería y tratar que el agua que se lleva sea limpia, máxime en invierno. La limpieza de los desarenadores está prevista mínimo cada dos semanas, vaciar por los aliviaderos la arena. Debe pedir que el fabricante entregue el manual de mantenimiento del equipo adquirido, y seguir las instrucciones.

Para aumentar la vida de los acumuladores y que mantengan su carga optima, debe revisarse mínimo mensualmente lo siguiente: Mantener bien sujeto el acumulador a su base, revisar que los bornes hagan buen contacto con las terminales, únicamente agregue agua destilada o desmineralizada, revise cada cuatro meses el sistema eléctrico que las carga, y evite someter el acumulador a cargas rápidas.

Secuencia de desmontaje completo del equipo, para limpieza, lubricación o fugas (Referencias 16 y 22):

- 1.Retirar la tapa del generador. Tener precaución de no soltar las conexiones.
- 2.Lubricar descanso a través de la grasera.
- 3.Fijar el eje en la parte hexagonal para evitar el giro.
- 4.Retirar la tapa de inspección.
- 5.Soltar la tuerca del rodete.
- 6.Retirar cuidadosamente el rodete (¡frágil!).
- 7.Soltar toberas de bronce y limpiar.
- 8.¡Tener cuidado que las toberas no rocen con el rodete al montar nuevamente!.
- 9.Separar la unión americana, girar *Fitting* en 90°, girar *Fitting* de empalme hasta retirar.
- 10.Desarmar conjunto tobera.
- 11.Soltar seguro de descanso para retirar el eje.
- 12.De ser necesario, retirar tornillos de porta sello para recambio de sello; lo mismo vale para el descanso.

4. ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA MICRO HIDROELÉCTRICA

Cuando no se cuenta con el servicio de energía eléctrica, es indispensable generar su propia energía en un Beneficio húmedo de café, por lo que implementar una micro hidroeléctrica, es la opción más económica, dejando muy atrás a los que utilizan plantas eléctricas de combustión de diésel, molinos de viento y los paneles solares que algunos utilizan en esta aplicación específica. Su implementación en un lugar de este tipo es sencilla, más bajo costo de instalación, y mantenimiento que los paneles solares, más bajo costo de operación que las de combustión de diésel, capaces de generar energía de forma constante, y mejor regulada que los sistemas eólicos.

El cálculo de costos se estimará en la temporada alta, o sea cuando el Beneficio opera en su mayor capacidad, en el peor de los casos y exagerando situaciones actuales de mercado, para dar un costo que podría ser más bajo e incluso se puede generar mayor energía, para vender a casas cercanas y una granja avícola, que es del mismo propietario.

4.1. Inversión inicial

El costo de implementación (instalación y compra de equipo) de la micro hidroeléctrica, es el gasto mayor que se hace, si compramos un equipo estacionario de una sola pieza, que tiene integrado una turbina Turgo y un generador de CC acoplados; únicamente es necesario anclarlo al piso, conectar el tubo a la entrada, y colocar la salida de la máquina al tubo de desagüe.

La ventaja en este Beneficio, como en la mayoría, es que ya cuenta con un sistema de tuberías, bocatoma, tanque de almacenamiento de agua y retorno de agua limpia al río.

Para estimar el costo se hará de la siguiente forma:

1. Elegimos un modelo que en este momento está en el mercado, según nuestras especificaciones, que genera hasta 1 kW de potencia, que trae incluido su regulador de voltaje para cargar baterías de 12 V, a un precio de US\$1700.00. Más un inversor de voltaje con potencia de 2.5 kW, de 120 V a 60Hz; este tiene un precio de US\$500.00, publicado en la página de Internet www.savoiapower.8k.com (Referencia 14), a la fecha 01/03/2006. Considerando el tipo de cambio en esa fecha de Q7.62125, por cada US\$1.00 (Referencia 25), aumentando US\$350.00 de envío (datos proporcionados por la empresa Savoia), se tiene un valor puesto en el Beneficio de:

$$(\$1700 + \$500 + \$350) * 7.62125 \text{ Q/\$} = \text{Q } 19434.19.$$

2. Si se compran 12 baterías para cumplir, el pico de demanda de iluminación a un precio cada una de Q400.00, cotizadas en el mercado local (venta de repuestos para autos), da un total de Q4800.00.
3. La cámara de carga, el desarenado, la bocatoma y el cuarto de máquinas, al ser construcciones sencillas, según lo estimado por un albañil del lugar, saldría en Q8000.00; utilizando cemento, arena, piedras, hierro, block y lamina. Para la compra de elementos restantes, como bornes para baterías, flipón, cables, conectores, etc.; y mano de obra necesaria, estimaremos Q2000.00.

4. Estimamos un costo de instalación y estudio por parte del planificador de Q5000.00, por ser un proyecto pequeño; aunque pueden contratar un servicio local, saldría mucho más económico que importar el equipo y pagar un diseño por separado, estos fabrican el equipo con materiales económicos, y lo instalan incluyendo el costo en la venta del equipo (Referencia 26).

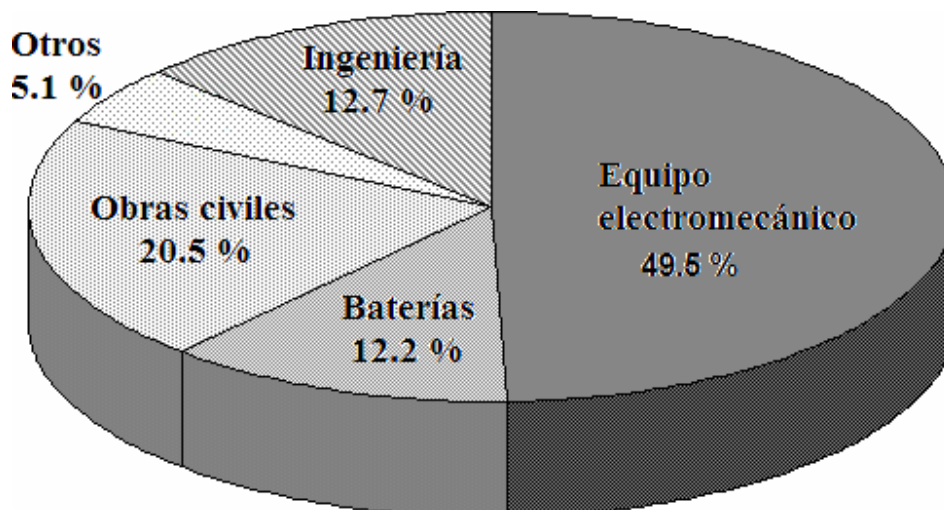
5. Todo lo anterior sumado, nos da el valor de la inversión:

$$Q19434.19 + Q4800.00 + Q8000.00 + Q2000.00 + Q5000.00 = \mathbf{Q39234.19}.$$

6. Los porcentajes de la inversión se detallan a continuación y en la figura 28.

Equipo electro-mecánico:	$Q19434.19/Q39234.19 = 49.5\%$
Almacenamiento de carga:	$Q4800.00/Q39234.19 = 12.2\%$
Obra civil:	$Q8000.00/Q39234.19 = 20.5\%$
Material para instalación eléctrica y otros:	$Q2000.00/Q39234.19 = 5.1\%$
Costo de ingeniería:	$Q5000.00/Q39234.19 = 12.7\%$

Figura 28. Costo de la micro central de 1kW



4.2. Gastos de operación y mantenimiento

El costo de operación es prácticamente mínimo, pues no consume combustible y el mantenimiento pueden hacerlo las personas que laboran en el Beneficio, pueden chequear el funcionamiento del sistema tal y como lo hacen con el sistema del proceso del Beneficio, además debe llevarse el generador por lo menos una vez al año a revisión y mantenimiento, por un técnico especializado, esto se estima en **Q500.00** por año (puede hacerse junto con el mantenimiento de los demás motores). La vida útil de las baterías podría extenderse hasta 5 años, si se les da mantenimiento, eventualmente tendrá que cambiarse el banco completo. También puede comprar baterías con mayor rendimiento, pero tienen mayor costo (US\$120.00 c/u, según la empresa Dintersa, Guatemala).

A menos que necesite una reparación de daños que haya sufrido por mal manejo o descuido, no habrá un gasto mayor; para evitar esto es necesario seguir las instrucciones del manual de operación del equipo, lo cual garantiza como mínimo el tiempo de vida útil indicado.

Se tiene planificado una limpieza de los desarenadores cada 2 semanas, para lo cual se aprovecha a hacer un chequeo general y dar mantenimiento a la parte mecánica, esto quitara por lo menos 4 horas de funcionamiento del sistema, lo cual equivale a:

$$0.88 \text{ kW} * 4 \text{ h} * 0.72036 \text{ Q/kWh} = \text{Q}2.54$$

de pérdida por no operar, 4 h cada 2 semanas. Si el año tiene 52 semanas, o sea 26 veces al año, entonces el tiempo por mantenimiento es:

$$T = 4 \text{ h} * 26 * (1 \text{ día}/24 \text{ h}) = 4.33 \text{ días}$$

$$T = 4.33 \text{ días} * (1 \text{ año}/365 \text{ días}) = 0.011863 \text{ años.}$$

4.3. Reducción de costos de operación en el Beneficio

En el Beneficio La Presa, se cuenta con el servicio eléctrico proporcionado por DEORSA (Empresa eléctrica que distribuye energía eléctrica en el sur-oriente, oriente y nor-oriente de Guatemala), cuenta con una acometida de 240 V CA, a 60 Hz, se divide en dos circuitos de 120 V c/u, uno dedicado para iluminación y otro para fuerza.

El requerimiento de energía del beneficio es de 15.77 kWh/día (véase la página 71), a un costo de 0.72036 Q/kWh (según recibos de cobro de DEORSA, tarifa \leq 100 kWh/mes), entonces se gasta en pago de electricidad:

$$(15.77 \text{ kWh/día}) * (0.72036 \text{ Q/kWh}) = 11.36 \text{ Q/día.}$$

Si la micro central genera a una potencia de 0.88 kW, en un día que se tenga funcionando las 24 horas, generará una energía igual a:

$$0.88 \text{ W} * 24\text{h} = 21.12 \text{ kWh,}$$

entonces podría sufragarse fácilmente el requerimiento total de energía del Beneficio, en temporada de cosecha, que es de 15.77 kWh/día, generando un exceso de energía de:

$$21.12 \text{ kWh/día} - 15.77 \text{ kWh/día} = 5.35 \text{ kWh,}$$

que podría utilizarse para una granja avícola aledaña del mismo propietario, en calefactores e iluminación.

El ahorro si se consume la energía generada es

$$21.12 \text{ kWh} * (0.72036 \text{ Q/día}) = \mathbf{15.21 \text{ Q/día;}}$$

si se prescindiera totalmente de Deorsa, evitaría pagarse un cargo fijo mensual de Q10.44, más el servicio de alumbrado público de Q24.51, que es igual a Q34.95 por mes, diario sería de: $(34.95 \text{ Q/mes})/(30 \text{ días/mes}) = 1.165 \text{ Q/día.}$

Esto agregado al ahorro de consumo, se tiene un ahorro total de:

$$15.21 \text{ Q/día} + 1.165 \text{ Q/día} = \mathbf{16.38 \text{ Q/día.}}$$

Esto es un ahorro por cada día que genere energía las 24 h, que es lo que se espera en temporada alta, pero se parará su producción de energía, cuando se realicen las operaciones de mantenimiento y reparación.

4.4. Recuperación de la inversión

La inversión inicial es prácticamente la única inversión, que se debe hacer diferente a los gastos que tiene el Beneficio, el gasto de mantenimiento (véase la página 90), es mínimo y no lo tomamos en cuenta porque sería parte de los gastos de operación. La recuperación de la inversión la plantearemos de 2 maneras, una en el caso del Beneficio en análisis, y la otra asumiendo que no cuenta con el servicio de electrificación, comparando el costo de introducir el servicio eléctrico de un Beneficio con similares requerimientos de energía (como hay muchos en esta área), pero desea construir una extensión de línea hasta él.

1) En el Beneficio La Presa, como la inversión inicial es de Q39234.19 y el ahorro es de 16.38 Q/día, entonces se tiene que el tiempo de recuperación de capital es:

$$T = 39234.19 \text{ Q} / (16.38 \text{ Q/día}) = 2395.25 \text{ días}$$
$$T = 2395.25 \text{ días} / (365 \text{ días/año} - 4.33 \text{ días/año})$$

$$\mathbf{T = 6.64 \text{ años.}}$$

Entonces el tiempo de recuperación de capital es de 6.64 años aproximadamente, en el caso de competir con el servicio eléctrico con el que cuenta, y teniendo la posibilidad de generar más energía, pues el cálculo es en época de estiaje, y el agua es más abundante en el resto del año, máxime en invierno. La energía que pueda generar siempre sería utilizada, pues en la granja avícola se utilizan calefactores a base de gas, y se pueden utilizar calefactores eléctricos o lámparas incandescentes durante todo el año, entre otras aplicaciones, consumiendo toda la energía que se pueda generar.

2) En el caso del Beneficio Las Cañas, no contaba con el servicio de electrificación, pero decidió hacer una extensión de línea para tener energía eléctrica, pues la empresa que suministra el servicio se negaba a construir la línea hasta el Beneficio. Hace seis meses se construyó la línea de transmisión eléctrica para dar servicio de 240 VCA, en 60 Hz, con una longitud de 400 m, y un costo de Q35000.00. Si tuviera un ahorro similar al calculado para el Beneficio la presa de 16.38 Q/día y un costo de implementación igual, de Q39234.19, entonces la diferencia en costo es: $Q39234.19 - Q35000.00 = Q4234.19$ y el tiempo para la recuperación de la inversión sería:

$$T = 4234.19 \text{ Q} / 16.38 \text{ Q/día} = 258.5 \text{ días}$$

$$T = 258.5 \text{ días} / (365 \text{ días/año} - 4.33 \text{ días/año})$$

$$\mathbf{T = 0.72 \text{ años.}}$$

Entonces el tiempo de recuperación de capital es de 0.72 años. Pero en este caso, el Beneficio se encuentra a orillas del río Las Cañas, el cual lleva agua incluso en verano, que es donde obtiene el agua el propietario y puede obtener un caudal mucho mayor al del Beneficio La Presa, teniendo la posibilidad de generar varios kilovatios de potencia, y vender energía a sus vecinos, reduciendo el costo de operación, reduciendo el tiempo de recuperación de la inversión y pudo haber evitado el gasto de la línea de transmisión.

CONCLUSIONES

1. Sí, es factible la implementación de una micro hidroeléctrica en un Beneficio húmedo de café desde cualquier punto de vista, porque al hacer un cálculo pesimista del costo de construcción en el Beneficio La Presa, no es muy alto, y la recuperación de la inversión es lenta pero efectiva en 6.64 años; el propietario tiene la posibilidad de aumentar la producción de energía eléctrica y además la puede vender a vecinos cuando no la utiliza o reducir su propio consumo con lámparas ahorradoras y mantener el servicio a casas vecinas.
2. En el caso de un Beneficio que no cuenta con servicio de electrificación (como hay muchos), es indispensable y muy conveniente la implementación de una micro hidroeléctrica en él, siendo la mejor opción entre las formas de generar energía eléctrica típicas que ellos utilizan, como lo son plantas de combustión de diésel y paneles solares, pues el agua ya la llevan hasta ellos.
3. La inversión inicial puede disminuir, si se compra el equipo localmente, pues la empresa que venda el equipo le incluirá el diseño e instalación al comprar con ellos. También si tiene capacidad de producir más energía, el equipo generador a comprar sería de los más comunes y por ende más económico que los pedidos especiales.

4. La potencia a la cual se puede generar la energía eléctrica está en función del caudal de agua que se tenga en el punto de recepción, y la altura de caída efectiva con que se disponga; o podemos utilizar otros parámetros como la presión, entre otros. Podemos generar energía eléctrica en CA o CD, según sean las circunstancias de duración y cantidad de caudal con la altura de la caída del agua que se disponga.
5. La micro hidroeléctrica es una forma de generación de energía eléctrica renovable, ecológicamente es un recurso de bajo impacto ambiental, el cual se supone casi nulo, porque se aprovecha el agua que ya se lleva hasta el Beneficio y además ayuda a crear conciencia de proteger los recursos hídricos, manteniéndolos y evitando la contaminación.
6. Los generadores utilizados en micro hidroeléctricas pueden ser de CA o CD, aunque se prefieren en CA para disminuir pérdidas, pero para éstos se necesita una buena regulación de flujo del agua y reguladores para mantener el voltaje constante. También los generadores pueden ser nuevos o adaptar alternadores, dinamos u otros motores eléctricos de segunda mano, obtenidos por ejemplo, de automóviles.
7. Las turbinas hidráulicas comúnmente utilizadas en micro hidroeléctricas son: PELTON, cuando el salto es grande y el caudal reducido; FRANCIS, para valores medios de salto y caudal; KAPLAN, cuando el salto es pequeño y el caudal es importante, al igual que las BANKI (flujo radial). Las turbinas también son llamadas motores primarios o primotor. La turbina TURGO es similar a la pelton y utilizada igualmente.

8. La altura de caída y el caudal del agua son directamente proporcionales a la potencia que se genera en una central micro hidroeléctrica, por tal razón si disminuimos o aumentamos uno de estos parámetros, también lo hará la potencia eléctrica que es generada.

9. En el caso de un Beneficio, en el cual se evalúen las opciones de implementar una micro hidroeléctrica, o hacer una extensión de línea para introducir el servicio eléctrico del Sistema Nacional Interconectado (Deorsa) con más de 400 metros, el costo de una extensión de línea es mayor o igual que implementar una micro hidroeléctrica; por lo que es más factible generar su propia energía, siempre y cuando se cuente con los recursos de agua suficientes.

RECOMENDACIONES

1. En una instalación eléctrica es indispensable que sea evaluada su situación actual y verificar si es posible ahorrar energía, como por ejemplo si se tienen lámparas incandescentes, cambiarlas por ahorradoras que disminuyen el consumo hasta un 80%, máxime si se alimentan con bancos de baterías. También si es posible alternar los usos de energía, como por ejemplo evitar trabajar de noche, no usar la bombas cuando estén encendidos los motores o luces, etc.
2. Cuando se puede generar más energía de la que se consume, a una cantidad de potencia suficiente, puede venderla a viviendas o negocios vecinos; incluso puede vender energía a la empresa eléctrica local, conectándose a la red de distribución, verificando si cumple con los requisitos, y luego negociar con la empresa, para esto necesitaría una buena regulación de voltaje.
3. Si necesita implementar una micro hidroeléctrica en su Beneficio, puede hacerlo usted mismo buscando asesoría, también hay muchos lugares en Guatemala (ventas de equipo agrícola o eléctrico) en donde encuentra el equipo y la asesoría necesaria para llevar a cabo un proyecto de este tipo, ellos pueden hacer un diagnóstico y presupuesto actualizado para cualquier necesidad específica.

4. Es importante conservar las áreas boscosas, reforestar los manantiales y las cuencas de los ríos, para que el agua se mantenga y estos no se sequen; también evitando contaminarlos, purificando y filtrando el agua antes de devolverla al cauce del río.
5. Debe abocarse al ente encargado de regular la ley de aguas (Ministerio de Energía y Minas), para obtener los permisos correspondientes cuando sea un proyecto grande o afecte a otros.
6. Es práctico utilizar motores de inducción como generadores, por su simplicidad y robustez o dinamos, podrían incluso utilizarse bombas roto dinámicas de agua como sistema turbina-generator, invirtiendo el flujo de agua en ellas, pero para esto hay que hacer las pruebas correspondientes.
7. Si se genera energía eléctrica en CA es necesario regular meticulosamente el flujo de agua a la entrada del sistema generador, pero puede hacerse con reguladores automáticos de válvulas que controlan el voltaje y la frecuencia de salida. La generación en CD es menos metódica y pueden usarse reguladores electrónicos de voltaje para cargar baterías, así la potencia a la salida dependerá del banco de baterías y no del generador en sí.
8. Al diseñar una micro hidroeléctrica es necesario que observe otras ya instaladas y funcionando, pues podrán verse los inconvenientes que han tenido y aprender de ellos para mejorar el diseño.

REFERENCIAS

1

Byron Dardón y otros "Los frutos del café". Diario **Prensa Libre**. Guatemala, 9 de mayo. Página 20. 2006.

2

Julieta Sandoval y otros. "Radiografía del café". **Revista D**, Prensa Libre 4 de septiembre. (Guatemala) (61): pp. 18-21. 2005.

3

Barrios, Ing. Marco Antonio. "Beneficiado húmedo, defectos y recomendaciones", **El Cafetal**, enero: 10-11. 2005.

4

Marschoff, Dr. Carlos M. "Ciencia e investigación: innovación tecnológica, investigación y desarrollo en el sector energético". **Información Científica**, página publicada en Internet <http://www.ambiente-ecologico.com>, abril (69). 2000.

5

Ing. Alessandro Brusa e Ing. Elena Guarnone, "Energía mini hidráulica: Clasificación". Energías limpias, (España: 2006), página publicada en Internet: http://www.europa.eu.int/comm/energy/en/renewable/energia_minihidraulica.

6

Biblioteca de consulta encarta Microsoft, "Energía hidráulica", **Encarta**, 13. 2005.

7

Dirección general de energía, centro de información y promoción de energías renovables. Guatemala, 28 de febrero de 2006. Comunicación personal.

8

“Darán financiamiento para construcción de pequeñas hidroeléctricas”, Diario **Siglo Veintiuno**. Guatemala, 20 de febrero. pp. 14-15. 2006.

9

Amos Bien, consultor. “Estrategia de certificaciones turísticas en Centroamérica”, **Fomento al desarrollo sostenible mediante turismo en Centroamérica (Fodestur)**, Estudio octubre de 2000: 37. 2000.

10

“Central hidroeléctrica”, Enciclopedia Wikipedia. Febrero de 2006, página publicada en Internet http://www.es.wikipedia.org/wiki/central_hidroelectrica.

11

Ing. Alessandro Brusa e Inga. Elena Guarnone, “Energía mini hidráulica: Clasificación”. Energías limpias, España: 2006, página publicada en Internet: http://www.europa.eu.int/comm/energy/en/renewable/energia_minihidro.

12

“Energía hídrica: Pico hidroeléctrica”, Aprotéc. Colombia: 2004, página publicada en Internet: <http://www.aprotec.com.co>.

13

Norman, Jim. “*Micro Hydro Power*”. ABS Alaskan, Inc. USA: 2006, página publicada en Internet: <http://www.absak.com>.

14

“Equipos Savoia de energía renovable: potencia de pequeñas hidroeléctricas”, Savoia. Argentina: 2006, página publicada en Internet: <http://www.Savoiapower.com>.

15

“Potencia hidroeléctrica”, Enciclopedia Wikipedia. Febrero de 2006, página publicada en Internet http://www.es.wikipedia.org/wiki/central_hidroelectrica.

16

“Programa de energía, infraestructura y servicios básicos”, ITDG-AL, soluciones para la pobreza. Perú: UPECI-ITDG, 2004, página publicada en Internet: <http://www.itdg.org.pe>.

17

Chapman, Stephen J. “Máquinas CC y CA”, **Máquinas eléctricas**. 2ª edición; México: Editorial McGraw-Hill interamericana, 1998, pp. 1-694.

18

Gualda, Juan A. y otros. “Reguladores”. **Electrónica industrial, técnicas de potencia**. 2ª edición; Colombia: Editorial Alfaomega, 1995, pp. 221-253.

19

Gualda, Juan A. y otros. “Carga de baterías”. **Electrónica industrial**. 2ª edición; Colombia: Editorial Alfaomega, 1995, pp. 415-422.

20

Gualda, Juan A. y otros. “Inversores, configuraciones”. **Electrónica industrial, técnicas de potencia**. 2ª edición; Colombia: Editorial Alfaomega, 1995, pp. 333-351

21

“Energía hídrica: componentes del sistema micro hidroeléctrico”, Aprottec. Colombia: 2004, página publicada en Internet: <http://www.aprotec.com.co>.

22

Coz, Federico y otros. “Manual de Mini y Micro centrales Hidráulicas: una guía para el desarrollo de proyectos”, ITDG-Perú. 1ª ed. en español. Perú: ITDG, 1995. Página publicada en Internet: <http://www.itdg.org.pe/energía/manualdeminiymicrocentraleshidraulicas>.

23

Serway, Raymond A. “Mecánica de Fluidos”, **Física**. 2ª edición en español, tomo I; México: Editorial McGraw-Hill interamericana, 1994, pp. 403-425.

24

“Productos especiales para calidad de potencia: Reguladores de voltaje automáticos e Inversores de voltaje”, Savoia. Argentina: 2006, página publicada en Internet: <http://www.SavoiaPower.8k.com>.

25

“Tipo de cambio de monedas extranjeras”, **Prensa Libre**. Guatemala, 17 de marzo. Página 22. 2006.

26

Fumagalli S., José Adolfo. **Mecánica industrial agrícola S.A.** Beneficios ecológicos y micro hidroeléctricas. 21 calle 2-01 “A” zona 12, Guatemala. Marzo 2006.

BIBLIOGRAFÍA

1. Anacafe. "Beneficiado húmedo, defectos y recomendaciones". El Cafetal. Guatemala, enero: 10. 2005.
2. Boylestad, Robert L. **Análisis introductorio de circuitos**. 8^a ed. México: Editorial Prentice Hall hispanoamericana, 1998. 1,168 pp.
3. Chapman, Stephen J. **Máquinas eléctricas**. 2^a ed. México: Editorial McGraw-Hill interamericana, 1998.
4. Cruz Barrios, José Ademar. Metodología a seguir para la planificación de un proyecto hidroeléctrico antes de su implementación en Guatemala. Tesis Ing. Civil. Guatemala, Universidad de San Carlos, Facultad de Ingeniería, 2003.
5. Giles, Ronald V. **Teoría y problemas de mecánica de los fluidos e hidráulica**
6. Gourishankar, Vembu. **Conversión de energía electromecánica**. Editorial Grupo Alfaomega, 1995.
7. Gualda, Juan A. y otros. **Electrónica industrial, técnicas de potencia**. 2^a ed. Colombia: Editorial Alfaomega, 1995.

8. Fumagalli S., José Adolfo. **Mecánica industrial agrícola S. A.** Beneficios ecológicos y Micro hidroeléctricas. 21 calle 2-01 "A" zona 12, Guatemala. Marzo 2006.
9. Menchú, Juan Francisco. Manual práctico de beneficios de café. Tesis Ing. Civil. Guatemala, universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería.
10. Méndez Tello, Ricardo Alfredo. Pequeñas hidroeléctricas: una opción factible económicamente para la electrificación rural en Guatemala. Tesis Ing. Eléctrico. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala Facultad de Ingeniería, 2003.
11. Rayo Méndez, Axel Antonio. Producción en los ríos de la costa sur de Guatemala, con fines de riego (proyecto San Gerónimo). Tesis Ing. Agrónomo. Guatemala, universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1969.
12. Rodas R., César Augusto. Manual de beneficios para pequeños y medianos productores de café. Tesis Ing. Civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería.
13. Sandoval, Julieta y otros. "Radiografía del café". Revista D, Prensa Libre, 4 de sept. (Guatemala) (61): 18-21. 2005.
14. Serway, Raymond A. **Física.** 2^a ed. en español. (Tomos I y II). México: Editorial McGraw-Hill interamericana, 1994.

15. Coz, Federico y otros. "Manual de Mini y Micro centrales Hidráulicas: una guía para el desarrollo de proyectos", ITDG-Perú. En español. Perú: ITDG, 1995. Web: <http://www.itdg.org.pe/energía/manualdeminiymicrocentraleshidraulicas>.

Referencia Electrónica

1. <http://www.absak.com>. Febrero de 2006.
2. <http://www.ambiente-ecologico.com>. Enero de 2006.
3. <http://www.anacafe.org>. Febrero de 2006.
4. <http://www.anacafe.org>. Febrero de 2006.
5. <http://www.anuies.mx>. Febrero de 2006.
6. <http://www.aquasolar.com>. Febrero de 2006.
7. <http://www.aprotec.com.co>. Febrero de 2006.
8. <http://www.energiaminihidraulica.com>. Febrero de 2006.
9. <http://www.engov.oregon.gov>. Febrero de 2006.
10. <http://www.es.wikipedia.org/wiki>. Febrero de 2006.
11. http://www.europa.eu.int./comm/energy/en/renewable/energia_minihidraulica.
Febrero de 2006.
12. <http://www.hemerodigital.unam.mx/anuies>. Febrero de 2006.
13. <http://www.itdg.org.pe>. Mayo de 2006.
14. <http://www.mem.gob.gt>. Mayo de 2006.
15. <http://www.savoiapower.8k.com>. Marzo de 2006.
16. <http://www.vita.org>. Mayo de 2006.

ANEXOS

ANEXO 1. Conversión de unidades

Longitud

1 plg = 2.54 centímetros (cm)
1 m = 39.37 plg = 3.281 pies
1 pie = 0.3048 m
12 plg = 1 pie
3 pies = 1 yarda (yd)
1 yd = 0.9144 m
1 kilómetro (km) = 0.621 millas (mi)
1 mi = 1.609 km = 5280 pies

Área

1 m² = 10⁴ cm² = 10.76 pies²
1 pie² = 0.0929 m² = 144 plg²
1 plg² = 6.452 cm²

Volumen

1 m³ = 10⁶ cm³ = 6.102x10⁴ plg³
1 pie³ = 1728 plg³ = 2.83x10⁻² m³
1 litro = 1000 cm³ = 1.0576 cuartos
1 litro = 0.0353 pie³
1 pie³ = 7.481 gal = 28.32 litros
1 pie³ = 2.832x10⁻² m³
1 gal = 3.786 litros = 231 plg³

Masa

1000 kg = 1 tonelada métrica
1 slug = 14.59 kg = 1 lb/g
1 unidad de masa atómica (u) =
1.66x10⁻²⁷ kg

Fuerza

1 newton (N) = 10⁵ dina = 0.2248 lb
1 N = 1 kg * m/s²
1 lb = 4.448 N = 1 slug * pie/s²
1 dina = 10⁻⁵ N = 2.248x10⁻⁶ lb
1 dina = 1 g * cm/s²

Velocidad

1 mi/h = 1.47 pie/s = 0.447 m/s = 1.61 km/h
1 m/s = 100 cm/s = 3.281 pie/s
1 mi/min = 60 mi/h = 88 pie/s

Aceleración

1 m/s² = 3.28 pie/s² = 100 cm/s²
1 pie/s² = 0.3048 m/s² = 30.48 cm/s²

Presión

1 bar = 10⁵ N/m² = 14.5 lb/plg² (psi)
1 atmósfera (atm) = 760 mm Hg
1 atm = 76 cm Hg
1 atm = 14.7 lb/plg² = 1.013x10⁵ N/m²
1 pascal (Pa) = 1 N/m² = 1.45x10⁻⁴ lb/plg²

Tiempo

1 año = 365 días = 3.16 x10⁷ s
1 día = 24 h = 1.44x10³ min =
8.64x10⁴ s

Energía

1 J = 0.738 pie*lb = 10⁷ ergs
1 caloría (cal) = 4.186 J
1 Btu (unidad térmica británica) =
252 cal = 1.054x10³ J
1 electrón-volt (eV) = 1.6x10⁻¹⁹ J
1 kWh = 3.6x10⁶ J
931.5 MeV es equivalente a 1 u

Potencia

1 HP = 550 pie*lb/s = 0.746 kW
1 W = 1 J/s = 0.738 pie*lb/s
1 Btu/h = 0.293 W

Fuente: Serway, Raymond A. Física. Apéndice A y contraportadas.

Conversiones útiles

1 pie cúbico (pie³) = 7.48 galones (gal)
1 pie³/s = 448.8 gal/min = 1698.708 litros/min
1 gal/min = 3.785 litros/min
1 pulgada (plg) = 2.54 centímetros (cm)
1 pie = 0.3048 m
1 m = 3.28 pies
1 pie³ = 0.028 m³
1 m³ = 35.3 pie³
1 gal = 3.785 litros
1 pie³ = 28.31 litros
1 pie³/s = 1698.7 litros/min
1 m³/s = 15842 gal/min
1 psi de presión = 2.31 pies (altura de caída de agua)
1 lb = 0.454 kilogramos (kg)
1 kg = 2.205 lbs
1 kW = 1.34 HP
1 HP = 746 W
1 gal = 0.00378 m³

Fuente: Página en Internet <http://www.engov.oregon.gov>.

ANEXO 2. Medición de caudal con vertedero o canal

Tabla X. Caudal respecto de la altura del nivel H

H (m)	Q (l/s)	H (m)	Q (l/s)	H (m)	Q (l/s)	H (m)	Q (l/s)
0.01	1.7	0.22	185	0.58	792	1.15	2210
0.02	5	0.24	210	0.60	833	1.20	2350
0.03	9	0.26	237	0.62	875	1.25	2500
0.04	14	0.28	265	0.64	918	1.30	2650
0.05	20	0.30	294	0.66	961	1.35	2810
0.06	26	0.32	324	0.68	1006	1.40	2970
0.07	33	0.34	356	0.70	1051	1.45	3130
0.08	40	0.36	387	0.72	1095	1.50	3294
0.09	45	0.38	420	0.74	1141		
0.10	54	0.40	453	0.76	1188		
0.11	65	0.42	488	0.78	1235		
0.12	74	0.44	523	0.80	1283		
0.13	84	0.46	560	0.85	1404		
0.14	93	0.48	596	0.90	1530		
0.15	104	0.50	634	0.95	1660		
0.17	125	0.52	672	1.00	1793		
0.19	148	0.54	711	1.05	1930		
0.20	160	0.56	751	1.10	2068		

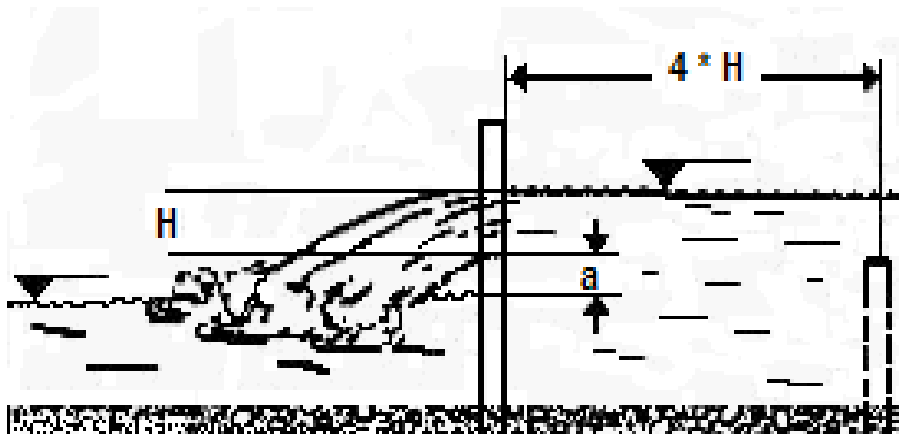
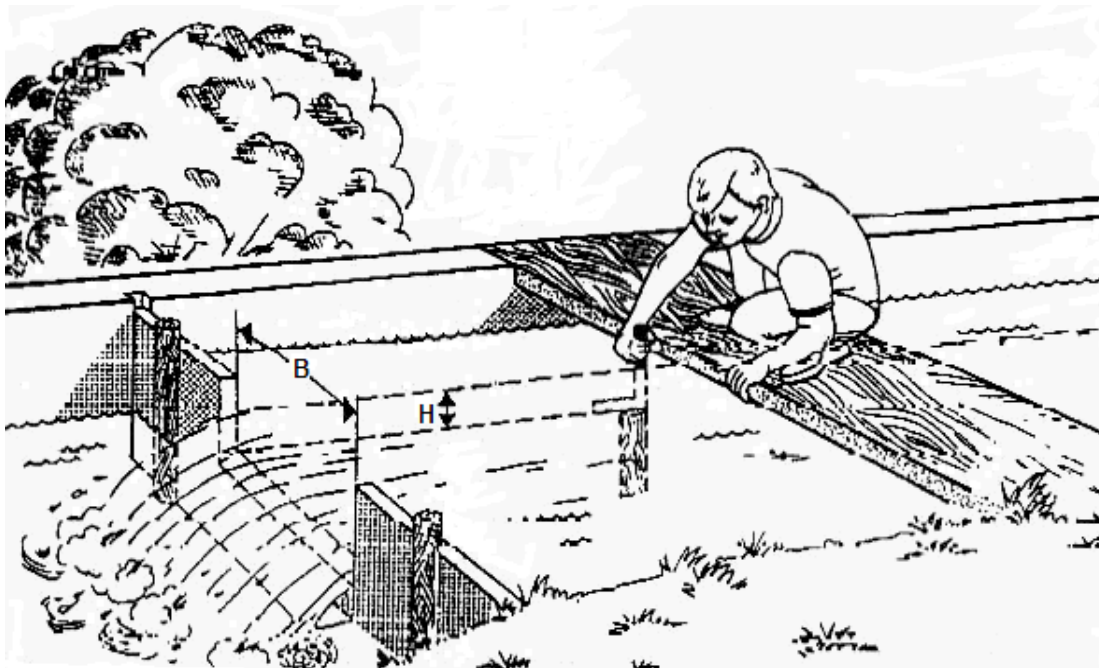
Los valores "Q" en litros/segundo son válidos para un ancho de vertedero de B =1 metro. La altura "a" debe ser de 5 centímetros al menos.

Se sabe que:

1 pie = 0.3048 metros

1 sección cúbica = 28.3 litros/segundo.

Figura 29. Medición del caudal de agua en canal o vertedero



Fuente: José Adolfo Fumagalli S., **Mecánica industrial agrícola S. A.** Beneficios ecológicos y micro hidroeléctricas. 21 calle 2-01 "A" zona 12, Guatemala. (OSSBERGER-TURBINENFABRIK).

ANEXO 3. Medición de caudal por medio de Flotadores

1. Para obtener resultados utilizables, se debe elegir un trecho de medida de curso y sección lo más derecho y parejo posibles.
2. Averiguar la longitud y la sección transversal del trecho de medida.
3. Preparar un flotador de corcho de madera o mejor aún, una botella que se llenará de agua, de manera que flote aproximadamente en sus 2/3.
4. Se colocará el flotador algunos metros antes del trecho elegido y será cronometrado el tiempo que utiliza para atravesarlo.
5. El caudal es calculado a partir de la velocidad media "Vm" y de la sección transversal de la reguera "S" según la fórmula, $Q = S * Vm$.
La velocidad media no es ésta que nos da el flotador sino sólo una parte de ella, porque el flotador se moverá hasta que alcanza la velocidad máxima. La velocidad del agua disminuirá en las paredes, según la amplitud y tamaño del perímetro humedecido en proporción con la sección transversal de la reguera. La tabla siguiente da el coeficiente de flotación según valores de experimentación para las diferentes proporciones S/P:

$S = \frac{\text{Superficie de la sección transversal}}{\text{Perímetro de los lados húmedos en cualquier estado de la reguera.}}$

P =

Tabla XI. Coeficientes de flotación

$\frac{S}{P}$	Madera lisa o cemento	Madera sin cepillar o pared de ladrillo	Pared de pedruscos	Tierra
0.1	0.860	0.840	0.748	0.565
0.2	0.865	0.858	0.792	0.645
0.3	0.870	0.865	0.812	0.685
0.4	0.875	0.868	0.822	0.712
0.5	0.880	0.870	0.830	0.730
0.6	0.890	0.871	0.835	0.745
0.7	0.892	0.872	0.837	0.756
0.8	0.895	0.873	0.839	0.763
0.9	0.895	0.874	0.842	0.771
1.0	0.895	0.875	0.844	0.778
1.2	0.895	0.876	0.847	0.786
1.4	0.895	0.877	0.850	0.794

Ejemplo:

Trecho de medida 15 metros.

Tiempo utilizado por el flotador 20 segundos.

Velocidad $V_i = d/t = 15 \text{ m}/20 \text{ s} = 0.75 \text{ m/s}$.

La reguera tiene una sección transversal rectangular, la base tiene dos metros de ancho, las paredes laterales 0.8 metros de altura.

La sección transversal del agua es por lo siguiente: $2 \text{ m} * 0.8 \text{ m} = 1.6 \text{ m}^2$.

El perímetro humedecido es: $2 \text{ m} + 0.8 \text{ m} + 0.8 \text{ m} = 3.6 \text{ m}$.

El cociente $S/P = 1.6 \text{ m}^2/3.6 \text{ m} = 0.44 \text{ m}$.

La reguera es de tierra y de esta manera no válida para $S/P = 0.44$, por lo que el cociente aproximado es de 0.72 (según la tabla).

La velocidad media es por consiguiente $0.75 \text{ m/s} * 0.72 = 0.54 \text{ m/s}$.

De aquí se calcula el caudal: $Q = V_m * S = 0.54 \text{ m/s} * 1.6 \text{ m}^2 = 0.864 \text{ m}^3/\text{s}$

$Q = 864$ litros por segundo.

Fuente: José Adolfo Fumagalli S., **Mecánica industrial agrícola S. A.** Beneficios ecológicos y micro hidroeléctricas. 21 calle 2-01 "A" zona 12, Guatemala. (OSSBERGER-TURBINENFABRIK).

ANEXO 4. Sección de aforo

Sección de aforo de un río, arroyo o canal, es un local, ya sea natural o preparado para tal efecto, en el cual se ha determinado la curva cota-caudal. De esa forma, cuando se requiere, midiendo el nivel, con una regla graduada implantada en el lugar, por interpolación en la curva, se podrá determinar el caudal líquido en la sección.

Para seleccionar una sección de aforo deben tenerse en cuenta algunos factores, pero el más importante es tener la certeza que la forma de la sección no cambia en el tiempo, es decir que se trata de un tramo de río o arroyo que no sufre socavación y no está en proceso de sedimentación. Cuando estas características no se encuentran en el tramo en el cual interesa instalar la sección de aforo, deberá implementarse una obra, como por ejemplo, un vertedero. Esta obra, según la dimensión del río o arroyo, puede llegar a ser una obra costosa, y en algunos casos puede resultar más conveniente determinar el caudal por otros métodos.

Los vertederos utilizados en estos casos son también de varios tipos:

- Vertedero de Bazin
- Vertedero libre en pared delgada y vertical:
 - Rectangular,
 - Triangular,
 - Tipo Cipolletti,
 - Trapezoidal,
- Circular.
- Vertederos de paredes gruesas

Con frecuencia, una sección adecuada para implementar una sección de aforo es en correspondencia con un puente, puesto que esta sección ya ha sido estabilizada.

En ríos y arroyos de anchos, se hace difícil y costoso implementar vertederos con la sola finalidad de definir la sección de aforo, en estos casos, la medición se hace con el uso del correntómetro. Con el auxilio de este instrumento, se mide la velocidad del flujo en varias partes de la sección, de forma que se pueda establecer curvas de igual velocidad en toda la sección. Con base en el mapeo de las velocidades del flujo se calcula el caudal líquido.

El cálculo del caudal en este caso, se efectúa con la fórmula siguiente:

$$Q = \sum_{i=1, j=1}^{N, M} (A_{i,j} * v_{i,j})$$

Donde:

- Q = Caudal en m³/s,
- v_{i,j} = velocidad en la altura j de la vertical i, en m/s y
- A_{i,j} = Área elemental en la cual se aplica v_{i,j}, por ejemplo calculada en

base a los Polígonos de Thiessen, en m^2 .

Para la medición de la cota del pelo libre del agua, se utilizan:

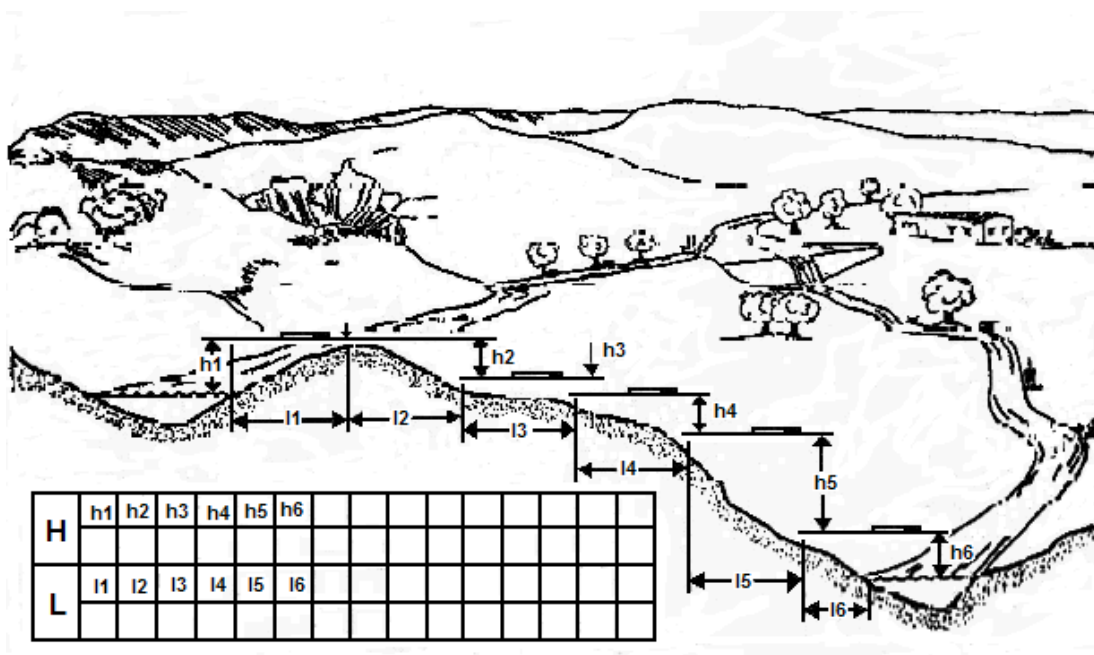
- Reglas limnimétricas, en este caso la lectura debe ser hecha en su lugar.
- Registradores continuos de nivel.
- Sensores que transmiten periódicamente la medición a distancia, la que puede ser controlada en tiempo real.

Fuente: Página en Internet <http://www.es.wikipedia.org/wiki>.

ANEXO 5. Manual de medición de la caída con nivel

1. Sembrar tarugos preferiblemente con distancia de longitud de la regla de medición (por ejemplo tres metros), en una línea recta, correspondiente al curso proyectado de la tubería de presión. Todos los tarugos deben resaltar igualmente fuera del suelo, si es posible.
2. Poner la regla de medición con nivel de agua puesto encima de la regla. Fijar las alturas medidas H_1, H_2, H_3, \dots y registrarlas en la tabla, atender los signos +/- positivo/negativo, bajada/subida.
3. Fijar las distancias L_1, L_2, L_3, \dots y registrarlas en la tabla.
4. Calcular $H =$ sumar todos los valores con signo positivo (+) menos la suma de todos los valores h con signo negativo (-).

Figura 30. Medición de la altura de caída con nivel



Fuente: José Adolfo Fumagalli S., **Mecánica industrial agrícola S. A.** Beneficios ecológicos y micro hidroeléctricas. 21 calle 2-01 "A" zona 12, Guatemala.

ANEXO 6. Ley general de electricidad (fragmento de)

CAPÍTULO I. Generalidades

Artículo 8. Es libre la instalación de centrales generadoras, las cuales no necesitarán de autorización de ente gubernamental alguno, y sin más limitaciones que las que se den de la conservación del medio ambiente y de la protección a las personas, a sus derechos y a sus bienes. No obstante, para utilizar con estos fines los que sean bienes del Estado, se necesitará de la respectiva autorización del Ministerio, cuando la potencia de la central exceda de 5 MW. El Ministerio deberá resolver sobre las solicitudes de las autorizaciones en un plazo de noventa (90) días contados a partir de la fecha en que se presenten las mismas, previo a que el solicitante haya cumplido con lo estipulado en el Artículo 10 de esta Ley, y de acuerdo con lo que al respecto establece su reglamento.

Artículo 10. Los proyectos de generación y de transporte de energía eléctrica deberán adjuntar evaluación de impacto ambiental, que se determinará a partir del estudio respectivo, el que deberá ser objeto de dictamen por parte de la Comisión Nacional del Medio Ambiente -CONAMA-, dentro de un plazo no mayor de sesenta (60) días a partir de su recepción. En su dictamen, CONAMA definirá, en forma razonada, la aprobación o desaprobación del proyecto, o en su caso la aprobación con recomendaciones, las que deberán cumplirse. El reglamento de esta ley establecerá los mecanismos que garanticen su cumplimiento. En caso de no emitirse el dictamen en el plazo estipulado, el proyecto, bajo la responsabilidad de CONAMA, se dará por aprobado, deduciendo las responsabilidades, por la omisión, a quienes corresponda.

Artículo 12. Cuando un recurso hidráulico se utilice en forma compartida para generar electricidad y para otros usos, o bien cuando se trate de dos o más aprovechamientos hidráulicos de energía eléctrica en el mismo cauce, el titular de la autorización del aprovechamiento del recurso deberá prever que no se afecte el ejercicio permanente de otros derechos.

CAPÍTULO III. De la imposición de servidumbres en bienes del dominio público y privado

Artículo 23. Tipos de Servidumbres Legales de Utilidad Pública. Las servidumbres legales de utilidad pública comprenden las de paso, que incluye la construcción de senderos, trochas y caminos; las de agua, acueducto y todas aquellas que señala la legislación ordinaria y que sean necesarias sobre la base de los estudios técnicos correspondientes, incluyendo el derecho de inspección y mantenimiento permanente.

Fuente: Ministerio de Energía y Minas, **Dirección General de Energía**, 24 calle 21-12, zona 12, Guatemala, Guatemala, C.A. www.mem.gob.gt

ANEXO 7. Decreto Número 52-2003

Ley de Incentivos para el Desarrollo de Proyectos de Energía Renovable de Guatemala (fragmento de)

ARTÍCULO 1 . Urgencia e interés nacional. Se declara de urgencia e interés nacional el desarrollo racional de los recursos energéticos renovables. El órgano competente estimulará, promoverá, facilitará y creará las condiciones adecuadas para el fomento de inversiones que se hagan con ese fin.

ARTÍCULO 5 . Incentivos. Las Municipalidades, el Instituto Nacional de Electrificación -INDE-, Empresas Mixtas, y las personas individuales y jurídicas que realicen proyectos de energía con recursos energéticos renovables gozarán de los siguientes incentivos:

- A) Exención de derechos arancelarios para las importaciones, incluyendo el Impuesto al Valor Agregado -IVA-, cargas y derechos consulares sobre la importación de maquinaria y equipo, utilizados exclusivamente para la generación de energía en el área donde se ubiquen los proyectos de energía renovable. Previamente a la importación de la maquinaria y equipo que sean necesarios para desarrollar los proyectos de energía renovable, en cada caso las personas individuales y jurídicas que los realicen deberán solicitar la aplicación de la exención a la Superintendencia de Administración Tributaria -SAT, quien se encargará de calificar y autorizar la importación. Este incentivo tendrá vigencia exclusiva durante el período de preinversión y el período de construcción, el cual no excederá de diez (10) años.
- B) Exención del pago del Impuesto Sobre la Renta. Este incentivo tendrá vigencia exclusiva a partir de la FIE, por un período de diez (10) años. Esta exención únicamente se otorga a las personas individuales y jurídicas que desarrollen directamente los proyectos y solamente por la parte que corresponda a dicho proyecto, ya que la exención no aplica a las demás actividades que realicen.
- C) Exención del Impuesto a las Empresas Mercantiles y Agropecuarias -IEMA-. Este incentivo tendrá vigencia exclusiva a partir de la FIE, por un período de diez (10) años.

Fuente: Ministerio de Energía y Minas, **Dirección General de Energía**, 24 calle 21-12, zona 12, Guatemala, Guatemala, C.A. www.mem.gob.gt

ANEXO 8. Ministerio de Energía y Minas
Dirección General de Energía, Centro de Información y Promoción de
Energías Renovables

Fundamentos para promocionar a las energías renovables

La Constitución Política de la República preceptúa que es obligación fundamental del Estado orientar la economía nacional para lograr la utilización de los recursos naturales, adoptando las medidas que sean necesarias para su aprovechamiento, en forma eficiente, así mismo, manifiesta que el desarrollo de los recursos energéticos renovables es de interés público. La política del Gobierno, a través del Ministerio de Energía y Minas, tiene como uno de sus objetivos fomentar el desarrollo de los recursos renovables en Guatemala, que permita a mediano y largo plazo, estabilizar los precios de la energía eléctrica y disminuir la contaminación ambiental.

Guatemala es un país que cuenta con una considerable cantidad de recursos renovables, los cuales a la fecha no han sido aprovechados intensamente. Tal afirmación se deriva del hecho que existiendo un potencial aprovechable de 5,000 MW en energía hidroeléctrica y de 1,000 MW energía geotérmica, solamente se utilizan el 13% (650.3 MW) y el 3% (29 MW), respectivamente.

Con la promulgación de la Ley General de Electricidad en 1996 se ha promovido la apertura del mercado eléctrico y como consecuencia de ello, la oferta de generación de energía eléctrica se ha incrementado. Sin embargo, la mayor parte de la generación que se ha adicionado proviene de centrales termoeléctricas que utilizan como combustibles derivados del petróleo y carbón mineral, debido a que su período de instalación y la inversión inicial es menor y la recuperación del capital es más rápida.

En el año 2004, en el sistema nacional interconectado, el 52.5% de la producción de energía eléctrica provino de centrales térmicas que utilizan derivados del petróleo y de carbón mineral; el 36.3% de centrales hidroeléctricas; el 8.4% de cogeneradores (ingenios azucareros) y el 2.8% de centrales geotérmicas.

Potencial de energía hidráulica

A continuación se presentan las oportunidades que existen para el desarrollo de proyectos hidroeléctricos en Guatemala. Estas oportunidades son viables, en virtud que Guatemala está ubicada en una zona tropical y subtropical. Cuenta con tres vertientes hidrográficas, la del Océano Pacífico, la del Golfo de México y la del Atlántico, en ellas existen 38 cuencas hidrográficas, que drenan sus aguas a los diferentes océanos, las mismas se presentan a continuación:

Figura 31. Hidrografía de Guatemala

VERTIENTE DEL ATLÁNTICO		
No.	Cuenca	Área (Km ²)
2.1	Grande de Zacapa	2,642.0
2.2	Motagua	12,670.0
2.3	Izabal – Río Dulce	2,712.0
2.4	Polochic	2,811.0
2.5	Cahabón	2,459.0
2.6	Sarstún	2,109.0
2.7	Mopán – Belice	4,910.0
2.8	Hondo	2,931.0
2.18	Moho	643.0
2.19	Temans	69.0
TOTAL		33,956.0

VERTIENTE DEL GOLFO DE MEXICO		
No.	Cuenca	Área (Km ²)
3.1	Cuilco	2,274.0
3.2	Selegua	1,535.0
3.3	Neltón	1,451.0
3.4	Pojom	813.0
3.5	Ixcán	2,085.0
3.6	Xaclbal	1,366.0
3.7	Salinas	12,150.0
3.8	Pasión	12,156.0
3.9	Usumacinta	2,638.0
3.10	San Pedro	14,335.0
TOTAL		50,803.0

VERTIENTE DEL PACÍFICO		
No.	Cuenca	Área (Km ²)
1.1	Coatán	270.0
1.2	Suchiate	1,054.0
1.3	Naranjo	1,273.0
1.4	Ocosito	2,035.0
1.5	Samalá	1,510.0
1.6	Sis – Ixcán	919.0
1.7	Nahualate	1,941.0
1.8	Atitlán	541.0
1.9	Madre vieja	1,007.0
1.10	Coyolate	1,648.0
1.11	Acomé	706.0
1.12	Achiguate	1,291.0
1.13	María linda	2,727.0
1.14	Paso Hindo	512.0
1.15	Los Esclavos	2,271.0
1.16	Paz	1,732.0
1.17	Ostúa - Güija	2,243.0
1.18	Olopa	310.0
TOTAL		23,990.0

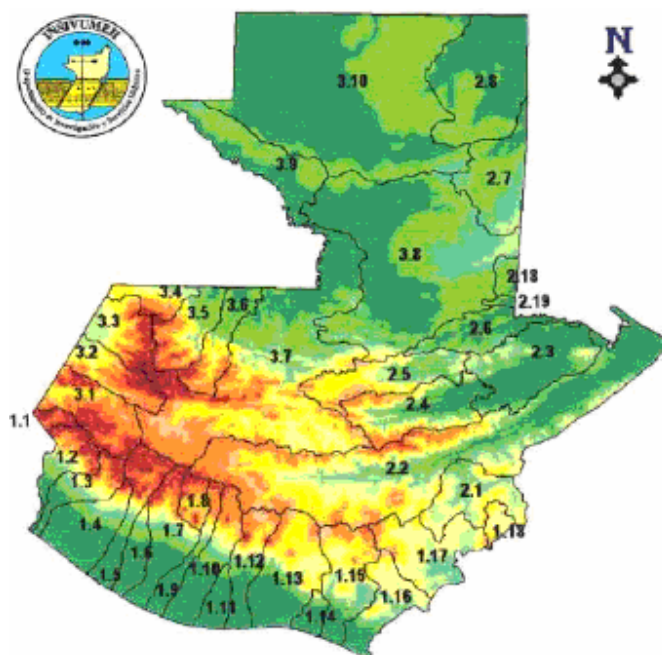


Tabla XII. **Proyectos hidroeléctricos en Guatemala**

RESUMEN DE PROYECTOS HIDROELÉCTRICOS				
No.	PROYECTOS	NÚMERO DE PROYECTOS	CAPACIDAD MW.	PRODUCCIÓN GWh/año
1	Menores de 5 MW	13	43.3	126.4
2	Entre 6 y 15 MW	28	288.7	1,028.1
3	Mayores de 16 MW	27	2,369.6	8,194.4
4	Entre 50 y 75 MW			
	Opción 1	4	262.2	1,099.0
	Opción 2	4	256.8	1,071.0
5	Mayores de 100 MW			
	Opción 1	3	905.0	3,474.0
	Opción 2	3	805.0	3,219.0
6	Cuenca Río Suchiate	12	78.2	645.5
7	Cuencas Río Naranjo	4	23.5	198.4
8	Proyectos con autorización definitiva	4	101.7	442.1
9	PCH's Registradas	9	30.7	
	Total opción 1	104	4,103	15,208
	Total opción 2	104	3,998	14,925

Fuente: Ministerio de Energía y Minas, Dirección General de Energía, **Centro de información y promoción de energías renovables**, 24 calle 21-12, zona 12, Guatemala. www.mem.gob.gt