



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

**DISEÑO DE BOMBA HIDRÁULICA DE PISTONES ACCIONADA
MEDIANTE PEDALEO, “BICIBOMBA”**

Victor Manuel Hernández Solís

Asesorado por el Ing. José Ismael Véliz Padilla

Guatemala, noviembre de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE BOMBA HIDRÁULICA DE PISTONES ACCIONADA
MEDIANTE PEDALEO, “BICIBOMBA”**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

VICTOR MANUEL HERNÁNDEZ SOLIS

ASESORADO POR EL ING. JOSÉ ISMAEL VÉLIZ PADILLA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

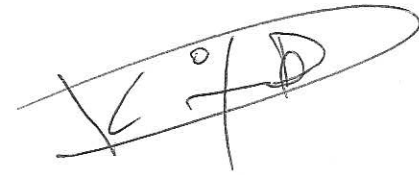
DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Carlos Enrique Chicol Cabrera
EXAMINADOR	Ing. Roberto Guzmán Ortiz
EXAMINADOR	Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

DISEÑO DE BOMBA HIDRÁULICA DE PISTONES ACCIONADA MEDIANTE PEDALEO, "BICIBOMBA"

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 7 de octubre de 2016.

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized letters and a large flourish, enclosed within an oval shape.

Victor Manuel Hernández Solís

Guatemala, 13 de septiembre de 2017

Ingeniero
Roberto Guzmán Ortiz
Director de Escuela de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Señor Director:

Por este medio me dirijo a usted, para informarle que he llevado a cabo la revisión del trabajo de graduación del estudiante **Víctor Manuel Hernández Solís**. El mismo, se identifica con No. de **DPI 2326 53860 0101** y registro académico **201020633**. Dicho trabajo lleva como título: **DISEÑO DE BOMBA HIDRÁULICA DE PISTONES ACCIONADA MEDIANTE PEDALEO, "BICIBOMBA"**.

Después de haber realizado todas las correcciones necesarias, el trabajo cumple con los requisitos exigidos por la Facultad de Ingeniería; por tanto, doy mi aprobación para que pueda continuar con los trámites correspondientes.

Agradeciendo su atención me suscribo de usted.

Atentamente,



Ing. José Ismael Véliz Padilla
Asesor de Trabajo de Graduación

JOSÉ ISMAEL VÉLIZ PADILLA
INGENIERO MECÁNICO
COLEGIADO 3646



USAC

TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.260.2017

El Coordinador del Área Complementaria de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE BOMBA HIDRÁULICA DE PISTONES ACCIONADA MEDIANTE PEDALEO, "BICIBOMBA"** desarrollado por el estudiante **Víctor Manuel Hernández Solís**, CUI **2326538600101**, Registro Académico **201020633** recomienda su aprobación.

"Id y Enseñad a Todos"

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



Guatemala, septiembre 2017

/aej



USAC

TRICENTENARIA

Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.317.2017

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y con la aprobación del Coordinador del Área Complementaria del trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE BOMBA HIDRÁULICA DE PISTONES ACCIONADA MEDIANTE PEDALEO, "BICIBOMBA"** del estudiante **Victor Manuel Hernández Solís**, CUI **2326538600101**, **Registro Académico 201020633** y luego de haberlo revisado en su totalidad, procede a la autorización del mismo.

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Roberto Guzmán Ortiz
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala noviembre de 2017

/aej

Universidad de San Carlos
De Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.550.2017

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE BOMBA HIRÁULICA DE PISTONES ACCIONADA MEDIANTE PEDALEO, "BICIBOMBA"**, presentado por el estudiante universitario: **Victor Manuel Hernández Solis**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, noviembre de 2017



/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Mis abuelos

Jessy Torres, Jesús Solís, Irma Anzueto y Cándido Hernández; quienes a pesar de las circunstancias de tiempo y distancia que nos separaron de forma temprana, representan la raíz esencial de mi formación y vida.

Mis padres

Cristina Solís y Víctor Hugo Hernández; pilares fundamentales de mi existencia y quienes representan mi ejemplo vivo de humildad, entrega y compromiso. Gracias por su amor y apoyo incondicional.

Mis hermanos

Anita, Carlos Francisco, Jose y Lucrecia Hernández; quienes con su ayuda y cariño han hecho posible la materialización de este sueño.

Mi mejor amiga

Compañera y amor de mi vida, María Fernanda Asturias, con quien tengo la dicha de compartir un destino común. Gracias por tu tiempo, esfuerzo, compañía, motivación y amor incondicional.

Mis amigos

Aquellos que vienen desde el colegio, los que tuve la fortuna de conocer durante mis estudios universitarios y mis espacios de recreación y formación personal. Gracias por su apoyo y cariño, por todas esas risas que alentaron día a día mi camino.

AGRADECIMIENTOS A:

**Facultad de Ingeniería -
Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por ser el *alma mater* de mi formación académica y guiarme en el ejercicio profesional en beneficio de la población guatemalteca.

**Ing. José Ismael Véliz
Padilla**

Por sus aportes y recomendaciones en la realización del presente trabajo.

Ing. Félix Aquino

Más que apoyo, su amistad y disposición de compartir, me han ayudado a complementar la formación académica con el ejercicio práctico y profesional. De esta forma, ha incidido positivamente y motivado en mi proceso de graduación y formación personal.

**Equipo de ACCSS y el
Centro de Capacitación
Ricardo Pérez Mira**

Por compartir la visión de necesidad de una aplicación de las ciencias sociales y exactas en comunidades históricamente excluidas de los procesos de desarrollo social, con el objetivo de incidir positivamente en su calidad de vida.

Mis hermanos

Quienes nunca me negaron su apoyo y ayuda, especialmente a Lucrecia por brindarme un espacio en el que no pude haber tenido mejores condiciones de trabajo y estudio.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XIII
GLOSARIO.....	XV
RESUMEN	XXIII
OBJETIVOS	XXV
INTRODUCCIÓN	XXVII
1. SITUACIÓN ACTUAL	1
1.1. Desarrollo en Guatemala	1
1.1.1. Diversidad del país y su desarrollo heterogéno.....	1
1.1.2. Contexto internacional: desarrollo humano en el país.....	3
1.1.3. Índices integrados de desarrollo humano, pobreza y desigualdad	5
1.1.4. Participación/ausencia del Estado.....	20
1.1.5. Transmisión intergeneracional de la pobreza y desigualdad	22
1.1.6. Contexto del sector rural	25
1.1.6.1. Dispersión de las comunidades rurales	25
1.1.6.2. Esquemas de organización rural	26
1.1.6.3. Composición étnica y lingüística.....	27
1.1.6.4. Servicios para la población rural.....	29
1.1.6.5. Problemas estructurales	32
1.1.6.6. Problemas de coyuntura.....	32
1.1.6.7. Análisis de la pobreza en el sector rural y gasto en energía	33

1.2.	Energía eléctrica.....	35
1.2.1.	Descripción general del sector.....	35
1.2.2.	Alcance de la electrificación rural	39
1.2.2.1.	Avance de la electrificación	39
1.2.2.2.	Cobertura eléctrica	42
1.2.2.3.	Impactos de la electrificación rural	44
1.2.3.	Características de las comunidades rurales pendientes de electrificar	50
1.2.3.1.	Áreas remotas con dificultad de acceso vial y a otros factores productivos.....	50
1.2.3.2.	Comunidades con menor densidad de población	51
1.2.3.3.	Dispersión en centros poblados rurales.....	52
1.2.3.4.	Cambios en el patrón migratorio.....	52
1.2.3.5.	Regiones de mayor vulnerabilidad.....	53
1.2.3.6.	Regiones conflictivas	55
1.2.4.	Zonas rurales aisladas.....	55
1.2.4.1.	Definición y tipificación.....	55
1.2.4.2.	Comunidades.....	56
1.2.4.3.	Demanda de energía	57
1.3.	Recurso hídrico	58
1.3.1.	Síntesis de la situación actual	59
1.3.1.1.	Agua, cobertura vegetal y uso de la tierra	60
1.3.1.2.	Demanda de agua	62
1.3.1.3.	Contaminación de los cuerpos de agua.....	64
1.3.1.4.	Incidencia de enfermedades de origen hídrico	65
1.3.1.5.	Dinámica de la institucionalidad pública	66
1.3.2.	Aspectos sociales de los servicios de agua y saneamiento ..	67
1.3.2.1.	Agua y salud.....	67

1.3.2.2.	Agua y educación	68
1.3.2.3.	Agua y género	69
1.3.2.4.	Agua y pobreza	70
1.3.2.5.	Costos incurridos por falta de una buena prestación	70
1.3.2.6.	Agua y cohesión social	73
1.3.2.7.	Agua y medio ambiente	74
1.3.2.8.	Agua y economía.....	74
2.	BICIMÁQUINAS.....	77
2.1.	Precedentes: mecanismos operados a mano	77
2.2.	Bicicleta y pedales: revolución en movimiento	84
2.3.	Eficiencia de la energía generada mediante pedaleo	88
2.4.	Bicimáquinas y sus aplicaciones a través del tiempo.....	90
3.	BOMBAS RECIPROCANTES.....	101
3.1.	Definición	101
3.2.	Aplicaciones y desventajas	103
3.3.	Clasificación	105
3.4.	Componentes del extremo líquido.....	106
3.4.1.	Empaquetaduras para bombas	107
3.4.2.	Material del émbolo	109
3.5.	Características del flujo	109
3.6.	Componentes del extremo de potencia.....	112
3.6.1.	Carga de aceleración	113
3.6.2.	Carga neta positiva de succión	115
3.7.	Criterios para las pruebas de la NPSH.....	117
3.8.	Carga del émbolo	119
3.9.	Eficiencia mecánica: bomba de potencia	120

3.10.	Eficiencia mecánica: bomba de acción directa	121
3.11.	Eficiencia volumétrica.....	122
3.12.	Sistemas de propulsores de bombas de potencia.....	124
3.13.	Diseño del sistema	124
3.14.	Descarga de la bomba	127
3.15.	Volumen de despejo.....	128
3.16.	Alta presión de succión	129
4.	BOMBAS RECIPROCANES DE PISTÓN.....	131
4.1.	Descripción.....	131
4.2.	Cálculo del caudal	132
4.3.	Rendimientos	133
4.3.1.	Rendimiento volumétrico	133
4.3.2.	Rendimiento hidráulico	134
4.3.3.	Rendimiento mecánico	135
4.3.4.	Rendimiento total.....	135
4.4.	Velocidades y aceleraciones	136
4.5.	Otras realizaciones de bombas recíprocas de pistón	138
4.5.1.	Émbolo buzo.....	138
4.5.2.	Multipistón	139
4.6.	Instalaciones de aspiración	140
4.7.	Instalaciones de impulsión	142
5.	DISEÑO Y DIMENSIONES DE LA BICIBOMBA.....	147
5.1.	Principio de operación	147
5.2.	Desarrollo de diseño y materiales a utilizar	156
5.3.	Materiales y presupuesto	178

6.	EVALUACIÓN DEL DISEÑO	183
6.1.	Rendimiento volumétrico	189
6.2.	Rendimiento hidráulico	190
6.3.	Rendimiento mecánico	190
6.4.	Rendimiento total	191
	CONCLUSIONES	193
	RECOMENDACIONES	195
	BIBLIOGRAFÍA	197

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Evolución del IDH de Guatemala en el contexto mundial, 1980-2011.....	4
2.	Tres magnitudes de la medición del desarrollo humano	6
3.	Evolución del IDH y sus componentes, 2000, 2006 y 2011	8
4.	Clasificación de los departamentos del país según su IDH.....	9
5.	Avances y retrocesos en el IDH y sus componentes por departamento, tasa promedio de variación anual, en porcentajes, 2006 – 2011	10
6.	Desigualdad en los componentes del IDH y pérdidas estimadas por desigualdad, 2000, 2006 y 2011	12
7.	Estratificación social y desarrollo humano.....	13
8.	Valor del IDH y sus componentes según área y etnicidad	14
9.	Desigualdad entre grupos y su peso en la desigualdad total, 2000 – 2011	15
10.	Población que sufre privaciones incluidas en el IPM, desagregadas por área y etnicidad, 2011	16
11.	Incidencia de la pobreza multidimensional en Guatemala según nivel de privaciones, área y etnicidad, en porcentajes, 2000 – 2011	17
12.	Pobreza multidimensional según departamento y cambios recientes, 2006 – 2011	19
13.	Gasto público social en países de la región, porcentaje del PIB	21
14.	IDE y municipios con mayoría indígena y rural	22
15.	Ratio de dependencia demográfica.....	23
16.	Grupos étnicos reconocidos en Guatemala.....	28
17.	Suministro de electricidad y agua, 2002 – 2013.....	37

18.	Generación de electricidad en Guatemala	38
19.	Mapa de cobertura eléctrica 2011 a nivel municipal	44
20.	Evolución de la intensidad energética, 1990 – 2009	46
21.	Consumo de energía per cápita, bep / habitante, 1990 – 2009	46
22.	Consumo de electricidad per cápita, 2002 – 2010	47
23.	Tendencia de las emisiones totales del país, en Gg de CO ₂ -eq; 1990 – 2005	49
24.	Mapa índice vial de Guatemala.....	51
25.	Incidencia y mortalidad infantil por enfermedades de origen hídrico	65
26.	Arado de Shantung	80
27.	Cadena sinfín de tablonces para bombeo	81
28.	Esquema del transporte del Obelisco de 1586	83
29.	Esmeril accionado mediante pedal, mecanismo arco – cuerda	85
30.	Sierra de banco, 1892.....	87
31.	Torno, 1875	88
32.	Chasis del Oxtrike, años 70	92
33.	Oxtrike en su versión de bicitaxi	93
34.	Desgranadora de maíz conectada a mecanismo de pedaleo	95
35.	Prototipo de Dynapod conectado a desgranadora de maíz	95
36.	Dynapod, prototipo.....	97
37.	Bomba de paletas	98
38.	Prototipo de bomba de pozo accionada por pedaleo	99
39.	Bomba de potencia	102
40.	Bomba de acción directa.....	103
41.	Clasificación de las bombas reciprocantes	106
42.	Esquema bomba de pistón	107
43.	Velocidades de flujo en bombas reciprocantes de acción directa de doble acción	110
44.	Curvas de flujo para bombas de potencia reciprocantes	111

45.	Carga de las válvulas influye en la $NPSH_R$	116
46.	Resultado de pruebas de NPSH en bomba de potencia tríplex	118
47.	Eficiencia mecánica de una bomba de acción directa	122
48.	Diseño adecuado para bombas reciprocantes	126
49.	Bomba de pistón de doble efecto.	132
50.	Cinemática del pistón	136
51.	Bomba reciprocante con émbolo buzo	138
52.	Bomba multipistón, pistones paralelos	139
53.	Bomba multipistón, pistones radiales	140
54.	Diagrama de equipo dosificador electromecánico con amortiguador de pulsaciones.....	143
55.	Volumen fluctuante en la cámara de aire, un pistón de simple efecto..	144
56.	Volumen en cámara de aire, tres pistones – simple efecto	145
57.	Esquema de bomba de émbolo de simple efecto.....	148
58.	Esquema de mecanismo biela-manivela	149
59.	Sistema biela-manivela-émbolo	150
60.	Carrera del pistón	151
61.	Mecanismo cadena-engranaje y su relación de velocidades	153
62.	Relaciones de velocidad en engranajes	154
63.	Tren de engranajes	155
64.	Multiplicadora que se utilizará en mecanismo accionante.....	157
65.	Manivela necesaria para mecanismo accionante	158
66.	Maza – eje en el extremo sujeto a la biela	159
67.	Maza – eje en el extremo guía del movimiento alternativo.....	160
68.	Cuerpo del émbolo	161
69.	Conjunto varilla – émbolo y unión a manivela	162
70.	Cilindro – émbolo y sus uniones.....	163
71.	Platina para soporte de mecanismo bombeante y carriles para extremo alternativo de la manivela.....	164

72.	Mecanismo bombeante.....	165
73.	Acondicionamiento de marco de bicicleta núm. 26	166
74.	Acondicionamiento de marco de bicicleta núm. 20	166
75.	Base	168
76.	Chasis bicibomba.....	170
77.	Alturas y medidas de referencia para chasis de bicibomba	171
78.	Mecanismo accionante	172
79.	Mecanismo accionante montando en el chasis, 1.....	173
80.	Mecanismo accionante montando en el chasis, 2.....	174
81.	Bicibomba y sus accesorios.....	176
82.	Diseño final de bicibomba	178
83.	Bicibomba – construcción final.....	183
84.	Cisterna 1 y la bicibomba antes de la instalación de prueba	184
85.	Válvula de pie de manguera de succión	185
86.	Instalación de cruces, con extremo de tapón roscado para cebar la bomba	186

TABLAS

I.	Indicadores de desarrollo humano de Guatemala, países y regiones seleccionadas, 2011	5
II.	Cobertura de agua y saneamiento, 2004	30
III.	Hogares por tipo de local de habitación particular, según el tipo de servicio de agua que dispone regularmente	31
IV.	Programas y proyectos de electrificación ejecutados por el INDE.....	39

V.	Cobertura plan de electrificación rural, comunidades electrificadas y usuarios atendidos al 31-01-2012	41
VI.	Índice de cobertura eléctrica 2011	43
VII.	Resumen de comunidades ZRA, por departamento y niveles de pobreza	57
VIII.	Indicadores – señal de la situación del recurso hídrico en Guatemala y su desempeño	59
IX.	Uso del suelo en las tierras forestales de muy alta, alta y media captación y regulación hidrológica, 2006	61
X.	Cobertura forestal en las tierras de muy alta, alta y media captación y regulación hidrológica, 2010.....	61
XI.	Intensidad de uso de la tierra en las TFCRH, 2003.....	62
XII.	Utilización del agua en Guatemala por grupo de actividades económicas y de consumo, en millones de m ³ , 2006 – 2010.....	63
XIII.	Mecanismos de conservación y manejo forestal sostenible en las TFCRH.....	66
XIV.	Variación de la velocidad en bombas de potencia	112
XV.	Valores de las constantes C y k	114
XVI.	Materiales de la bicibomba y su cotización	179
XVII.	Gastos de fabricación.....	181
XVIII.	Margen de utilidad.....	182
XIX.	Imprevistos con margen de utilidad.....	182
XX.	Imprevistos sin margen de utilidad	182

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Q	Caudal, gasto volumétrico
CO₂	Dióxido de carbono
Gg	Gigagramos
km	Kilómetros
kV	Kilovatios
psi (a)	Libras / pulgada cuadrada, atmosférica
psi (g)	Libras / pulgada cuadrada, manométrica
m³	Metros cúbicos
msnm	Metros sobre el nivel del mar
ml	Mililitros
mm	Milímetros
ft	Pie
%	Porcentaje
”	Pulgada
rpm	Revoluciones por minuto

GLOSARIO

Biela	En las máquinas, barra que sirve para transformar el movimiento de alternativo a rotativo, o viceversa. En una bicicleta, barra o palanca que une el pedal a la multiplicadora o plato.
Bomba de achique	Bomba utilizada para retirar el agua que entra a una embarcación en caso de incidentes o imprevistos.
Caballo de fuerza	Unidad de medida de potencia.
Cabestrante	Torno de eje vertical utilizado para mover grandes pesos por medio de un cable, con diferentes posibilidades de accionamiento.
Caudal	Flujo volumétrico; cantidad de fluido que discurre en determinado punto por unidad de tiempo.
Cavitación	Formación de burbujas de vapor o de gas en el seno de un líquido, causada por las variaciones que este experimenta en su presión.
Cigüeñal	Eje con codos que, mediante un juego de bielas, transforma el movimiento rotativo en alternativo o viceversa.

CNEE	Comisión Nacional de Energía Eléctrica.
Cojinete	Conjunto de piezas en que se apoya y gira el eje de un mecanismo.
Cotejo	Confrontación de algo con otras situaciones, comparaciones entre sus características.
Eje pedalier	Pieza de bicicleta que permite el movimiento rotativo y coordinado de las bielas/multiplicadora a través de los pedales.
Émbolo	Pieza que se mueve alternativamente en el interior de un cuerpo de bomba para comprimir un fluido.
Encovi	Encuesta Nacional de Condiciones de Vida.
Ergómetro	Máquina de ejercicio que permite medir la capacidad y el índice de trabajo físico en condición bajo control (ergometría).
Estratificado	Dispuesto en estratos; capas o niveles sociales.
Excentricidad	Distancia entre el centro geométrico de una pieza y su centro de giro.
GEI	Gases de efecto invernadero.

Hacinamiento	Condición social de no contar con suficiente espacio personal dentro de la vivienda, mínimo 2 m ² por persona.
Heterogeneidad	condición de mezcla de partes de diversa naturaleza en un todo.
Horquilla	Pieza en forma de Y, que suele sujetar otras piezas o hacerlas girar.
IARNA	Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente.
IDE	Índice de densidad del Estado.
IDH – H	Índice de desarrollo humano ajustado por desigualdad.
IDH	Índice de desarrollo humano.
IE	Índice de Electrificación.
INAB	Instituto Nacional de Bosques.
INDE	Instituto Nacional de Electrificación.
Intergeneracional	Que abarca diversas generaciones.
IPM	Índice de pobreza multidimensional.

kbep	Miles de barriles equivalentes de petróleo.
Leva	Excéntrica; pieza que gira alrededor de un punto.
MAGA	Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación.
Manivela	Manubrio.
MARN	Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales.
Media geométrica	Raíz enésima del producto de n números.
MEM	Ministerio de Energía y Minas.
Morbilidad	Proporción de personas que enferman en un sitio y tiempo determinado.
MSPAS	Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social.
Multiplicadora	Pieza de bicicleta que tiene el o los engranajes de accionamiento del mecanismo.
MVA	Megavoltio amperio.
NPSH	Carga neta positiva de succión.
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico.

PER	Programa de Electrificación Rural.
PIB	Producto Interno Bruto.
Piñón	Pieza de bicicleta que agrupa el o los engranajes conducido acoplado a la rueda trasera.
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.
Prensaestopas	Pieza metálica roscada con que se aprieta la estopa alrededor del vástago movable de un dispositivo, a fin de evitar la salida de líquidos o gases.
Prohibitivo	Inaccesible para la mayoría de población.
RASGUA	Red de Agua potable y Saneamiento de Guatemala.
Reivindicación	Reclamar o recuperar alguien lo que, por razón de dominio, cuasi dominio u otro motivo, le pertenece.
SEGEPLAN	Secretaría de Planificación y Programación de la Presidencia.
Tecnología apropiada	Innovación tecnológica adaptada a las necesidades y contextos de los individuos.
TFCRH	Tierras forestales de muy alta, alta y media captación y regulación hidrológica.

Tipificación	Ajuste de varias cosas semejantes a un tipo o norma común.
Torno	Máquina herramienta en la que la pieza se hace girar a altas velocidades sobre un eje de simetría, mientras se labra o maquina mediante buriles y otros accesorios.
Transición demográfica	Cambio de cantidad de población a través del tiempo.
Trinquete	Garfio que resbala sobre los dientes de una rueda, para impedir que esta vuelva hacia atrás.
USAID	<i>United States Agency for International Development.</i>
Uso consuntivo	Acerca del agua, se refiere al uso que por características del mismo proceso, presenta pérdidas volumétricas.
Uso no consuntivo	Acerca del agua, se refiere al uso que no presenta pérdidas volumétricas.
Vástago	Barra que sujeta al centro de una de las dos caras del émbolo; sirve para darle movimiento al mismo o transmitirlo a otra parte del mecanismo.

Viscosidad	Propiedad de los fluidos que caracteriza su resistencia a fluir, debida al rozamiento entre sus moléculas.
watt	Unidad de medida de potencia.
Zona de recarga hídrica	Área donde el agua de lluvia se incorpora de forma natural, a las fuentes subterráneas.
ZRA	Zonas rurales aisladas.

RESUMEN

Mediante una revisión bibliográfica pertinente, se muestra un panorama general que revela a grandes rasgos la situación de los servicios de energía eléctrica y el recurso hídrico en el país. Se abordan aspectos sobre su generación, obtención, transporte, así como el alcance y la cobertura que ha tenido en la totalidad del territorio guatemalteco; a la vez, se contrasta con las implicaciones sociales que conlleva dicho contexto. Se pueden constatar deficiencias y carencias aún existentes en infraestructura de energía eléctrica y agua potable – saneamiento; y evidenciar dificultades junto a situaciones adversas que han impedido el fácil acceso por parte de comunidades rurales y en situación de pobreza, a estos recursos fundamentales para la calidad de vida.

Se presentan los fundamentos de dos aplicaciones ingenieriles: la primera consiste en el mecanismo de pedaleo; la bicicleta es su aplicación básica y más importante. Se muestran diversas máquinas y herramientas accionadas por pedaleo que evidencian la potencialidad de esta tecnología apropiada para la resolución de problemáticas sociales. La segunda aplicación es la bomba hidráulica de pistones, y se describe su forma de operación y componentes principales. Ambos fundamentos permitieron determinar las características necesarias para el planteamiento principal del presente trabajo, en el que se diseñó y construyó una bomba hidráulica de pistones capaz de funcionar mediante pedaleo.

Se realizaron los análisis mecánicos e hidráulicos necesarios para evaluar previamente el funcionamiento de la bomba. Posteriormente se construyó e instaló para su utilización en el Centro de Capacitación “Ricardo Pérez Mira”,

ubicado en la comunidad de Nueva Jerusalén, municipio de Ixcán, departamento de Quiché. Dicho proyecto fue respaldado por la Asociación Coordinadora Comunitaria de Servicios para la Salud, ACCSS, así como el taller de Construcción y Reconstrucción de Equipo Agrícola e Industrial CREA. Ambos brindaron su apoyo y asesoramiento para el proceso de diseño, construcción, e instalación de la bicibomba.

OBJETIVOS

General

Proponer el diseño de una bomba hidráulica de pistones accionada mediante pedaleo.

Específicos

1. Establecer las condiciones de necesidad energética eléctrica residencial, prioritarias principalmente en la población rural guatemalteca y de escasos recursos.
2. Establecer las condiciones de carencia y escasez de recurso hídrico, principalmente en población rural y de escasos recursos.
3. Describir la evolución ingenieril de los mecanismos accionados mediante pedaleo y su aplicación para la generación de máquinas herramientas.
4. Establecer los parámetros de construcción y funcionamiento de una bomba de pistones.
5. Plantear el diseño del mecanismo principal de una bomba hidráulica de pistones accionada por pedaleo.
6. Realizar los análisis hidráulicos correspondientes para evaluar la funcionalidad de operación de la bicibomba.

INTRODUCCIÓN

A través de su historia y evolución, el ser humano ha sido capaz de satisfacer sus necesidades básicas a través de la implementación de máquinas-herramientas que facilitan y aumentan la eficiencia de diversos procesos para la obtención y manipulación de recursos naturales y minerales. Una de las necesidades indispensables para éste, sin duda alguna es el recurso hídrico para consumo, así como otras aplicaciones como de limpieza e higiene, riego de cultivos o procesos industriales y de manufactura.

La débil institucionalidad existente para la gestión integrada e integral del recurso hídrico en el país, su sobreexplotación y manejo inadecuado, generan grandes limitaciones y dificultades en la obtención y distribución equitativa de agua para la población. Junto con otra serie de limitaciones, como la inexistencia de infraestructura eléctrica que cubra todo el territorio nacional, generan escasez, desperdicio y contaminación de la misma. En Guatemala, así como en la mayoría de países en vía de desarrollo, quienes padecen principalmente de estas consecuencias son las poblaciones más alejadas de áreas urbanas; es decir, las que habitan en zonas rurales, donde se carece de planificaciones estratégicas por parte del Estado y de las mismas comunidades u otras entidades, para aprovechar y distribuir de forma sustentable el recurso hídrico existente.

Sin duda alguna la energía eléctrica y otras fuentes de energía, principalmente las derivadas de combustibles fósiles, proveen alguna facilidad para la operación de máquinas que transforman esta energía para trasladar un volumen de agua de un lugar a otro. Las bombas hidráulicas accionadas por

motores eléctricos o de combustión interna han sido los principales medios para la obtención y distribución de agua. Es por ello que existen limitaciones en las comunidades que no tienen acceso a estos recursos o resultan inaccesibles por su capacidad económica. Por lo tanto, para este sector resultaría de beneficio una bomba hidráulica que no requiera un proceso complicado de ensamblaje, que pueda ser fabricada en la comunidad, y sea de mantenimiento sencillo y una operación en la que no se requiera energía eléctrica o de un motor de combustión interna.

Está demostrado que el aumento de eficiencia con la que se provee agua a una población incide positivamente en su calidad de vida, ya que el acceso a este servicio fundamental garantiza aspectos indispensables para el desarrollo personal y social, como la alimentación, la higiene, el acceso a oportunidades e igualdad de género: de tal cuenta surge la necesidad de la bicibomba.

1. SITUACIÓN ACTUAL

1.1. Desarrollo en Guatemala

1.1.1. Diversidad del país y su desarrollo heterogéneo

Guatemala cuenta con una amplia diversidad en los aspectos humano, geológico y biológico, aún con su territorio relativamente pequeño; dentro del mismo se encuentran catorce zonas de vida en altitudes que van desde el nivel del mar, hasta los 4 200 msnm. Hasta el año 2012, según proyecciones del Instituto Nacional de Estadística, habitaban alrededor de quince millones de personas; dos de cada cinco se autoidentificaron como pertenecientes a alguno de los pueblos indígenas del país.

Esta diversidad se ve acentuada por las condiciones de desigualdad históricas, y que han fragmentado al país en varios niveles de desarrollo económico-social. A su vez, se han creado dinámicas de inclusión/exclusión entre estos niveles, que mueven las relaciones sociales y culturales entre ellos y va más allá de las estratificaciones por el nivel de ingreso. Así, el funcionamiento del conjunto social se ve marcado por esta hendidura étnico-cultural que se hace más visible a medida que las relaciones interétnicas se alimentan del racismo, discriminación, desconfianzas y rencores históricos.

No es el objetivo de dicho trabajo analizar las condiciones históricas que han dado lugar a la situación actual. Sin embargo, es importante mencionar brevemente el mismo proceso histórico, ya que es de utilidad para entender la realidad nacional y proponer soluciones que puedan abordar los problemas estructurales más allá de abordar las situaciones coyunturales de algún período de tiempo específico. La sociedad guatemalteca ha vivido una serie de

dificultades y contradicciones luego de sufrir varios siglos de coloniaje y una serie de revoluciones democráticas incompletas o fallidas. La última y con más alcance e impacto positivo en la población fue la ocurrida en el periodo de 1944 a 1954. Como resultado de la extrema desigualdad y la incapacidad para establecer mecanismos democráticos que aportaran a la resolución de conflictos que esto genera, ocurrió un prolongado conflicto armado que costó miles de vidas. A su vez, generó una debilidad institucional del estado y profundas heridas en el tejido social.

Luego de varias décadas de dictaduras militares y a raíz de una profunda crisis político-económica, se realizaron en 1985 las primeras elecciones democráticas. En 1996 se firmó el Acuerdo de Paz Firme y Duradera, donde se establecieron compromisos para abordar las causas estructurales del conflicto armado. En el año 2000, Guatemala se suscribe a la Declaración del Milenio, donde la mayoría de países del mundo se comprometió a dirigir sus esfuerzos para promover el desarrollo y el combate a la pobreza. Hasta ahora, los avances en desarrollo humano son insuficientes: la pobreza agobia a una parte importante de la población y la brecha de la desigualdad no ha dejado de ampliarse. La debilidad institucional y las heridas en el tejido social antes mencionadas no han permitido abordar de forma efectiva los compromisos suscritos en los Acuerdos de Paz.

El Índice de Desarrollo Humano (IDH), se propuso originalmente como una alternativa a las medidas de desarrollo basadas en el desempeño macroeconómico, así como el producto interno bruto PIB, o el ingreso nacional per cápita. Su metodología más reciente cuenta con alta precisión y comparabilidad, además de permitir evaluar la desigualdad y heterogeneidad entre las distintas dimensiones del índice; el mismo indica que si bien son múltiples los aspectos que componen el desarrollo humano, es necesario recurrir

a medidas sintéticas que permitan “tomar la temperatura” de la situación. El IDH considera dimensiones consideradas como medibles, actualizables, comparables y con información asequible en la mayoría de países del mundo; fue diseñado de forma que satisfaga una serie de requerimientos técnicos y que fuera evaluable periódica y continuamente. Las dimensiones son:

- Longevidad: expresa el estado de salud en general de una sociedad.
- Nivel educativo: relacionado con la oportunidad de adquirir conocimientos, habilidades y destrezas.
- Nivel de vida: asociado a las condiciones materiales para lograr bienestar.

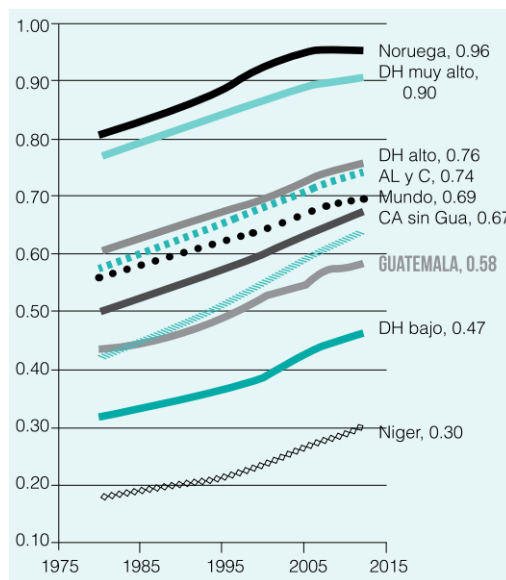
1.1.2. Contexto internacional: desarrollo humano en el país

A pesar de que se observa en el mundo un avance significativo en desarrollo humano, este no ha sido equitativo. Hay más de mil millones de personas que padecen de hambre y viven generalmente en países con alta conflictividad. Además, es notable el persistente deterioro ambiental que pone en riesgo la sostenibilidad de los ecosistemas y recursos naturales que se demandan. En el caso de Guatemala se muestra que su IDH ha mejorado un 34% entre 1980 y 2011; este resultado, a pesar de ser significativo, no ha sido suficiente para sacar al país de la posición más baja en la escala de países hispanoamericanos. Como se observa en la figura 1, el ritmo de crecimiento del IDH guatemalteco es mayor que el de otros países y regiones. La tasa promedio es de 0.95%, mayor que el promedio mundial de 0.65% y que el promedio latinoamericano, 0.73%.

A pesar del relativamente rápido progreso, estas cifras se explican por el inicio cargado de conflictos y contradicciones sociopolíticas que condujeron al país al sótano regional desde mucho antes de 1980. En la tabla I se puede corroborar que a pesar de que los logros en materia educativa fueron

proporcionalmente más amplios, no se llega al promedio regional. De esta forma, Guatemala posee el menor promedio de escolaridad en adultos entre los países hispanoamericanos; este indicador se complementa con la *escolaridad esperada*, la cual indica la cantidad de años de educación que esperaríamos recibir un niño que ingresa al sistema educativo y se mantienen los patrones actuales de cobertura. Nuevamente, al comparar con el resto de países, es el más bajo de la región, a pesar de su incremento de 6 a 10.6 años para 2011.

Figura 1. **Evolución del IDH de Guatemala en el contexto mundial, 1980 - 2011**



Fuente: *Sinopsis del desarrollo humano en Guatemala PNUD 2014*.

En el aspecto de *nivel de vida*, es donde menos avance pudo evidenciarse. Este se calcula a partir del ingreso nacional bruto per cápita. En términos reales, el incremento promedio anual fue apenas 0.2%, en una época caracterizada por una profunda crisis sociopolítica, la abrupta caída de la producción e ingresos, grandes desequilibrios macroeconómicos y una asfixiante deuda externa en toda la región. Dentro de esta coyuntura, las crisis financieras internacionales y los altibajos de los precios de productos de exportación contribuyeron a desacelerar

la economía guatemalteca: esto dejó como saldo un bajo dinamismo y círculos viciosos que fortalecen las desigualdades, a las mafias y mercados ilegales. De esta forma, existe un estrecho margen para el trabajo decente que propicia un latente sector informal, con pocas oportunidades para el crecimiento en pro del desarrollo humano individual y colectivo.

Tabla I. **Indicadores de desarrollo humano de Guatemala, países y regiones seleccionadas, 2011**

	IDH	Clasificación (de 187 países)	IDH social	Esperanza de vida al nacer (años)	Escolaridad promedio (años)	Escolaridad esperada (años)	Ingreso Nacional Bruto per cápita (\$PPA)	Diferencial INB-IDH
Países de Centroamérica:								
Costa Rica	0.744	69	0.785	79.3	8.3	11.7	10,497	4
El Salvador	0.674	105	0.724	72.2	7.5	12.1	5,925	-4
Honduras	0.625	121	0.694	73.1	6.5	11.4	3,443	4
Nicaragua	0.589	129	0.669	74	5.8	10.8	2,430	10
Guatemala	0.574	131	0.595	71.2	4.1	10.6	4,167	-14
América Latina y el Caribe	0.731	n. a.	0.767	74.4	7.8	13.6	10,119	n. a.
Mundo	0.682	n. a.	0.683	69.8	7.4	11.3	10,082	n. a.
Países según su nivel de desarrollo humano:								
DH muy alto	0.889	n. a.	0.918	80	11.3	15.9	33,352	n. a.
DH alto	0.741	n. a.	0.769	73.1	8.5	13.6	11,579	n. a.
DH medio	0.63	n. a.	0.658	69.7	6.3	11.2	5,276	n. a.
DH bajo	0.456	n. a.	0.478	58.7	4.2	8.3	1,585	n. a.

Fuente: *Informe Nacional de Desarrollo Humano 2011/2012.*

1.1.3. Índices integrados de desarrollo humano, pobreza y desigualdad

La definición de desarrollo humano ha sido objeto de amplias discusiones. El resultado es un paradigma normativo que supone no solo la ampliación de las capacidades humanas, sino también su distribución equitativa. En dicho contexto, la acumulación de estos resultados por parte de élites político-económicas, así como la misma situación de pobreza definida como la negación de estas capacidades, son consideradas dinámicas injustas. En la figura 2 se puede observar cómo los avances en el IDH, la desigualdad y la pobreza son fenómenos resultantes del mismo proceso, por lo que deben ser analizados conjuntamente.

El IDH muestra la tendencia promedio de los avances en una sociedad; sin embargo, no evidencia la forma en que se distribuyen los mismos. Generalmente, dichos logros resultan en beneficio de solamente una pequeña parte de la población; como resultado, se han estructurado sociedades estratificadas en las que las capas superiores poseen un alto bienestar y acceso al poder, mientras que las inferiores están en una constante lucha por sobrevivir en condiciones de pobreza y desigualdad.

Figura 2. **Tres magnitudes de la medición del desarrollo humano**



Fuente: <http://bit.ly/2vdu110>. Consulta: septiembre 2017.

De tal cuenta, resulta necesario no solamente evaluar los avances, sino también quiénes han sido incluidos o excluidos de dichos procesos: en otras palabras, evaluar el grado de desigualdad en el desarrollo humano. Esta ha definido estratos socioeconómicos, que se acentúan con las diferencias entre diversos grupos y genera exclusión en base a la condición étnica, de género o preferencias en general, e instituye como prácticas sociales comunes el racismo, sexismo e intolerancia.

A continuación, se realizará un breve análisis del estado del desarrollo humano en el país, tomando en cuenta los aspectos de logros, privaciones y

desigualdad, los cuales están estrechamente relacionados con los procesos de inclusión-exclusión. Las magnitudes para realizar dicho análisis resultan de la metodología establecida para los IDH, ajustada para evaluar tres magnitudes:

- Logros en desarrollo humano: índice de desarrollo humano.
- Desigualdad: IDH ajustado por desigualdad y comparaciones entre grupos.
- Pobreza multidimensional: privaciones en las dimensiones del IDH.

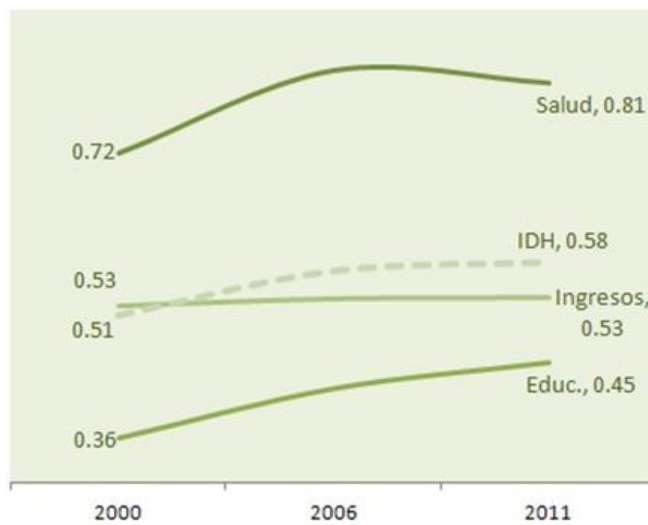
Los índices de las tres magnitudes fueron calculados con las mismas variables, y están basados en datos de la Encuesta Nacional de Condiciones de Vida, Encovi, realizadas por el Instituto Nacional de Estadística en los años 2000, 2006 y 2011. Así se establece el conjunto de variables representativas de las tres dimensiones del IDH:

- Salud: cobertura de servicios ya sea seguro o afiliación, y condiciones del hogar que inciden en la misma: hacinamiento, piso de tierra, acceso a agua y servicio sanitario.
- Educación: escolaridad alcanzada de adultos y esperanza educativa en niños y jóvenes.
- Nivel de vida: ingreso familiar agregado, laboral y no laboral.

Si se utiliza como referencia la información de las Encovi del periodo 2000 – 2011, puede observarse una mejora en el IDH que representa un incremento anual de 0.9 %, como se observa en la figura 3. Al evaluar los subíndices, se encuentra un incremento en el promedio anual de 2% en educación, que refleja ciertas mejoras en la escolaridad en adultos, esperanza educativa de niños y jóvenes, así como ampliación en la cobertura del servicio.

En contraste, en materia de salud se pudo observar una reducción de 0.4% anual en la segunda mitad del período evaluado; se evidencia que las condiciones del hogar en materia de saneamiento, acceso a agua potable y servicios de salud, se deterioraron en ese lapso. Además de sufrir las consecuencias de la crisis económica, dichas condiciones se vieron afectadas por los eventos climatológicos que impactaron al país, principalmente en cuanto a condiciones de vivienda.

Figura 3. **Evolución del IDH y sus componentes; 2000, 2006 y 2011**



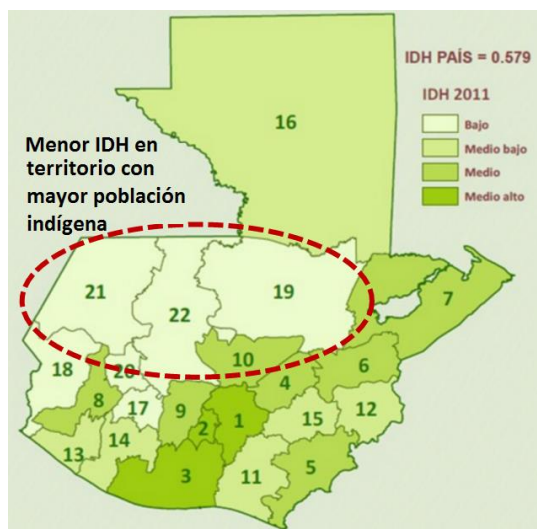
Fuente: <http://bit.ly/2g6oBoE>. Consulta: septiembre 2017.

Por su parte, el subíndice condiciones de vida no sufrió cambio alguno en dicho período, lo que demuestra un estancamiento en el valor real promedio en los ingresos de los hogares. El IDH resultante es la media geométrica de los subíndices, y le da el peso correspondiente a la heterogeneidad entre los componentes del índice: las poblaciones que logren procesos desiguales en diferentes dimensiones tendrán un menor índice.

Cuando se hace el análisis a nivel departamental, los valores de IDH tienen un amplio rango de variación. Se mantiene la tendencia de división del territorio

en dos regiones con distinto nivel de inclusión; documentada en diferentes ámbitos y distintos indicadores socioeconómicos. Al observar la figura 4, se puede notar que los departamentos ubicados en la región noroccidental tienen valores menores en IDH; lo que coincide con los departamentos donde habita la mayoría de población indígena del país. Es de notar que en la última mitad del período evaluado han existido algunas mejoras de forma desigual en IDH y en sus componentes. El incremento anual del mismo no fue homogéneo, se mostró estancamientos en Guatemala y Sacatepéquez, así como avances más significativos en Sololá, Totonicapán y Quiché.

Figura 4. **Clasificación de los departamentos del país según su IDH**

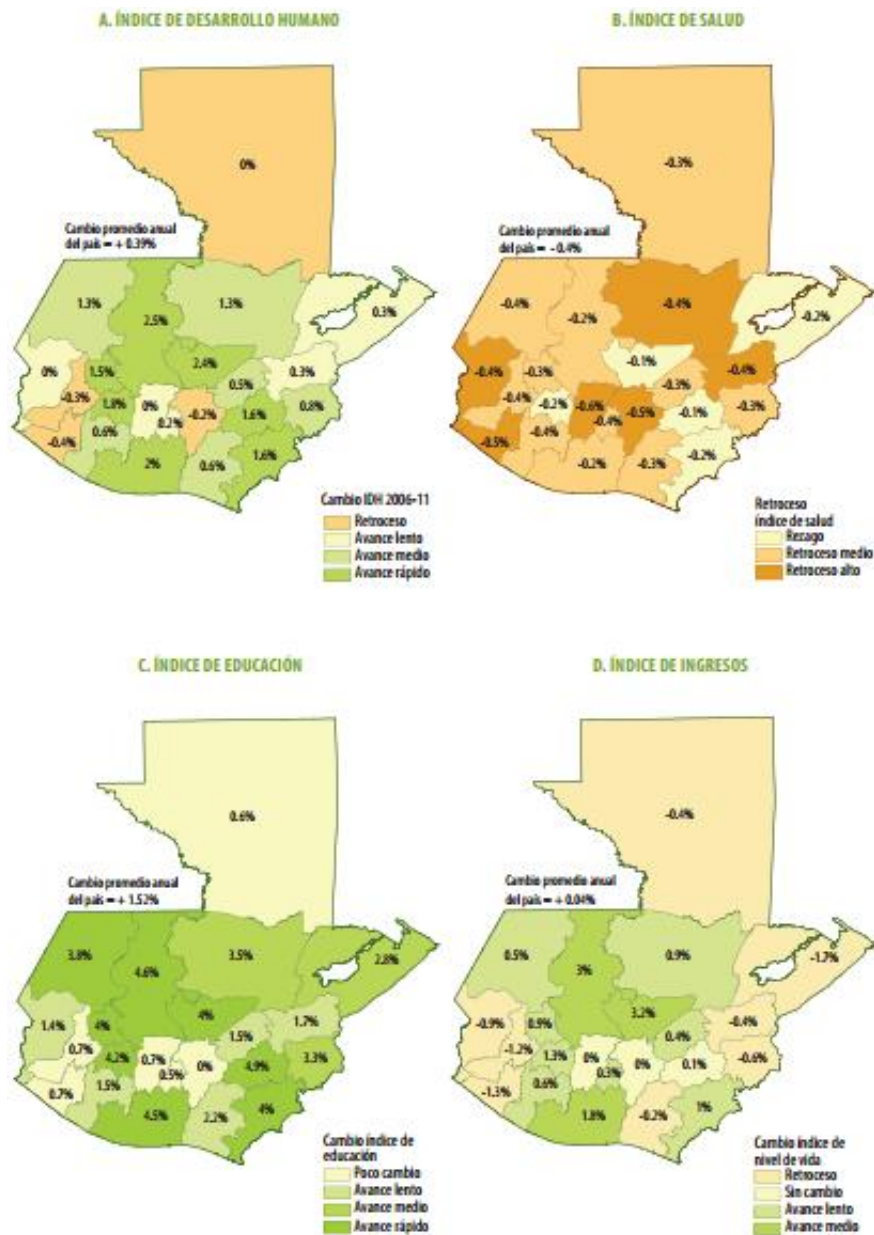


Fuente: <http://bit.ly/2wssISD>. Consulta: septiembre 2017.

Se pueden observar en la figura 5, los rezagos explicados por la precarización en condiciones habitacionales y de salud, que fue generalizada en el país. En dicho período se sufrieron las consecuencias de eventos naturales que generaron emergencias y desastres en diversas comunidades, principalmente rurales. En el ingreso familiar promedio se nota un cambio más heterogéneo, y hay tanto reducciones como se observan en Quetzaltenango y Retalhuleu, como incrementos en Quiché, Baja Verapaz y Escuintla. Por último,

en la mayoría de departamentos se observaron transformaciones positivas, lo que contribuyó a reducir las brechas territoriales del IDH agregado.

Figura 5. Avances y retrocesos en el IDH y sus componentes por departamento, tasa promedio de variación anual, en porcentajes, 2006 – 2011



Fuente: <http://bit.ly/2iuMeYD>. Consulta: septiembre 2017.

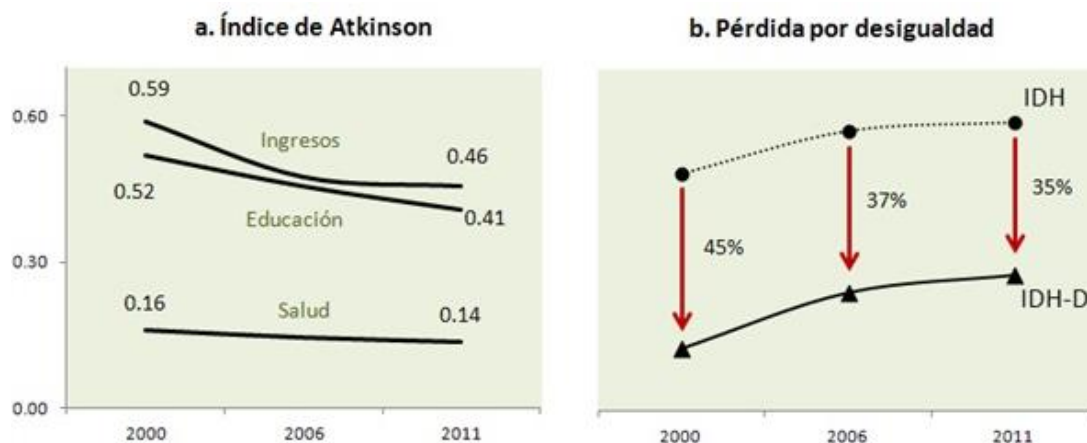
El paradigma del desarrollo humano ha surgido de la interrogante sobre qué son y cómo lograr arreglos sociales justos. A pesar de los extensos debates sobre lo que puede ser demandable a la justicia o si existe la posibilidad de la igualdad en un mundo heterogéneo, se ha determinado una injusticia fundamental en determinados tipos de desigualdad económica o sociopolítica. En 1998, Ray D. definió la existencia de objeciones funcionales a la desigualdad más allá de discusiones éticas, ya que esta alimenta los círculos viciosos que transmiten generacionalmente la pobreza e incrementan el grado de conflictividad social. El concepto de desarrollo humano va más allá de resultados medidos en términos de bienestar material o avances tecnológicos. Representa entonces un arreglo social justo, aquel que pueda brindar oportunidades a todos los ciudadanos.

A continuación, se analizará brevemente la heterogeneidad de la distribución de las dimensiones de los indicadores de desarrollo humano. Ya se mencionó la reducción de las brechas departamentales a pesar de la persistencia de la desigualdad, y se redujeron los índices de esta en los diferentes ámbitos del bienestar. Por ejemplo: el coeficiente de Gini muestra la diferencia existente en una distribución respecto a una igualdad perfecta; su valor oscila entre 0, que representaría dicha igualdad, y 1, determinaría concentración de todos los recursos en una persona. Este coeficiente evaluado en los ingresos familiares per cápita, se redujo de 0.62 a 0.57 en el período evaluado.

Otro índice posible de mencionar es el de Atkinson, el cual está basado en el análisis de las funciones de bienestar social; puede especificarse en un parámetro para hacerlo más sensible a la desigualdad que afecta a los más pobres. Tiene también la ventaja de permitir la *pérdida de bienestar* debida a la desigualdad. Al añadir esta propiedad al cálculo del IDH, se obtiene el Índice de Desarrollo Ajustado por Desigualdad, IDH-D; la diferencia entre estas dos es interpretada como la pérdida en desarrollo humano, debida a la desigualdad. En

la figura 6 se muestra cómo evolucionaron los índices de Atkinson en los tres componentes del IDH para Guatemala. Al aplicar dichos índices para efectuar el cálculo del IDH-D, se puede observar que en 2011 la pérdida es de 35% en el IDH debida a desigualdad: aunque es menor al registro del año 2000, aún evidencia la severidad con la que afecta al país. En dicha figura puede verse también que las mayores pérdidas ocurren en nivel de vida y educación.

Figura 6. **Desigualdad en los componentes del IDH y pérdidas estimadas por desigualdad; 2000, 2006 y 2011**

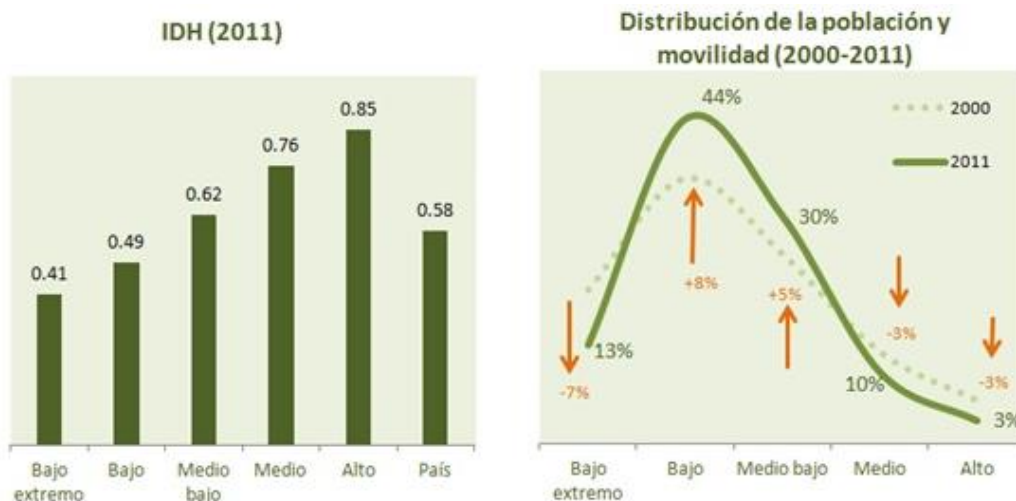


Fuente: <http://bit.ly/2g6oBoE>. Consulta: septiembre 2017.

Como se ha mencionado, las desigualdades tienen raíces en la estratificación socioeconómica que ha resultado del proceso histórico del país y sus dinámicas tanto internas como externas. La amplitud de dichas desigualdades se ve reflejada en los niveles de desarrollo humano: de forma que los valores más altos de IDH corresponden al sector más alto en la estratificación y cae abruptamente en los sectores más bajos. Así, es posible observar en la figura 7 que el valor para la población más pobre y numerosa (más del 50%), es menos de la mitad que para los estratos altos que representan el 13% de la población.

En la otra parte de la gráfica se compara la distribución en estratos para dos momentos de la historia: 2000 y 2011. Dicha comparación no corresponde a un estudio longitudinal que permita la descripción de la movilidad social; sin embargo, la recomposición de la distribución sugiere la posibilidad de un movimiento ascendente desde el estrato bajo extremo y descendente en los alto y medio. Como resultado de dicha movilidad se aprecia un incremento en la población que se ubica en los estratos bajo y medio bajo, lo cual es congruente con la reducción de la pobreza extrema, incremento de la media para ambos años y la reducción relativa de la desigualdad.

Figura 7. **Estratificación social y desarrollo humano**



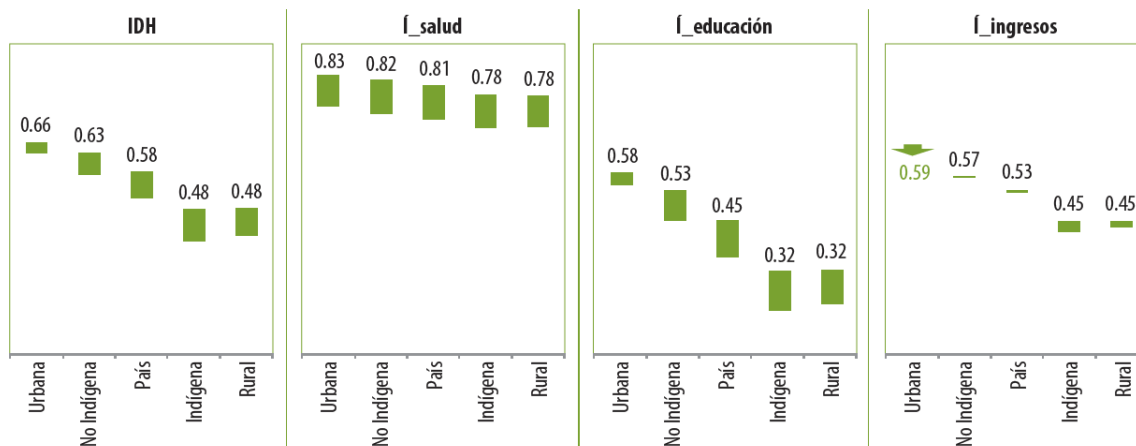
Fuente: <http://bit.ly/2g6oBoE>. Consulta: septiembre 2017.

Cuando se hace una comparación por grupos sociales, se puede evidenciar que ha habido unos más afectados por la pobreza y desigualdad, como la población rural e indígena. En la figura 8 puede observarse que el IDH de la población urbana y no indígena es, en promedio, bastante más alto que para la población rural e indígena, fenómeno observado también en sus diferentes componentes. La longitud de las barras describe el cambio en el valor del IDH durante el período

analizado. Contradictoriamente, la mayor desigualdad se encuentra en educación, que es donde se ha reducido la brecha en mayor medida.

Mediante la propiedad de descomponibilidad en grupos del Índice de Desigualdad de Theil, es posible estimar el peso que tiene la desigualdad entre grupos específicos, sobre la desigualdad total. De esta forma es posible calcular la proporción de desigualdad que es explicada por esa desigualdad entre grupos, en particular, entre las áreas urbana-rural y poblaciones indígenas-no indígenas, así como entre departamentos. Como resultado, en la figura 9 se observa que el 13% de las desigualdades en el IDH se explica por la desigualdad entre población urbano y rural, el 11% por diferencias territoriales y el 8% por diferencias étnicas. Los porcentajes no pueden ser sumados entre sí, ya que existen intersecciones entre los grupos representados.

Figura 8. Valor del IDH y sus componentes según área y etnicidad

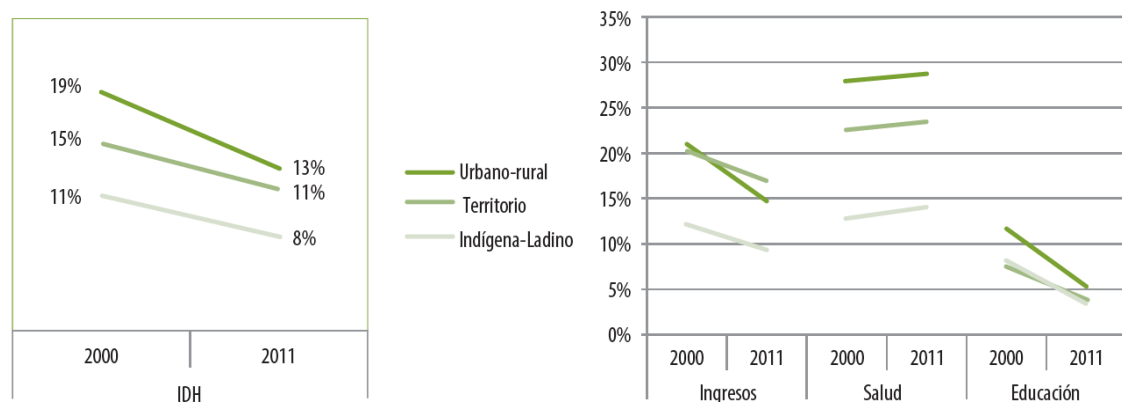


Fuente: Informe Nacional de Desarrollo Humano 2011/2012.

Más allá de darle un sentido económico, la pobreza se ha comprendido como un fenómeno multifacético y con distintos niveles. Como resultado, las mediciones de pobreza basadas en los ingresos o en el consumo son insuficientes para realizar un análisis más completo e integral. Entonces, al

abordarla desde un enfoque de desarrollo humano, puede entenderse como la privación de capacidades humanas para alcanzar el bienestar; en otras palabras, limitaciones en la capacidad para funcionar. Dado que las capacidades son múltiples y diversas, la pobreza de capacidad puede medirse de forma más aproximada por medio de indicadores multidimensionales.

Figura 9. **Desigualdad entre grupos y su peso en la desigualdad total, 2000 – 2011**



Fuente: *Informe Nacional de Desarrollo Humano 2011/2012*.

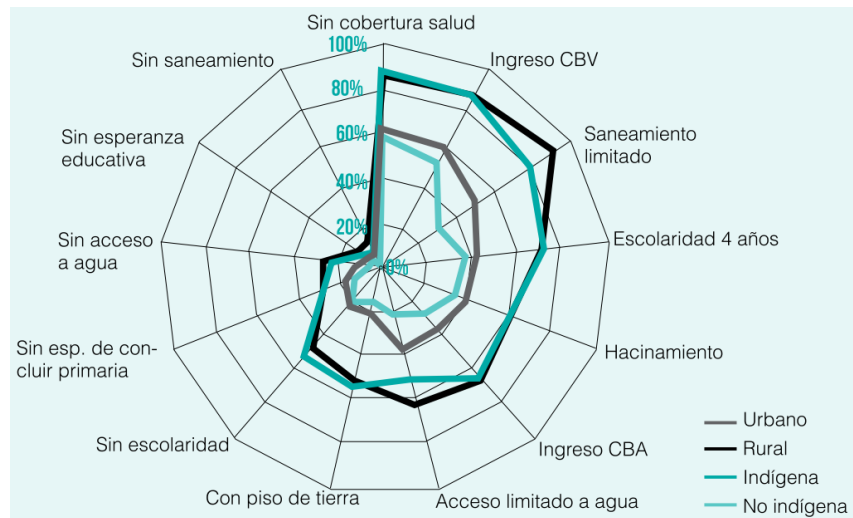
El Índice de Pobreza Multidimensional IPM, que se presenta en el informe del Índice de Desarrollo Humano, puede interpretarse como una extensión del cálculo tanto del IDH como del IDH-D. Dicho índice se mide en las mismas dimensiones y variables, las cuales se describen como:

- **Salud:** esta dimensión refleja la falta de cobertura de servicios de salud; la afiliación a un seguro privado o al Seguro Social; condiciones de hacinamiento y viviendas con piso de tierra; así como las limitaciones o falta de acceso a agua y saneamiento dentro de las viviendas.

- Educación: sus indicadores específicos incluyen la escolaridad alcanzada por adultos menor a cinco años; y la esperanza educativa menor al nivel primario en niños y jóvenes.
- Ingresos: evidencia la situación en que el ingreso familiar resulta menor que el costo aproximado de la canasta básica de alimentos, bienes y servicios básicos.

En la figura 10 puede observarse la información desagregada de privaciones por área geográfica y por etnicidad. Las desigualdades reflejadas en el IDH también se expresan en términos de pobreza. Como se observa, la incidencia de privaciones es más severa en las poblaciones rurales e indígenas, en todos los indicadores analizados.

Figura 10. **Población que sufre privaciones incluidas en el IPM, desagregadas por área y etnicidad, 2011**



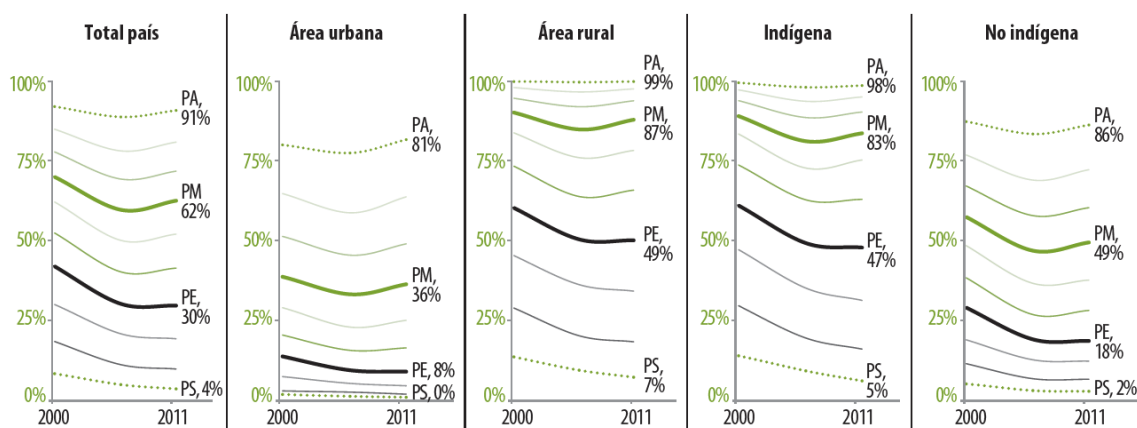
Fuente: *Sinopsis del desarrollo humano en Guatemala PNUD 2014*.

Al 2011, a pesar de evidenciarse algunas mejoras en el saneamiento, escolaridad de adultos y hacinamiento de hogares respecto al 2000, aún existían

privaciones en dichos aspectos que afectaban a más de la mitad de la población. El porcentaje de habitantes en el área rural e indígenas que no alcanzaba a cubrir la canasta básica con los ingresos que tenía; se mostraba superior a 80%. Se puede notar también que un 10% de los menores de edad en el área rural habían quedado fuera del sistema educativo; el 30% de los niños y jóvenes de esta área no alcanzaban a terminar la primaria, y casi un 50% de los adultos no tenía escolaridad. En el ámbito salud, casi una de cada cinco no cuenta con conexión a red de agua potable y uno de cada diez no dispone de servicio sanitario.

La figura 11 muestra la incidencia de la pobreza multidimensional con base en niveles de pobreza específicos, y resalta la pobreza media y la extrema. Se observa una reducción de la pobreza extrema, aunque el número de pobres se aumentó en casi 100,000 personas; las reducciones son menores mientras menor es el nivel de privaciones. Así, la pobreza severa se ha reducido 4% en el período evaluado, y ha afectado mayormente a la población rural e indígena.

Figura 11. Incidencia de la pobreza multidimensional en Guatemala según nivel de privaciones, área y etnicidad, en porcentajes; 2000 – 2011

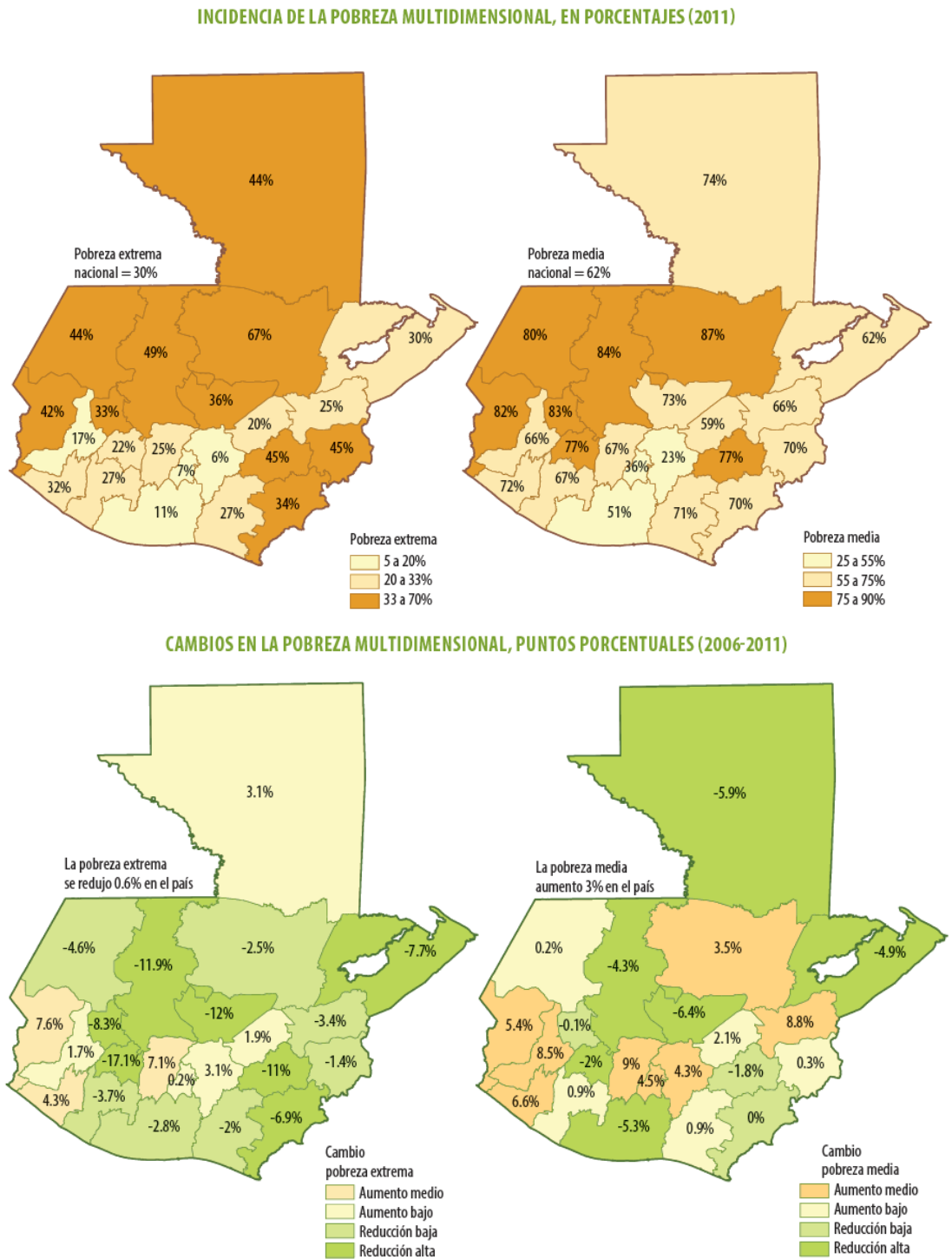


Fuente: Informe Nacional de Desarrollo Humano 2011/2012.

Finalmente, la figura 12 muestra una distribución territorial de la pobreza, según el criterio multidimensional para dos niveles de privaciones: medio y extremo. Se observa de nuevo el país dividido en dos regiones, donde la noroccidental presenta los mayores niveles de pobreza. Asimismo, se hace una comparación respecto a la incidencia de la pobreza, cuya distribución refleja diferencias respecto de la del IPM, debido a la sensibilidad de esta última a la intensidad de las privaciones: por ejemplo, se observa a Jutiapa en el nivel más alto de pobreza extrema, pero en el nivel medio según su IPM. Dicha situación puede sugerir que la intensidad de las privaciones es menor que la de los departamentos con similar incidencia de pobreza extrema.

Es posible encontrar también diferencias en los grados de reducción de pobreza en la escala territorial. Algunos departamentos con altos índices redujeron su brecha, como Quiché, Baja Verapaz y Sololá; mientras que otros del mismo grupo, como Huehuetenango o San Marcos, no lograron alguna reducción sustantiva y mantuvieron los niveles de privaciones durante la última mitad de la década de 2000.

Figura 12. **Pobreza multidimensional según departamento y cambios recientes, 2006 – 2011**



Fuente: Informe Nacional de Desarrollo Humano 2011/2012.

1.1.4. Participación/ausencia del Estado

Está evidenciado que la cobertura espacial y social, así como la calidad de la gestión del sector público, son determinantes en los avances o retroceso en desarrollo humano. El Estado y su desempeño están directamente relacionados con los desiguales progresos en desarrollo humano y en políticas públicas logrados a la fecha. Estas últimas son dependientes de una serie de factores, dentro de los que pueden destacarse:

- Disponer de recursos financieros suficientes y a largo plazo.
- Sensibilidad y razonabilidad por parte de las élites gobernantes, para priorizar el combate a la pobreza y la desigualdad.

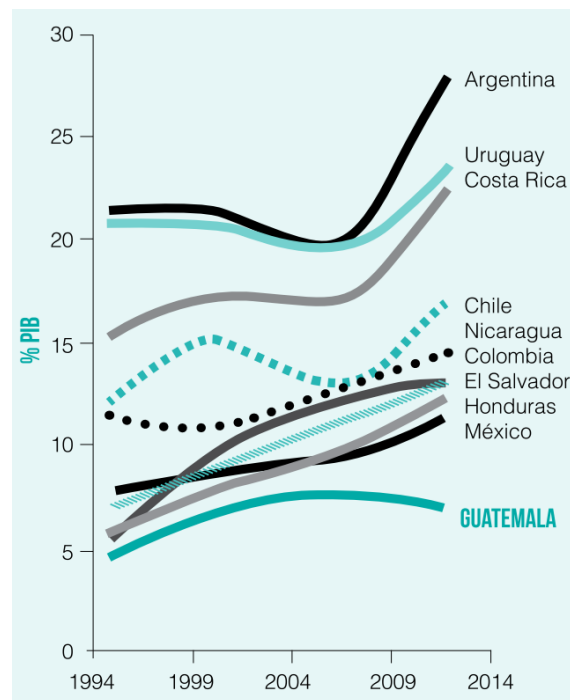
El segundo aspecto mencionado resulta fundamental, no solamente por el valor intrínseco de la equidad sino por el fortalecimiento de nivel de vida de la población que genera círculos virtuosos, lo que acelera el proceso de desarrollo humano.

En la región, Guatemala sigue entre los países que menos inversión realizan en gasto público social, como se observa en la figura 13. Esta incapacidad de realizar inversión pública es debida a la deficiente capacidad fiscal, la corrupción, inconveniencia para los grupos oligárquicos y desinterés general por alcanzar pactos sociales. Desde la firma de los Acuerdos de Paz, no se ha logrado una carga tributaria mayor al 11%, lo que genera menor probabilidad de un mayor y mejor gasto público social.

Uno de los rasgos más conocidos sobre la sociedad guatemalteca es la existencia de desigualdades espaciales. Estas son las distancias socioeconómicas existentes en zonas geográficas, departamentos y municipios

del país. El PNUD determinó contrastes territoriales donde se observó que los departamentos con menor IDH y con altos índices de pobreza, también se encuentran con los valores más bajos del Índice de Densidad del Estado, IDE. Este permite establecer cómo el poder público y sus funciones se hacen presentes en los distintos departamentos del país: así, se muestra una diagonal que lo divide, con seis departamentos de la zona noroccidental que ocupan los puestos más bajos de la clasificación; de nuevo, donde habita la mayoría de la población rural e indígena, como se observa en la figura 14.

Figura 13. **Gasto público social en países de la región, porcentaje del PIB**

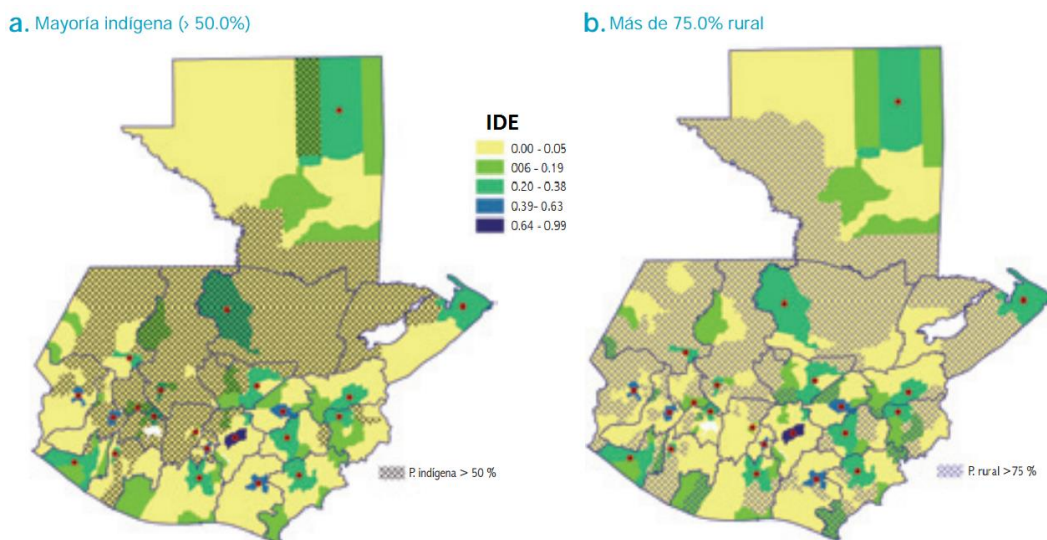


Fuente: *Sinopsis del desarrollo humano en Guatemala PNUD 2014.*

El IDE permite establecer que la presencia del Estado también debe asegurar que se produzcan cambios positivos, dentro de los cuales los resultados se observan en escuelas y centros de salud abastecidos, ambos con personal

capacitado. De lo contrario se convierten en factores de exclusión para la mayor parte de la población. La calidad de los servicios debe ser intrínseca a su cobertura, y debe propiciarse en las políticas de Estado su inclusión dentro de las prioridades a evaluar y resolver.

Figura 14. IDE y municipios con mayoría indígena y rural



Fuente: *Informe Nacional de Desarrollo Humano 2009/2010.*

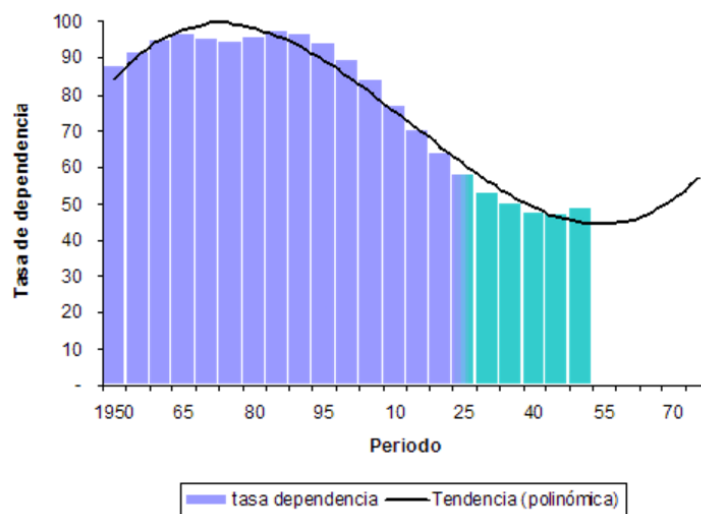
1.1.5. Transmisión intergeneracional de la pobreza y desigualdad

Al contrario de las tendencias mundiales de disminución de las tasas de crecimiento de la población, Guatemala continúa con un ritmo acelerado de crecimiento; es el más alto de la región. A pesar de no existir un consenso en cuanto a las implicaciones en desarrollo humano que tiene este crecimiento acelerado, puede inferirse que impactará negativamente en términos de sostenibilidad. Dichos impactos se relacionan con la estructura de la población y la transición demográfica, referida a los cambios ocurridos entre las tasas de natalidad y mortalidad. En el caso de Guatemala, la reducción de la mortalidad genera una etapa de crecimiento acelerado, provocado por la macroinercia de la

tasa de natalidad y resultando en una población mayoritariamente joven. Posteriormente, se producirá una reducción en la tasa de natalidad y el crecimiento se desacelera.

Los cambios demográficos, a su vez, tienen sus efectos en el equilibrio de la estructura demográfica en términos de la relación de dependencia económica. En el 2012, más del 60% de la población tenía menos de 25 años: esto significa que la transición demográfica permitirá reducir las tasas de dependencia hasta aproximadamente 2050; para entonces, las dos terceras partes de la población estarán en edad de trabajar. Luego de dicho período la tasa de dependencia demográfica tenderá al alza nuevamente, como se puede observar en la figura 15.

Figura 15. **Ratio de dependencia demográfica**



Fuente: <http://bit.ly/2wvauQi>. Consulta: septiembre 2017.

Los efectos de dichos cambios dependerán en gran medida del esfuerzo del Estado de Guatemala para mejorar las capacidades y oportunidades de la niñez y juventud, en ese período de transición. Existen diversos mecanismos y

fenómenos económico-sociales que ponen en riesgo el desarrollo humano de dichas generaciones; la desigualdad institucionalizada la que entrapa e impide el acceso a oportunidades para la mayor parte de la población.

En América Latina se ha documentado ampliamente que la desigualdad persiste de una generación a otra y se presenta en un contexto de muy baja movilidad social. En el Informe Regional sobre Desarrollo Humano de América Latina y el Caribe de 2010, se analizaron los factores que inciden en la imposibilidad de los hogares de incrementar los niveles de logro social de las generaciones siguientes. Dichos factores constituyen una compleja y superpuesta combinación de limitaciones; algunas de ellas están determinadas por las condiciones iniciales de los hogares y su accesos limitado o nulo a recursos de calidad, mientras que otras responden al entorno social, así como a las características de la política pública y al funcionamiento más amplio del sistema político. Se hace un énfasis en algunos factores que no son tan fáciles de determinar u observar, pero que tienen una gran influencia: cuando las restricciones que se enfrentan inciden en la valoración subjetiva de qué nivel de logro es posible alcanzar en materia de bienestar, influyen en las aspiraciones y la capacidad para optar por un plan de vida autónomo, de forma que se disminuye el potencial de ser sujeto activo del desarrollo propio e individual. En otras palabras, la sostenibilidad del desarrollo tiene una relación directa con la transmisión intergeneracional y con la manera de cómo se empoderan las nuevas generaciones.

En el país, el contexto en que los jóvenes comienzan su tránsito hacia la vida adulta, los retos y desafíos que se enfrentan son desventajosos; resaltan algunos aspectos como desnutrición y mortalidad infantil, menores de edad sin acceso a educación y su esperanza educativa, así como trabajo infantil. El avance en la reducción de pobreza y la desigualdad ha sido insuficiente. Su

persistencia es un obstáculo para la generación de círculos virtuosos que puedan acelerar el desarrollo. Por otra parte, los logros no son irreversibles, hay diversas limitaciones para consolidarlos: redes integrales de protección social inexistentes que reduzcan la vulnerabilidad ante las crisis económicas o ambientales, globales o regionales externas; deficiencias institucionales en las carteras de salud y educación; deficiencia en la calidad provisión de servicios; fallas inherentes al mercado, entre otros. Todo esto repercute desproporcionadamente en los grupos más desfavorecidos, e incluye cuestiones relativas a la seguridad patrimonial y personal, acceso a la justicia y la calidad del empleo.

Se observa la necesidad de acelerar los cambios que generen el desarrollo humano incluyente, para lo cual resulta indispensable el aumento sustantivo de los niveles de equidad. El mejorar la calidad de vida y la esperanza educativa de la niñez y la juventud, implicará a su vez mejoras en el desarrollo humano e inclusivo del país.

1.1.6. Contexto del sector rural

Cuando se habla de sectores, se entiende por urbano todo poblado que tiene más de 2000 habitantes, así como los que poseen entre 1500 y 2000 habitantes con servicio de agua; todos los demás son considerados como áreas rurales. Según la Encuesta Nacional de Condiciones de Vida 2011, el 51.5% de la población vivía en áreas rurales.

1.1.6.1. Dispersión de las comunidades rurales

Hasta antes del 2010, los poblados rurales se mostraron en aumento; el proceso de retorno postguerra fue un fenómeno que contribuyó considerablemente a dicha expansión, la dispersión o concentración de poblados tiene implicaciones directas sobre el medio ambiente, la calidad de vida de los

habitantes y el desarrollo económico. En el período de 1993 a 1998 surgieron casi 3 000 nuevos asentamientos humanos; un proceso de colonización por parte de la población campesina, que como estrategia de sobrevivencia se moviliza buscando tierras nuevas para cultivar y expandir la frontera agrícola. Para entonces el país era el menos urbanizado de Latinoamérica, superado solamente por Haití al incluir El Caribe. Para 1994, el 65% de la población vivía en área rural, mientras que en 2002 la cifra había descendido un 3,6%.

1.1.6.2. Esquemas de organización rural

La calidad del desarrollo humano en Guatemala está directamente relacionada con la calidad de la democracia, la cual se desarrolla mediante la participación ciudadana en los asuntos colectivos. Sin embargo, el pasado autoritario y la guerra interna dejaron una ciudadanía debilitada y atemorizada, con poca capacidad e interés en la participación de asuntos colectivos.

Asimismo, las mismas condiciones de racismo y exclusión no han permitido la participación de líderes y grupos rurales en asuntos de interés nacional. Se ha demeritado su capacidad propositiva en cuestiones públicas y de importancia nacional, de forma que han sido otros sectores poderosos tradicionales, los que han definido la dirección del desarrollo en el país.

En los últimos años, se han fortalecido las capacidades organizativas de la sociedad civil; siempre hay asimetrías entre los sectores empresariales y las organizaciones sociales, así como entre sectores urbano – rural. Ya demostrado el fracaso del sistema asistencialista del Estado, varias comunidades de ambos sectores han sabido superar esa asimetría y desventaja, y genera soluciones exitosas e integrales a sus necesidades. Estas comunidades han sido creativas en la definición de estructuras que les han permitido encontrar el apoyo de organizaciones privadas y no gubernamentales, otros países, iglesias,

cooperantes internacionales, entre otros. Estos apoyan el esfuerzo de la organización local democrática, y la consideran una variable diferenciadora y determinante del éxito de los proyectos; además valoran el significado que implica para el comunitario, su participación en el proyecto.

A lo largo de los últimos 30 años han surgido diversas estructuras que incidieron positivamente en el fortalecimiento de los movimientos autónomos y su organización, planeación y ejecución de proyectos. Algunas de ellas son:

- Comité Comunitario
- Consejo Comunitario de Desarrollo, COCODE
- Asociación Nacional de Electrificación Rural, ANAER
- Auxiliatura Municipal
- Oficina de Planificación Municipal, OPM
- Oficina Municipal de Agua y Saneamiento, OMAS
- Mancomunidad
- Cooperativa

1.1.6.3. Composición étnica y lingüística

Como resultado del conflicto armado, varios núcleos étnicos de una procedencia fueron reasentados en áreas ya habitadas por otras etnias. Esto transformó el mapa étnico y lingüístico del país. A su vez, esto se ve influenciado por la migración intermunicipal, generalmente provocada por la búsqueda de mejores oportunidades laborales. Ambos fenómenos migratorios generan mayores impactos en las poblaciones indígenas y rurales. Mientras, la migración externa también tiene un efecto considerable.

En el Diagnóstico del Sector Energético en el Área Rural de Guatemala se señala que para el 2005 ya vivía en Estados Unidos un 10% de la población guatemalteca; sus remesas representaron el 5% del PIB. Asimismo, indica que, para el mismo año la población indígena representaba el 43% del total; sin embargo, como ya se vio anteriormente, la mayoría constituye la población que no lograba cubrir sus necesidades básicas: los indígenas son el 58% de la población en situación de pobreza y, más alarmante, el 72% los que se encontraban en pobreza extrema. Casi las tres cuartas partes de la población indígena vivía en pobreza, mientras que en la población no indígena era un 40%.

Figura 16. **Grupos étnicos reconocidos en Guatemala**

Etnia	Ubicación	Población	Actividad principal
Garinagu (Garifunas)	Livinstone, Izabal	6,000 Hab.	A la pesca
Tekiteko	Cuilco y Tectitán, La Mesilla, Huehuetenango.	4,895 Hab.	A la agricultura
Achi'es	Baja Verapaz (Rabinal, San Miguel Chicaj, San Gabriel)	16,617 Hab.	A artesanías
Jakaltecos	Jacaltenango y Huistas, Huehuetenango.	393,597 Hab.	A la música
Ixiles	San Gaspar Chajul	47,902 Hab.	A la agricultura
Q'anjob'ales	San Juan Chapul	75,155 Hab.	A la siembra
Q'eqchies	Región del Polochic	474,000 hab	A la plata, barro, máscaras y muebles
Chalchitecos	Aguacatan, Huehue.	30,000 Hab.	Artesanías y cultivo de cebollas y ajos
Sakapultecos	Sacapulas, Quiche	3,033 Hab.	A hacer joyas
Maya Mopán e Itzá	Peten y Belice	8,500 Hab.	A la madera
Awakatecos	Aguacatan, Huehue.	18,756 Hab.	A la agricultura
Akatecos	Centro de Huehue	40,991 Hab.	A la metalurgia
Chuj	San Mateo Cluj	50,000 Hab.	A la música
Mames	Altiplano -	346,576 Hab.	A la agricultura
K'ichés	Quiché		
Xincas	Chiquimulilla, Montaña de Xalapán	100 a 200 Hab.	Hacer jarcias
Sipakapenses	Sicapacas San Marcos	4,049 Hab.	Hacer candelas
Uspanteko	Uspantán, Quiche	12,949 Hab.	Al tejido
Ch'orti'es	Chiquimula	27,090 Hab.	A las artesanías
Poqomames	Chinautla, Jalapa	46,515 Hab.	Cerámica
Tz'utujiles	Suchitepequez	17,645 Hab.	A la pintura
Poqomchies	San Miguel aguan	40,991 Hab.	Al hierro
Kaqchikeles	Chimaltenango, Sacatepequez, Sololá, Suchitepequez, San Juan, San Pedro y San Raymundo, en Guatemala	343,000 Hab.	Agricultura y artesanía

Fuente: BARRIOS, Carlos. *Ch'umilal Wul: El Libro del Destino*. p. 43.

En Guatemala no se ha sabido valorar la riqueza multiétnica y plurilingüe, de forma que se pormenoriza su vínculo con las raíces de las estructuras

sociales, fundamentos patrimoniales de la cultura y diversidad. Al contrario, se resaltan las desventajas económicas e implicaciones de dicha realidad, lo que no permite determinar las fortalezas y oportunidades que representa para lograr un desarrollo humano inclusivo e integral.

1.1.6.4. Servicios para la población rural

Dentro de los retos pendientes por resolver en la mayoría de la población rural, se encuentra la cobertura de los servicios que inciden de forma directa o indirecta en su calidad de vida y desarrollo humano. A continuación, se describen brevemente los servicios fundamentales y su situación en los últimos años.

- Educación: según datos del INE, en el 2002 la tasa de analfabetismo en el área rural era de 43% y de 17% para el sector urbano; por otra parte, el 50% de la población indígena mayor de 15 años es analfabeta.

No se cuenta con un programa público de educación donde se actualicen y revisen los contenidos de estudio, ni con un recurso suficiente para realizar infraestructura con capacidad de atención a todos los alumnos, así como con las condiciones adecuadas para dicho fin. Todo esto incide de forma negativa en la calidad educativa a la que se tiene acceso en el sector rural, con sus consecuentes repercusiones en las oportunidades laborales a las que pueden acceder.

- Salud: a pesar de algunos avances importantes en cobertura de vacunación y reducción de la mortalidad infantil, siguen presentándose patrones de enfermedades nutricionales e infecciosas. Estas afectan principalmente a la población en situación de pobreza, indígena y rural, ya que no se cuenta con cobertura en todo el territorio; los centros de salud

tienen déficit en su capacidad y calidad de atención; problemáticas específicas como el déficit nutricional y la mortalidad materna, se concentran en esta población.

La mayoría no cuenta con el recurso necesario para cubrir los gastos que representa una enfermedad o dolencia en un centro de salud privado. Mientras que una pequeña parte de la población cuenta con acceso a diversas opciones tecnológicas y profesionales mejor calificados, la otra parte solamente puede acceder a paquetes básicos de salud proporcionados por los servicios deficientes del Estado, o bien mediante organizaciones e instituciones que tienen programas de asistencia en esta área.

Tabla II. **Cobertura de agua y saneamiento, 2004**

Cobertura de Agua y Saneamiento en Porcentajes, según el CEPIS				
Agua Potable	Con Conexión	Fácil Acceso*	Sin Conexión	
Urbana	87.34	11.42	1.24	
Rural	47.91	22.39	29.70	
Total	61.71	18.55	19.74	
Saneamiento	Conexión	In situ (Fosa/letrina)**	Sin Conexión	
Urbana	92.68	2.68	5.28	
Rural	14.97	56.33	28.7	
Total	42.15	37.74	20.51	

*Fácil acceso indica que hay un llena-cantaros, pilo o pozo público a una distancia menor de un kilómetro o menos.

** In situ, indica que aunque no hay conexión a un sistema de drenaje, hay saneamiento a través de fosas sépticas o letrinas.

Fuente: *Perfil Ambiental de Guatemala* – IARNA 2004.

- Agua: según el perfil ambiental del 2004 elaborado por el IARNA, el 70% del suministro de agua en todos los municipios provenía de aguas superficiales y el resto, de aguas subterráneas. De estos, aproximadamente un 66% de los sistemas de abastecimiento son por

gravedad; el 18,5% utilizan sistemas de bombeo y el 15,2% restante son sistemas mixtos, lo que evidencia la estrecha relación existente entre abastecimiento de energía y de agua. En la tabla II se muestra el nivel de cobertura según el área. El acceso al servicio de agua potable y saneamiento representa una variable considerablemente influyente en la determinación de la ruralidad de una región. En el Censo Nacional de 2002 se muestra una aplicación de esta variable para diferenciar las áreas rurales de las urbanas. En la tabla III se muestran algunos de los hallazgos del censo.

Tabla III. Hogares por tipo de local de habitación particular, según el tipo de servicio de agua que dispone regularmente

Total País – Rural							
Tipo de Servicio de Agua	Total Hogares	Casa formal	Apartamento	Cuarto en Casa de Vecindad	Rancho	Casa Improvisada	Otro tipo
Totales	1,095,614	953,830	1,965	3,822	101,555	30,706	3,736
Chorro de uso exclusivo	577,776	547,046	1,289	391	29,050		
Chorro para varios hogares	18,142	17,174	128	213	626	1	
Chorro público (fuera del local)	56,500	46,196	69	962	5,303	3,677	289
Pozo	280,866	225,590	405	1,695	38,908	12,471	1,887
Camión o tonel	23,114	5,154	74	203	1,131	6,025	527
Río, lago o manantial	97,512	70,802		266	21,513	4,582	349
Otro tipo	41,704	31,868		182	5,020	3,950	684

Fuente: Censo Nacional 2002 – INE.

- **Seguridad Social:** este servicio tiene considerables implicaciones en la vulnerabilidad de las personas ante situaciones de riesgo social, económico y de salud. El esquema predominante en la población rural e indígena es el autoempleo estacional a nivel de micro, pequeña y mediana empresa familiar no registrada en el seguro social; de forma que no existen oportunidades laborales empresariales o institucionales que cuenten con esta prestación. Así, las personas que se dedican a la economía informal

y a la agricultura quedan fuera de la posibilidad de acceso al Seguro Social, el cual solamente se ofrece a los trabajadores del sector formal.

1.1.6.5. Problemas estructurales

En los párrafos anteriores se ha descrito brevemente cómo han evolucionado los diferentes indicadores de desarrollo humano para el país. Se evidencia que, a pesar de algunas mejoras en aspectos específicos, no se ha logrado tener cobertura que garantice el acceso a servicios y condiciones de vida de calidad para una parte considerable de la población, la mayoría, rural e indígena.

Las observaciones y recomendaciones que ha realizado el PNUD en Guatemala consideran la reivindicación cultural como requisito para el desarrollo humano, ya que afirma el derecho que tienen las personas de vivir acorde a sus creencias, valores y espiritualidad. Por ello, el Estado debe garantizar no solo el cumplimiento de dicho derecho, sino también los medios para su transmisión a las siguientes generaciones, desde la educación, el conocimiento de las lenguas o la incorporación del derecho consuetudinario a las normas y al sistema de justicia vigente, entre otros. Todo esto constituye parte de la responsabilidad de gestión estatal, para dar una respuesta integral a las necesidades de la población y el medio ambiente, para incidir positivamente en la calidad de vida de la población.

1.1.6.6. Problemas de coyuntura

Dentro de las diferentes problemáticas y situaciones que se dan en el país, hay algunas de carácter estructural a largo plazo, mientras que otras se dan con relación a circunstancias socioeconómicas y políticas sucedidas durante un espacio de tiempo determinado. Es necesario establecer estrategias para

minimizar las inversiones hacia situaciones coyunturales, y maximizar las que formen parte de un plan estructurado que priorice las estructurales.

En las últimas décadas no ha habido política para definir una agenda de Estado que establezca prioridades en temas estructurales que afectan al país. Hay una serie de iniciativas basadas en cuestiones coyunturales con sus consecuentes resultados, positivos o negativos. No puede concluirse que toda iniciativa de esta naturaleza sea incapaz de resolver alguna problemática específica; pueden incidir de mejor forma y alcance en la medida en que se planifiquen, coordinen y ejecuten con el objetivo de generar soluciones integrales en cada una de las problemáticas. De esta forma, pueden abordarse con un enfoque más objetivo y cercano a la realidad.

1.1.6.7. Análisis de la pobreza en el sector rural y gasto en energía

El término desarrollo hace referencia al progreso político, económico y social de una región, y se ha manifestado de forma injusta e insostenible, ya que no ocurre con igual oportunidad para todos los habitantes de la región. Esto se puede evidenciar en diferentes proyectos que tienen el discurso del desarrollo y pretenden bajo un único argumento económico-tecnológico, ignorar las implicaciones en los entornos social, ambiental y legal en los que se llevan a cabo y ejecutan.

En el Diagnóstico Energético Rural se detallan algunos de los elementos que se han podido ligar de forma directa e íntima con el círculo vicioso que se forma en torno a la pobreza. Cabe mencionar que la misma debe abordarse con énfasis en la dinámica de sus causas y efectos, ya que no es un fenómeno aislado. Algunos de sus elementos característicos son los siguientes según el Diagnóstico:

- Para el 2003, la tasa global de fecundidad o promedio de hijos por familia era de 4,4, una de las más altas de Latinoamérica. Cuando se hace la separación por grupos, se encuentra una tasa de 6,1 en la población indígena y 3,7 en la no indígena, así como 5,2 en el área rural y 3,4 en el medio urbano.
- La tasa de mortalidad infantil en el mismo año fue de 44/1000, la más alta de Latinoamérica. La esperanza de vida era de 65 años, significativamente más baja que el promedio para Latinoamérica y El Caribe, con 70 años.
- Siempre en el mismo año, la pobreza basada en el nivel de consumo de la canasta básica era de 57%, con marcadas diferencias entre la población indígena con 71,9%, y no indígena con 44%; así como entre área rural de 72,2% y urbano de 28,1%. Para entonces se calculaba que el 80% de los pobres se encontraban en una situación de pobreza crónica, de carácter estructural y difícil de erradicar.
- La desnutrición crónica en menores de cinco años también afecta en mayor medida a la población rural y especialmente a la indígena, es de 49,4% y 57,3%, respectivamente.
- A pesar de encontrarse para el año 2000 algunas mejoras en los indicadores de calidad de vida, Guatemala presentaba una de las situaciones más desventajosas de la región respecto a desarrollo social y niveles de vida, especialmente en el área rural. Esto puede evidenciarse al encontrar que al menos un 60% de la población no satisfacía por lo menos una necesidad básica para dicho año.

- Los índices de desigualdad entre la población se encontraban para el año 2003 entre los más altos del mundo. Los índices utilizados son el de Gini con 58% y el de Theil con 74%. Esto indica que el quintil con mayor nivel de pobreza solamente recibía un 1,7% del total de ingresos del país, mientras que el quintil mayor recibía un 64%.

La población indígena representa más de la mitad de la población total y participa de menos de una cuarta parte del ingreso total y consumo del país. Por su parte, la población rural constituye casi dos tercios de la población, dispone de un tercio del ingreso y del consumo total del país. Para los años 2000, el índice de desigualdad para la distribución de propiedad de la tierra era de 85%; esta es una de las principales causas de los conflictos socioeconómicos del país.

Se observan diferencias significativas entre el patrón de consumo, especialmente influenciado por las diferencias en el ingreso de las personas del área rural. De acuerdo con estimaciones realizadas en el Diagnóstico Energético Rural, el gasto realizado por una familia rural era de Q46 al mes, en fuentes energéticas que reemplazan la electricidad, sin incluir la leña. Esta era colectada en su mayoría a nivel de astilleros comunitarios; sin embargo, en la actualidad requiere un gasto considerable para las familias que dependen de ella.

1.2. Energía eléctrica

1.2.1. Descripción general del sector

Según la CNEE, el sistema de suministro eléctrico comprende esencialmente el conjunto de medios y elementos útiles para la generación-oferta de energía; transmisión-transporte; y distribución – demanda de energía. La generación puede desarrollarse por centrales hidroeléctricas, turbinas de vapor, turbinas de gas, motores de combustión interna y centrales geotérmicas. Esta se

desarrolla en un ambiente competitivo, compuesto por un mercado de oportunidad en donde los agentes y grandes usuarios pactan libremente las condiciones de sus contratos en cuanto a plazo, cantidades y precio.

Con respecto al sistema de transmisión, el mismo está compuesto por un sistema principal y un secundario:

- El sistema principal es el que se comparte por los generadores y las interconexiones a otros países, y opera básicamente en tres niveles de voltaje: 230, 138, y 69 kV.
- El sistema secundario es el medio de interconexión de un generador a la red principal.

La infraestructura para el sistema de distribución consta de líneas, subestaciones y las redes de distribución que operan en tensiones menores a 34,5 kilovatios. Las principales empresas distribuidoras, coordinadas por la Asociación del Mercado Mayorista, son:

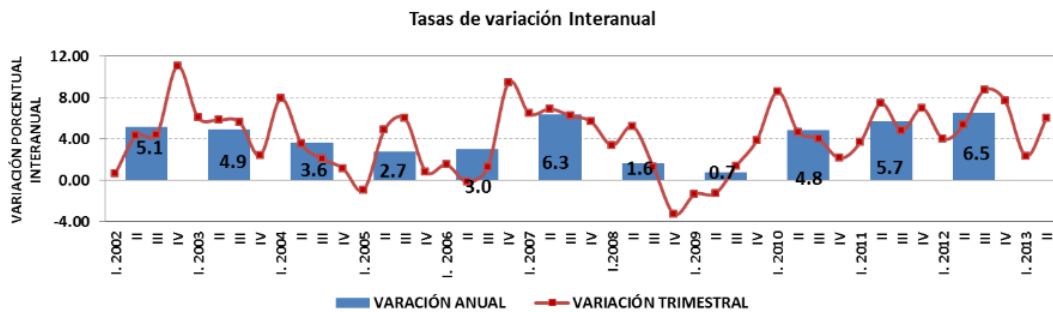
- Empresa Eléctrica de Guatemala,
- Distribuidora de Electricidad de Occidente, Distribuidora de Electricidad de Oriente, y
- Empresas eléctricas municipales.

El marco regulatorio del sector eléctrico guatemalteco se basa en un modelo de mercado competitivo a nivel de generación y comercialización. En general, los precios son fijados por el ente regulador sobre la base de costos económicos eficientes. Las principales regulaciones son las siguientes:

- Constitución Política de la República
- Ley General de Electricidad, Decreto No. 93-96
- Reglamento de la Ley General de Electricidad, Acuerdo Gubernativo No. 256-97 y sus reformas.
- Reglamento del Administrador del Mercado Mayorista, Acuerdo Gubernativo No. 299-98 y sus reformas.
- Normas de Coordinación Comercial y Operativa del Administrador del Mercado Mayorista.

En cuanto a la participación del sector energético, con respecto del PIB, este representó un 2,2%. Adicionalmente, dicho sector tuvo un aumento en la variación interanual al pasar de un 5,7% en el 2011 a 6,5% durante el 2013, como se observa en la figura 17.

Figura 17. **Suministro de electricidad y agua; 2002 – 2013**



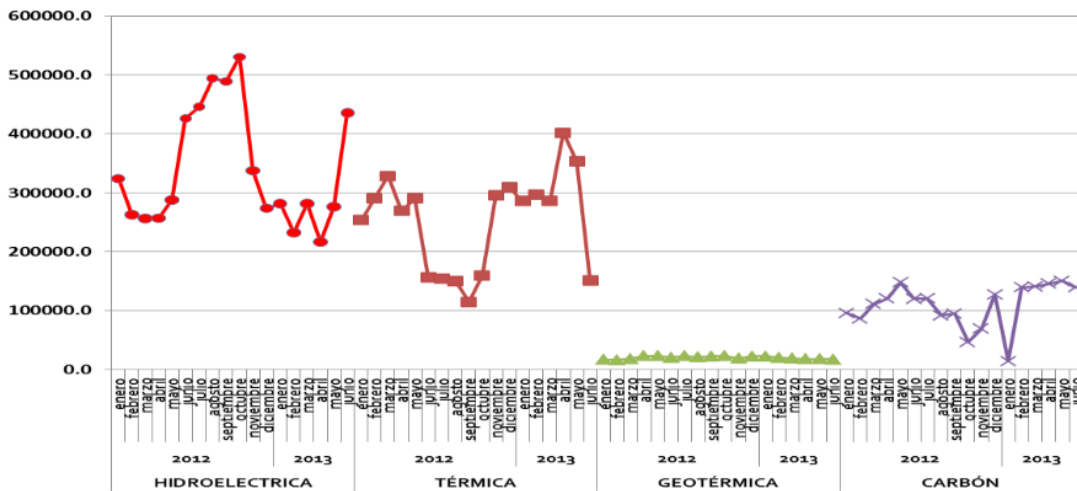
Fuente: Banco de Guatemala.

La matriz energética ha presentado algunos cambios en los últimos años, y tiende a utilizar cada vez más las fuentes de energía renovable. De acuerdo con datos de la CNEE, durante el primer trimestre de 2013 se observa que el comportamiento de la generación de energía por medio hidroeléctrico fue en aumento con el comienzo del invierno; mientras que la generación térmica va a la inversa. La generación a junio de 2013 se puede dividir en un 58,7%

correspondiente a hidroeléctrica y el 20,3% a térmicas, y alcanzan entre las dos, el 79,0% del total. Esto se aprecia en la figura 18.

En cuanto a las perspectivas del mercado, el consumo de electricidad de los usuarios finales crece más rápido que el uso de otras fuentes de energía, como ha sido el caso durante las últimas décadas. En las proyecciones de generación neta de electricidad en todo el mundo se eleva un 2,2% anual en promedio desde 2010 hasta 2040.

Figura 18. **Generación de electricidad en Guatemala**



Fuente: Comisión Nacional de Energía Eléctrica.

El mayor crecimiento en la generación de electricidad se prevé que se dará en los países fuera de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico, OCDE, donde la generación de electricidad aumenta en un promedio de 3,1% anual. El aumento en los niveles de vida en los mismos provoca una mayor demanda de consumo energético para los aparatos electrodomésticos, dispositivos electrónicos, así como la ampliación de cobertura de servicios básicos y complementarios, tales como: hospitales, escuelas, talleres industriales, oficinas, centros comerciales, entre otros.

En las naciones de la OCDE, donde la infraestructura muestra mayor desarrollo y el crecimiento de la población es relativamente lento o en descenso, el crecimiento proyectado de generación energética promedio es de 1,1% por año desde 2010 hasta 2040. Guatemala, pese a contar con una de las tarifas más bajas de Centroamérica, tiene el reto de encontrar junto a los países de la región, soluciones que busquen la producción de energía más limpia y de bajo costo. Estas acciones deben tener como objetivo, cubrir la totalidad de la demanda del país, incidir tanto para elevar los niveles de vida como para proveer eficientemente al sector productivo. Para ello se hace necesario contrarrestar los ciclos de generación de energía por medio hidroeléctrico a térmico, y compensar tanto los precios como la generación de contaminación.

1.2.2. Alcance de la electrificación rural

1.2.2.1. Avance de la electrificación

Los avances de la electrificación en Guatemala están generados por la sumatoria en la ejecución de diferentes programas y proyectos que han sido desarrollados por las instituciones encargadas del sector energético y en especial del subsector eléctrico, como los que se detallan a continuación:

Tabla IV. **Programas y proyectos de electrificación ejecutados por el INDE**

Proyecto	Usuarios	Montos y fuentes de financiamiento
PER I / 1971-1978	25 000 en 5 departamentos.	US\$11,61 millones USAID – 60% Gobierno - 40%
PER II / 1979 – 1989	91 301 en 536 comunidades de 20 departamentos.	US\$15 millones USAID – 57% Gobierno - 43%

Continuación de la tabla IV.

PER III / 1990-1996	37 102 en 232 comunidades de occidente	US\$20,2 millones USAID – 37% Gobierno - 15% INDE – 48%
Plan de electrificación rural de INDE	284 000 usuarios en 2 889 comunidades	US\$334 millones Gobierno – 100%
Modelo de costo compartido con aportes inter-institucionales	640 beneficiarios	US\$548 310,54 INDE 64% Cooperantes 36%

Fuente: Aplicación de responsabilidad social corporativa RSC, en sistemas de energía rural en zonas aisladas – Guatemala. Página 11.

El PER llevado a cabo por el INDE no ha consistido solamente en construir redes de distribución en las poblaciones y dar servicio de inmediato, sino que ha sido necesario prever el incremento de la capacidad de generación; la ampliación y el reforzamiento de la infraestructura de transmisión, subtransmisión y distribución; es decir, fortalecer y adecuar la infraestructura que da sustento a la calidad y seguridad del servicio requerido. Por lo anterior, los objetivos específicos del PER son:

- Elevar el índice de electrificación de 49% al 90%.
- Complementar el reforzamiento de la infraestructura de transmisión.
- Elevar el nivel socioeconómico de la población del país.
- Generar bienestar, al mejorar la calidad de vida.
- Elevar los niveles de empleo y de ingreso.
- Fortalecer la infraestructura eléctrica con el propósito de extender el servicio y mejorar la calidad.
- Construir la infraestructura necesaria para proveer un mejor servicio a la zona occidental del país.

- Interconectar todas las regiones de Guatemala pendientes al Sistema Nacional Interconectado, SIN.

En consecuencia, se hace conveniente revisar y analizar sus avances, presentados en la tabla V. Se puede notar que Alta Verapaz, Huehuetenango, Quiché y San Marcos concentran el 51,58% del número de comunidades y 53,94% del número de usuarios conectados a la red por el fideicomiso en todo el país. Paradójicamente, los departamentos de Alta Verapaz y Quiché aún presentan la mayor deficiencia en la cobertura; es evidente que, a pesar del énfasis a los territorios menos electrificados, dicho esfuerzo no ha sido suficiente para alcanzar una cobertura de acuerdo con el promedio nacional.

Tabla V. **Cobertura plan de electrificación rural, comunidades electrificadas y usuarios atendidos al 31-01-2012**

Departamento	Total Certificado		Aprobado
	Comunidades	Usuarios	Usuarios
Alta Verapaz	333	31,810	29,920
Baja Verapaz	80	7,123	6,518
Chimaltenango	58	4,412	3,601
Chiquimula	177	14,905	14,462
El Progreso	18	1,252	1,226
Quiché	273	26,183	24,810
Escuintla	36	4,952	4,584
Huehuetenango	283	31,599	28,852
Izabal	86	7,342	6,584
Jalapa	74	8,336	7,416
Jutiapa	123	10,358	9,925
Petén	79	8,231	7,881
Quetzaltenango	70	7,074	6,254
Retalhuleu	28	3,479	3,241
San Marcos	267	28,897	26,177
Santa Rosa	102	7,165	6,151
Sololá	20	1,469	1,184
Suchitepéquez	68	7,128	6,476
Totonicapán	37	5,570	3,349
Zacapa	29	2,394	2,227
Total	2,241	219,679	200,838

Fuente: Departamento de Desarrollo Energético – Área de Electrificación Rural, junio 2012.
Dirección General de Energía, Ministerio de Energía y Minas.

Es destacada la actividad desarrollada por la Dirección General de Energía entre los años de 1997 y 2008, en los cuales logró cubrir más 3 500 servicios con sistemas de iluminación fotovoltaica. Actualmente no existe un dato oficial sobre la capacidad instalada en sistemas fotovoltaicos, pero se estima que la capacidad instalada no sobrepasa los 500 kW a nivel nacional.

Las cifras de los programas y proyectos presentados evidencian que un 98% de usuarios asistidos han sido conectados al Sistema Nacional Interconectado y un 2% corresponden a sitios aislados fuera de la red con sistemas individuales y algunos colectivos como las microcentrales hidroeléctricas.

1.2.2.2. Cobertura eléctrica

A partir de la reforma del subsector eléctrico en Guatemala, con el que se inicia la ejecución del plan de electrificación rural, se observa un importante avance de la ampliación en la cobertura. Esta estuvo detenida desde la época anterior a las reformas con índices de electrificación de 29% en 1985, 46% en 1995, 69% en 2000 y 81,5% en el 2005. Posteriormente a esta última fecha, el crecimiento en la cobertura se contrajo y ha sido lento.

Los datos oficiales más recientes, determinados por la Dirección General de Energía establecen el índice de cobertura eléctrica que se presenta en la tabla VI. En cifras absolutas, los departamentos de Alta Verapaz, Petén y Quiché suman 217 116 hogares sin electrificar, lo que corresponde al 45% del total. Los departamentos de Escuintla, Chiquimula e Izabal también presentan cifras por debajo del promedio, por lo que se requiere focalizar los esfuerzos en estos departamentos. En la figura 19 se muestra la cobertura a nivel municipal.

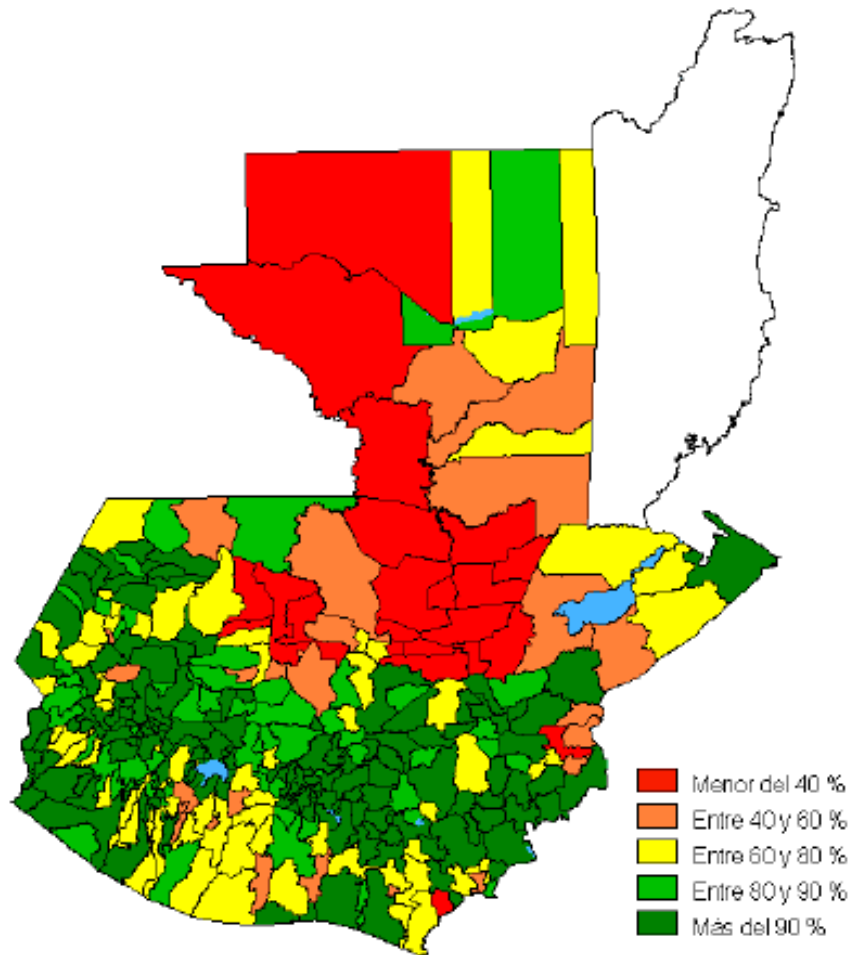
Tabla VI. Índice de cobertura eléctrica 2011

ÍNDICE DE COBERTURA ELÉCTRICA 2011			
Departamento	Hogares	Usuarios	ÍNDICE
ALTA VERAPAZ	202,234	72,093	35.60%
BAJA VERAPAZ	61,100	44,144	72.20%
CHIMALTENANGO	124,967	105,254	84.20%
CHIQUIMULA	83,822	66,790	79.70%
EL PROGRESO	42,838	39,520	92.30%
ESCUINTLA	179,106	140,553	78.50%
GUATEMALA	824,558	800,437	97.10%
HUEHUETENANGO	205,103	176,832	86.20%
IZABAL	81,711	62,809	76.90%
JALAPA	59,871	53,489	89.30%
JUTIAPA	108,744	94,858	87.20%
PETEN	111,880	61,426	54.90%
QUETZALTENANGO	188,167	177,615	94.40%
QUICHE	170,219	123,698	72.70%
RETALHULEU	64,684	56,270	87.00%
SACATEPEQUEZ	75,421	72,990	96.80%
SAN MARCOS	198,058	175,148	88.40%
SANTA ROSA	83,350	73,970	88.70%
SOLOLA	78,716	73,009	92.70%
SUCHITEPEQUEZ	112,286	90,964	81.00%
TOTONICAPAN	92,835	84,737	91.30%
ZACAPA	60,998	54,624	89.60%
ÍNDICE A NIVEL NACIONAL	3,210,669	2,701,230	84.10%

Fuente: Dirección General de Energía – Ministerio de Energía y Minas.

Al hacer la evaluación por municipios, los más críticos en el departamento de Alta Verapaz son Tukurú, Chahal, Senahú, Cahabón y Lanquín, con una cobertura menor al 20%, siguiendo los municipios de Panzós, Santa Catalina La Tinta, Fray Bartolomé de las Casas, San Pedro Carchá, Raxruhá, Chisec, Tamahú y San Juan Chamelco que no sobrepasan el 40% de cobertura. En el departamento de Peten los municipios de La Libertad, San Andrés y Sayaxché no sobrepasan el 40% de cobertura y si se les suma el municipio de Dolores, concentran el 66% de los hogares sin electricidad en dicho departamento. En Baja Verapaz, los municipios de Purulhá y Cubulco, son los que cuentan con menor cobertura y ambos suman el 60% de los hogares sin electrificar. En el departamento de Quiché, los municipios menos electrificados son Chajul, Chicamán, Uspantán y San Juan Cotzal; la sumatoria de hogares sin electrificar de estos cuatro municipios constituyen el 50,7% del total del departamento.

Figura 19. **Mapa de cobertura eléctrica 2011 a nivel municipal**



Fuente: Índice de Cobertura Eléctrica 2011, DGE/MEM.

1.2.2.3. Impactos de la electrificación rural

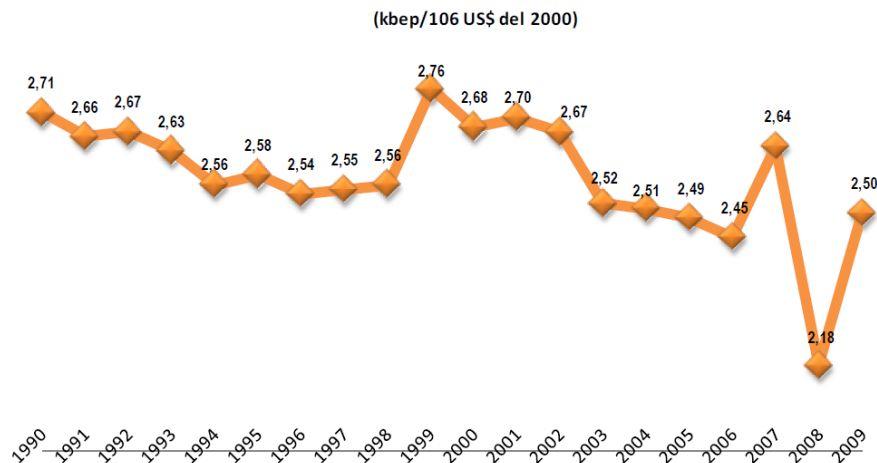
Los mayores niveles de impacto observados en los proyectos de electrificación rural se presentan en tres dimensiones. Abarcan la infraestructura física, socioeconómica y ambiental, que se describen brevemente a continuación.

Infraestructura: en la infraestructura física, el sistema de transmisión del país cuenta con un diseño troncal que permite el abastecimiento de energía eléctrica desde los principales centros de generación hasta los centros de consumo. Esto se realiza a través de una red de aproximadamente 1 010 km de longitud, en tensiones de 138 kV y 230 kV. Su capacidad de transformación es de 319 MVA y 1 445 MVA, respectivamente. Luego, con un voltaje de 69 kV se abastecen cerca de 2515 km de líneas de transmisión, las que permiten abastecer a los sistemas de distribución y a los grandes usuarios. Su capacidad de transformación es de 760 MVA. En la tabla VII se detallan las obras de infraestructura de transmisión con base en los planes de electrificación rural, hasta el año 2013.

Impactos socioeconómicos: puede utilizarse una serie de indicadores para medir los impactos que ha generado el acceso a energía eléctrica en el país. Se ha demostrado que una mayor intensidad energética y mayor consumo de electricidad per cápita, genera un incremento en el PIB per cápita, así como en el índice de desarrollo humano. Dichos cambios se muestran tanto en la población rural como urbana.

En la figura 20 se muestra el índice de intensidad energética en el país, el cual relaciona la cantidad de energía por dólar producido. Este manifiesta una tendencia de deterioro del año 2000 al 2008, con una drástica recuperación hasta el 2009. Esto indica que a pesar de que el PIB absoluto y per cápita con tendencias positivas, para la producción económica se utilizó cada vez menor cantidad de energía.

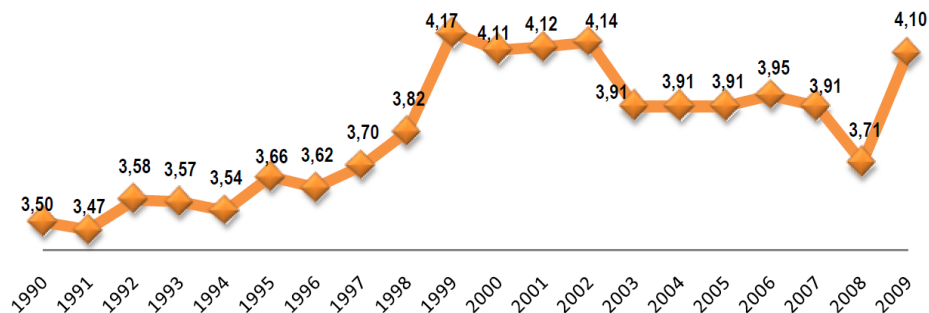
Figura 20. **Evolución de la Intensidad Energética, 1990 – 2009**



Fuente: Organización Latinoamericana de Energía.

Por su parte, la figura 21 muestra el comportamiento del consumo energético per cápita, la cual indica una tendencia similar a la gráfica anterior, con sus respectiva baja y repunte en los mismos periodos de tiempo. Cabe resaltar que a pesar de que la electricidad constituye solamente un 8% del consumo de energía, su incidencia en las tendencias de los indicadores socioenergéticos no resulta menos significativa que otros factores.

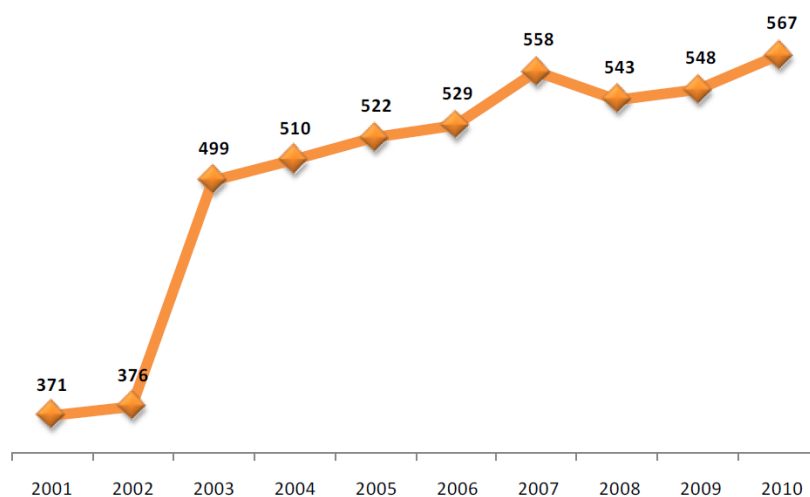
Figura 21. **Consumo de energía per cápita, bep / habitante; 1990 – 2009**



Fuente: Organización Latinoamericana de Energía.

La figura 22 muestra el comportamiento del consumo de electricidad per cápita, donde se puede observar un continuo aumento del consumo. Se puede notar un crecimiento pronunciado en el año 2002; se mantiene moderadamente el incremento hasta una contracción en el 2008; para retomar de nuevo la tendencia de incremento.

Figura 22. **Consumo de electricidad per cápita, 2002 – 2010**



Fuente: Organización Latinoamericana de Energía.

Las tres gráficas descritas, acotadas en los periodos en los que coinciden, de 2001 al 2009, revelan una tendencia similar e importante: se observa el punto más bajo en el 2008, fenómeno que se puede explicar por el efecto negativo provocado por la crisis económica mundial de dicho año. Esta condición, sumada a las debilidades institucionales y problemas estructurales del país, no ha permitido generar avances significativos en las poblaciones más vulnerables, afectadas por sus condiciones de pobreza y desigualdad.

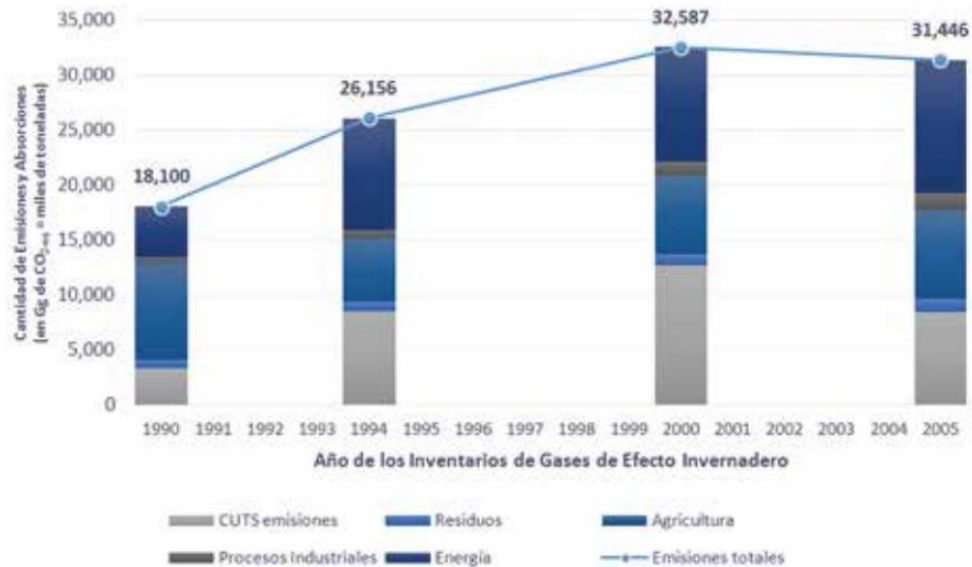
Impactos ambientales: en el país, si la institucionalidad ha sido débil en la cobertura de servicios básicos de salud y educación, no podría afirmarse algo mejor respecto en lo referente a la materia ambiental. Se puede comenzar por la

responsabilidad de elaborar los Estudios de Impacto Ambiental (EIA), a cargo de las mismas empresas interesadas en la actividad económica, de tal forma que los pueden hacer a la medida. Esto les permite presentar únicamente la información que les resulta conveniente, y pueden tergiversar también la que represente algún obstáculo o modificación de sus planes ejecutivos. En algunos casos apoyados por instituciones que se dedican a la promoción de la justicia socioambiental, se han determinado algunos estudios en los que se presentan fragmentos o partes completas de EIA realizados para proyectos ejecutados en otros países.

Dentro de los pocos indicadores que pueden referirse, existe un estudio de inventario de gases de efecto invernadero en el sector energético del país, durante el periodo 1990 – 2005, a cargo del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, MARN. Las tendencias en las emisiones reflejan las variaciones en el desarrollo de las diversas actividades humanas, producción industrial, energética, de servicios, agrícola y otras actividades vinculadas al uso de la tierra. Dichos cambios en las actividades económicas influyen directamente en la generación de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y sus variaciones.

Tomando en cuenta la relación con los múltiples factores nacionales e internacionales a nivel económico, la tendencia de las emisiones en el país muestra un fuerte incremento entre el periodo 1990 – 2000, con los valores más altos de crecimiento anual en los primeros cinco años, como se observa en la figura 30. Así, se puede notar un crecimiento anual de 38,9% entre 1990 – 1994 y en el periodo de 1994 – 2000 es de 8%; mientras que entre 2000 – 2005 se observa un decremento de 0,7%. Dichas variaciones se han visto influenciadas por las emisiones reportadas en el sector de “Uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura (UTCUTS), principalmente en el 2000, donde aporta las mayores emisiones de GEI.

Figura 23. **Tendencia de las emisiones totales del país, en Gg de CO₂-eq; 1990 – 2005**



Fuente: Segunda Comunicación Nacional sobre Cambio Climático, Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales.

Al observar los sectores restantes, se puede notar una tendencia creciente de emisiones en los cuatro. Las tasas de crecimiento en los diferentes periodos de análisis coinciden con las de crecimiento económico y de población para los mismos. Esto puede indicar que las variaciones explicadas anteriormente se deban a la influencia de las tasas de conversión de bosques y praderas que pueden observarse al analizarse los mapas de uso de la tierra para el periodo 2000 – 2005.

Se pueden evidenciar tendencias al alza cuando se analizan en conjunto las emisiones y absorciones del país. De los cuatro inventarios realizados, puede notarse una tendencia general al alza; el balance es de -24 804 Gg de CO₂ para 1990 y se redujo la absorción hasta llegar al ser un país productor, con 6 954 Gg de CO₂ para 2005. Los mayores productores de GEI resultan de la conversión de bosques y praderas dentro de las UTCUTS; uso de suelos agrícolas en la

agricultura y el transporte dentro del ramo de Energía. El hecho de que las mayores fuentes de emisión provengan de estas categorías, evidencia la asociación del comportamiento de emisiones con el modelo de desarrollo vigente en el país, caracterizado principalmente por actividades extractivas y una limitada capacidad rectora – reguladora por parte del Estado en estas actividades.

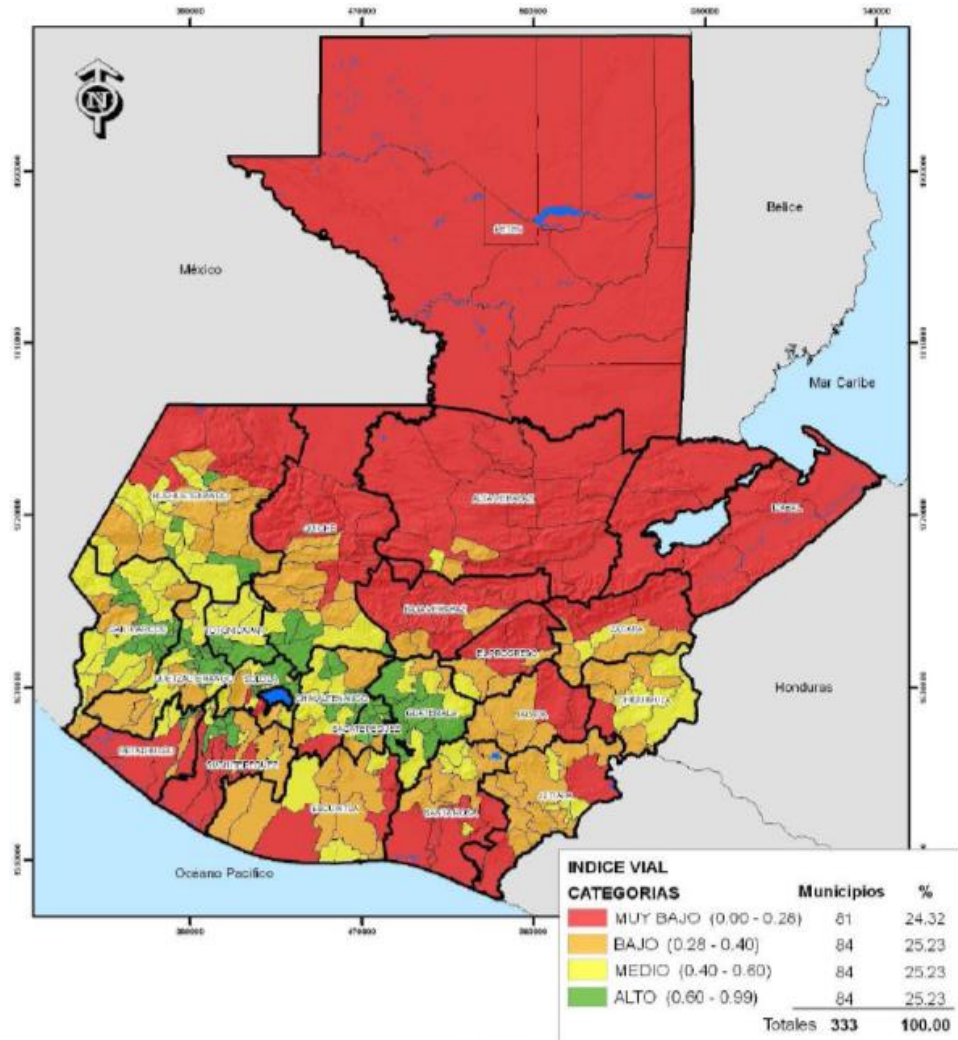
1.2.3. Características de las comunidades rurales pendientes de electrificar

Aunque se ha hecho énfasis en los avances significativos de cobertura eléctrica, que pasó de un 29% en 1985 a 84,10% en 2011, los índices desglosados para la población rural son relativamente bastante más bajos. Estos se encuentran en los departamentos de Petén, Alta Verapaz, Izabal, Quiché y Huehuetenango; presentan condiciones de precariedad más críticos y complejos, que son determinados por una serie de factores que se describen a continuación.

1.2.3.1. Áreas remotas con dificultad de acceso vial y a otros factores productivos

No hay capacidad de inversión en infraestructura por parte del Estado, por lo que es muy difícil el acceso vial a estas regiones del país, principalmente, lo que dificulta el acceso a otros factores productivos como conectividad económica – infraestructura, centros de acopio, programas de riego, entre otros. Esto ha propiciado condiciones desventajosas tanto comparativas como competitivas. Las comunidades presentan índices viales menores, como se observa en la figura 24.

Figura 24. Mapa índice vial de Guatemala



Fuente: Priorización de municipios a través de vulnerabilidad a la inseguridad alimentaria y nutricional de la población de Guatemala IVISAN, MAGA.

1.2.3.2. Comunidades con menor densidad de población

Las comunidades que no han sido electrificadas tienen a ser las de menor densidad de población, ya que esto aumenta los costos de inversión, sumados a la dificultad de acceso. En concreto, las características en este aspecto son:

- Menor extensión territorial por el número de habitantes por comunidad; por consiguiente, también el número de viviendas dentro de la misma es menor.
- La dispersión de las viviendas es alta, lo que genera mayores gastos en infraestructura para la distribución de la energía eléctrica.
- El promedio de hijos en los hogares rurales es mayor que en los urbanos, por lo que el promedio de habitantes por vivienda es mayor. Esto se traduce en hacinamiento y falta de oportunidades en todos los aspectos.
- El 80% de las viviendas del área rural están construidas con materiales o métodos que representan deficiencias y aumento de la vulnerabilidad frente a eventos climatológicos o desastres naturales.
- Existe incertidumbre sobre la propiedad de la tierra, falta de acceso a servicios básicos, infraestructura y poca presencia del Estado.

1.2.3.3. Dispersión en centros poblados rurales

La tendencia de dispersión de algunas comunidades en poblaciones rurales puede explicarse por algunos poblados reasentados de retornados, movilizados y desplazados después de su regreso en el proceso de firma de la Paz. También hay algunos movimientos migratorios de expulsados de sus comunidades por razones económicas; víctimas de desastres naturales, entre otros. Esto ha extendido la frontera agrícola y provocado algunos asentamientos humanos especialmente cercanos o en áreas de reserva o protegidas.

1.2.3.4. Cambios en el patrón migratorio

Una práctica imperante por el sistema económico que ha predominado a lo largo de la historia es la migración temporal hacia las grandes finca agroexportadoras. A partir de los años 80, aparecen tres fenómenos migratorios

que modificaron algunas dinámicas dentro de la movilidad social, de forma que surge la búsqueda masiva de destinos fuera del país:

- Migración provocada por el conflicto armado interno y las estrategias de contrainsurgencia.
- Migración interna permanente por el acceso a la tierra, hacia las zonas periféricas del norte del país, principalmente hacia Petén. Esta fue, en su momento, la principal causa de la expansión de la frontera agrícola.
- Migración laboral hacia el exterior, principalmente a Estados Unidos, y otra parte importante dirigida a México.

1.2.3.5. Regiones de mayor vulnerabilidad

Puede presentarse una alta vulnerabilidad física, debido a la posición de una comunidad dentro de una zona de cabecera de cuenca, o bien una zona de recarga hídrica con un deterioro avanzado. Así también se ha realizado un planteamiento inadecuado de la vulnerabilidad a que se expone a las áreas protegidas o de reserva, ya que se ha visualizado a las comunidades como una amenaza y no como un agente de oportunidad para la conservación de las mismas.

Así también, se pueden presentar algunas vulnerabilidades socioeconómicas que se presentan en mayor o menor medida, dependiendo de cada comunidad. Esto se debe considerar como un reto para lograr la electrificación rural, la cual tiene requerimientos de planificación y ejecución diferenciada para superar de forma integral, mediante la participación multisectorial, el estado precario y complejo de las comunidades sin cobertura. A continuación, se mencionan algunas generalidades relacionadas:

- Las principales actividades productivas para las comunidades no electrificadas son la agricultura, ganadería y empleo de mano de obra no calificada, popularmente conocida como jornales. Esta es su principal fuente de ingreso, que presenta altibajos generados por las condiciones volátiles y de incertidumbre que se generan en sus respectivos mercados; hay condiciones impuestas por los intermediarios, dado que son pequeños productores no organizados; e impactos de variabilidad climática que inciden directamente en su productividad.
- Una de las fuentes principales del ingreso proviene de las remesas familiares, la cual tuvo una participación para las áreas rurales de 62% en el 2010. Se sabe también que los principales departamentos beneficiados de dicho rubro son Guatemala, San Marcos, Huehuetenango, Quetzaltenango y Jutiapa, que suman entre todos el 50% de beneficiarios. A pesar de ello, no puede considerarse como base de sustento familiar, ya que en muy pocos casos el total de remesa mensual por familia llega a superar el costo de la canasta básica.
- Las poblaciones sin electrificación están en riesgo de presentar inseguridad alimentaria y nutricional, por lo que la mayor parte de sus recursos está dirigido a subsanar dicha necesidad. A pesar de esto, el 60% de los hogares no cuenta con la capacidad económica de adquirir la mitad de una alimentación básica.
- El 20% de la población en los departamentos con menor cobertura eléctrica no tiene capacidad de pago para el servicio. Asimismo, el 50% de la población de los mismos departamentos, pueden presentar dificultades y limitaciones en su capacidad de pago.
- Predominancia de población indígena y rural sujeta de discriminación y exclusión social, con las consecuencias de concentración de pobreza.
- Los municipios menos electrificados coinciden en la mayoría de casos, con los que presentan mayores índices de pobreza extrema. En estas regiones

también se presenta mayor complejidad por la composición multicultural y algunas barreras que representa la falta de aprendizaje sobre los idiomas indígenas en el país.

- Las regiones sin cobertura eléctrica se encuentran dentro de los departamentos con los menores índices de desarrollo humano, de acuerdo con los informes del PNUD.

1.2.3.6. Regiones conflictivas

En las regiones donde se presentan menores índices de electrificación, también sucede la mayor cantidad de casos de conflictividad social, principalmente derivados de:

- Litigios de tierra: conflictos agrarios y áreas protegidas.
- Uso de bienes naturales: minería, monocultivos e hidroeléctricas.
- Servicio eléctrico: falta de pago, conexiones ilegales y servicio deficiente de distribución.

1.2.4. Zonas rurales aisladas

1.2.4.1. Definición y tipificación

La electrificación en las zonas rurales aisladas se distingue por las siguientes características:

- Densidad de carga baja:
 - El número de conexiones por km de línea en media tensión es relativamente bajo, ya que se necesita cubrir grandes extensiones de territorio con hábitat disperso.

- La carga por conexión y el factor de carga de cada consumidor tienden a ser menores en comparación a los de áreas urbanas. La demanda individual de energía eléctrica es generalmente baja, ya que los ingresos medios de una familia en estas áreas son usualmente más bajos que la media, además de la influencia en el consumo derivado del estilo de vida.
- Costos por conexión y por kWh suministrado, altos:
 - Costo de instalación es creciente con el aumento del aislamiento o lejanía del punto a conectar.
 - Los costos de operación y mantenimiento son mayores por la razón anterior. La densidad de carga, costos de instalación y la normativa sobre mantenimiento, generan períodos de retorno de la inversión imposibles de aceptar para la empresa inversora. Esta situación da lugar a la falta de interés para las compañías eléctricas, en el suministro del servicio en poblaciones rurales.

1.2.4.2. Comunidades

Como se ha descrito, la composición y naturaleza de la realidad social del área rural presenta condiciones económicas deprimidas y precariedades marcadas. Además, las condiciones geográficas, demográficas, socioeconómicas y ambientales determinan el tipo y magnitud de mercado rural para la distribución de electricidad, especialmente en áreas donde no existe ninguna cobertura. Todo esto genera vulnerabilidad y riesgo en distintos aspectos para dicha población, por lo que se requieren de estrategias sólidas y diferenciadas para lograr sostenibilidad social, económica y ambiental en dicho mercado, para hacerlo funcional en los aspectos mencionados. A continuación, se muestra en la tabla VII, los departamentos con mayor presencia de ZRA's.

Tabla VII. **Resumen de comunidades ZRA, por departamento y niveles de pobreza**

Departamento	ZRA	Usuarios	% Electrificación	Indice de Pobreza
Alta Verapaz	763	35,925	44.6	54.8
Quiche	553	30,610	70.7	81.1
Peten	402	16,228	52.7	59.3
Izabal	277	10,301	71.9	52.1
Huehuetenango	262	9,569	83.6	77.8
Baja Verapaz	193	5,909	68.1	71.6
Santa Rosa	140	2,317	87.9	62.1
Suchitepequez	113	3,258	87	53.9
San Marcos	105	4,385	88.1	86.7
Chiquimula	100	3,836	76.7	49.3
Zacapa	84	1,791	84	43.8
Escuintla	81	1,464	82.1	35.2
Quetzaltenango	66	2,141	93.2	60.7
Jalapa	65	2,226	82.3	72.6
Chimaltenango	55	1,962	95.4	57.9
El Progreso	54	1,439	93.1	54.8
Jutiapa	36	1,313	85.2	63.9
Retalhuleu	35	586	87	57.6
Totonicapan	22	1,176	90.3	85.6
Solola	16	1,034	88.4	76.4
Total	3,422	137,470		

Fuente: *Análisis de demanda energética en zonas rurales aisladas.*

1.2.4.3. Demanda de energía

La caracterización consiste en una descripción de las microrregiones en los aspectos de localización, situación socioeconómica, infraestructura, información sobre el uso actual de la energía, evaluación de los recursos energéticos renovables locales y análisis de otros faltantes.

En Guatemala, Fundación Solar realizó un estudio de caracterización y encontró las singularidades de demanda en los departamentos que presentan mayor cantidad de ZRA y, por tanto, los menores índices de electrificación rural; es decir, parte de la Franja Transversal del Norte, Huehuetenango, Quiché y Alta Verapaz. De acuerdo con este proyecto, se pudo obtener el dato de gasto

promedio en sustitutos inferiores a la electricidad en las comunidades que se encuentran en las regiones anteriormente mencionadas.

Es posible obtener una proyección de demanda global en ZRA que posteriormente se conectarían al sistema nacional. Se lograría mediante la estimación de consumos de energía que se observan en las experiencias de interconexión en los planes de electrificación rural implementados hasta ahora en el país, y agregarle la desviación característica de las diferentes regiones del mismo.

Puede considerarse que las ZRA mantendrán este estatus mientras no exista un programa estatal que subsidie el acceso a la energía para estos centros poblados; de lo contrario, no se observa ningún interés en los prestadores de servicios por invertir en ellos.

1.3. Recurso hídrico

Como factor y elemento fundamental de la vida en todos sus ámbitos, se le ha asignado valores de primer orden, tanto sociales como ambientales. Según el Artículo 127 de la Constitución Política de la República de Guatemala, las aguas del país tienen carácter de “bienes de dominio público”, patrimonio del Estado y de los particulares, así como su “aprovechamiento, uso y goce se otorgan de acuerdo al interés social”.






Se ha determinado a través de estudios ambientales que, a pesar de la existencia de suficiente agua en el país, no existen capacidades adecuadas para su gestión. Esto se ha podido determinar bajo los siguientes argumentos, según el IARNA:

- Según las estadísticas, los usos consuntivos y no consuntivos representan menos de una cuarta parte de la oferta hídrica disponible.
- Los conflictos existentes y derivados de la falta de acceso a fuentes seguras de agua potable, principalmente en el área rural, donde el 25% de la población (año 2011) no contaba con este servicio.
- Los elevados índices de contaminación del recurso hídrico.

1.3.1. Síntesis de la situación actual

En la tabla VIII se describen los indicadores – señal priorizados por el IARNA para el recurso hídrico del país; se presenta además las mediciones respectivas para el periodo evaluado, y se valora su desempeño ambiental.

Tabla VIII. **Indicadores – señal de la situación del recurso hídrico en Guatemala y su desempeño**

Indicador	Descripción	Procedimiento de cálculo/Fuente	Desempeño	Valoración
Agua y cobertura vegetal	38.77% de las tierras forestales de mayor importancia hidrológica poseen bosque al 2010.	Elaboración propia	La información disponible sugiere una tendencia a la pérdida de cobertura forestal en las tierras forestales de mayor importancia hidrológica durante el periodo 2003-2010. Esto implica mayores volúmenes de suelo erosionado y de sedimentos en los cuerpos de agua.	
	24% de las tierras forestales de mayor importancia hidrológica sobreutilizada al 2006.	Gordillo (2010)		
	Erosión potencial en tierras forestales de mayor importancia hidrológica: 107.4 millones de toneladas de suelo al año (2006).	Gordillo (2010)		
	299 millones de m³/año de suelo erosionado por prácticas agrícolas convencionales.	PNUD (2010)		
Demandas de agua	Más de 20,000 millones de m³ utilizados anualmente en el periodo 2007-2010, con un enfoque extractivo.	IARNA-URL (2011)	Con un escaso manejo de la oferta, la demanda de agua se incrementa en el país conforme crecen la economía y la población. Los datos más recientes muestran retrocesos en cuanto a la cobertura de los servicios de agua y saneamiento en el país. La abundancia relativa del recurso no redundaba en acceso para todos.	
	Cobertura de servicio de agua potable a 2011: 75.27% de las familias a nivel nacional; 90.46% de las familias en el área urbana; 58.16% de las familias en el área rural.	INE (2011)		
	Cobertura del servicio de saneamiento a 2011: 90.11% de las familias a nivel nacional; 96.97% de las familias en el área urbana; 85.27% de las familias en el área rural.	INE (2011)		
Contaminación de cuerpos de agua	14 de los 38 ríos principales de Guatemala están altamente contaminados.	MARN (2009)	La calidad del agua en ríos y lagos sigue deteriorándose. No hay evidencia de mejoras sustantivas ni de mecanismos que estén siendo eficientes para la protección y mejoramiento de las aguas del país.	
	Los cuatro lagos más importantes de Guatemala están altamente contaminados y muestran evidencias de procesos de eutrofización.	MARN, IARNA-URL y PNUMA (2009)		
Incidencia de enfermedades asociadas a la calidad del agua	Incidencia de enfermedades de origen hídrico (2010): 37.22/1,000 habitantes.	MSPAS (2011, enero)	Entre 2003 y 2010 la mortalidad infantil por causas de origen hídrico se redujo en 90%, y la incidencia de casos mortales por enfermedades de origen hídrico en un 67%.	
	Incidencia de casos mortales por enfermedades de origen hídrico (2010): 0.75 casos/10,000 habitantes.	MSPAS (2011, enero)		
	Mortalidad infantil por enfermedades de origen hídrico (2010): 236 casos.	MSPAS (2011, enero)		
Dinámica de la Institucionalidad pública relacionada al agua	El 16.38% del área total de las tierras forestales de mayor importancia hidrológica posee algún mecanismo estatal de conservación y/o manejo forestal sostenible.	Gordillo (2010)	Las tierras forestales estratégicas para el mantenimiento y regulación del ciclo hidrológico están, en su mayoría, desprovistas de mecanismos que garanticen la cobertura forestal y el mantenimiento de condiciones adecuadas. Sin embargo, existen adelantos importantes en planes y políticas para la planificación y gestión integral del recurso, aunque aún no se implementan.	
	Elaboración del Plan Sectorial Multianual de Ambiente y Agua 2011-2013.	MARN (2010)		
	Aprobación de la Política Nacional del Agua de Guatemala.	GEA (2011)		

Fuente: Perfil Ambiental de Guatemala 2010 – 2012.

A continuación, se dan a conocer algunas generalidades de interés para el abordaje de la problemática, las cuales se presentan con mayor detalle y amplitud en el Perfil Ambiental de Guatemala 2011 – 2012, desarrollado por el IARNA. Cabe resaltar que dicho estudio se realiza desde una perspectiva socioecológica, por lo que en base a esta se identificaron y priorizaron indicadores–señal, los cuales, a la vez, vinculan el agua con los subsistemas económico, social, natural e institucional.

1.3.1.1. Agua, cobertura vegetal y uso de la tierra

En el 2005, el INAB definió la vocación de los suelos del país. Encontró que las tierras forestales de muy alta, alta y media captación y regulación hidrológica TFCRH, ocupan el 28% de la superficie nacional. La mayoría presenta condiciones severas de pendiente y profundidad efectiva del suelo. Estas son fundamentales para la regulación del ciclo hidrológico y de uso preferentemente forestal, ya que esto propicia una mejor infiltración y almacenamiento de agua lo que garantiza la mínima tasa de erosión hídrica.

En el 2010, la ingeniera ambiental Carla Gordillo realizó un análisis del uso de la tierra al año 2006 en estas zonas de importancia hidrológica. Los resultados, mostrados en la tabla IX, muestran que para el 2003 el 81% de las TFCRH tenía un uso asociado a la cobertura vegetal permanente, lo cual es más ventajoso que el establecimiento de cultivos anuales.

Por su parte, el Perfil Ambiental de Guatemala muestra resultados al 2010 para las distintas categorías de TFCRH, según el Mapa de Cobertura Forestal de Guatemala 2010. Dichos resultados no son comparables con los de la ingeniera Gordillo, ya que el mapa únicamente distingue entre superficie con bosque y sin él. Sin embargo, los datos muestran una tendencia a la pérdida de bosque en tales territorios, ya que del total de la superficie evaluada solamente un 39% del

área considerada estaba cubierta por bosque en el 2010. Es notoria la escasa cobertura forestal en las tierras de muy alta captación y regulación hidrológica, ya que apenas una cuarta parte de su superficie posee bosque; por su parte, en las otras dos categorías evaluadas la cobertura forestal no alcanza un 50% del total de superficie ocupada por las mismas.

Tabla IX. **Uso del suelo en las tierras forestales de muy alta, alta y media captación y regulación hidrológica, 2006**

Uso de la tierra	Área (ha)	Área (%)
Agua	7,164	0.23
Arbustos Matorrales	817,552	26.62
Área Urbana	13,234	0.43
Bosque	1,219,980	39.72
Cultivos Anuales	426,037	13.87
Cultivos Perennes	455,615	14.83
Humedal	1,036	0.03
Otros	5,566	0.18
Pastos Naturales Herbazales	125,442	4.08
TOTAL	3,071,626	100

Fuente: GORDILLO, Carla. *Situación actual y directrices para el manejo de las tierras forestales de muy alta, alta y media captación y regulación hidrológica de Guatemala.*

Tabla X. **Cobertura forestal en las tierras de muy alta, alta y media captación y regulación hidrológica, 2010**

Categoría de TFCRH	Área total	Superficie con bosque	
		Hectáreas	Porcentaje
Muy alta	902,610.54	228,783.96	25.35
Alta	904,182.93	421,294.32	46.59
Media	1,263,787.92	540,411.57	42.76
Total	3,070,581.39	1,190,489.85	38.77

Fuente: INAB, CONAP, UVG y URL; 2012.

En la tabla XI se muestra la intensidad de uso de las TFCRH, mostrando que el 24% de estas se encuentran en sobreuso, un 31% en subuso y el 45% de las mismas tiene un uso adecuado. Se observa que el 36% de las tierras de muy alta captación y regulación hidrológica presentan condiciones de sobreuso, con erosiones potenciales de 48 millones de toneladas al año. De acuerdo con el PNUD, al 2010 la práctica agrícola convencional era responsable de una pérdida total del suelo de 299 millones de m³/año, lo que ha causado la sedimentación de los cursos de agua y altos niveles de eutrofización.

Tabla XI. **Intensidad de uso de la tierra en las TFCRH, 2003**

Categoría	Área	
	Ha	%
Intensidad de uso de la tierra		
Uso correcto	5,002,262	46
Subuso	4,021,363	37
Sobreuso	1,642,403	15
Áreas urbanas	118,289	1
Cuerpos de agua	104,038	1
No determinada	545	0
Total	10,888,900	100

Fuente: IARNA – URL; 2009.

1.3.1.2. Demanda de agua

El IARNA ha realizado las estimaciones de la Cuenta Integrada de Recursos Hídricos, y mostrado que entre los años 2007 – 2010 se habrían destinado más de 20 mil millones de metros cúbicos al año para usos consuntivos y no consuntivos, como se puede observar en la tabla XII. Esto representa un 20% de la oferta hídrica disponible anualmente, que se ha estimado en 90 000 millones de metros cúbicos. Para el año 2010, el mayor consumo fue del 38%, utilizado por actividades industriales, incluida la agroindustria. Por su parte, las actividades agropecuarias y silviculturales representaron el 32%, la generación de energía un 25%; por último, el consumo en los hogares guatemaltecos representó un 2%.

Tabla XII. Utilización del agua en Guatemala por grupo de actividades económicas y de consumo, en millones de m³; 2006 – 2010

Actividades económicas y de consumo	Año				
	2006	2007	2008	2009	2010
Agricultura, ganadería, caza y silvicultura	5,042.00	5,490.10	6,003.62	6,252.08	6,496.56
Pesca	427.06	535.24	527.52	511.90	514.62
Explotación de minas y canteras	6.13	6.93	6.22	6.34	6.19
Industrias manufactureras (incluye agroindustria)	7,473.39	8,185.24	8,296.74	7,604.04	7,643.17
Suministro de electricidad, gas y agua	4,765.13	5,184.56	5,516.04	5,110.16	5,057.33
Construcción	93.17	104.36	102.94	87.29	76.26
Comercio al por mayor y al por menor	51.33	44.36	44.94	47.27	48.22
Servicios	52.33	51.71	59.30	68.16	69.85
Hogares	422.93	433.51	444.35	455.45	461.68
Total	18,333.48	20,036.00	21,001.66	20,142.69	20,373.88

Fuente: Evaluación Ambiental Estratégica, COSOP-BR Guatemala; IARNA – URL; 2013.

Sobre la disponibilidad de servicio de agua entubada y saneamiento en las viviendas, se incluyen las que poseen tubería dentro del terreno, ya sea dentro o fuera de la vivienda, así como las que cuentan con un chorro público. En la figura 35 se puede observar que a pesar de una mejora significativa entre 2000 – 2006; dicha tendencia no pudo mantenerse hasta el 2011, año para el cual la cobertura era de 75%, y disminuyó 4% desde el 2006.

A pesar de que se esperaba que el agua entubada sea potable, se ha mostrado evidencia de que existe deficiencia de la calidad el recurso en varias partes del país. Al año 2008, el Programa de Vigilancia del Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social determinó que 50% de los sistemas de suministro de agua no contenía niveles adecuados de cloro, y más de una cuarta parte presentó contaminación bacteriológica.

Respecto al costo promedio mensual del servicio de agua residencial por tubería en 2006, fue de Q38 en el área urbana y Q10 en el área rural. En el departamento de Guatemala se registran valores mayores, los cuales no superan

los Q64 promedio al mes. Esto refleja las bajas tarifas existentes por parte de los municipios, de forma que no permiten cubrir los costos reales de la provisión del servicio.

Por su parte, la cobertura de servicios de saneamiento incluye los datos de cualquier sistema que posean los hogares para la disposición de excretas: inodoro conectado a red de drenajes o a fosa séptica, excusado lavable, letrina o pozo ciego.

1.3.1.3. Contaminación de los cuerpos de agua

Guatemala dispone de 38 ríos principales, los cuales se encuentran distribuidos en tres vertientes hidrográficas: la del Pacífico, del Atlántico y la del Golfo de México. El indicador – señal de mayor facilidad de interpretación a nivel macro, es la cantidad de ríos principales que han superado los límites permitidos de elementos contaminantes. Al 2009, por lo menos 14 ríos principales y cuatro lagos presentaron altos porcentajes de contaminantes físicos, materia orgánica, microorganismos, contaminantes tóxicos y materiales cancerígenos; lo cual implica riesgos considerables en la utilización de dichas aguas para consumo humano y riego. Para el 2013 se determinó en la Evaluación Ambiental Estratégica, que se producían anualmente 116 millones de toneladas de desechos sólidos y se generaban 10 000 millones de metros cúbicos de aguas residuales al año.

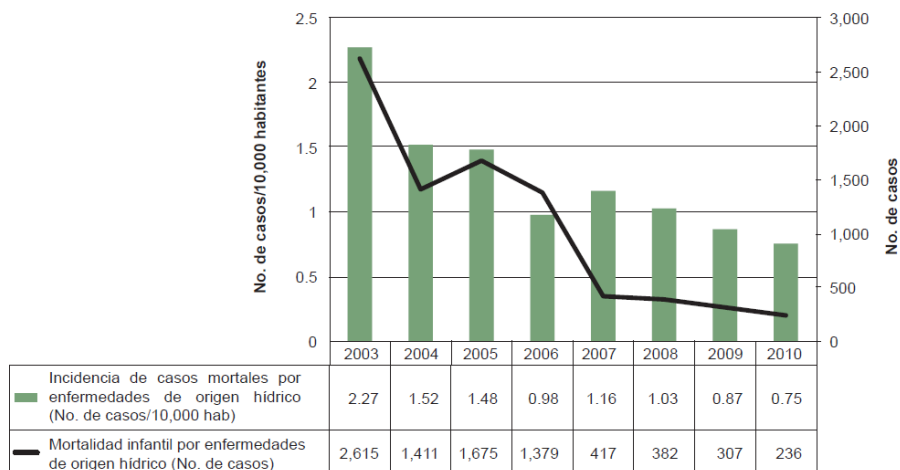
El IARNA concluyó que gran parte de la contaminación de los cuerpos acuíferos en el país proviene de aguas residuales de los centros urbanos, las cuales son vertidas hacia los ríos, generalmente sin ningún tipo de tratamiento. Dichas descargas son ricas en nutrientes, bacterias y patógenos que favorecen la proliferación de algas en los cuerpos receptores y genera factores de riesgo para la salud humana. De esta forma, los lagos más importantes del país: Atitlán,

Amatitlán, Río Dulce y Petén Itzá, muestran niveles de contaminación sin precedentes, y hay poca capacidad de revertir la situación por parte de las autoridades creadas para su manejo sustentable.

1.3.1.4. Incidencia de enfermedades de origen hídrico

La combinación del servicio deficiente de agua entubada, mala calidad del líquido para consumo humano y la falta de acceso a condiciones mínimas de saneamiento, ha incidido negativamente en la salud de la población guatemalteca; es, en caso extremo, una causa de mortalidad. Según estadísticas del MSPAS se han dado mejoras en cuanto a la reducción de enfermedades de origen hídrico: de 86 a 38 casos por cada mil habitantes desde el año 2005 hacia el 2010. En la figura 25 se muestran los adelantos en dicho aspecto, observándose un 90% de reducción en mortalidad infantil por causas de origen hídrico en el periodo 2003 – 2010. En el mismo periodo, se redujo un 67% la incidencia de casos mortales por enfermedades de origen hídrico a nivel nacional.

Figura 25. Incidencia y mortalidad infantil por enfermedades de origen hídrico



Fuente: Perfil Ambiental de Guatemala 2010 – 2012.

1.3.1.5. Dinámica de la institucionalidad pública

En el análisis realizado sobre las TFCRH por la ingeniera Gordillo en el 2010, se identifican algunas áreas de dichos territorios que son susceptibles a destinarse a categorías de manejo específicas: conservación, restauración para manejo forestal sostenible, restauración prioritaria para conservación y restauración prioritaria para manejo forestal sostenible. Para ello se realiza un estudio de cotejo entre las categorías propuestas y las directrices actuales de conservación; la síntesis se muestra en la tabla XIII. Se puede observar que a pesar de que el 15% de la superficie se encuentra dentro de áreas protegidas, el resto no cuenta con ningún mecanismo institucional de conservación o manejo. Menos del 2% se ha establecido para proyectos del Programa de Incentivos Forestales del INAB, o del Programa de Apoyo a la Reconversión Productiva Agroalimentaria del MAGA.

Tabla XIII. **Mecanismos de conservación y manejo forestal sostenible en las TFCRH**

Categoría de manejo propuesta	Total área propuesta (ha)	Directrices actuales de conservación (ha)							
		Áreas protegidas	PINFOR protección	Proyectos PARPA	PARPA + PINFOR	Áreas protegidas + PINFOR	Áreas protegidas + PARPA	PINFOR + Áreas protegidas + PARPA	Ninguna protección
a. Conservación	768,540	150,604	1,866	2,194	7	6,327	6,889	16	600,636
b. Manejo forestal sostenible	616,647	138,392	497	4,607	-	4,322	3,620	-	465,209
c. Restauración para conservación	947,090	102,325	2,989	2,432	15	2,347	4,941	2	832,038
d. Restauración para manejo forestal sostenible	579,136	48,504	915	1,403	-	402	1,144	-	526,768
e. Restauración prioritaria para conservación	108,393	11,045	162	107	-	279	272	1	96,528
f. Restauración prioritaria para manejo forestal sostenible	79,755	8,900	62	135	-	63	49	-	70,546
Total	3,099,561	459,770	6,491	10,878	22	13,740	16,915	19	2,591,725
Porcentaje	100.00	14.83	0.21	0.35	0.00	0.44	0.55	0.00	83.62

Fuente: Perfil Ambiental de Guatemala 2010 – 2012.

1.3.2. Aspectos sociales de los servicios de agua y saneamiento

1.3.2.1. Agua y salud

El impacto más estudiado y significativo de no contar con un servicio de abastecimiento de agua de calidad, es el que corresponde a los efectos en la salud. A lo largo del tiempo se ha analizado dicha relación y se ha identificado los vectores de transmisión y cuantificando dicho impacto.

Se consideran las enfermedades de transmisión hídrica las que son consecuencia del consumo voluntario o accidental de agua contaminada, o bien a la exposición directa a agua contaminada o material fecal, así como en las cuales el vector prolifera en el agua. Deben considerarse también los trastornos ocasionados por la ingesta de alimentos contaminados por riego o bien, por su manipulación en condiciones antihigiénicas. Todo lo anterior puede derivarse en enfermedades infecciosas, gastrointestinales y dérmicas, como por ejemplo la fiebre tifoidea, el cólera, dengue y la más frecuente, diarrea.

Otro factor determinante asociado del contagio o prolongación de dichas enfermedades es la accesibilidad a atención médica, hábitos y prácticas correctas de higiene, las cuales están fuertemente relacionadas con el nivel de educación en los niños y, particularmente, la madre o persona encargada del hogar.

Hasta el 2007, se reportó por parte del MSPAS que cinco de las primeras veinte causas de morbilidad general respondieron a enfermedades de transmisión hídrica: diarrea aguda, parasitismo intestinal, amebiasis intestinal, dengue y malaria clínica. A pesar de que no puede atribuirse la totalidad de los casos a esta causa, debido a la falta de especificación de las estadísticas, se registraron un poco más de 1 millón de casos. En el caso de la mortalidad

general, en el 2002 el 10% de las muertes se debía a enfermedades de transmisión hídrica, mientras que la enfermedad diarreica aguda fue la segunda causa de morbilidad. Asimismo, en el 2007 dicha enfermedad representó la cuarta causa de mortalidad general. La situación descrita ha implicado grandes costos a nivel familiar y social. Según análisis realizados por RASGUA en el mismo año, la población sin acceso al servicio es la más vulnerable, presenta mayores tasas de morbilidad general y morbilidad de los niños de 1 a 4 años por contaminación del agua, así como mortalidad debida a enfermedades diarreicas.

1.3.2.2. Agua y educación

El acceso al servicio debe considerar las consecuencias en la educación de los menores, principalmente de las niñas. Como ya se mencionó, la población carente del servicio se encuentra más vulnerable frente a las enfermedades de transmisión hídrica; de forma que, al enfermarse los niños, se ven imposibilitados de cumplir con la asistencia escolar. Otro factor determinante corresponde a la asignación de responsabilidades para el acarreo del agua, a menudo asignada a los niños; según RASGUA, este tiempo puede implicar entre 3 y 4 horas promedio al día, y tiende a coincidir con la jornada de estudio.

Así también, las condiciones sanitarias de la escuela y la falta de servicios sanitarios pueden aumentar los índices de deserción escolar, principalmente en las niñas después de la pubertad. Por otra parte, se ha determinado que al existir un mayor nivel educativo en la madre, existe una menor posibilidad de enfermedad diarreica por parte de los hijos. Esto debido a la existencia de mejores prácticas de higiene, mayor conciencia sobre la calidad del agua y sus formas de tratamiento, así como una mejor capacidad de interpretación de los síntomas.

1.3.2.3. Agua y género

Como se mencionó anteriormente, la tasa de deserción escolar en niñas es mayor respecto a los niños, considerando la falta de acceso a servicios de agua y saneamiento. Asimismo, en la mayoría de casos la mujer es la encargada y responsable de asegurar el abastecimiento de agua en el hogar; el 74% de las actividades de acarreo son realizadas por mujeres y niñas. Además, la mujer suele ser la responsable de tratamiento de agua, labores de limpieza e higiene en el hogar y lavado de los alimentos, entre otras actividades vinculadas con el recurso, estimándose que se emplea entre 5 y 6 horas diarias para realizar dichas actividades. Dicha situación genera la indisponibilidad de tiempo para realizar otras actividades, limitando la inserción laboral en el mercado formal y representando su consecuente costo de oportunidad por los ingresos que deja de percibir por realizar las tareas anteriormente descritas.

Relacionado al párrafo anterior, se hace necesario considerar los espacios de participación de las mujeres en la toma de decisiones respecto al manejo y uso del recurso. A pesar de que en la mayoría de casos las mujeres son las responsables del uso del agua y tienen mejor conocimiento de la problemática, quedan relegadas y excluidas de los procesos de decisión relativos a proyectos y obras relacionadas con los servicios.

De igual forma, la presencia de servicios de agua potable y saneamiento hace posible una mayor privacidad y seguridad, lo que repercute principalmente en el bienestar de las mujeres y disminuye las probabilidades de violencia y acoso sexual.

1.3.2.4. Agua y pobreza

Todos los impactos hasta ahora mencionados se encuentran vinculados directamente con la pobreza, donde esta se convierte en causa y consecuencia de este círculo vicioso padecido principalmente por la población que carece de una buena prestación de los servicios. Esto puede evidenciarse al observar que la mayor cantidad de hogares que no cuentan con los mismos se encuentra en situación de pobreza, viven en zonas rurales y son indígenas.

Asimismo, la distribución de los casos de diarrea está asociada con factores económicos y sociales, tales como la pobreza, analfabetismo, desnutrición crónica, origen étnico y zonas rurales. Puede verificarse también una correlación directa entre la cobertura del servicio y el ingreso de los hogares, ya que solamente un 9% del quintil más bajo tiene acceso, mientras que, en el quintil superior la cifra asciende a 72%. La cifra anterior se explica a la condición del agua como necesidad vital, así como las pocas oportunidades que tienen de acceder al mismo por las condiciones de pobreza. De cierto modo, la mayor parte de hogares encuentran una forma de acceder a alguna fuente de abastecimiento de agua, puede ser lejana, de diversa calidad, con carácter irregular e intermitente, ya que de otra forma no podrían sobrevivir; por ello hace falta énfasis en la mejora de la calidad del agua suministrada junto al acceso de la misma.

1.3.2.5. Costos incurridos por falta de una buena prestación

El contar con un servicio de calidad aumenta el tiempo disponible para realizar otras actividades económicas, sociales o culturales, lo que permite ahorrar parte del ingreso, dado que un servicio adecuado por red puede ser adquirido a un precio menor que las provisiones alternativas. Dicha red también

puede ofrecer beneficios adicionales como presión, calidad, continuidad y seguridad.

- Costo de oportunidad del tiempo de acarreo: La falta de acceso a una red pública de agua obliga a las familias al abastecimiento por alguna fuente alternativa. Especialmente en las zonas rurales, las personas dedican tiempo considerable al acarreo de agua, el cual se ve incrementado cuando no existe capacidad suficiente. Asimismo, las condiciones inadecuadas de almacenamiento pueden favorecer la propagación de ciertas enfermedades.

Como se mencionó, el tiempo dedicado a la actividad de acarreo representa un costo de oportunidad, ya que dicha necesidad imposibilita dedicar ese tiempo a otras actividades, principalmente productivas. Con ello existen una potencial pérdida de ingresos, así como de actividades educativas o recreativas.

Es de notar que, al existir una mayor distancia de la fuente de abastecimiento, también es necesario un mayor tiempo y esfuerzo, así como se incrementan los costos asociados a dicha actividad. Esto genera un menor consumo de agua por persona, el cual probablemente se encuentra por debajo de la dotación mínima recomendada por el PNUD, de 1 700 litros por habitante al año. Para el 2013, a pesar de que las estimaciones de disponibilidad de agua en Guatemala eran de 7 539 litros por habitante al año, dicha disponibilidad se encuentra en forma desigual dependiendo del área a evaluar. De esta forma, la escasez de agua no permite prácticas adecuadas de higiene y limpieza, y aumenta la probabilidad de contagio de enfermedades de origen hídrico.

- Gastos en provisión de agua: por lo general, las formas alternativas de abastecimiento de agua no presentan el mismo nivel de calidad en potabilidad, continuidad y presión respecto al servicio de red domiciliaria. Asimismo, pretender la obtención de un estándar equivalente conllevaría a un gasto prohibitivo o una drástica reducción del nivel de consumo, por ejemplo, consumir solamente agua embotellada.

Al no existir un suministro por red, 4% de la población realiza el abastecimiento ya sea de un chorro público fuera del terreno; pozo, 15,3%; camión o tonel, 2,2%; río, lago o manantial, 4,8%; o por otras fuentes, 3%. En términos generales, para alcanzar un nivel de consumo equivalente a los hogares provistos por red pública, el costo por metro cúbico de abastecerse por camión o tonel resulta entre 10 y 20 veces mayor; esto ha provocado un menor consumo por persona y de peor calidad.

Así, la deficiente calidad del agua y la incertidumbre sobre su continuidad pueden provocar costos adicionales vinculados al tratamiento de agua y a la compra de agua embotellada. A pesar de que el gasto en agua purificada representa el triple de la factura del servicio, el 20% de los hogares conectados realiza dicho gasto. Con referencia al año 2010 y teniendo en cuenta que el costo del mismo es entre 80 y 100 dólares por metro cúbico, este significaría casi la mitad del salario mínimo de 200 dólares, y sería tres veces mayor que la canasta alimentaria mensual de un individuo. Todo lo anterior ha evidenciado que tanto las familias conectadas como las no conectadas a la red pública, incurren en gastos adicionales derivados del inadecuado servicio de agua potable, que representa un alto porcentaje del presupuesto familiar en el caso de los hogares con mayores índices de pobreza.

- **Gastos en salud:** Las deficiencias en el servicio han provocado costos adicionales tanto para las familias afectadas como para el Estado. Dichos gastos se realizan principalmente en atención médica, que incluye consultas, exámenes e internación. Para el año 2004, según SEGEPLAN, el costo promedio de los tratamientos asociados con enfermedades diarreicas era de aproximadamente 35 dólares por evento; esto incluye la consulta, análisis, diagnósticos, medicamentos y tratamientos.

Además, la mala salud de alguno de los integrantes de la familia puede impactar en un menor ingreso ante la imposibilidad de asistir al trabajo o la necesidad de cuidado de los menores enfermos; así, se hace necesario un gasto extra en transporte hacia el centro de salud, compra de medicamentos y dietas especiales.

1.3.2.6. Agua y cohesión social

Se ha determinado la existencia de efectos vinculados a las vivencias, sensaciones, sentimientos y percepciones subjetivas de cada individuo, que resultan complicados de cuantificar. En dicha línea, pueden existir también factores psicosociales tales como la vergüenza, incomodidad por falta de limpieza del área y su impacto en la estética del lugar en que se habita. Asimismo, la limitación en el aseo personal puede ser motivo de vergüenza y discriminación.

Para la sociedad en su conjunto, el acceso a servicios de agua potable y saneamiento de calidad representa una importante condición de estabilidad política y social; esto debido a que los problemas que le afectan tienen un gran potencial de provocar reacciones político-sociales que pueden tornarse explosivas y violentas.

1.3.2.7. Agua y medio ambiente

Al analizar el recurso hídrico relacionado con el funcionamiento del servicio domiciliario de agua potable y alcantarillado, existen dos puntos principales de influencia sobre el medio ambiente: la toma de agua cruda y devuelta de aguas residuales. A pesar de que en la demanda nacional representa un bajo porcentaje, el consumo de agua potable representa uno de los usos más exigentes por su continuidad e inelasticidad de la demanda; a su vez, el nivel de tratamiento de las aguas servidas determina las condiciones medioambientales de los cuerpos de agua e incide directamente en la calidad del agua cruda que se toma como insumo del sistema.

Según SEGEPLAN, al año 2006 solamente el 5% de las aguas residuales del total de consumo, es tratada adecuadamente. El resto son devueltas sin ningún tipo de tratamiento en los distintos cuerpos acuíferos y contribuyen a su contaminación desmedida. RASGUA determinó en el 2007 que más del 90% de las aguas superficiales se encuentran contaminadas con heces, desechos en descomposición, basura, químicos y otras sustancias perjudiciales para la salud. Dicha condición representa un riesgo al momento de utilizarse para aseo personal, higiene del hogar, riego de cultivos, elaboración de alimentos o área recreacional; y expone a aproximadamente 3 millones de personas a nivel nacional. En algunos casos, se excavan pozos de agua que se encuentran próximos a fosas sépticas, lo que provoca contaminación con microorganismos de origen fecal en el agua destinada a consumo humano.

1.3.2.8. Agua y economía

Esta relación tiene sus mayores efectos visibles en la producción agrícola y su consecuente comercio exterior. La calidad del agua empleada para riego determina la calidad de algunos productos agrícolas. Asimismo, tiene incidencia

en las actividades turística e industrial, de forma que la estimación de generación directa de valor agregado del agua era equivalente, en el 2006, a un 5,6% del PIB. Para el mismo año, el 70% de la población económicamente activa del país se encontraba en relación directa o indirecta con el aprovechamiento del recurso hídrico.

En el sector agropecuario, el contar con agua en buenas condiciones permite el desarrollo de producción agrícola en la temporada seca, así como mejorar significativamente la calidad de los alimentos. A pesar de ser una práctica con menor superficie cultivada, todavía se realiza riego de cultivos con aguas servidas en algunas zonas del país, tal como se observa en Almolonga. Dicha ciudad abastece de hortalizas al mercado nacional y a El Salvador, utilizando para riego el agua del río Samalá, que a su vez recibe las descargas de la ciudad de Quetzaltenango.

En el sector industrial, la mayoría de las empresas se autoabastecen del recurso captándola o extrayéndola de las fuentes naturales, sin pagar por dicha extracción. De esta forma se garantiza el suministro y se evita depender del sistema público que podría resultar con mayores costos e ineficiencias. Esta situación hace poco probable la expansión de la red pública de agua que pudiera aumentar la demanda con fines industriales en el corto o mediano plazo. Al no existir una legislación específica sobre el recurso hídrico, se dan casos de sobreexplotación y contaminación del agua por parte del sector industrial; han surgido conflictos por las fuentes de agua, especialmente al aumentar la profundidad a la que es posible encontrar agua subterránea.

La vinculación con el sector turístico se establece principalmente por la importancia de contar con cuerpos de agua limpios, estéticamente agradables y seguros, así como por el consumo y uso de agua de los propios turistas. Cabe

mencionar que dos de los cuatros sitios más visitados del país, Atilán y Río Dulce, están asociados a cuerpos de agua. El turismo receptivo valora fuertemente la calidad del entorno natural, donde el agua se presenta como uno de los principales elementos visuales y estéticos; por lo que los cuerpos de agua contaminados y la probabilidad de adquirir alguna enfermedad de origen hídrico hacen del país un destino turístico menos atractivo.

En cuanto al comercio exterior, el riego con aguas servidas junto a las malas prácticas de higiene, pueden impactar de forma negativa en la calidad del producto de exportación, con su respectiva reducción de competitividad y pérdida económica para el país. Como ejemplo se puede mencionar la suspensión por 4 meses, de exportación de mora y frambuesa hacia Estados Unidos a finales de los 90, debido a un brote de *cyclosporiasis* que afectó a casi 3 000 personas, estimándose las pérdidas en más de 50 millones de dólares. Para el año 2000 ocurrió un brote similar, por lo que se perdió en forma definitiva dicho mercado y redujo drásticamente el cultivo de frambuesa en el país.

De forma contraria, las buenas prácticas permiten la obtención de certificaciones exigidas para exportar al mercado de países desarrollados, lo que favorece la competitividad de las exportaciones. Algunas políticas públicas no realizadas, o su aplicación de forma inadecuada, pueden implicar un alto nivel de riesgo de generación de pasivos contingentes para el Estado. La falta de normativa ambiental, o el no cumplimiento de la misma, puede ser penalizada en el marco de los tratados internacionales y de libre comercio; así como la posible discrepancia con inversionistas extranjeros que pretendan realizar obras en el sector y que tienen el potencial de demanda a Guatemala en arbitrajes de jurisdicción internacional.

2. BICIMÁQUINAS

2.1. Precedentes: mecanismos operados a mano

Es notable la evolución histórica de la utilización de la potencia muscular, ya que en un principio era de forma cruda y rudimentaria; conforme los métodos fueron mejorando, se fueron extendiendo alrededor del mundo. De tal cuenta, existen tres formas en que la eficiencia de la aplicación de fuerza muscular humana podría caer muy por debajo de la óptima. En primer lugar, los músculos equivocados podrían estar involucrados. Es posible encontrar que antiguamente las personas estaban condicionadas a realizar trabajos forzados, por ejemplo, en el bombeo o elevación de agua de un pozo o una zanja, usando sólo los músculos de sus brazos y la espalda. Hoy está comprobado que para obtener una salida de potencia máxima con el esfuerzo mínimo, se deben utilizar los músculos de las piernas.

En segundo lugar, la velocidad del movimiento muscular generalmente era demasiada baja. La gente estaba obligada a tirar y empujar con todas sus fuerzas, avanzando lentamente en la tarea. Como una comparación moderna paralela a la fuerza desarrollada entonces, el esfuerzo realizado sería similar al de un ciclista intentando subir una colina empinada en las relaciones más altas, o bien, remeros intentando hacerlo con remos muy largos y con las manijas interiores muy cortas.

Como tercer punto, el tipo de movimiento en sí mismo, incluso si se lleva a cabo a la mejor velocidad posible usando las piernas, no necesariamente garantiza una óptima funcionalidad, sino que más bien complicaba su funcionamiento. Luego de hacer ciertas observaciones experimentales utilizando

un ergómetro, el doctor J. Harrison de Australia comparó la fuerza desarrollada por ciclistas y remeros profesionales. El resultado, para su asombro, fue que no existía una diferencia significativa entre la fuerza desarrollada por las diferentes disciplinas. Tras algunas modificaciones al ergómetro, pudo verificar que en la acción de remar se produjo un incremento sustancial de la fuerza desarrollada; esto era posible cuando el apoyapié se deslizaba, y no el asiento, como en los botes normales de competición. De esta forma se involucra menos masa muscular en el movimiento, y es menor la energía cinética necesaria de absorber por los constantes cambios de dirección, requeridos en el movimiento repetitivo realizado por el atleta.

Investigó también los efectos de la utilización de mecanismos que conservan esta energía cinética aplicados al ergómetro, y empleó diferentes mecanismos de biela – manivela, como el de un pistón – cilindro en un motor de combustión interna. Llamó a estos movimientos “forzados”, contrarios a los movimientos normales de remo, libres; encontró que todos los individuos produjeron un aumento sustancial, sobre su mejor marca de potencia obtenida en pruebas anteriores, ya sea remando o montando bicicleta. De esta forma obtuvo una potencia constante de aproximadamente medio caballo de fuerza durante 5 minutos.

Hasta que Harrison hizo su trabajo, no existía algún estudio en cuanto a qué movimiento muscular resulta más adecuado utilizar, ya sea para deporte, o bien para realizar un trabajo físico. Otra investigación por Frank Whitt, en Inglaterra, demostró que la potencia de salida medida por ergómetro puede ser sustancialmente más baja que la producida por el mismo atleta, en las condiciones naturales en que desarrolla su disciplina. Esto debido a la ausencia de viento autoproducido por estas acciones en condiciones naturales o normales, que puede generar un calentamiento mayor en el cuerpo. Son pocos los

movimientos utilizados históricamente para aprovechar la energía muscular humana que incorporan una acción de refrigeración intrínseca. Tal hecho provocó en su momento las consecuencias de salud que sufrieron los obligados a lidiar con el estrés y desgaste muscular que genera realizar movimientos inapropiados; en contra de resistencias que resultaban demasiado grandes y a velocidades demasiado bajas. A continuación, se mencionan algunas de las herramientas operadas manualmente que fueron desarrolladas para optimizar algunos procesos y enfocados a resolver algunas problemáticas específicas de su tiempo. Estos han servido como base para el desarrollo de la tecnología en otras máquinas herramientas.

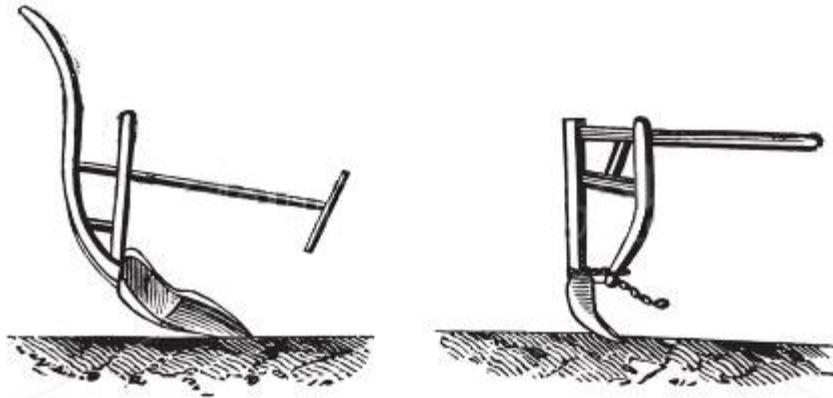
- Arado de operación manual de Shantung: este es un arado primitivo, que, por falta de animales de tiro tiene que ser operado por el hombre. Para utilizarlo se requiere de dos personas, una empuja y otra tira contrariamente. Todavía se utilizaba en China en los años veinte, en regiones donde por la extrema pobreza no contaban con el acceso a métodos más modernos, económicos y eficientes.

Como puede apreciarse en la figura 26, consta de una base de madera, con una parte de hierro fundido con la forma de arado, en uno de sus extremos. Dos postes están firmemente sujetos a la base; la parte del hierro fundido se considera como delantera; el poste trasero se encuentra doblado hacia atrás. De esta forma, al inclinarse hacia delante y hacia abajo puede presionar sus hombros contra dicho poste, mientras que sus manos sujetan los dos extremos salientes del mango cruzado, el cual, a su vez, es conducido por la parte baja del poste curvado. Así, se logra guiar y empujar el arado con el mismo movimiento.

Para llevar a cabo esta ardua tarea, ambos labradores utilizan principalmente los músculos de sus piernas, los que resultan más

apropiados para el trabajo. Sin embargo, los movimientos son demasiado lentos para que resulte eficiente y se llega a un pobre acoplamiento de impedancia, de forma que se produce un sobreesfuerzo realizado por los demás músculos para poder aplicar correctamente la fuerza en las piernas. Este dispositivo es apto solamente para tierra suave, ya que en un suelo rocoso resultaría tortuoso e ineficiente.

Figura 26. **Arado de Shantung**

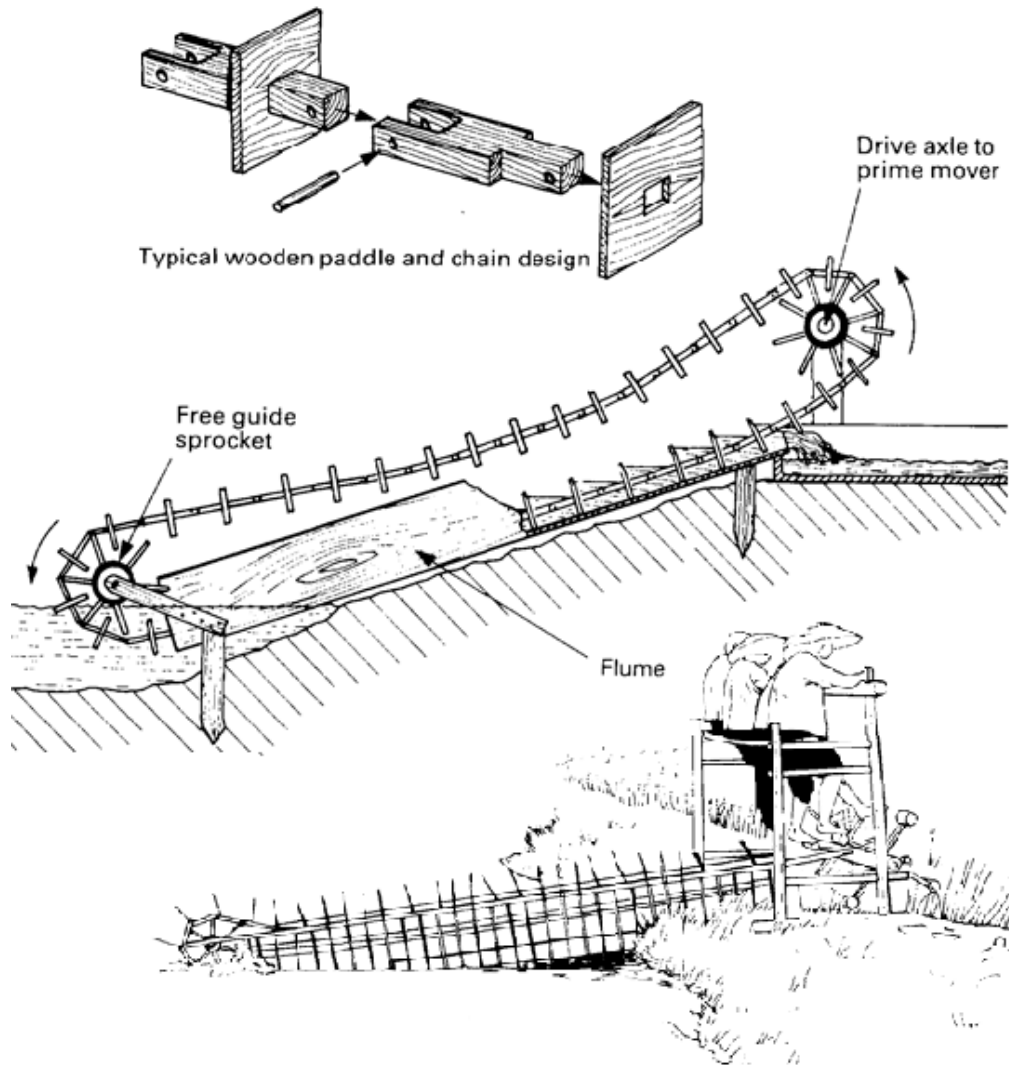


Fuente: <http://bit.ly/2wqXLNI>. Consulta: septiembre 2017.

- Manivelas operadas a mano: este es tal vez el método más práctico para obtener un movimiento rotatorio, y ha sido utilizado por siglos. El primer mecanismo desarrollado de esta naturaleza hasta ahora descubierto es una bomba utilizada en grandes embarcaciones romanas, empleada para retirar el agua que entraba por incidentes o imprevistos. El mecanismo de la manivela accionaba una cadena de cubetas o recipientes que removían desechos y fangos en los embarcaderos. El mecanismo de la cadena de cubetas sirvió para realizar el transporte de agua hacia locaciones elevadas. En China utilizaron en su momento una variante de la cadena sinfín para el transporte del vital líquido; en vez de cubetas, el agua era captada por tablones que se deslizaban sobre una canaleta introducida en el cuerpo de agua, como puede observarse en la figura 27. Sin embargo,

podría no resultar tan eficiente debido a la fricción generada y al escape o filtración del líquido.

Figura 27. Cadena sinfín de tablonés para bombeo



Fuente: <http://bit.ly/2gxSiIL>. Consulta: septiembre 2017.

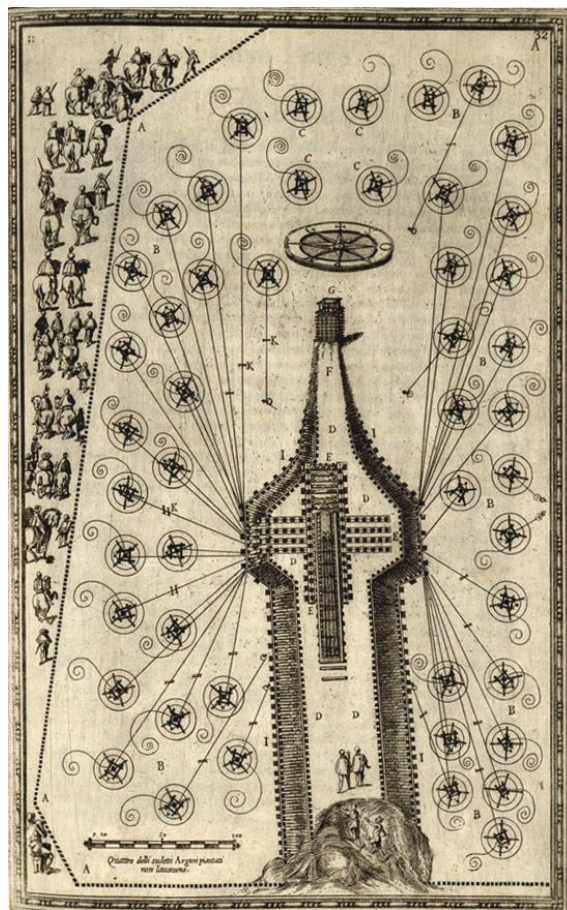
En *The Encyclopedie des Planches* de 1751, escrita por Denis Diderot y Jean Lerond D'Alembert, se puede observar en varios dispositivos el uso extendido de la manivela operada manualmente, en los talleres de manufactura europeos. En la Revista *Science Record* de 1872, se

muestran, por ejemplo, una bomba de aire manual para bucear, además de un removedor múltiple para el proceso de manufactura de nitroglicerina. Estos son ejemplos de aplicaciones que necesitan un par de torsión bajo para funcionar. Por su parte, entre algunos artefactos de entonces que necesitaban un alto par de torsión, es posible mencionar el escurridor manual de ropa y un tipo de torno manual para realizar cortes; este tipo de máquinas necesitaban una gran precisión y destreza, ya que mientras se hacían funcionar con una mano, con la otra se tenía que llevar a cabo otra operación que requería exactitud y precisión.

- Cabestrantes: estos representan un gran avance respecto a los mecanismos predecesores, cuando se necesita maximizar la potencia de salida con fuerza humana. Para accionarlo se necesita solamente caminar, por lo que se usan así los músculos de las piernas. El movimiento debe ser razonablemente eficiente, y la velocidad puede ser variada con un carrete de diferente tamaño. Un claro ejemplo del uso que se le dio en su momento es la construcción de un obelisco en el Vaticano, de 360 toneladas, el cual fue dirigido por el papa Sixto V en 1586. Cuarenta cabestrantes fueron utilizados, así como ciento cuarenta caballos y ochocientos hombres, en un tipo de operación militar.
- Caminadoras: esta es la aproximación más cercana a la obtención de potencia a través de pedales. Se tiene información sobre diferentes variedades de caminadoras utilizadas en Mesopotamia, utilizadas unos 1200 años antes de Cristo. Estas continuaron utilizándose hasta finales del siglo XVII, donde grandes grúas accionadas a través de caminadoras aún se empleaban en el río Rin.
Las caminadoras tienen las mismas ventajas que los cabestrantes. El movimiento necesario para accionarlos es caminar, y mediante el cambio

de tamaño de engranaje se puede variar la velocidad, a modo de obtener la eficiencia máxima. Es común confundir el cabestrante con una caminadora; esta última tiene los mangos radiales fijos, así como la pasarela circular rotada, lo que hacía menos incómodo el trabajo en las largas jornadas laborales.

Figura 28. **Esquema del transporte del Obelisco de 1586**



Fuente: <http://bit.ly/2ew5Al1>. Consulta: septiembre 2017.

Una variación importante que se puede realizar en una caminadora es cuando se eleva un punto de la banda rodadora para que quede con determinada inclinación. De esta forma, en vez de continuamente sujetarse de una barra para empujar con sus pies hacia atrás, el operario

caminaba como si subiera por una colina o una rampa infinita. De tal modo, el peso del mismo es suficiente para hacer girar la rueda, y la barra horizontal sirve para que el operario pueda sostenerse. Una desventaja de este sistema es que, al estar inclinado, no puede haber más de una persona operándolo, ya que existe solo una posición óptima para su funcionamiento; mientras que, en una posición horizontal, puede haber más de una persona operando.

La mayoría de las caminadoras son del tipo jaula de ardilla; de hecho, variedad de animales han sido utilizados para hacerlas funcionar. Sin embargo, cuando la operación requería de un riguroso control, como por ejemplo levantar objetos pesados en grúas durante las construcciones, o bien la operación de un torno, se utilizaban personas.

2.2. Bicicleta y pedales: revolución en movimiento

El aprovechamiento de la energía transmitida hacia un mecanismo de pedales puede ser dividido en dos categorías: aquellos en los que se necesita poca potencia de salida mientras se ejecuta otra acción que requiere precisión, como se observa en las máquinas de coser; y las aplicaciones en las que se necesita la máxima potencia posible de salida, como en cierto tipo de bicicletas.

El mecanismo de pedales se utiliza frecuentemente para generar una baja potencia de salida, la cual se da de forma alternativa. Se puede mencionar por ejemplo, un taladro de arco para perforación de perlas utilizadas en collares; un esmeril de pie como el mostrado en la figura 29, con mecanismo de arco – cuerda y un resorte en voladizo; ambos datan del siglo catorce. Por su parte, los chinos utilizaron pedales para generar un movimiento continuo que hiciera eficiente el desmote e hilado del algodón: un extremo de un pedal estaba montado sobre un cojinete universal, cerca del nivel del suelo, mientras el otro pedal estaba

instalado sobre otro cojinete universal de forma excéntrica en la rueda motriz. De esta forma se lograba usar los dos pies en un solo pedal, ya que la rueda generalmente se inclinaba con un ángulo que hacía muy difícil utilizar el otro pedal.

Figura 29. **Esmeril accionado mediante pedal, mecanismo arco – cuerda**



Fuente: McCULLAGH, James C. *Pedal Power in work, leisure, and transportation*. p. 21.

En cuanto a la máxima potencia de salida, la principal aplicación de los pedales y su innovación en los mecanismos ha sido la bicicleta. Estos en un principio, le transmitían directamente el movimiento las manivelas montadas en la rueda motriz, tal como la primera bicicleta movida por pedaleo fabricada por Alexander Macmillan, entre 1839 y 1842. Sin embargo, en 1880, la empresa *American Star* introdujo una versión más segura de la bicicleta ordinaria de ese entonces, conocida como *penny-farthing*; esta permitía que una maza con juego libre hacia un lado accionara el mecanismo, de forma que el diámetro de la maza

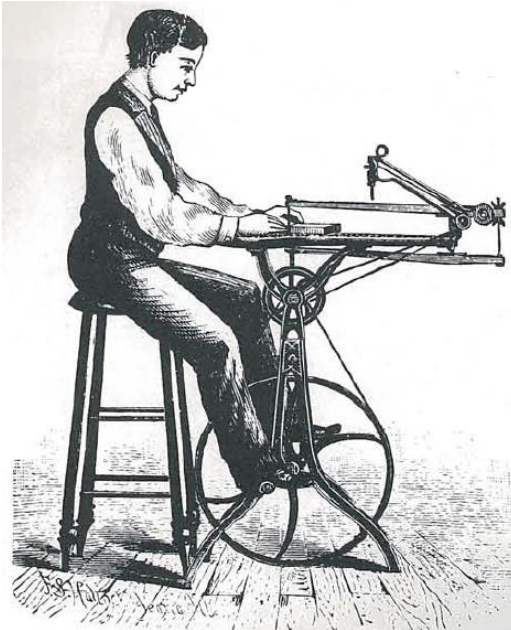
determinaba la relación de transmisión. Con ello se lograba tener una llanta de menor tamaño y, por ende, menos peligrosa. Sin embargo, estas fueron opacadas cuando aparecieron las bicicletas con ruedas de tamaño más apropiado y accionadas por un mecanismo de multiplicadora – cadena – piñón. Desde entonces todas las bicicletas han utilizado este mecanismo, con sus diferentes aplicaciones por disciplina y sus variadas innovaciones.

Hasta antes del desarrollo de los pedales y engranajes aplicados a la fabricación de bicicletas, no existían máquinas que utilizaran este mecanismo para aprovechar eficientemente la energía humana. Esto probablemente debido a los pocos avances hasta entonces en tecnología de materiales en aspectos de resistencia – peso. Sin embargo, conforme se desarrolló esta tecnología se comenzó a utilizar en otras aplicaciones, como algunos botes de competición, los cuales resultaban más rápidos y potentes que los normalmente impulsados por remos. Los pedales fueron aplicados en herramientas como tornos, sierras y bombas, como el ejemplo de sierra en la figura 30; incluso hubo intentos de realizar aviones accionados de esta forma.

La bicicleta influyó todos los aspectos de la vida cotidiana: trabajo, deporte, el ocio y el transporte primordialmente. Mensajeros, carteros y policías encontraron una forma más eficiente de realizar sus largos trayectos diarios, mientras que, a su vez se incorporaba el ciclismo como un juego olímpico. Con base en el principio de operación de la bicicleta, diversas empresas estadounidenses y europeas realizaron varios intentos por integrar este mecanismo a máquinas herramientas, que humanizaban el trabajo y permitían condiciones más adecuadas para evitar las consecuencias del excesivo trabajo pesado. Compañías como *H. L. Sheperd & Co.*, *W. F. Barnes & Co.*, y *Seneca Falls Machine Company*, desarrollaron algunas máquinas que aplicaban mecanismos y características de bicicletas, tanto para el hogar como para

talleres. Algunos de sus modelos fueron principalmente tornos, sierras y esmeriles, tal como se aprecia en las ilustraciones y en la figura 31. Se puede observar la simplicidad de las mismas, que representaban un gran avance tecnológico para entonces; el torno y sus aplicaciones es el que representó un mayor nivel de avance tecnológico; se puede encontrar algunos tornos de este tipo aún, en algunos talleres artesanales.

Figura 30. **Sierra de banco, 1892**

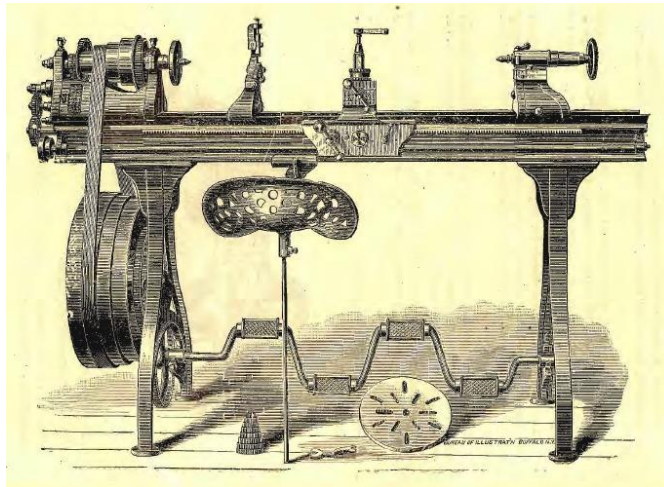


Fuente: <http://bit.ly/2ewkT3n>. Consulta: septiembre 2017.

De cierta forma, estas máquinas representaron una posibilidad para desarrollar otras habilidades, que a su vez se utilizaron como un método productivo en los diferentes hogares y permitieron la aparición de pequeños talleres ubicados en las mismas viviendas. Desafortunadamente, el avance de la tecnología de motores de combustión interna desvió los esfuerzos de mejora e innovación de mecanismos para el aprovechamiento de la fuerza motriz humana. En la actualidad, las consecuencias de la contaminación generada por la

revolución industrial y el uso desmedido de combustibles fósiles han puesto en evidencia la necesidad de reconsiderar este tipo de tecnología apropiada.

Figura 31. Torno 1875



Fuente: <http://bit.ly/2vWUemK>. Consulta: septiembre 2017.

2.3. Eficiencia de la energía generada mediante pedaleo

Sin lugar a dudas, la bicicleta fue uno de los inventos que más impacto ha tenido en aspectos tecnológicos y sociales durante el siglo diecinueve. La tecnología con que se desarrolló le permitió mejorar aspectos que antes de su aparición provocaban un funcionamiento ineficiente; principalmente en la resistencia – peso de los materiales, diseño avanzado de estructuras y mecanismos más eficientes. En el caso de la bicicleta, por ejemplo, pueden mencionarse las innovaciones en el uso de tubos ligeros hechos de aleaciones para los marcos; el sistema maza – rayos – rin para los aros; cojinetes sellados para los mecanismos de ejes y horquilla; cadena de rodillos; así como las llantas con cámaras neumáticas. Todo lo anterior ha supuesto una optimización significativa en términos de ergonomía, de forma que ha logrado su éxito al proveer una forma eficiente y económica de transporte individual a una escala prácticamente mundial; así como ha logrado adaptarse a las distintas condiciones

físicas, realidades y necesidades de las personas que la utilizan para transporte u otra utilidad. En términos energéticos, los motivos por los cuales se obtiene la eficiencia en la utilización de la bicicleta son:

- Utiliza los músculos más poderosos del cuerpo: los muslos.
- Se realiza el movimiento más adecuado y continuo: circular.
- Velocidad adecuada: 60-80 rpm
- Se transmite eficientemente esta energía al mecanismo cadena–piñón y cojinetes de bolas.

El torque ejercido por el movimiento de las piernas se traslada por el mecanismo pedales – bielas – multiplicadora, hacia el piñón sujeto a la rueda trasera mediante la cadena. Dicho torque no es constante, se hace mínimo en las partes superior e inferior del recorrido de los pedales, lo que resulta un tercio del máximo posible a alcanzar. Este se ha intentado eliminar para conseguir una salida más constante, de forma que hay técnicas de inclinación del pie sobre los pedales y para la disciplina del ciclismo, existen las zapatillas con clip al pedal. En una bicicleta, por el mismo movimiento es posible mantener la inercia y, por lo tanto, su fluidez, sin embargo, en máquinas estacionarias, el movimiento se vuelve inconsistente y es causa de esfuerzos indeseados. A modo de suavizarlo, se han utilizado diversos métodos para lograrlo, generalmente mediante la colocación de un volante; se usa en ocasiones un piñón elíptico, lo cual varía la relación de transmisión dos veces durante cada revolución del eje pedalier.

En algunas pruebas realizadas en laboratorio se adicionó un dinamómetro en la bicicleta y se demostró que un ciclista promedio logra generar 1/10 de caballos de fuerza o 75 watts al viajar a 19 Km/h. Por su lado, ¼ de caballo de fuerza, o 200 watts se puede obtener a unos 29 kilómetros por hora, lo que varios ciclistas pueden lograr por lo menos por un tiempo prudente; y casi 1 caballo de

fuerza o 750 watts es posible generar por aproximadamente un segundo. Esto revela la impresionante habilidad del cuerpo humano para producir 10 veces la fuerza ejercida normalmente, cuando así se le exige. El reto consiste entonces en aplicar correctamente esta energía en mecanismos productivos y útiles, además del transporte individual y colectivo. Particularmente, desarrollar métodos y herramientas que proporcionen alternativas adecuadas a la realidad de las poblaciones, para solucionar sus problemáticas e incrementar su calidad de vida.

2.4. Bicimáquinas y sus aplicaciones a través del tiempo

Como se ha mencionado, la principal aplicación del mecanismo de pedales ha sido para el transporte. Más allá del transporte individual, también se ha considerado el transporte de bienes y productos de primera necesidad, para lo cual se coloca una canasta ubicada sobre la rueda frontal que puede soportar hasta 100 libras. Para cargas mayores o más voluminosas resulta más eficiente el triciclo, el cual se ha utilizado desde el siglo XX en diferentes partes del mundo como bicitaxi o para transporte de cargas.

Los principales problemas de los diseños comercialmente desarrollados y utilizados hasta 1975 evidenciaban la necesidad de un replanteamiento general del diseño que permitiera mejorar los aspectos integrados de funcionamiento – rendimiento – seguridad. Los principales problemas radicaban en los siguientes puntos:

- El uso de una sola relación de transmisión: 1 plato en la biela, 1 paso en el piñón; esto generalmente dificulta el arranque y avance en pendientes elevadas.
- Solamente se le transmite movimiento a una rueda desde el pedaleo.

- El frenado se aplica solamente a una rueda.
- Las partes ordinarias de bicicletas no resisten las cargas impuestas, por lo que llegan a ceder; las piezas que regularmente sufren algún fallo son las llantas y las horquillas.
- El marco en sí mismo, de construcción tubular y con geometría similar a una bicicleta, no se considera como el diseño más adecuado al evaluar la relación peso – fuerza.

A pesar de las circunstancias descritas, el uso de dicho medio ha sido bastante popular entre las clases medias y bajas de las poblaciones tanto urbanas como rurales, en la India, China, Indonesia, sureste de Asia, y varios países latinoamericanos. Su utilización ha representado una solución económica, de bajo consumo energético, sin generar emisiones directas de gases de EI, así como tampoco contaminación auditiva; además que genera una fuente de ingreso para quien ofrece dicho servicio.

Por ello, Stuart S. Wilson junto a Oxfam, desarrolló el *Oxtrike*, el cual consistía en un chasis base, al que se le podía adaptar una serie de “carrocerías” según lo que se fuera a transportar en él. Soportaba una carga máxima de 330 libras, incorporando una serie de innovaciones con las que solucionaban las situaciones anteriormente descritas, las que consistían en:

- Las llantas utilizadas son de 20 pulgadas de diámetro, lo que permite un bajo centro de gravedad junto con la carga, así como un espacio hacia el nivel del suelo; las traseras contienen un refuerzo para las cargas laterales, mientras que la delantera es una utilizada en las bicicletas de carga convencionales.

- Se incorporó una maza con tres velocidades estándar en el sistema de transmisión; intermedia entre una cadena primaria y otra secundaria. Esto genera la posibilidad de utilizar cierto rango de relaciones que facilitaba el comenzar la marcha con una carga pesada, o bien, subir una pendiente.
- Ya que los frenos son fundamentales para la seguridad, en ese entonces se utilizó freno de varilla para la rueda delantera. Sin embargo, para las ruedas traseras se utilizaron tambores individuales montados en los extremos del eje, aplicándose el frenado de forma uniforme mediante una varilla de equilibrio conectada al pedal de freno. Este también puede ser utilizado como freno de mano.

Figura 32. **Chasis del Oxtrike, años 70**



Fuente: <http://bit.ly/2x3QaGt>. Consulta: septiembre 2017.

- La construcción de una bicicleta convencional supone la soldadura de tubos de pared delgada, así como el uso de conexiones de tubos específicos que no son fácilmente encontrados de forma comercial. Por lo mismo, el *Oxtrike* se fabrica de hoja de acero suave con una dureza estándar, la cual puede ser cortada fácilmente en una guillotina de pie,

maquinada en una dobladora manual, y unida por cualquier método de soldadura, atornillado o remachado como se aprecia en la figura 32.

- Se diseñó una variedad de carrocerías dependiendo del uso que se le fuera a dar. Una de las más utilizadas fue la de bicitaxi, con un asiento corrido que no compromete el ancho del vehículo; así como para transporte de bienes y mercancías, puede llevar hasta 150 Kg, como se observa en la figura 33. El chasis puede ser acondicionado con una carrocería cerrada para el transporte de paquetes, o bien un cuerpo de tolva para el transporte de arena, grava o pedrín.

Figura 33. **Oxtrike en su versión de bicitaxi**



Fuente: <http://bit.ly/2gvtcgN>. Consulta: septiembre 2017.

Asimismo, cuando se utiliza el mecanismo de pedaleo para accionar máquinas estacionarias, se encuentran tres posibles configuraciones de mecanismos:

- Una manivela manual, acoplada a una estructura donde se le adaptan unos pedales para poder accionarse por ese medio. Así pueden encontrarse diversos dispositivos tales como la desgranadora de maíz

mostrada en la figura 34, o bombas hidráulicas manuales acopladas a mecanismos de pedaleo.

- Unidad estacionaria de potencia por pedaleo: llamada *dynapod*, en inglés, la cual puede ser adaptada a cualquier mecanismo compatible para ser accionado. Se han diseñado diversidad de estos *dynapod*, que varían en los materiales tanto para el chasis como para los volantes. De esta forma se lograba poner en funcionamiento tanto los mecanismos ya accionables normalmente mediante las manos, como los que no eran comúnmente accionados por un humano: rueda de alfarero, taladro, rueda de molienda horizontal, etc.

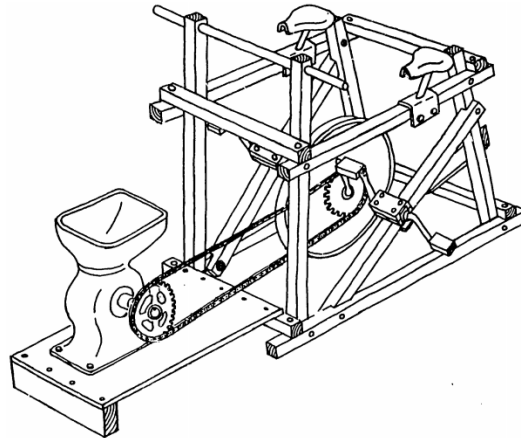
En la figura 34 se muestra un prototipo de *dynapod* llamado *Dual-Purpose Bicycle*, utilizada para la conducción mecánica de múltiples máquinas y producción de electricidad. El mecanismo consistía en una rueda volante adaptada al chasis de la bicicleta y una base en la llanta trasera que podía plegarse hacia arriba; se utilizaba para transporte de carga o mercancía. La capacidad de potencia depende del tamaño de la rueda volante y las relaciones de velocidades posibles de obtener; en la figura 35 se observa, el *dynapod* conectado a una desgranadora de maíz.

Los principales retos de armar este tipo de mecanismos consisten en:

- La uniformidad de salida de potencia, la cual se mencionó anteriormente y puede suavizarse por medio del volante.
- La necesidad de una estructura rígida entre el mecanismo conducido y el conductor, la cual también debe ajustar la tensión adecuada de la cadena. Esta estructura a veces requiere dimensiones considerables para su instalación.

- Falta de autoenfriamiento por la inamovilidad. Se puede resguardar al usuario de algunas condiciones climáticas mediante un quiosco sencillo con un techo adecuado.

Figura 34. **Desgranadora de maíz conectada a mecanismo de pedaleo**



Fuente: WEIR, Alex. *The dynapod: A pedal power unit.* p. 2.

Figura 35. **Prototipo de Dynapod conectado a desgranadora de maíz**



Fuente: <http://bit.ly/2eZD7eh>. Consulta: septiembre 2017.

- Una tercera forma consiste en diseñar el equipo desde un principio para que funcione mediante un mecanismo de pedaleo. Un ejemplo puede ser

el diseño del cabestrante mostrado en la figura 36, el cual muestra un prototipo accionado por dos personas pedaleando. Este utiliza dos volantes de automóvil:

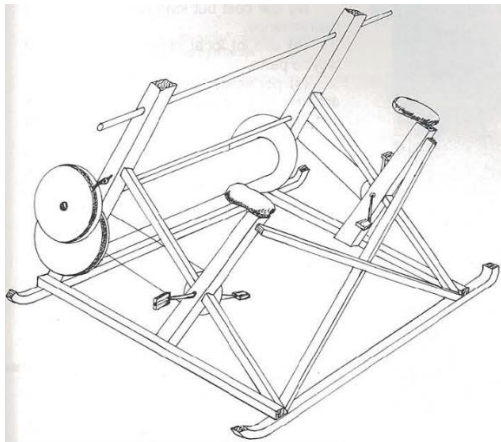
- El de la parte inferior, acoplado al tambor del cabestrante y accionado por medio de un piñón de arranque que conecta con otro engranaje de arranque del eje ubicado en la parte superior.
- El eje superior contiene, además del segundo volante, dos engranajes fijos conectados independientemente a un mecanismo convencional de pedales. Cabe mencionar que el desfase de ángulos entre cada pareja de pedales, debe compensar la discontinuidad en la potencia transmitida.

La función del segundo volante consiste en rotar lo suficientemente rápido para almacenar energía, que permita descargarla para superar cualquier obstáculo que se oponga al movimiento del objeto remolcado. Así también, el anillo del engranaje se debe añadir junto con un trinquete que le permita funcionar como un ratchet, previendo de esta forma el regreso de la carga. Para descarga, se puede retirar el mecanismo de trinquete y controlar el descenso por medio del frenado.

Un uso alternativo consiste en el arado de la tierra, donde se puede adaptar un arado en el extremo de la cadena o cable. De esta forma, los usuarios se mantienen estacionarios mientras mueven el arado a través del cabestrante. Tiene las ventajas de ahorrar energía, ya que no se realiza esfuerzo caminando; evita la compactación de la tierra, un problema recurrente cuando se utilizan tractores; así como permite utilizarse en tierra encharcada.

En Bangladesh y otras partes del mundo se implementó, por parte del *International Rice Research Institute*, una bomba de riego que tomaba agua de los ríos. Esta lo conseguía con un esfuerzo mínimo por parte del ser humano, quien solamente colocaba sus pies en los respectivos apoyos y se movía de un lado hacia el otro alternativamente. Al mantener cierta continuidad, se lograba bombear grandes cantidades de agua de forma eficiente; lo cual era posible al comprimir un mecanismo de diafragma con el movimiento alternativo del mismo. Esta presión se transmitía al líquido que salía por la válvula de descarga conectada a la manquera de conducción.

Figura 36. **Dynapod, prototipo**



Fuente: McCULLAGH, James C. *Pedal Power in work, leisure, and transportation*. p. 47.

Stuart S. Wilson argumentaba en 1977 que se requería la innovación en las bombas de riego accionadas por pedales; particularmente, que permitiera elevar el agua a alturas considerables. De esta forma, planteaba los siguientes requerimientos:

- Costo bajo.
- Calidad adecuada de los materiales: larga vida útil.
- Mantenimiento mínimo.

- Uso de materiales disponibles comercialmente.
- Uso de partes estándar de bicicleta: accionado a través de pedaleo.
- Portabilidad: debe poder trasladarse a diferentes sitios donde se requiera, y guardarse mientras no.
- Operado por dos personas: para suavizar la salida de potencia, así como por el aspecto social que involucra.

En la figura 37 se puede observar un modelo de bombas tradicional utilizado en China durante cientos de años. Se empleaba para bombeo de baja elevación por medio de una cadena de paletas cuadradas, y no es adecuado a lugares con distancias mayores de 10 metros desde la toma hacia la descarga.

Figura 37. **Bomba de paletas**

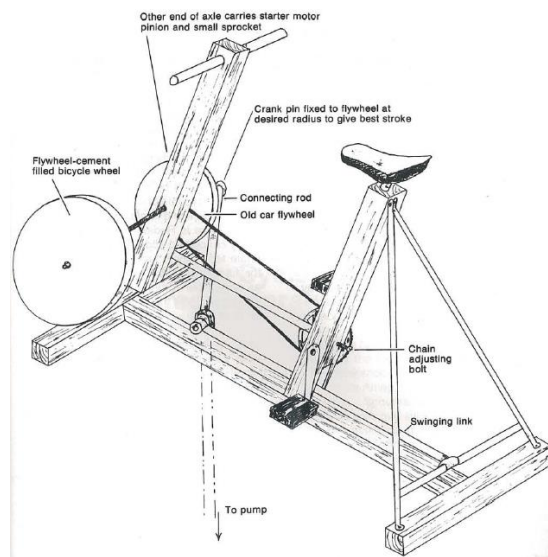


Fuente: <http://bit.ly/2wEP2Gh>. Consulta: septiembre 2017.

Se han podido adaptar mecanismos de pedaleo a equipos de bombeo para pozos, donde se alcanzan profundidades de hasta 100 metros. Como ya se ha mencionado, el operarlas mediante un método manual resulta ineficiente, por lo que realizar estas adaptaciones permitió hacer al menos tres veces más eficiente este proceso; de forma que se lograron mayores profundidades y esfuerzo mínimo de operación. En la figura 38 se aprecia un diseño de esta naturaleza,

donde se acortan la carrera y la velocidad de operación con un volante usado de automóvil y su piñón de arranque conectado al engrane de arranque del mecanismo motriz. El piñón es accionado por un mecanismo convencional de pedales para bicicleta que se encuentra en el mismo eje, y se usa una rueda rellena de cemento como volante.

Figura 38. **Prototipo de bomba de pozo accionada por pedaleo**



Fuente: McCULLAGH, James C. *Pedal Power in work, leisure, and transportation*. p. 52.

De cualquier forma, este tipo de tecnología ha propuesto soluciones sencillas a una problemática general y una necesidad básica como el agua. Se han diseñado máquinas para ser construidas por materiales fácilmente asequibles de forma comercial, así como se considera primordialmente el uso de piezas estándar de bicicleta. Las estructuras, dependiendo de la disponibilidad del material, pueden ser de madera o tubos de acero; pueden ser acoplados de forma fija o de forma que puedan desarmarse. Los mecanismos que se utilizan no requieren de un mantenimiento especializado ni detallado, por lo que se realiza prácticamente una única inversión para la solución de una necesidad básica.

3. BOMBAS RECIPROCANTE

3.1. Definición

Una bomba recíproca es la accionada mediante un mecanismo de desplazamiento positivo; es decir, a través del movimiento alternativo generado por un pistón, émbolo o un diafragma. Recibe un volumen fijo de líquido en condiciones de succión, lo comprime a cierta presión y lo expulsa por la boquilla de descarga. Son llamadas también bombas alternativas, debido al mecanismo que las acciona.

Se utilizan en numerosas aplicaciones donde las bombas centrífugas o rotatorias muestran una operación deficiente y de bajo rendimiento. Poseen una elevada eficiencia mecánica respecto a las centrífugas, por lo que resultan una adecuada solución cuando existen elevados costos por concepto de energía eléctrica. Realizar cualquier operación con la bomba inadecuada generará, sin duda alguna, un aumento en la demanda de potencia, su consecuente aumento en costo por energía y la frecuencia de mantenimiento.

Una de las ventajas de la bomba recíproca es que su eficiencia no depende estrictamente de la energía cinética como en la centrífuga; por tanto, no requiere altas velocidades para producir presión. Es posible obtener presiones altas a bajas velocidades; resulta adecuado en particular para manejar pastas agudadas abrasivas y líquidos muy viscosos.

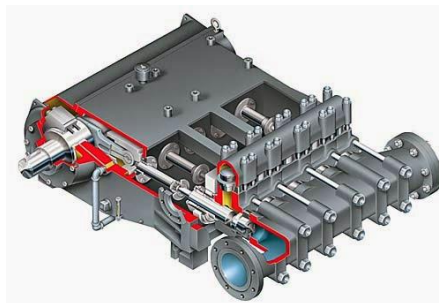
Básicamente, las bombas recíprocas pueden dividirse en dos clases: de potencia o de acción directa. En la bomba de potencia se hace alternar el elemento de bombeo con una manivela o un cigüeñal; se acciona mediante un

propulsor con eje rotatorio, como un motor eléctrico, de combustión interna o una turbina. Su mejor característica es una alta eficiencia, pues suele ser de 85 a 94%. La pérdida total incluye todas las que ocurren en las bandas, engranes, cojinetes, empaquetaduras y válvulas.

La bomba de acción directa se impulsa con un fluido-motor por medio de una presión diferencial. Estas estaban diseñadas originalmente para ser impulsadas mediante vapor, por lo que se les llamaba bomba de vapor; no porque lo bombearan, sino porque se accionaban mediante este. Uno de los fluidos actualmente utilizado es aire comprimido, con frecuencia para impulsar bombas pequeñas en servicios como pruebas hidrostáticas y dosificación de productos químicos.

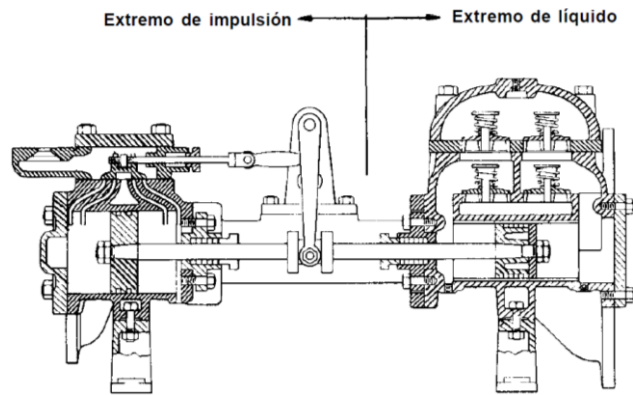
En las últimas, la velocidad se controla mediante la estrangulación del fluido-motor, y se emplean en aplicaciones que requieren alta presión y bajo flujo. Las presiones de descarga suelen ser entre 300 y 5 000 psig, en ocasiones exceden los 10 000 psig. Son más resistentes a condiciones extremas como el contacto con vapores corrosivos; dependiendo del modelo, no utilizan cubierta de cojinetes, caja de cigüeñal o depósito de aceite. En las figuras 39 y 40 se pueden observar los diagramas de una bomba de potencia y una de acción directa, respectivamente.

Figura 39. **Bomba de potencia**



Fuente: <http://bit.ly/2wG7obh>. Consulta: septiembre 2017.

Figura 40. **Bomba de acción directa**



Fuente: <http://bit.ly/2wICFJe>. Consulta: septiembre 2017.

3.2. **Aplicaciones y desventajas**

Entre algunas aplicaciones de las bombas reciprocantes se pueden mencionar:

- Carga de glicoles: sustancias utilizadas para eliminar la humedad del gas natural, tales como etilenglicol o trietilenglicol. Estos se bombean a un absorbedor con una presión de 1 000 psig, atrapando el contenido de agua en el gas. Luego se estrangula a presión atmosférica y calienta posteriormente para eliminar el agua. Por último, se enfría y se hace retornar al absorbedor mediante la bomba.
- Carga de aminas: sustancias empleadas para expeler el sulfuro de hidrógeno y dióxido de carbono del gas natural, tales como la monoetanolamina, así como otros absorbentes patentados. Se bombean hacia un absorbedor con 1 000 psig, lo que produce una acción similar a la de los glicoles.
- Gas seco o pobre: se bombea aceite para la absorción de hidrocarburos contenidos en el gas natural, tales como el butano, propano y etano.

- Inyección de agua salada: para la recuperación secundaria de petróleo y gas, frecuentemente se utiliza un método que consiste en inundar los yacimientos con agua. Por lo general, se bombea agua salada en pozos periféricos y obliga a los hidrocarburos a moverse hacia el pozo central.
- Sistemas de oleoductos y gasoductos: se inyecta amoníaco o hidrocarburos ligeros en las tuberías mediante bombas de potencia; también pueden trasladarse pastas aguadas y petróleo crudo.
- Sistemas hidráulicos: en las laminadoras, se utiliza un líquido hidráulico que depende del material a trabajar. Por tanto, puede bombearse aceite soluble, agua y keroseno para colocar los rodillos de las laminadoras, así como para mover el metal que se lamina.
- Producción de fertilizantes: se aplican diferentes químicos a altas presiones para añadir propiedades específicas, tales como amoníaco y carbamato de amonio. Estas bombas poseen algunas características específicas para dicha función, tales como prensaestopas especiales, o extremos hechos con acero inoxidable.
- Limpieza: mediante una bomba hidráulica de potencia se pueden conseguir presiones entre 7 000 y 5 000 psig, lo que facilita el lavado de equipos y estructuras.
- Pruebas hidrostáticas: se utilizan bombas de potencia y acción directa para dichas pruebas en equipos y sistemas.
- Pastas aguadas: utilizadas para manejar pastas como mantequilla de cacahuate, detergentes, plásticos, carbón y minerales pulverizados, de modo que trabajan en condiciones de alta presión y temperatura.
- Dosificación: se utilizan diversas configuraciones para dosificar líquidos, tanto en bombas grandes para tuberías con propulsión de velocidad variable, como pequeñas bombas de volumen controlado, utilizadas para inyectar cantidades precisas de productos químicos en la corriente de proceso.

- Homogeneización: proceso utilizado en la producción de leche, así como para otros productos alimenticios y no alimenticios. Este produce una consistencia uniforme al producto y evita la separación de sus fases.

Entre las desventajas, la más evidente es la discontinuidad del flujo, la cual puede corregirse mediante un adecuado diseño del sistema. Presentan también, en ocasiones, un costo inicial y de mantenimiento. La bomba de acción directa presenta una baja eficiencia térmica, cuando se le impulsa con un gas, tal como vapor de agua. Al no poseer un componente que almacene temporalmente la energía, tal como un volante, el gas motor debe mantener la presión de trabajo en el cilindro durante toda la carrera.

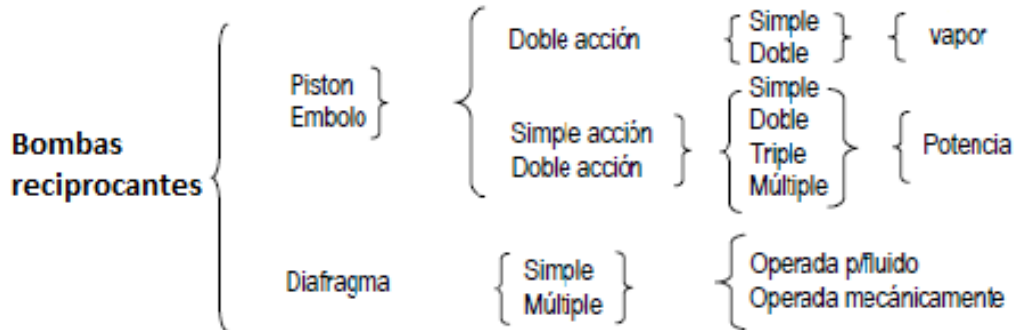
La mayoría de problemas con bombas reciprocantes pueden evitarse mediante un diseño adecuado del sistema, así como la selección conveniente de la bomba. Con velocidades apropiadas y un mantenimiento que conserve la función del prensaestopas en el émbolo, se garantiza un desempeño óptimo de la máquina.

3.3. Clasificación

Las bombas reciprocantes pueden ser clasificadas por sus características, como se describe a continuación en la figura 41:

- Extremo de impulsión: de potencia o acción directa
- Orientación de la línea de centros del elemento de bombeo: horizontal o vertical.
- Número de carreras de descarga por ciclo de cada biela: acción sencilla o doble acción.
- Configuración del elemento de bombeo: pistón, émbolo o diafragma.
- Número de varillas o bielas de mando: simplex, dúplex o múltiplex.

Figura 41. **Clasificación de las bombas reciprocantes**



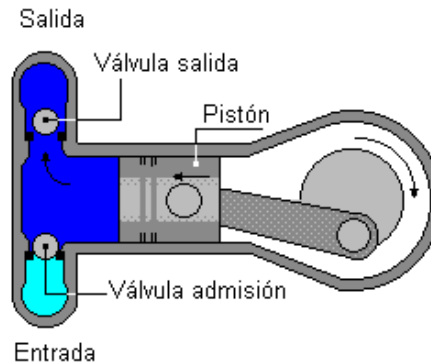
Fuente: <http://bit.ly/2vMlcSW>. Consulta: septiembre 2017.

3.4. Componentes del extremo líquido

Se llama extremo del líquido a la parte de la bomba que efectúa la acción propia de bombeo. Los tres componentes comunes en todos ellos son:

- Cilindro para líquido: es la pieza que retiene la presión y contiene el volumen desplazado del líquido; es la parte más importante de la cámara de bombeo. Generalmente, incluye y soporta a todos los demás componentes del extremo del líquido.
- Elemento de bombeo: pueden tener uno o más de dichos elementos; son generalmente pistones, émbolos o diafragmas, los cuales se mueven alternativamente hacia adentro y fuera de las cámaras de bombeo para producir su acción. Así, entonces, se pueden utilizar:
 - Pistones: elementos cilíndricos y planos, los cuales se instalan en una biela; contienen generalmente anillos selladores. Su utilización hace que los elementos selladores sean móviles. El pistón sella contra un cilindro o camisa dentro de la bomba, y produce succión y presión de descarga. En la figura 42 se puede observar el esquema de una bomba hidráulica de pistón.

Figura 42. **Esquema bomba de pistón**



Fuente: <http://bit.ly/2taNuon>. Consulta: septiembre 2017.

- Émbolo: varilla lisa de simple acción en su configuración normal, haciendo que los elementos selladores sean estáticos. De esta forma, solo debe sellar contra el prensaestopas tocando apenas la empaquetadura.
- Diafragma: paredes elásticas que se mueven en la cámara de forma que varían su volumen y realizan el empuje del líquido. Dependiendo del rango de temperatura a operar, se utilizan materiales como neopreno, vitón, teflón, poliuretano, entre otros sintéticos.
- Válvulas: Se requieren tanto para succión como para descarga, al menos un par por cada cámara de bombeo. Se pueden abrir por la acción de la presión diferencial ejercida por el líquido; son cerradas por mecanismos de resorte generalmente. También hay de bola, hemisféricas, de disco y de asientos cónicos.

3.4.1. **Empaquetaduras para bombas**

Representa uno de los principales detalles que debe ser atendido en el mantenimiento de las bombas reciprocantes. Su vida útil promedio es

aproximadamente de 2 500 horas; a pesar de ello, es posible conseguir más de 18 000 horas de funcionamiento mediante el uso de prensaestopas especiales. A continuación, se listan algunas causas de una corta duración de la empaquetadura:

- Empaquetadura incorrecta para la aplicación.
- Lubricación deficiente.
- Falta de alineación entre el émbolo o biela con el prensaestopas.
- Ajuste deficiente o sobreforzado de la empaquetadura.
- Altas velocidades o presiones de funcionamiento.
- Exceso de empaquetaduras, lo que provoca aumento de fricción.
- Altas y bajas temperaturas del líquido.
- Cavitación que provoca roturas en los resortes de válvulas.
- Sólidos, cuerpos extraños y lubricante contenidos en el líquido.
- Colocación inicial inadecuada de la empaquetadura.

Asimismo, conviene hacer una revisión de las otras partes del sistema además del cambio y ajuste de empaquetadura, ya que podrían indicar también la existencia de algún otro problema en una sección aparte de la bomba.

Si es inexistente la holgura entre el émbolo o biela y la empaquetadura, el volumen de fugas o escurrimiento también es nulo. Dicha característica requiere de blandura y flexibilidad en los anillos selladores, así como flexibilidad en la empaquetadura, de forma que se puede escurrir entre los espacios libres del prensaestopas, especialmente entre el émbolo y el buje del impulsor. Dicho buje debe producir una barrera eficaz; de lo contrario, la empaquetadura se extruirá y aumentarán las fugas.

3.4.2. Material del émbolo

Después de la empaquetadura, es el componente que se hace necesario reemplazar con mayor frecuencia. Para proporcionarle mayor duración se puede endurecer al aplicarle diversos métodos, tales como un revestimiento duro de cromo, diversas cerámicas y aleaciones de níquel o cobalto. La adición de partículas duras en las aleaciones que presentan menor dureza, aumentan la vida útil del émbolo, a expensas de una menor duración de la empaquetadura. Un ejemplo es el carburo de tungsteno en émbolos producidos en aleaciones de níquel o cobalto.

Las características de un revestimiento ideal son dureza, tersura, alto punto de fusión y resistencia a la corrosión, así como bajo costo. Dependiendo de la naturaleza del material con que están manufacturados, variarán sus propiedades; los revestimientos cerámicos presentan mayor dureza que los metálicos; sin embargo, resultan quebradizos, con una baja resistencia de cohesión y su porosidad reduce la duración de la empaquetadura.

3.5. Características del flujo

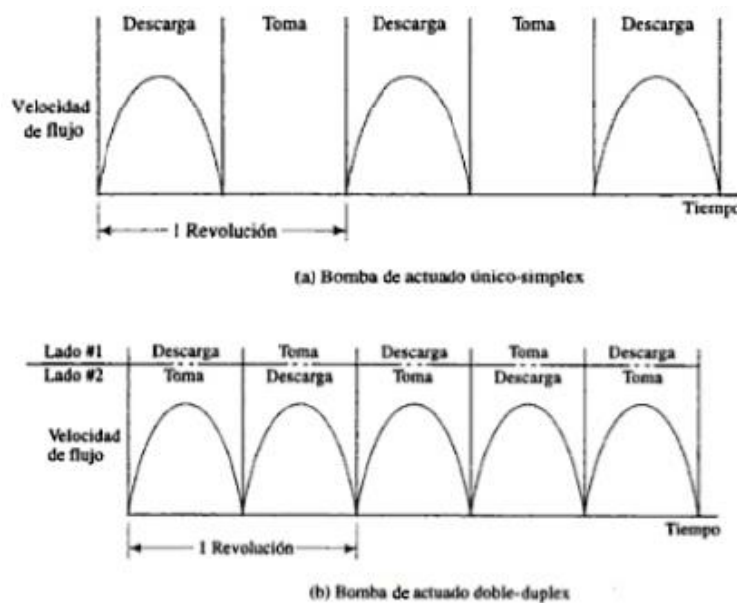
En el momento en que el elemento bombeante se retrae de la cámara de bombeo, el líquido dentro de la misma se expande y se reduce la presión. Ya que la mayor parte de líquidos no son compresibles, es poco el movimiento requerido para disminuir la presión. La presión diferencial se refiere a la presión de succión menos la presión en la cámara; es la que empuja la válvula de succión y la abre.

El líquido circula por la válvula y sigue al elemento de bombeo en su carrera de succión. Cuando el elemento desacelera cerca del final de la carrera, la válvula de succión regresa a su asiento en forma gradual y se cierra al detenerse totalmente el elemento. Este invierte su movimiento para comenzar la carrera de

descarga, de forma que comprime el líquido dentro de la cámara de bombeo hasta que la presión excede la necesaria para vencer la válvula de descarga. En toda la carrera, se expulsa el líquido por dicha válvula y, al finalizar, comienza de nuevo el ciclo.

En la figura 43 se puede observar la velocidad de una bomba símplex de acción directa, de simple acción. La velocidad del líquido que entra y sale de la bomba cae a cero y se mantiene así durante medio ciclo de bombeo. Dicha bomba acelera con rapidez hasta llegar a la velocidad máxima, la conserva y posteriormente desacelera cerca del final de la carrera.

Figura 43. **Velocidades de flujo en bombas reciprocantes de acción directa de doble acción**



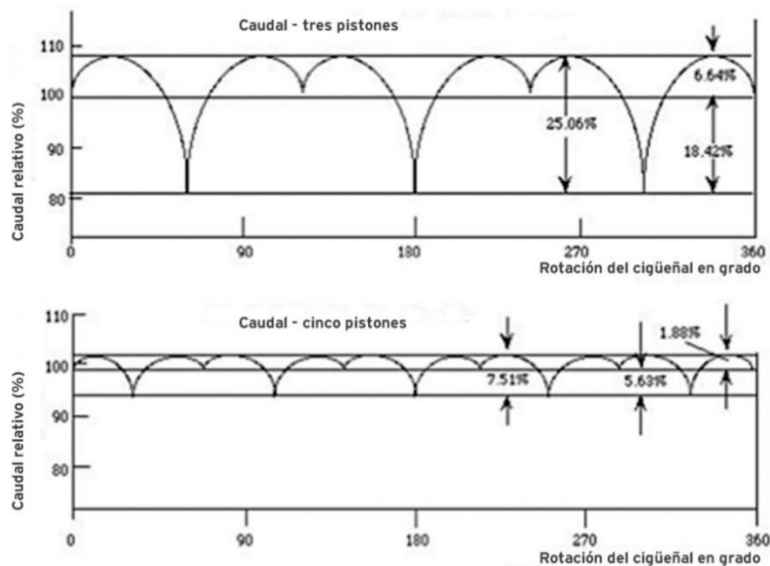
Fuente: <http://bit.ly/2wGQNnG>. Consulta: septiembre 2017.

En la misma figura se observa la velocidad de flujo de la bomba dúplex de doble acción, de acción directa, la cual presenta un comportamiento más constante. Uno de los cilindros se pone en marcha un instante antes de que se

detenga el otro y se produce un traslape. Con las válvulas bien ajustadas, se hace posible conseguir un flujo suave en los tubos de succión y descarga.

En la bomba de potencia, la velocidad del elemento varía aproximadamente acorde al seno del ángulo que forma el muñón o codo de cigüeñal. La velocidad del líquido en la tubería es proporcional a la velocidad del pistón o émbolo, por lo que se puede graficar como porcentaje del promedio, como se observa en la figura 64.

Figura 44. **Curvas de flujo para bombas de potencia reciprocantes**



Fuente: <http://bit.ly/2gNR6YJ>. Consulta: septiembre 2017.

Una vez se agregan elementos de bombeo, se reduce notablemente la variación de la velocidad, a excepción de las bombas cuádruplex. Estas poseen sus codos desplazados a 90° y no son fabricadas comúnmente debido a que el perfil resultante de velocidad presenta mayor variación en comparación con la tríplex. A continuación, se muestra en la tabla XIV, las variaciones de velocidad por el tipo de bomba.

Tabla XIV. **Variación de la velocidad en bombas de potencia**

No. de elementos de bombeo de acción sencilla	Tipo de bomba	Traslape de los codos en el eje	Variación en la velocidad, %
2	Dúplex	180°	160
3	Tríplex	120°	25
5	Quíntuplex	72°	7
7	Septuplex	51.4°	4
9	Nónuplex	40°	2

Fuente: KENNETH J. *Bombas hidráulicas: Selección uso y mantenimiento*. p. 162.

3.6. Componentes del extremo de potencia

Es la parte de la bomba donde se encuentra instalado el propulsor; su función es convertir el movimiento rotatorio proveniente de la máquina motriz, en movimiento alternativo para el extremo del líquido. Se compone principalmente del bastidor, que soporta las demás piezas motrices y, generalmente, también al extremo de líquido.

Otro componente importante es el eje cigüeñal, que funciona de la misma forma que en un motor de combustión interna, solamente que aplica la energía en sentido opuesto. A veces también se utiliza un árbol de levas, ambos soportados por cojinetes instalados sobre el bastidor de potencia.

En una bomba de acción directa, esta sección es encargada de convertir la presión diferencial del fluido-motor en movimiento alternativo en el extremo del líquido. La diferencia fundamental radica en el accionamiento mecánico de las válvulas mediante un sistema de control que detecta la ubicación del pistón; hace que la válvula invierta el flujo del fluido motor al llegar al final de su carrera. En dicha bomba, el componente principal del extremo de potencia es el cilindro de

impulsión, el cual forma la mayor parte de la superficie límite para contener la presión, y soporta a su vez a otras piezas.

3.6.1. Carga de aceleración

La circulación en los tubos de succión no es constante sino que tiende a acelerar y desacelerar cierta cantidad de veces por cada revolución del cigüeñal. Debido a la masa del líquido y su inercia, se debe aplicar cierta energía para producir dicha aceleración repetidas veces, luego de desacelerar. Es necesario prever la existencia de suficiente exceso de presión para acelerar el líquido en el lado de succión y evita la cavitación en esta sección de la tubería, en la cámara de bombeo o en ambos.

Se ha determinado la aceleración teórica mediante la medición de la pendiente en las curvas de velocidad de flujo para bombas de potencia reciprocantes. La aceleración máxima en la dúplex ocurre dos veces por revolución, a 0° y 180° de la rotación del cigüeñal, y en la tríplex, a los 60°, 180° y 300° de rotación. Mediante normas del *Hydraulic Institute*, se puede obtener la carga de aceleración con la fórmula:

$$h_a = \frac{L * V * N * C}{k * g}$$

En donde:

- h_a = carga de aceleración, psi
- L = longitud real del tubo de succión, ft
- V = velocidad del líquido en el tubo de succión, ft/s
- N = velocidad de rotación del cigüeñal, rpm
- C = constante dependiendo del tipo de bomba

- k = constante dependiendo de la compresibilidad del líquido
 g = constante de la gravedad, 32,2 ft/s

Los valores numéricos de las constantes se encuentran en la tabla XV.

La ecuación anterior no es lo suficientemente amplia para incluir factores como la elasticidad del sistema, ni la velocidad de onda de presión en el líquido. Por lo mismo, solo se recomienda para tubos de succión cortos, que no excedan los 50 ft; de lo contrario, los resultados no son suficientemente exactos y confiables.

Cuando dos o más bombas funcionan en paralelo con un tubo común de succión, se supone que todas están en sincronía; es decir, como si fueran una sola bomba. Esto conviene al calcular la carga de aceleración, al sumar las capacidades de todas las bombas para determinar la velocidad en la tubería.

Tabla XV. **Valores de las constantes C y k**

Tipo de bomba	Constante C
Dúplex, acción sencilla.	0,200
Tríplex.	0,066
Quíntuplex.	0,040
Séptuplex.	0,028
Nónuplex.	0,022

Compresibilidad del líquido	Constante k
Líquidos no compresibles como el agua desaerada.	1,4
La mayor parte de los líquidos.	1,5
Líquidos compresibles como el etano.	2,5

Fuente: <http://bit.ly/2vMIJTD>. Consulta: septiembre 2017.

Cualquier gas arrastrado en el líquido o acumulado en un punto alto de la tubería de succión tiende a absorber las pulsaciones de la Bomba para reducir la carga de aceleración. Los estabilizadores de succión se utilizan para separar y

acumular el gas, y requiere la liberación periódica del mismo. Estos dispositivos previenen la entrada de gas, lo que provoca choque en el funcionamiento o que una de las cámaras de bombeo se cerrara por su causa. Los choques de presión ocasionados por la entrada de gases pueden producir diversas fallas en la bomba y componentes del sistema, por lo que se hace importante evitar su entrada al sistema.

3.6.2. Carga neta positiva de succión

Es la carga necesaria para separar la válvula de succión de su asiento, sumada a la utilizada para contrarrestar las pérdidas por fricción y la carga de aceleración en el extremo del líquido. Su abreviatura, por sus siglas en inglés, es NPSH, y se define como la diferencia entre la presión de succión y la presión de vapor, medida en la boquilla de succión con la bomba en funcionamiento.

La NPSH requerida ($NPSH_R$) se suele expresar en unidades de presión, ya que la mayor parte de esta es empleada para abrir la válvula principalmente a bajas velocidades. Esta característica es dependiente en mayor medida de una presión específica y no la carga que representa el fluido. Así, una bomba que requiere 2 psi de NPSH al bombear 4,6 ft de agua, también requerirá 2 psi de NPSH para bombear 9,2 ft de propano.

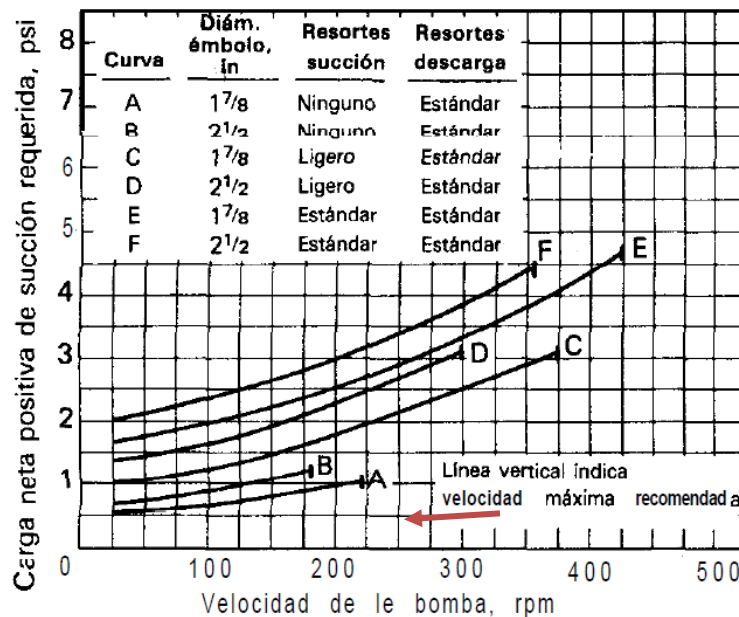
En la figura 45 se puede visualizar la NPSH y la acción de las válvulas en una bomba recíproca. En este caso, se grafican las curvas de una bomba triplex horizontal, con carrera de 3 pulgadas y funcionamiento vertical de las válvulas de succión. Ya que el eje de acción para las válvulas de succión es vertical, puede funcionar sin resorte si la bomba marcha a baja velocidad.

Las curvas A y B indican el NPSH requerido para dos émbolos de diámetro diferente, probados en el mismo extremo del líquido y con válvulas de succión sin

resorte. Los resultados son de 0,7 psi para la NPSH con émbolo de diámetro menor funcionando a 100 rpm, lo que es equivalente a 1,6 pies de agua; lo que resulta en un menor desempeño que en la mayoría de las centrífugas.

La línea vertical señalada en los extremos de la figura, donde terminan las diferentes curvas, indica el rango de velocidades apropiadas dentro del intervalo funcional para la válvula de succión. Las curvas C y D son para los mismos émbolos, con resortes ligeros en las válvulas de succión. Ya que ahora se necesita vencer la fuerza del resorte y el peso de la válvula, la NPSH aumenta alrededor de 100%, con relación a las curvas A y B. La ventaja que proporcionan los resortes es la suavidad de funcionamiento a altas velocidades, ya que se minimiza el tiempo en que se cierran las válvulas.

Figura 45. **Carga de las válvulas influye en la NPSH_R**



Fuente: KENNETH J. *Bombas hidráulicas: Selección uso y mantenimiento*. p. 164.

Por tanto, si se desea un funcionamiento a mayores velocidades, se debe agregar resortes con mayor fuerza, con su respectivo aumento de la NPSH,

mostrado en las curvas E y F. Como se observa, en todos los casos se conserva el resorte estándar en la válvula de descarga.

El agua contiene generalmente aire disuelto, por lo que su presión de vapor es más alta que la del agua desaireada, detalle que no se toma en cuenta a menudo cuando se calcula la NPSH. El margen recomendado por *el Hydraulic Institute*, es de 3 psi para bombas de potencia en los sistemas en donde el líquido ha estado expuesto a un gas que no tenga un valor similar. La prueba de NPSH con agua a su punto de ebullición, ha permitido minimizar los problemas ocasionados por aire disuelto de forma considerable.

3.7. Criterios para las pruebas de la NPSH

Para las bombas de potencia, se manejan tres criterios básicos y fundamentales bajo los cuales se realizan las pruebas de NSPH:

- Velocidad constante
- Presión constante
- Descarga constante

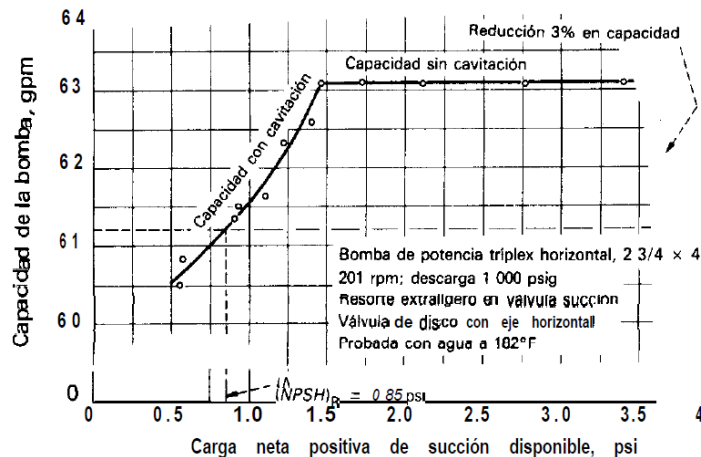
De esa forma, únicamente se hacen variaciones en la NPSH disponible en el sistema. En la figura 46 se observa una gráfica que muestra el resultado de una prueba de NPSH realizada en una bomba de potencia tríplex.

La capacidad permanece constante con todos los valores de $NPSH_A$ superiores a cierto punto; cuando se reduce la NPSH a menores términos, lo hace también la capacidad de bombeo.

También se ha establecido, por parte de los fabricantes, una caída de capacidad de 3% como criterio para definir la $NPSH_R$, similar a la caída de carga de 3% que se utiliza en la prueba de NPSH para bombas centrífugas. Con las bombas de desplazamiento positivo, el sistema determina la presión de descarga, por lo que no se puede utilizar la carga o presión para llevar a cabo la prueba. Por ello, se reduce la $NPSH_A$ hasta que la caída de capacidad es mayor a 3% y se establece luego, la $NPSH$ disponible con esta reducción, y queda definida como la $NPSH$ para determinada velocidad de operación.

Como se observa en la figura 46, la $NPSH$ para dicha bomba fue de 0,85 psi, y es el valor con el cual se ofrece a la venta al público. Asimismo, se observa que dicho valor entra en el rango de operación con cavitación, lo que produce la incertidumbre de la posibilidad de daños en la bomba y el sistema, así como si existe algún método que permita añadirle $NPSH_A$, a fin de eliminar la cavitación.

Figura 46. **Resultado de pruebas de NPSH en bomba de potencia tríplex**



Fuente: KENNETH J. *Bombas hidráulicas: Selección uso y mantenimiento*. p. 165.

La primera dependerá de la naturaleza del líquido y presión de operación. Así, al funcionar con un hidrocarburo ligero y baja presión diferencial, el efecto de la cavitación será prácticamente imperceptible. Esto debido a su baja relación

entre volumen de vapor y volumen del líquido, así como una baja relación de compresión. Ambas características provocan que el émbolo, en su carrera de descarga, recorra una pequeña distancia antes de comprimir el líquido a su presión de descarga. Además, las burbujas explotan de forma menos violenta con el hidrocarburo ligero, provocando menores daños en superficies metálicas, así como menor transmisión de cargas hacia los cojinetes en el extremo de potencia.

Para la segunda incertidumbre se podría pensar que, si se hiciera llegar a la capacidad total de la bomba, se lograrían los 1,5 psi de NPSH necesarios para eliminar la posibilidad de cavitación; sin embargo, no es así. Ya que es posible que ocurra cavitación en una bomba reciprocante sin reducirle su capacidad, se puede mencionar que esta ocurre durante la parte inicial de la carrera de succión. El émbolo o pistón están acelerando, y desaparece en cuanto estos desaceleran. Al final de la carrera de succión, la cámara de bombeo se llena por completo, por lo que no se altera la capacidad de la bomba.

La capacidad se reduce solamente cuando la cavitación es tan severa que la explosión de burbujas termina de completarse cuando el elemento ya se encuentra en la carrera de descarga. Así también, aunque se culmine en la carrera de succión, puede ocasionar algunos daños. El choque resultante en la cara del elemento bombeante se transmite a la válvula y tubo de succión, y produce ruidos y vibraciones.

3.8. Carga del émbolo

Es la fuerza o carga transmitida al extremo de potencia por el émbolo. En las bombas de acción sencilla se puede calcular dicha carga al multiplicar la presión de descarga por la superficie de la cara del émbolo.

Las bombas de potencia se especifican por la carga máxima del émbolo o biela que puede soportar el extremo de potencia, cuando la presión de succión es cero. Dependiendo del tipo de bomba, se especifica para funcionamiento continuo, intermitente, o bien para ambos.

3.9. Eficiencia mecánica: bomba de potencia

También llamada eficiencia de la bomba, se define como la relación entre la relación entre la potencia de salida y la potencia de entrada, Su ecuación es la siguiente:

$$\eta_m = \frac{P_o}{P_i} = \frac{Q(\Delta P)}{1,715 P_i}$$

En donde:

- η_m = eficiencia mecánica total de la bomba
- Q = capacidad, gpm
- ΔP = presión de descarga – presión de succión
- P_i = potencia de entrada del propulsor, hp

Generalmente, la potencia de entrada incluye las pérdidas cuando existe propulsión mediante bandas, correas, o integral con engranes. Sin embargo, no las incluye cuando son unidades con engranes separados o de velocidad variable. Asimismo, la eficiencia mecánica rara vez es menor a 90%, y a menudo es mayor que la eficiencia de su motor.

En algunas bombas existen variaciones en la eficiencia mecánica al realizar cambios en el diámetro del émbolo; los émbolos grandes en bombas de baja velocidad presentan menores eficiencias por aumentos en las pérdidas de válvulas y empaquetaduras. En determinadas bombas, al reducir su velocidad se ve reducida también la eficiencia, la cual es provocada por un aumento en la

fricción en los cojinetes y empaquetaduras. En otros casos, puede presentarse la situación contraria, debida a una reducción en las pérdidas ocurridas en las válvulas.

La eficiencia mecánica puede disminuir al reducirse la carga del émbolo, debido a que la potencia de salida cae con mayor rapidez que las pérdidas por fricción y se convierte en una fracción más pequeña respecto a la entrada de potencia. Si la carga se hace cero en el émbolo, la eficiencia también sería cero, porque también lo sería la salida de potencia; sin embargo, se hace necesario un mecanismo que conserve cierta energía para contrarrestar las pérdidas por fricción.

3.10. Eficiencia mecánica: bomba de acción directa

En estas bombas, la eficiencia mecánica es la relación entre la fuerza aplicada al líquido por el elemento de bombeo, y la fuerza aplicada al pistón de mando por el fluido motor. Ya que la mayoría de dichas bombas son de doble acción, se utilizan las presiones diferenciales en ambos extremos de ellas. Así también, las pérdidas por fricción del fluido en las válvulas y orificios se incluyen en la pérdida total de la bomba, las cuales se miden en orificios ubicados en la entrada y salida. Al expresarlo mediante una ecuación, se obtiene:

$$\eta_m = \frac{A_L \Delta P_L}{A_D \Delta P_D}$$

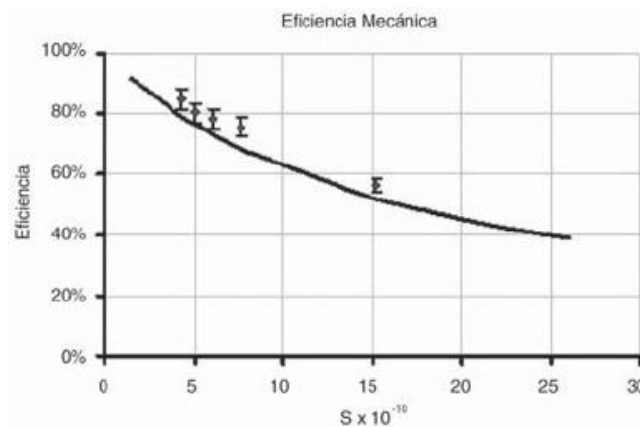
En donde:

- η_m = eficiencia mecánica de la bomba
- A_L = superficie del pistón o émbolo para líquido
- ΔP_L = presión diferencial a través del extremo del líquido
- A_D = superficie del pistón del propulsor

$\Delta P_D =$ presión diferencial a través del extremo de potencia

Por lo general, la superficie de la biela suele ser pequeña en comparación a la del pistón, y a menudo no se toma en cuenta; contrariamente, si supone una superficie importante dentro de la superficie del pistón debe añadirse a las consideraciones del cálculo. En la figura 47 se puede observar la eficiencia mecánica, se observa que η_m aumenta conforme se reduce la velocidad. Dicha característica permite controlar la bomba con la estrangulación del fluido motor, con lo que se logra reducir la presión diferencial disponible para propulsión y permite un funcionamiento más eficiente.

Figura 47. **Eficiencia mecánica de una bomba de acción directa**



Fuente: <http://bit.ly/2gOax3h>. Consulta: septiembre 2017.

3.11. Eficiencia volumétrica

Para las bombas reciprocantes, la eficiencia volumétrica se define como la relación entre la capacidad y el desplazamiento. En forma de ecuación es:

$$\eta_v = \frac{Q}{D}$$

La mayor parte de los líquidos se comprimen un valor medible cuando se mueven desde la succión hasta la descarga; el flujo es menor para la descarga que para la succión. Generalmente se indican los requisitos de capacidad y características del líquido en las condiciones de succión de la bomba, ya que se desconocen las características de descarga.

Además, cuando se incluye un medidor de flujo, se coloca en el lado de succión, para evitar el costo elevado de un medidor para la alta presión de descarga. Por conveniencia, se ha establecido utilizar el término “capacidad” para indicar el volumen de líquido por unidad de tiempo, en el tubo de succión.

Para determinar el desplazamiento de la bomba, se calcula el volumen desplazado por el elemento por unidad de tiempo. Para las bombas de émbolo se tiene:

$$D = 3\left(\frac{\pi}{4}\right)d^2lN$$

Donde:

- D = desplazamiento, in³/min
- d = diámetro del émbolo, in
- l = longitud de carrera, in
- N = velocidad de cigüeñal, rpm

Aunque la eficiencia volumétrica se refleja en la eficiencia mecánica, las dos no coinciden necesariamente en sus puntos máximos y mínimos. Así, es posible obtener una η_m elevada, con una baja η_v , debido a la compresibilidad de los líquidos, o bien una situación contraria cuando existe una alta presión de succión y baja presión diferencial.

3.12. Sistemas de propulsores de bombas de potencia

El motor eléctrico es la unidad motriz más comúnmente utilizada en bombas de potencia. En ocasiones también se utilizan turbinas, motores de combustión y otras máquinas motrices. Las velocidades de dichas bombas van desde las 20 hasta las 500 rpm, y los motores típicos trabajan entre las 1 000 – 1 800 rpm; por lo que se hace necesario conectarlos mediante un reductor de velocidad.

Cuando son potencias menores de 100 hp, se utilizan correas o bandas en V, aunque también se emplean bandas dentadas, cadenas y engranajes. Para más de dicha potencia, se utilizan más frecuentemente los engranes. Asimismo, se puede dosificar en forma precisa el líquido en el sistema, empleando unidades motrices de velocidad variable. Los motores de inducción con impulsión de frecuencia variable y las transmisiones hidrostáticas, lograron cada vez mayor aceptación debido al menor consumo de energía a menores velocidades de funcionamiento.

La potencia requerida en la unidad motriz es siempre 3% mayor que la máxima requerida por la bomba, ya que la eficiencia máxima de las unidades motrices de velocidad variable es alrededor de 97%. En la mayoría de plantas, las bombas de potencia funcionan a velocidad constante y de ello se deriva el exceso de capacidad, por lo que se produce alto flujo en el retorno al recipiente de succión. También se pueden utilizar motores de velocidad múltiple en combinación con derivaciones para controlar la capacidad.

3.13. Diseño del sistema

Un adecuado diseño evitará las vibraciones y ruidos en el sistema, los cuales pueden llegar a provocar pulsaciones suficientemente intensas para dañar los componentes de la bomba y los instrumentos de medición. Para lograr una

instalación satisfactoria, el factor más importante es la velocidad, complementada con un diseño adecuado. A continuación, se mencionan algunos lineamientos generales aplicados para recipientes de succión, tuberías de succión y tubería de descarga. Estos fueron establecidos por la institución *Hydraulic Institute*, que es la encargada de establecer parámetros de bombas y sistemas de bombeo. El diagrama de diseño general para un sistema adecuado se puede observar en la figura 48.

Recipiente de succión

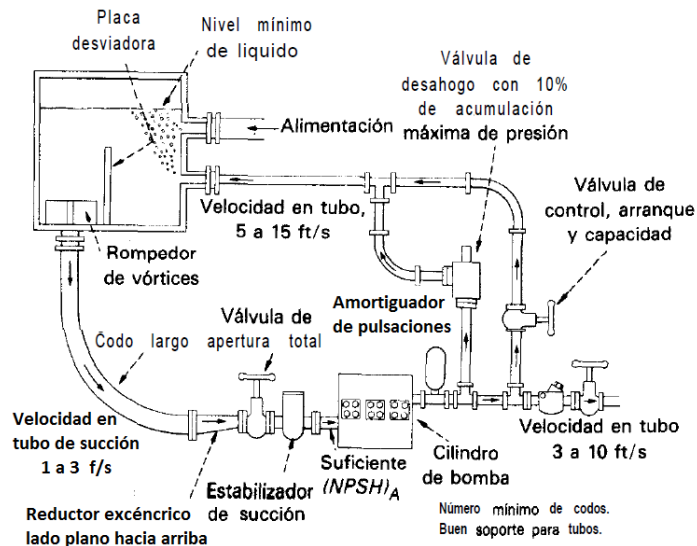
- Tener suficiente volumen, para proveer suficiente tiempo de retención, de forma que los gases libres se eleven a la superficie del líquido.
- Que los tubos de succión y retorno queden al nivel más bajo posible del nivel mínimo del líquido.
- Incluir la placa desviadora para enviar las burbujas de gas a la superficie. La parte superior de la placa debe estar sumergida lo suficiente para evitar alteraciones.

Tubería de succión

- Lo más corto y directo que sea posible.
- Que sea uno o dos diámetros mayor que la conexión de succión de la bomba.
- Obtener una velocidad promedio de líquido menor a los valores mostrados en la figura 69.
- Mínimo de codos y accesorios; en caso de existir codos, que sean largos o laterales.
- Impedir la acumulación de vapores.
- No debe tener puntos altos sin respiradero.
- Reductor de la bomba debe ser de tipo excéntrico.

- Calcularlo de modo que la NPSH permitida por la carga de aceleración sea mayor que la $NPSH_R$.
- Incluir un estabilizador de succión o amortiguador de pulsaciones en caso de aceleración excesiva.
- Contar con una válvula de corte de apertura total, para no restringir el flujo de la bomba.

Figura 48. **Diseño adecuado para bombas reciprocantes**



Fuente: KENNETH J. *Bombas hidráulicas: Selección uso y mantenimiento*, p. 171.

Tubería de descarga

- Diámetro de menor diámetro que la succión si se pierde presión.
- La velocidad promedio en él es tres veces menor a la velocidad máxima en el tubo de succión.
- Observación similar de los codos y accesorios.
- Incluir amortiguador de pulsaciones adyacente al extremo de líquido.
- Incluir válvula de desahogo de un tamaño que no supere la capacidad de la bomba, sin exceder del 110% de su presión de disparo o apertura. La

descarga de la válvula debe retornar al recipiente de succión para que los gases desprendidos en la válvula no regresen a la bomba.

- Incluir tubo y válvula de derivación que permita volver a arrancar la bomba en contra de una baja presión de descarga.
- Incluir válvula de retención para no aplicar la presión al sistema desde la bomba durante el arranque.

3.14. Descarga de la bomba

Se pueden obtener mejores resultados al instalar un tubo de derivación que permita el arranque de la bomba cuando esta se descarga, y se logra así cebar todas las cámaras de bombeo. En las bombas reciprocantes, las cámaras funcionan independientemente y en paralelo con las demás. En el caso de las múltiplex, solo existe la posibilidad de cebar una cámara a la vez, mientras las otras permanecen con vapor o aire.

La bomba reciprocante por lo general es autocebante; sin embargo, el gran volumen libre o de despejo imposibilita al émbolo producir una presión significativa cuando la cámara está llena de gas o aire. Esta condición es común después del mantenimiento, así como el aire infiltrado por la empaquetadura durante los periodos de paro. Durante el arranque, a menudo se introduce aire contenido en el tubo de succión. Debido a esto, se mantiene una baja presión de descarga durante los primeros 30 segundos de funcionamiento; debe expulsar totalmente el aire antes de que se someta a las presiones normales de funcionamiento.

Cuando la bomba comienza a funcionar con brusquedad, o se reduce la capacidad durante el funcionamiento normal, es señal de que existe succión de gas o aire en alguna o todas las cámaras de bombeo. Si existe en el sistema un

tubo de derivación, solamente se necesita abrir la válvula del mismo, hasta que se expulse la totalidad del gas.

3.15. Volumen de despejo

También llamado volumen libre de la cámara de bombeo, representa en la bomba reciprocante el volumen en la misma cuando el elemento se encuentra al final de su carrera de descarga. Dicho volumen libre se denomina mediante c , y suele expresarse como una fracción o porcentaje del desplazamiento d ; denominada “relación c/d ” o porcentaje de espacio libre.

La mayoría de bombas reciprocantes tienen una relación c/d de 2 a 4, 200 % – 400 %. Las bombas de émbolos presentan valores mayores que las de pistones. Dependiendo de la aplicación será también necesaria cierta relación c/d , ya que los líquidos volátiles requieren una relación alrededor de 0,15; diferente a la requerida por líquidos viscosos o pastosos.

Dependiendo de la naturaleza del líquido, será el porcentaje de compresión que sufre al aplicarle la presión correspondiente. Así, el agua se comprime 3% entre 15 y 10 000 psia. El líquido que queda atrapado en el volumen libre a presión de descarga, debe expandirse hasta la presión de succión antes de que la válvula de succión se abra. Así, en una bomba con relación $c/d = 3$, y que bombea un líquido que se comprime 5%, el émbolo debe moverse un 15% de su carrera de succión antes de que se abra la válvula. Esto ocasiona una reducción en su capacidad y rendimiento en la misma proporción; es una medición posible de realizar en la tubería de succión.

3.16. Alta presión de succión

Cuando existe una alta presión de succión, se hace necesario tomar medidas especiales en las bombas reciprocantes, principalmente en las de acción sencilla. Así, se hace necesario en estas últimas y en las de acción doble, aumentar las presiones de diseño de la brida y múltiple de succión.

La bomba de pistón de doble acción generalmente necesita un vástago guía para igualar las fuerzas aplicadas al pistón durante ambas carreras. De otra forma, la fuerza ocasionada por la presión de succión sobre la cara externa del pistón, puede exceder la fuerza de descarga que actúa en su cara más pequeña: la interna. Dado que la biela está montada sobre esta cara interna, se encuentra en compresión todo el tiempo; situación que resulta indeseable en las bombas de acción directa y de potencia.

Esta última modificación no es posible en bombas de acción sencilla, ya que conforme sube la presión de succión, aumenta la carga aplicada en los cojinetes, cigüeñal y otros componentes del extremo de potencia. En estas, se determina la presión efectiva de descarga sobre la base del momento de flexión del cigüeñal, y se agrega $1/3$ de la presión de succión a la presión de descarga.

Un factor determinante es el efecto de la alta presión de succión sobre los cojinetes. Cuando esta presión excede un 3% de la presión máxima de descarga, la biela permanece en compresión durante la carrera de succión. Ya que existe una carga continua de compresión, los cojinetes en ambos extremos de la biela soportan dicho esfuerzo en la misma zona de forma constante. Cuando ya ha generado algún daño, en el centro de dicha zona no puede circular y penetrar el aceite al cojinete, debido a la deformación. Por último, existe un problema en el pasador o perno de la cruceta, ya que el cojinete de la biela oscila en el pasador con cierto ángulo.

Cuando existen alta presión de succión y elevadas cargas sin las medidas adecuadas, se producen altas temperaturas que provocan corta duración en los elementos del extremo de potencia. El cojinete que sufre mayor desgaste es el del pasador de la cruceta; sin embargo, este tiene la carga en el mismo sentido en todo momento, por lo que no existe golpeteo o ruido en funcionamiento. Con un cambio en los puntos para entrada de aceite o el empleo de cojinetes especiales, puede resolverse en ocasiones la alta presión de succión.

Es necesario también reducir la presión máxima de descarga. Se ha demostrado que la temperatura en el extremo de potencia, aunque se coloquen los cojinetes adecuados, aumenta considerablemente al existir una alta presión de succión. Así también, se perjudica la eficiencia mecánica; en la mayoría de las bombas de pistón, de acción sencilla, desproporcionales a la presión diferencial.

El extremo de potencia experimenta los efectos de la presión total de descarga de cada émbolo en la dicha carrera, así como en cada carrera de succión. Existe un aumento en la carga de los cojinetes y en la fricción en la empaquetadura, de forma que aumenta la pérdida por fricción. Al mismo tiempo, el aumento en la presión de succión puede reducir considerablemente la potencia de salida.

4. BOMBAS RECIPROCANTES DE PISTÓN

4.1. Descripción

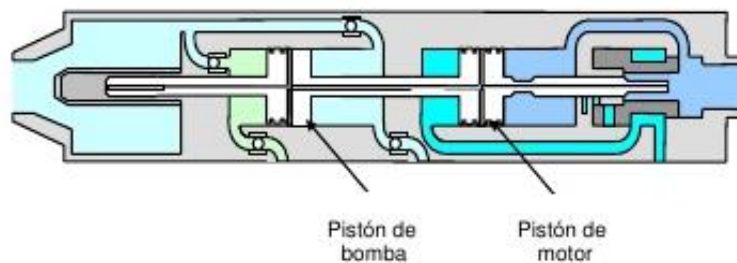
Se encuentran constituidas en el intermedio de los extremos de potencia y del líquido, por uno o varios pistones que se mueven dentro de su cilindro respectivo y de forma alternativa. Este movimiento es transmitido por un cigüeñal conectado al elemento motriz, excéntrica o leva giratorios, mediante un mecanismo de biela-manivela. Complementariamente, las válvulas de succión permiten el ingreso del fluido a la cámara de bombeo; y las de descarga, la salida del mismo por sus respectivas tuberías.

El mecanismo biela-manivela no resulta la única opción; también existe la posibilidad de accionarlo mediante otro pistón impulsado por vapor, o bien, algún gas en expansión. Si bien en alguna época estos tipos de accionamiento fueron de uso común, principalmente en los llamados burros de vapor para alimentación de calderas, actualmente se encuentran prácticamente en desuso.

Se llama bomba de “simple efecto” a aquella que tiene una carrera útil por cada revolución del cigüeñal, con solamente una de las caras del pistón en contacto con el fluido. Por cada revolución del cigüeñal, el pistón solamente bombea el fluido en una de sus carreras, la otra es la de aspiración del mismo. En una bomba de “doble efecto”, por cada revolución del elemento motriz se obtienen dos carreras útiles de trabajo. Ello se suele lograr con dos lados del pistón en contacto con el fluido, como se muestra en la figura 49. La presencia del vástago disminuye el volumen bombeado en uno de los efectos y requiere de un sistema de cierre adecuado; ya sea por empaquetadura, retén o sello.

Otra forma de aumentar el volumen bombeado por revolución consiste en utilizar pistones trabajando en paralelo, accionadas por un motor con solamente un cigüeñal.

Figura 49. **Bomba de pistón de doble efecto**



Fuente: <http://bit.ly/2gl5rCj>. Consulta: septiembre 2017.

4.2. Cálculo del caudal

Para calcular el volumen que desplaza un émbolo o pistón de diámetro “ D ”, se utiliza la siguiente fórmula:

$$V_D = \frac{\pi * D^2}{4} * L$$

Donde:

V_D = volumen desplazado

D = diámetro del pistón/émbolo

L = carrera del émbolo; $L = 2r$

donde:

r = excentricidad del cigüeñal o manivela

Para una bomba con varios cilindros en paralelo, con el cigüeñal girando a velocidad angular constante, el caudal teórico será:

$$Q_t = \frac{\pi * D^2}{4} * L * N * Z * j$$

Donde:

Q_t = caudal teórico

N = revoluciones por unidad de tiempo

Z = número de cilindros

j = 1 – simple efecto

j = 2 – doble efecto

Por lo general existe alguna fuga del líquido, ya sea entre el pistón y el cilindro, o pueden ocurrir también en las válvulas. Por máximas que puedan ser las reducciones en las fugas, se utiliza un rendimiento volumétrico para obtener un valor del caudal lo más cercano a la realidad posible; por tanto:

$$Q_T = \eta_v * Q_t$$

Donde:

Q_T = caudal teórico aproximado

η_v = rendimiento volumétrico, $\eta_v < 1$

4.3. Rendimientos

4.3.1. Rendimiento volumétrico

Como se mencionó anteriormente, durante el funcionamiento de la bomba pueden ocurrir algunas fugas, las cuales generalmente se producen entre el pistón-cilindro y en las válvulas debido a su cierre no instantáneo. En las bombas de doble efecto, también se produce una pérdida entre el vástago y su empaquetadura.

Siendo Q^1 el caudal de estas fugas, se llama rendimiento volumétrico al cociente:

$$\eta_V = \frac{Q}{Q + Q^1}$$

Frecuentemente, los valores de rendimiento volumétrico son elevados. Según algunos datos recopilados a través de diferentes investigadores, se han determinado algunos valores generales para aproximar los rendimientos volumétricos:

- $\eta_V = 0,97 - 0,98$ bombas de cuidadosa ejecución y grandes gastos
- $\eta_V = 0,94 - 0,96$ de cuidadosa ejecución y pequeños caudales
- $\eta_V = 0,89 - 0,92$ de regular ejecución y pequeños gastos

Las fugas varían en función de la presión de trabajo: a mayores presiones, mayor cantidad de fugas y, por tanto, un menor rendimiento volumétrico. Este también se ve afectado notablemente por la temperatura del líquido y su viscosidad, así como a la cantidad de luz a la que se expone el extremo del líquido. A muy altas temperatura se pueden alcanzar valores entre 0,60 y 0,70.

4.3.2. Rendimiento hidráulico

Debido a los rozamientos en los diferentes conductos, tubos y válvulas, inherentes a la construcción de la bomba, se producen algunas pérdidas de carga. El rendimiento hidráulico resulta del cociente entre la altura que se lograría sin la existencia de dichas pérdidas, y la que realmente logra subir la máquina. Se pueden determinar algunos datos generales:

- $\eta_H = 0,95 - 0,97$ bombas grandes y condiciones de escurrimiento favorables
- $\eta_H = 0,85 - 0,88$ pequeñas y diseño no muy complejo

El flujo volumétrico en dichas bombas no es dependiente de la presión, por lo que se utilizan en aplicaciones donde se necesitan altas presiones. Por ello, dicho rendimiento no tiene la misma relevancia que para las bombas centrífugas, ya que un aumento de presión interna debido a un bajo valor de η_H no presenta efectos secundarios significativos.

4.3.3. Rendimiento mecánico

Existen pérdidas de potencia o mecánicas, que son producidas por rozamientos principalmente en los aros, retenes, copas y elementos de cierre entre el mecanismo pistón – cilindro. También se generan pérdidas por rozamiento en los cojinetes, pernos, elementos, accesorios y de guías. Se conoce como rendimiento mecánico al cociente entre la potencia entregada al líquido mediante el pistón, y la consumida por la bomba. En otras palabras, indica qué porcentaje de la potencia entregada por la bomba, se está aprovechando para realizar la acción de bombeo. Bajo algunas consideraciones, se puede determinar:

- $\eta_m = 0,94 - 0,96$ bombas grandes, directamente acopladas al motor, diseño adecuado y mantenimiento óptimo
- $\eta_m = 0,83 - 0,86$ bombas pequeñas, transmisión por correas o engranajes

4.3.4. Rendimiento total

Se le llama así al producto de los rendimientos volumétrico, hidráulico y mecánico, expresado en la siguiente ecuación:

$$\eta_T = \eta_v * \eta_H * \eta_m$$

Por tanto, se puede calcular la potencia necesaria para entregar un caudal determinado a cierta altura como:

$$P = \gamma * Q_t * H_t + P_m$$

$$= \frac{\gamma QH}{\eta}$$

Donde:

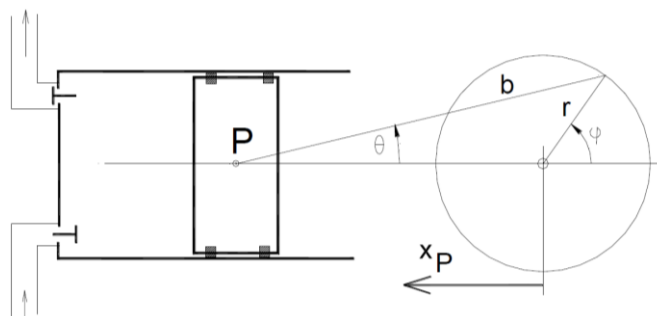
- P = potencia requerida de la bomba
- γ = peso específico del líquido
- Q_t = caudal teórico
- H_t = altura teórica
- P_m = pérdidas mecánicas
- η = rendimiento total

4.4. Velocidades y aceleraciones

En la figura 50 se muestra un esquema que permite visualizar la cinemática del pistón. Se le llama x_p a la coordenada de posición del pistón, representado por el punto P ; así también está la excentricidad del cigüeñal “ r ” y la longitud de la biela b . En función del ángulo “ φ ” del cigüeñal, con una dirección de referencia, se puede obtener:

$$x_p = -r \cos \varphi + b \cos \theta$$

Figura 50. **Cinemática del pistón**



Fuente: IMFIA. *Máquinas para fluidos I. Bombas volumétricas.* p. 6.

Si se toma como origen el centro de giro del cigüeñal o manivela, y considerando positivo el sentido hacia el punto muerto superior, se deduce:

$$x_p = -r \cos \varphi + b \sqrt{1 - \frac{r^2}{b^2} \sin^2 \varphi}$$

Luego, para obtener la velocidad, se hace una primera integración, por tanto:

$$\dot{x}_p = \left[(r * \sin \varphi) - \left(\frac{r^2}{b} * \frac{\sin 2\varphi}{2\sqrt{1 - \frac{r^2}{b^2} \sin^2 \varphi}} \right) \right] * \dot{\varphi}$$

Integrando una segunda vez, se obtiene la aceleración. Se hace la suposición: $\dot{\varphi} = \omega$, constante

$$\ddot{x}_p = \left[\cos \varphi + \frac{r}{b} * \frac{\cos 2\varphi}{\sqrt{1 - \frac{r^2}{b^2} \sin^2 \varphi}} - \frac{1}{4} \sin^2 2\varphi \left(1 - \frac{r^2}{b^2} \sin^2 \varphi \right)^{-3/2} * \frac{r^3}{b^3} \right] r\omega^2$$

Ya que usualmente se observa que la relación: $\frac{r^2}{b^2} \ll 1$, las expresiones se reducen a:

$$\dot{x}_p = r\omega \left(\sin \varphi - \frac{r}{2b} \sin 2\varphi \right)$$

$$\ddot{x}_p = r\omega^2 \left(\cos \varphi - \frac{r}{b} \cos 2\varphi \right)$$

Se observa que en dos puntos de cada ciclo en que la velocidad se reduce a cero, son aquellos en que la aceleración tiene valores máximos, tales puntos son $\varphi = 0$ y $\varphi = \pi$. Estos son llamados “punto muerto superior”, y “punto muerto inferior”, según sean el más alejado o cercano al cigüeñal,

respectivamente. Dichas aceleraciones generan fuerzas considerables sobre la biela, cigüeñal, pernos y cojinetes; por otra parte, estas fuerzas repetidas a cierta frecuencia pueden provocar un funcionamiento ruidoso y con vibraciones.

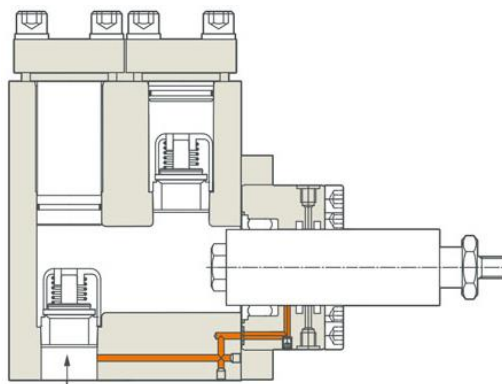
Alguna disminución en la fuerza se ha logrado conseguir, minimizando la masa de las piezas aceleradas y desaceleradas, lo cual no siempre es compatible con las resistencias mecánicas requeridas. Las técnicas recientes de equilibrio de esfuerzos estáticos y dinámicos han logrado contribuir notablemente en la disminución de las dichas fuerzas y sus efectos.

4.5. Otras realizaciones de bombas reciprocantes de pistón

4.5.1. Émbolo buzo

En ocasiones se utilizan bombas reciprocantes con válvula de descarga en el pistón. Esta variante es habitual en bombas accionadas mediante molinos de viento, así como de accionamiento manual. Como una variación de las anteriores, se puede considerar la de émbolo buzo. La diferencia radica en que el pistón entra en contacto con el fluido no solamente con su parte frontal, sino también en la superficie cilíndrica, como se observa en la figura 51.

Figura 51. **Bomba reciprocante con émbolo buzo**



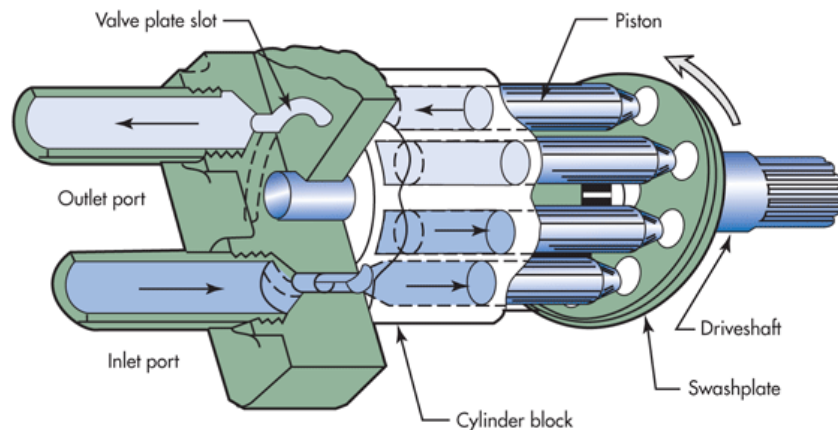
Fuente: <http://bit.ly/2w8vqZ2>. Consulta: septiembre 2017.

4.5.2. Multipistón

Las bombas multipistón, como su nombre lo indica, trabajan con varios pistones accionados en paralelo, movidos mediante un único motor. Las dos configuraciones típicas son: cuando se encuentran en paralelo – en línea y en la disposición de tambor. En la primera, un único cigüeñal mueve todos los pistones; en la segunda, el motor mueve una platina que a su vez hace girar el cuerpo de cilindros mediante un árbol central, produciendo movimiento recíprocante en los pistones debido a la inclinación que tiene.

En la última, todos los cilindros están conectados a las cámaras de aspiración e impulsión a través de válvulas específicas. Al variar el ángulo de la platina, se puede modificar el recorrido de los pistones, y por ende, regular el caudal. Un ejemplo se muestra en la figura 52.

Figura 52. **Bomba multipistón, pistones paralelos**

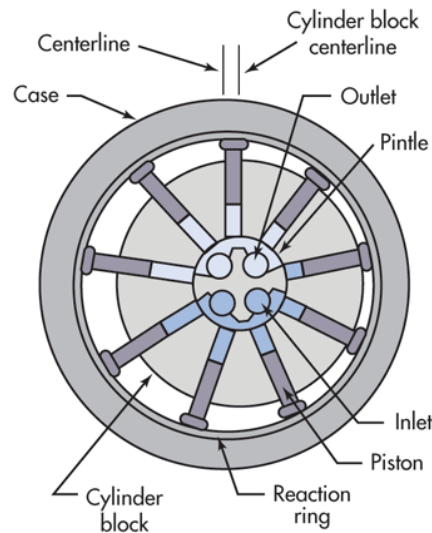


Fuente: <http://bit.ly/2eMDUmb>. Consulta: septiembre 2017.

Otra variante resulta de colocar los pistones radialmente, dentro de una carcasa exterior móvil respecto al cuerpo que aloja los cilindros, tal como se muestra en la figura 53. Este gira excéntricamente y produce un movimiento

alternativo en los pistones. Las configuraciones multicilindro permiten disminuir la amplitud de las pulsaciones de presión en la impulsión, de forma que aumentan su frecuencia.

Figura 53. **Bomba multipistón, pistones radiales**



Fuente: <http://bit.ly/2eMDUmb>. Consulta: septiembre 2017.

4.6. Instalaciones de aspiración

En ocasiones pueden producirse presiones inferiores a presión de vapor a la temperatura de escurrimiento en el ingreso del líquido a la bomba, lo que provoca cavitación dentro de la misma. Para determinar la presión dentro del cilindro, y medir la presión, velocidad y cota en la tubería de entrada a la bomba, se obtiene:

$$p/\gamma = H_S - \frac{v^2}{2g} - Z_P - h_t$$

Donde:

p = presión del cilindro

γ = peso específico del fluido

H_S = altura del líquido, desde salida hasta tubería de entrada a bomba

$$\frac{v^2}{2g} = \text{carga de velocidad}$$

v = velocidad del líquido en el cilindro
 g = aceleración por gravedad

Z_p = cota del pistón
 h_t = pérdidas de carga totales en la entrada

$$h_t = h_f + h_{ch} + h_v + h_{ac}$$

h_f = pérdidas por rozamiento en tubería de succión
 h_{ch} = pérdidas por cambios de dirección o de sección
 h_v = pérdidas de carga en válvula/s de admisión
 h_{ac} = energía necesaria para acelerar la masa líquida

Para que el líquido pueda ser bombeado, deberá superar la presión mínima de la válvula de expulsión, por lo que se debe cumplir la siguiente condición:

$$p_{at} + p > p_v$$

Por tanto:

$$H_s + \frac{(p_{at} + p)}{\gamma} - Z_p > \frac{v^2}{2g} + h_t$$

Siendo:

$$ANPA_D = H_s + \frac{p_{at}}{\gamma} - \frac{p_v}{\gamma} - h_{ac} - Z_p$$

Y:

$$ANPA_R = \frac{v^2}{2g} + h_f + h_{ch} + h_v$$

No existirá cavitación entonces si:

$$ANPA_D > ANPA_R$$

h_f y h_{ch} varían respecto al cuadrado de la velocidad del líquido en el tubo de aspiración, que a su vez es proporcional a la velocidad del pistón. Por tanto, será mínima en los puntos muertos superior e inferior, y máxima cerca de la mitad de la carrera.

h_v depende del caudal que se bombee, así como de la geometría de la válvula. Cuando comienza la carrera de aspiración, aumenta bruscamente debido a la fuerza necesaria para abrir completamente las válvulas. Media vez se encuentran plenamente abiertas, resulta proporcional al cuadrado del caudal instantáneo.

h_{ac} es proporcional a la aceleración del pistón, es decir, positiva al comienzo de la carrera de aspiración, cero a la mitad de la carrera y negativa al llegar al punto muerto inferior. Se incluye en $ANPA_D$, ya que está relacionada con el sistema en la medida que depende del diámetro de la tubería de admisión; si se realiza un ensayo o mediciones en la bomba, se necesita conocer la instalación para cuantificarla.

El valor de $ANPA_R$ es hallado experimentalmente, y suele ser provisto por el fabricante. En virtud de que los métodos para relevarlo no resultan precisos, se debe tomar un margen de seguridad entre $ANPA_D$ y $ANPA_R$.

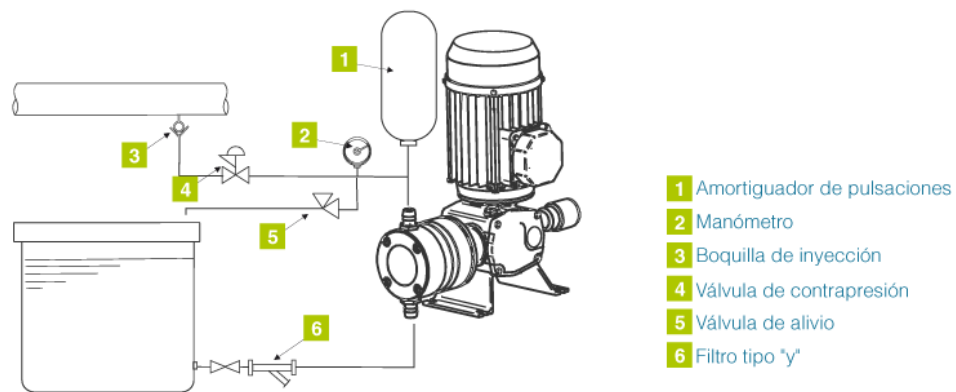
4.7. Instalaciones de impulsión

En las tuberías de expulsión de las bombas reciprocantes se producen pulsaciones de presión que pueden resultar muy intensas, a una frecuencia similar a la del émbolo. A fin de amortiguarlas, se coloca una cámara de aire o nitrógeno en paralelo a dicha tubería, como se observa en la figura 54. El gas

puede estar separado del líquido mediante una membrana o diafragma, para evitar su disolución; lo que haría necesaria su frecuente reposición.

La tubería se divide en dos partes: hasta la cámara de aire, la columna de agua sigue los movimientos del pistón, acelerando y desacelerándose. Luego de la cámara de aire, si está adecuadamente diseñada, el fluido se moverá con velocidad sensiblemente constante.

Figura 54. **Diagrama de equipo dosificador electromecánico con amortiguador de pulsaciones**



Fuente: <http://bit.ly/2wJyE7l>. Consulta: septiembre 2017.

Si se supone una biela mucho más larga que la excentricidad, $r/b = 0$; se determina la velocidad del pistón como:

$$\dot{x}_p = -r * \omega \sin \varphi$$

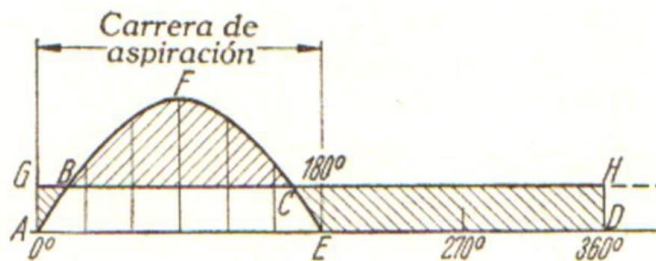
Suponiendo un diferencial de volumen de fluido, donde se tiene el área transversal del pistón durante un diferencial de tiempo:

$$dV = \dot{A}x dt$$

$$dV = A * r * \omega \sin \varphi dt$$

La función $dV/d\varphi$ muestra un comportamiento sinusoidal, como se muestra en la figura 55. El área bajo la curva A-F-E representa el volumen total impulsado por el pistón en toda la carrera. Por otra parte, si se agrega una cámara de aire que uniformice el flujo, el volumen total impulsado luego de la cámara, por ciclo, es el área del rectángulo A-G-H-D, y su altura es $2 A * r / 2\pi$.

Figura 55. **Volumen fluctuante en la cámara de aire en pistón de simple efecto**



Fuente: IMFIA. *Máquinas para fluidos I. Bombas volumétricas*. p. 10.

Por tanto, el área B-C-F representa la cantidad total de líquido que entra y sale por ciclo, de la cámara de aire. Si U es el volumen del mismo en la cámara, se cumple:

$$dU = A * r * \sin \varphi \, d\varphi - \frac{2 A * r}{2\pi}$$

$$dU = A * r \left(\sin \varphi - \frac{1}{\pi} \right) d\varphi$$

Por tanto, para los puntos B y C en la figura 79 se cumple: $\sin \varphi = 1/\pi$

Que corresponden a:

$$\varphi_1 = 18^\circ 34'$$

$$\varphi_2 = 161^\circ 26'$$

El volumen fluctuante que entra y sale de la cámara de aire resulta:

$$U_0 = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} A * r \left(\sin \varphi - \frac{1}{\pi} \right) d\varphi$$

Siendo “L” la carrera del pistón, y si $L = 2r$, entonces;

$$U_0 = 0.55 V_D$$

Donde:

V_D = volumen desplazado por embolada, o cilindrada.

Cuando una bomba es de un pistón y doble efecto, se reduce la variación, por tanto:

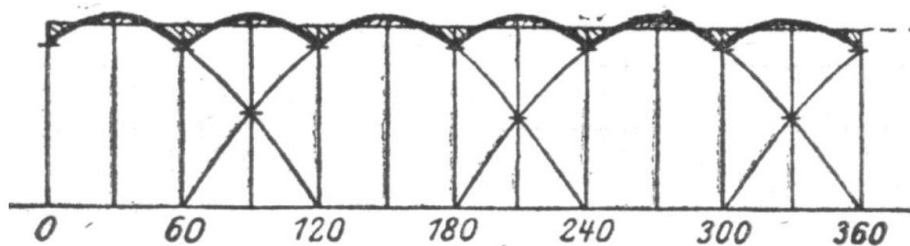
$$U_0 = 0.21 V_D$$

Para una bomba de doble pistón y doble efecto, con bielas a 90° en la manivela, resulta:

$$U_0 = 0.042 V_D$$

El coeficiente se reduce a medida que aumenta el número de pistones en paralelo, como se demuestra en la figura 56.

Figura 56. **Volumen en cámara de aire, tres pistones – simple efecto**



Fuente: IMFIA. *Máquinas para fluidos I. Bombas volumétricas*. p. 10.

Las pulsaciones en la tubería de impulsión pueden inducir resonancias en algún tramo de la misma, si no se toman las medidas para eliminarlas o amortiguarlas. La resonancia acústica depende de la longitud del tramo, velocidad del sonido en el fluido y las condiciones de borde; cuando esta es igual a la frecuencia de las pulsaciones o sus primeros múltiplos, se produce resonancia en la tubería.

Dichas condiciones generan vibraciones en la tubería que pueden llegar a tener amplitudes hasta cientos de veces mayores que la amplitud de la pulsación a la salida de la bomba. El resultado, aparte de provocar efectos molestos, puede llegar a causar daños considerables si no se toman las medidas adecuadas para amortiguarlo.

Las pulsaciones pueden ocurrir también en la tubería de aspiración, y su amortiguación se puede realizar de forma análoga. Sin embargo, no resulta frecuente que causen algún daño o molestias, ya que la bomba generalmente está ubicada cerca de la toma o de la fuente.

5. DISEÑO Y DIMENSIONES DE LA BICIBOMBA

5.1. Principio de operación

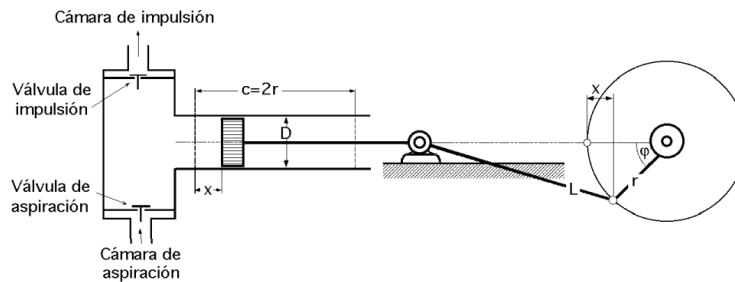
Como se explicó anteriormente, el funcionamiento de la bomba será provocado mediante el movimiento alternativo de los pistones. Estos se encuentran contenidos cada uno en su respectiva cámara de bombeo, de modo que la superficie cilíndrica de cada pistón está en contacto con la superficie interna de la cámara, lo que genera una depresión y compresión en los movimientos de succión e impulsión, respectivamente.

Los materiales utilizados para el mecanismo principal de bombeo deben ser adecuados para dicho fin. El pistón debe tener el contacto suficiente con la cámara para crear la succión necesaria, y tener una holgura que permita el movimiento alternativo. De esta forma, el líquido entra a la cámara por la depresión causada en el movimiento de succión, y una vez comienza la carrera de impulsión, este es expulsado por dicha tubería. Asimismo, se deben evitar fugas del líquido en el espacio existente entre pistón y cámara, y garantizar un óptimo rendimiento volumétrico.

Las válvulas de aspiración e impulsión complementan el mecanismo de bombeo y regulan el movimiento del líquido por la cámara, mediante su apertura y cierre en la carrera correspondiente. Uno de los propósitos del diseño es que pueda utilizar mecanismos sencillos, así como piezas y materiales que se puedan adquirir sin mayor dificultad en el mercado guatemalteco. Por ello, se toma la consideración de diseñar el prototipo con la característica de simple efecto, de modo que la instalación y ajuste de las válvulas no implique una complicación considerable en la fabricación del prototipo.

En la figura 57 se puede observar un esquema del funcionamiento del simple efecto en la bomba, donde se obtiene una carrera de trabajo por cada vuelta que realiza la manivela. Como ya se mencionó también, el simple efecto presenta la desventaja de la intermitencia en el flujo, por lo que el diseño considerará la configuración de doble pistón. De esta forma puede obtenerse un flujo más uniforme, porque en el momento en que uno de ellos está en la carrera de aspiración, el otro se encuentra en la carrera de descarga.

Figura 57. **Esquema de bomba de émbolo de simple efecto**



Fuente: FERNÁNDEZ, Pedro. *Bombas centrífugas y volumétricas*. p. 101.

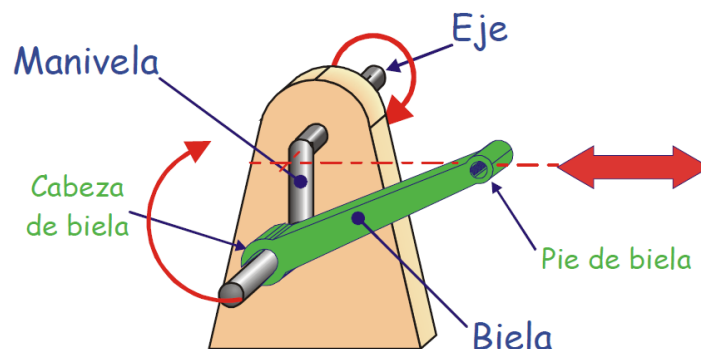
Una vez establecido el funcionamiento bombeante, es necesario definir el mecanismo motriz del mismo. Ya que se ha planteado una bomba de doble pistón, se debe producir un movimiento alternativo capaz de accionarla. Como la fuerza motriz será generada mediante un mecanismo de pedaleo de bicicleta, el movimiento que este genera es de rotación continua; de esta forma, solamente es necesario transformar el movimiento rotativo proveniente del mecanismo de pedaleo, en uno alternativo que accione los pistones.

Es así como puede determinarse el mecanismo más simple y eficiente para llevar a cabo dicha transformación: el sistema biela-manivela. Este consiste básicamente en una manivela unida a una barra llamada biela, mediante una articulación. En la figura 58 se observa un esquema general del funcionamiento, el cual se describe a continuación:

- El eje es accionado por el elemento motriz y dispone de un movimiento giratorio con cierta potencia. El movimiento es transmitido hacia la manivela, que puede formar parte del eje, o bien, puede ser independiente.
- La manivela, al girar, describe un movimiento circular. El extremo de la misma es el punto más notable y donde se encuentra la empuñadura.
- La cabeza de biela se monta sobre la empuñadura, y describe el mismo movimiento circular, mientras que el pie de biela se acopla al elemento guiado por un carril, por lo que muestra un movimiento alternativo.

La trayectoria de cada extremo de la biela se mantiene constante. Como cada extremo describe un movimiento diferente, la orientación de todo el cuerpo de la biela se mantiene en constante cambio conforme el movimiento del mecanismo.

Figura 58. **Esquema de mecanismo biela-manivela**



Fuente: <http://bit.ly/2gYhXgN>. Consulta: septiembre 2017.

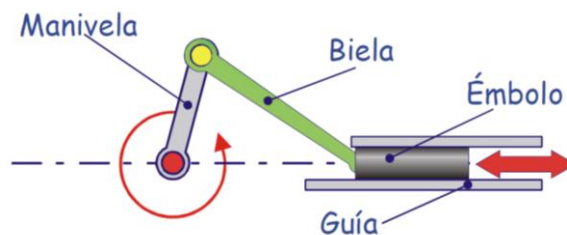
Al añadir más bielas al mismo sistema se obtiene un mecanismo parecido al de un cigüeñal-biela, donde dos o más bielas están acopladas al eje, de modo que la transmisión de movimiento siempre puede hacerse en ambos sentidos. Así, en un motor de combustión interna el movimiento alternativo de los pistones

le transmite el movimiento al cigüeñal, de modo que se aprovecha la rotación del mismo; mientras en una bomba se aplica potencia al eje y este transmite su movimiento al pistón o émbolo. En el momento de realizar el diseño, se necesita tomar las siguientes consideraciones:

- Utilizar bielas cuya longitud sea al menos 4 veces el radio de giro de la manivela a la que está acoplada.
- Cuando son varias bielas acopladas en serie, los cuellos del cigüeñal deben descansar sobre soportes adecuados, para evitar que se produzcan esfuerzos de flexión en el eje.
- La cabeza de biela debe estar centrada adecuadamente en la muñequilla sobre la que gira. Esto puede ocasionar la necesidad de aumentar su anchura, lo que implica a su vez la colocación de un casquillo.

Para realizar la acción bombeante se necesita solamente acoplar el pie de biela con un émbolo. Este se encuentra dentro de la cámara de bombeo, siendo su movimiento dentro de la misma el que genera la succión e impulsión del fluido. Un esquema se puede ver en la figura 59.

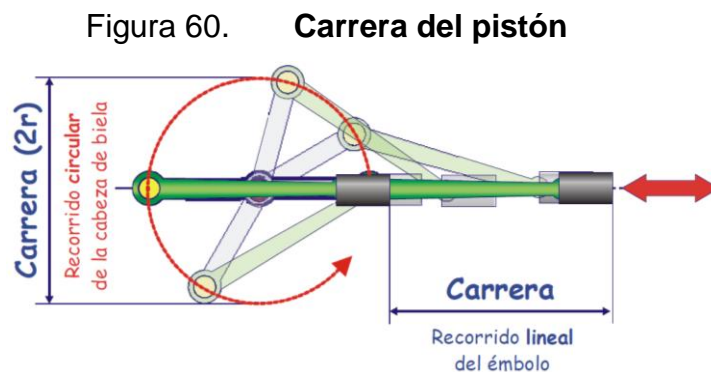
Figura 59. **Sistema biela-manivela-émbolo**



Fuente: <http://bit.ly/2gX2wt9>. Consulta: septiembre 2017.

Ya que la carrera del pistón influye directamente en la capacidad de la bomba, es importante determinarla adecuadamente en el diseño, a fin de que se

garantice el óptimo funcionamiento y rendimiento de la misma. Existen dos formas sencillas de determinar su magnitud con base en las consideraciones de diseño, las cuales de alguna forma siempre se relacionan entre sí. La primera es determinar el diámetro de giro que describe el extremo de la biela o el eje excéntrico al que está conectada la cabeza de biela. La segunda es definir los puntos muertos; tanto el inferior como el superior. Estos son los puntos donde se detiene momentáneamente el émbolo para que pueda producirse el cambio de dirección de su movimiento lineal. Ambas situaciones pueden visualizarse en la figura 60.



Fuente: <http://bit.ly/2wSyqxa>. Consulta: septiembre 2017.

Una vez definida la utilización del mecanismo adaptado al doble pistón, se hace necesario acoplarle el sistema motriz. En la línea de simplicidad y la facilidad de reproducción de la máquina, se utilizarán partes comerciales y piezas de bicicleta comúnmente utilizadas, así como diversos componentes de mecanismos para accionamiento con uso más frecuente en bicicletas de montaña simples.

El mecanismo básico que accionará la totalidad de la máquina será el de engranaje-cadena, el cual consiste en una cadena cerrada cuyos eslabones engranan con ruedas dentadas o piñones, los cuales están unidos a los ejes de

los mecanismos conductor y conducido. Las cadenas suelen tener libertad de movimiento en una sola dirección, tienen que engranar de manera muy precisa entre los dientes de los piñones. Las partes más básicas de una cadena son la placa lateral, el rodillo y pasador, aunque pueden tener algún tipo de refuerzo o configuración específica.

La ventaja principal que se obtiene al utilizar este mecanismo es evitar el deslizamiento entre los componentes, como sucede en una polea-faja. Debido a esto, mantiene una relación de transmisión constante que se traduce en una mayor eficiencia mecánica. La facilidad para su obtención, así como un bajo costo, inciden positivamente para utilizar el mecanismo en la máquina. Pueden transmitir mayores potencias que las poleas y no precisa de una tensión elevada en comparación con las correas: se traduce en menos cargas añadidas a los rodamientos y sus consecuentes averías.

Algunas de las consideraciones a tomar en cuenta son las de su funcionamiento menos flexible, porque cuando se deja de girar el eje conducido, también lo hará el conductor, lo que puede significar algún daño en la parte motriz. Esto se resuelve fácilmente con los sistemas de rodamiento libre de los piñones, como se explicará más adelante. Otra consideración importante es la del requerimiento de una adecuada lubricación periódica. Un esquema del mecanismo de cadena-engranaje se puede apreciar en la figura 61.

Se define entonces la relación de velocidades como:

$$i = \frac{\text{velocidad eje conductor}}{\text{velocidad eje conducido}} = \frac{\text{no. dientes eje conducido}}{\text{no. dientes eje conductor}}$$

$$i = \frac{N_1}{N_2} = \frac{Z_2}{Z_1}$$

Donde:

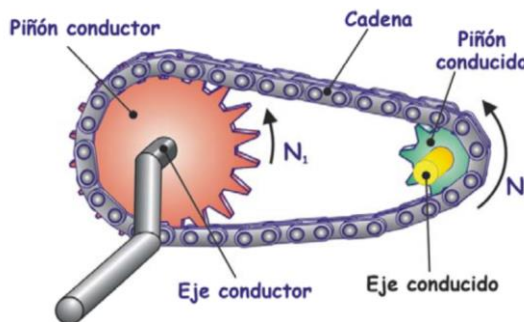
N_1 = velocidad de giro engranaje conductor

N_2 = velocidad de giro engranaje conducido

Z_1 = número de dientes engrane conductor

Z_2 = número de dientes engrane conducido

Figura 61. **Mecanismo cadena-engranaje y su relación de velocidades**



$$\text{Relación de velocidades} = \frac{\text{Número de dientes de la rueda conducida}}{\text{Número de dientes de la rueda conductora}} = \frac{Z_2}{Z_1}$$

Fuente: DPTO. DE TECNOLOGIA – CEJAROSU. *Mecanismos para transmisión de movimiento*. p. 5.

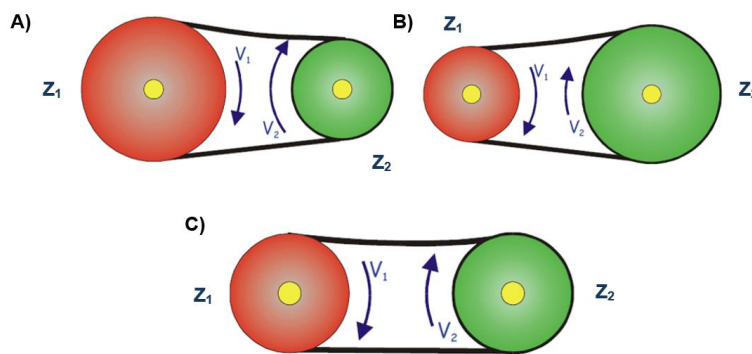
En la figura 62 se muestran algunas configuraciones para realizar modificaciones a la velocidad, según se haga necesario. Como se puede observar, cuando el engranaje conductor tiene un mayor número de dientes respecto al conducido, la velocidad de giro aumenta. Lo contrario sucede cuando el conductor es el de menor cantidad de dientes; entonces la velocidad en el conducido se verá disminuida respecto a la del anterior. Por último, si el número de dientes es el mismo en ambos, la velocidad también tendrá el mismo valor para los dos.

El mecanismo de transmisión de potencia será accionado mediante el pedaleo humano; sin embargo, puede añadirse un sistema que pueda almacenar momentáneamente la inercia adquirida por el funcionamiento de dicho

mecanismo. Parte de esta inercia es posible transferirla de regreso para que aporte energía para mantener el mecanismo funcionando, como lo realizan los volantes en las transmisiones para motores de combustión interna.

De esta forma se permite al usuario de la máquina no tener que realizar un esfuerzo máximo todo el tiempo para mantenerla accionada, sino que puede pedalear constantemente y con esfuerzo mínimo durante un tiempo considerable. Esto se conseguirá adaptando los volantes al mecanismo de accionamiento, y con ellos se requerirá de piñones multiplicadores de velocidad, así como un montaje de un tren de piñones con cadenas; todo ello con la finalidad de que el usuario pueda iniciar el accionamiento y mantenerlo, pero a su vez, que el mismo sistema de volantes le aporte significativamente con la inercia del movimiento.

Figura 62. **Relaciones de velocidad en engranajes**



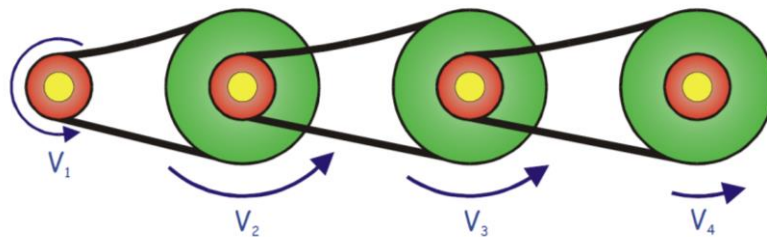
A) Aumento de velocidad, B) Reducción de velocidad, C) Velocidad Constante

Fuente: <http://bit.ly/2gZxHA6>. Consulta: septiembre 2017.

Para llevar a cabo la conexión de los volantes y el pedaleo con el mecanismo bombeante, es necesario utilizar multiplicadores de velocidad conectados mediante cadenas, en una configuración que se determinará con el diseño. Estos llevan dos o más engranajes de diferente número de dientes, ordenadamente montados de menor a mayor, varían también su diámetro.

Al contar con un sistema de engranajes – cadenas, se tiene en cada configuración uno conductor y otro conducido. Dependiendo de cuál sea la motriz, se actuará como reductor o amplificador de velocidad. Al considerar la figura 64, es posible determinar las relaciones de velocidades que existen entre los diferentes piñones, donde el eje conductor gira a cierta velocidad.

Figura 63. **Tren de engranajes**



Fuente: DPTO. DE TECNOLOGIA – CEJAROSU. *Mecanismos para transmisión de movimiento*. p. 4.

Por cada grupo nuevo de piñones que se monte, se producirá una reducción de velocidad que estará en la misma proporción que el número de dientes en cada engrane, Z_b/Z_a ; se cumple:

$$v_2 = v_1 * \frac{Z_b}{Z_a}$$

$$v_3 = v_2 * \frac{Z_b}{Z_a}$$

$$v_4 = v_3 * \frac{Z_b}{Z_a}$$

En este último caso, quedaría:

$$v_4 = v_1 * \frac{Z_b}{Z_a} * \frac{Z_b}{Z_a} * \frac{Z_b}{Z_a}$$

$$v_4 = v_1 * \left(\frac{Z_b}{Z_a}\right)^3$$

5.2. Desarrollo de diseño y materiales a utilizar

Como primer paso, se considerará la parte fundamental del sistema, la cual lo conforman el conjunto pistón – émbolo. Como se utilizarán piezas comerciales de bicicleta, se debe considerar la longitud de la manivela para encontrar el recorrido total del pistón. Por lo tanto, se observa en la figura 64 la multiplicadora para una bicicleta de montaña, con las bielas de 15,5 cm de longitud; el doble de dicha medida determinará el recorrido total del émbolo, que a su vez deberá ser la mínima longitud de la varilla que sujetará el mismo. Como se estableció anteriormente:

- Bielas motrices del mecanismo bombeante: multiplicadora de bicicleta infantil de montaña, de 155 mm de longitud.
- Eje pedalier para bielas motrices: eje sellado de montaña de tres pasos, se encuentra fácilmente en el comercio. Las ventajas de utilizar este tipo de eje son: no necesitan ajuste preciso de funcionamiento, cualquier persona puede desmontarlo, resiste mayores esfuerzos y no necesita mantenimiento especializado.

$$\text{Carrera del émbolo} = 2 * \text{longitud de la biela}$$

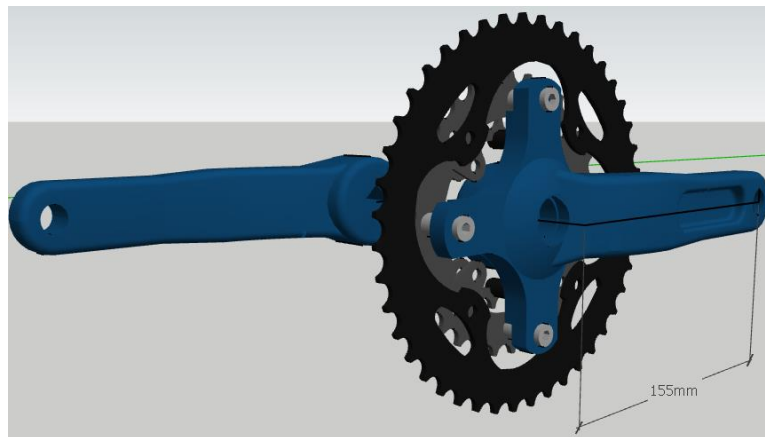
$$\text{Carrera} = 2 * 155 \text{ mm}$$

$$\text{Carrera} = 310 \text{ mm}$$

Como en este caso el recorrido es considerablemente largo, la manivela servirá como elemento transmisor del movimiento, entre la biela y la varilla del émbolo. Deben considerarse ciertas holguras para cada parte del mecanismo, de forma que permita el movimiento adecuado y la fluidez en el mismo. De esta forma, se partirá de la longitud de la biela y la carrera dada por la misma, para establecer las medidas de los componentes del mecanismo bombeante. El

siguiente elemento por definir será la manivela, la cual es necesario considerarla con sus diferentes elementos, que servirán de articulación y guía, como se describe a continuación.

Figura 64. **Multiplicadora que se usará en mecanismo accionante**



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp.

En ambos extremos de la manivela se debe acoplar dos ejes: uno sujeto a la biela, el cual tendrá la función de seguir el movimiento rotativo de la misma; mientras que el otro guiará el movimiento alternativo de la varilla del émbolo y oscilará sobre dicho eje. Como ambos extremos necesitan un movimiento giratorio entre el eje y el extremo de la manivela, se necesita de mazas que alojen cojinetes y contengan los ejes. Dicha descripción se podrá ver en la figura 65, no sin antes determinar las medidas de los elementos necesarios. Las holguras fueron determinadas con base en cada necesidad, por lo que no siempre es la misma para todas las consideraciones. En este caso se considera el equivalente a dos pulgadas, para que tenga espacio adecuado entre el extremo con movimiento alternativo y los elementos guía, como se verá posteriormente.

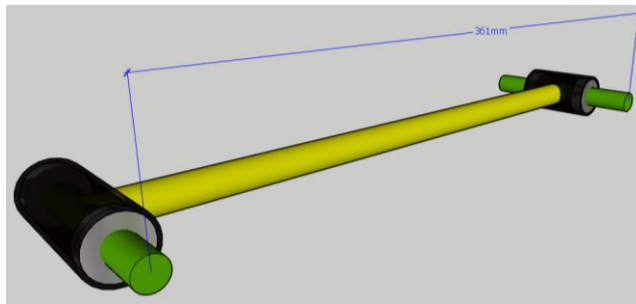
$$l_{manivela} = carrera + holgura$$

$$l_{manivela} = 310 \text{ mm} + 50,8 \text{ mm}$$

$$l_{manivela} = 360,8 \text{ mm}$$

$$l_{manivela} \approx 361 \text{ mm}$$

Figura 65. **Manivela necesaria para mecanismo accionante**



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp.

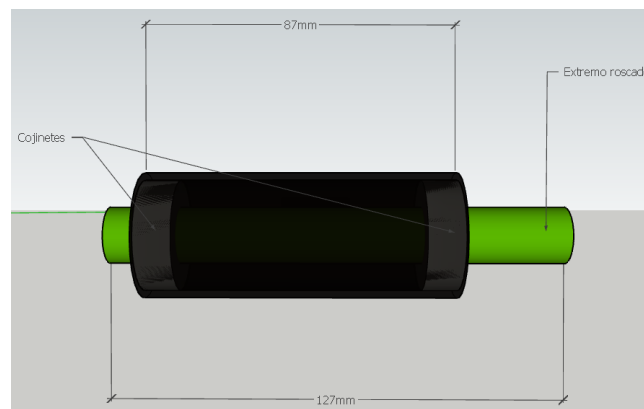
Para las consideraciones de las mazas y todos los demás elementos o componentes, se buscan los que son de mayor facilidad de asequibilidad en el mercado, sin dejar de considerar las necesidades de las distintas propiedades requeridas para el adecuado funcionamiento. Al considerar el diámetro del eje que puede alojarse de forma roscada en la manivela, por ser estándar, es de 15 mm, por lo que se necesita un eje con un diámetro ligeramente mayor que permita maquinar la rosca necesaria. Así, se ha establecido lo siguiente:

- Eje: Acero DF – 2, $\Phi = 5/8" \approx 16 \text{ mm}$
- Cojinete interior de maza: 6002, $\Phi_{\text{int}} = 15 \text{ mm}$, $\Phi_{\text{ext}} = 32 \text{ mm}$
- Cojinete rodillo: 6003, $\Phi_{\text{int}} = 15 \text{ mm}$, $\Phi_{\text{ext}} = 42 \text{ mm}$
- Maza: *Cold Rolled*, $\Phi = 1 \frac{1}{2}" \approx 38 \text{ mm}$
- Cuerpo de la manivela: tubo proceso, $\Phi = \frac{3}{4}" \approx 19 \text{ mm}$
- Placa en forma de U: platina de $\frac{1}{4}"$ de espesor.

La maza ubicada en el extremo de la biela será diferente a la del otro extremo con el movimiento alternativo. Esto se debe a que en la primera,

solamente un extremo del eje va sujeto a la biela, por lo que es necesaria alguna porción de eje en el extremo opuesto a la parte roscada; a su vez, la parte que sirve de guía al movimiento alternativo necesita de cojinetes en los extremos salientes del eje que le permitan deslizarse sobre las guías. Un esquema de la maza se muestra en la figura 66.

Figura 66. **Maza – eje en el extremo sujeto a la biela**



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp.

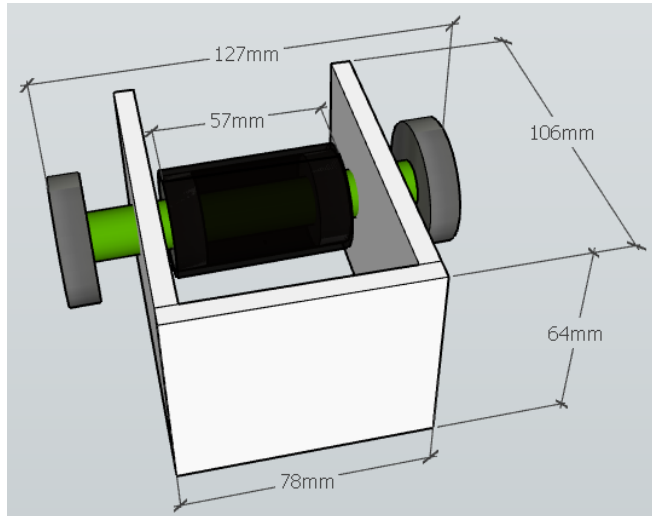
En el extremo guía del movimiento alternativo, la maza se requiere de una menor longitud, ya que sobre el eje también deberá ir montada la pieza que servirá de unión con la varilla del émbolo. El esquema de dicha configuración se aprecia en la figura 67. La placa en forma de u, mostrada en dicha figura, tendrá la función de la unión de la maza con la varilla, por lo que debe existir un espacio adecuado entre la maza y la pared de la placa, el cual permitirá alojar la tuerca que sujetará a la varilla del émbolo. Como siguiente paso se procederá con el cálculo de la longitud de la varilla, la cual se determina como:

$$l_{varilla} = carrera + holgura_{(placa-cilindro)} + l_{émbolo} + ancho\ de\ las\ tuercas \\ + ancho\ de\ pared\ de\ la\ placa$$

$$l_{varilla} = 310 + 50,8 + l_{émbolo} + 4(10) + 6$$

$$l_{varilla} = 400,8 + l_{émbolo}$$

Figura 67. **Maza – eje en el extremo guía del movimiento alternativo**



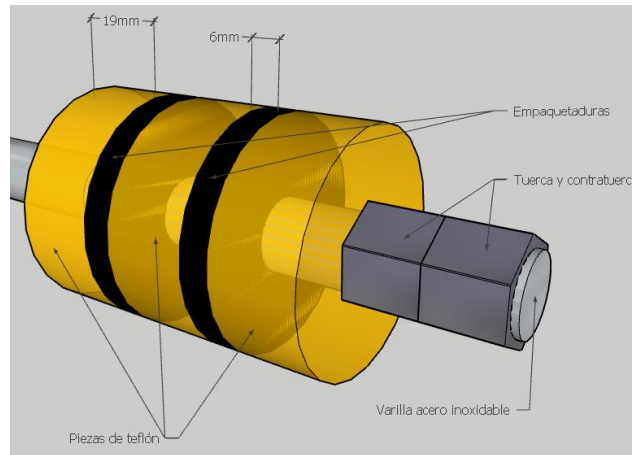
Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp.

Como se observa, la longitud de la varilla variará en función de la longitud que tenga el émbolo, por lo que es necesario establecer dicha medida. Para elaborar el émbolo, se ha determinado que el cuero es el material comercialmente más asequible, y que cumple con la necesidad de generar una succión en el cilindro sin verse dañado o afectado por el agua. Sin embargo, como el cuero resulta fácilmente deformable, se hace necesario añadir algún material que aporte rigidez, de forma que se utilizarán tres piezas plásticas maquinadas, las cuales irán sujetas al extremo de la varilla. Junto con las empaquetaduras de cuero, formarán el cuerpo del émbolo, como se puede observar en la figura 68.

El diámetro de las piezas plásticas y las empaquetaduras está determinado, a su vez, por el diámetro interno del cilindro; en este caso, entonces:

- Cilindro: tubo acero inoxidable, $\Phi_{\text{ext}} = 2" \approx 51 \text{ mm}$; $\Phi_{\text{int}} \approx 48 \text{ mm}$
- Varilla del émbolo: varilla de acero inoxidable, $\Phi = 5/8" \approx 16 \text{ mm}$
- Cuerpo del émbolo: anillo de teflón maquinado, $\Phi_{\text{ext}} = 46 \text{ mm}$; $\Phi_{\text{int}} \approx 17 \text{ mm}$
- Empaquetadura del émbolo: anillo de cuero, $\Phi_{\text{ext}} = 48 \text{ mm}$; $\Phi_{\text{int}} \approx 17 \text{ mm}$

Figura 68. **Cuerpo del émbolo**



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp.

Una vez establecida la conformación del cuerpo del émbolo, es posible determinar su longitud:

$$l_{\text{émbolo}} = 3(\text{ancho anillo teflón}) + 2(\text{ancho anillo cuero})$$

$$l_{\text{émbolo}} = (3 * 19) + (2 * 6)$$

$$l_{\text{émbolo}} = 57 + 12$$

$$l_{\text{émbolo}} = 69 \text{ mm} \approx 70 \text{ mm}$$

Por lo tanto:

$$l_{\text{varilla}} = 400,8 + l_{\text{émbolo}}$$

$$l_{\text{varilla}} = 400,8 + 70$$

$$l_{\text{varilla}} = 470,8 \text{ mm}$$

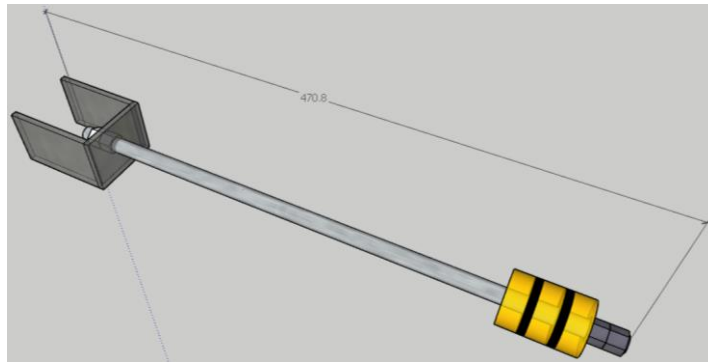
En la figura 69 se muestra el conjunto de émbolo y varilla con su respectiva unión a la manivela. Ahora corresponde calcular en base a los datos anteriores, la medida correspondiente del cilindro, la cual será:

$$l_{cilindro} = carrera + holgura_{(pistón-cilindro)} + l_{émbolo} \\ + ancho\ de\ tuercas\ de\ émbolo$$

$$l_{cilindro} = 310 + 10 + 70 + (2 * 10)$$

$$l_{cilindro} = 410\ mm$$

Figura 69. **Conjunto varilla – émbolo y unión a manivela**



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp.

Adicionalmente, se requiere una unión en cada extremo del cilindro: una que permita la entrada y salida de la varilla de un lado, sin dejar salir el agua que se pudiera filtrar; y en el otro extremo, una que permita la conexión a la tubería. Estas piezas requieren de medidas específicas que se facilitan maquinando con una barra redonda de teflón como materia prima, de forma que se ha decidido que cada pieza sea de 2 pulgadas de longitud, con 1 pulgada para cada conexión. Se define entonces:

- Unión cilindro – varilla de émbolo: teflón maquinado, $\Phi_1 = 50,8\ mm$; $\Phi_2 \approx 15,9\ mm$
- Unión cilindro – tubo PVC: teflón maquinado, $\Phi_1 = 50,8\ mm$; $\Phi_2 = 25,4\ mm$
- Base de mecanismo bombeante: platina $6,35\ mm \times 152,4\ mm \times l_{placa}$

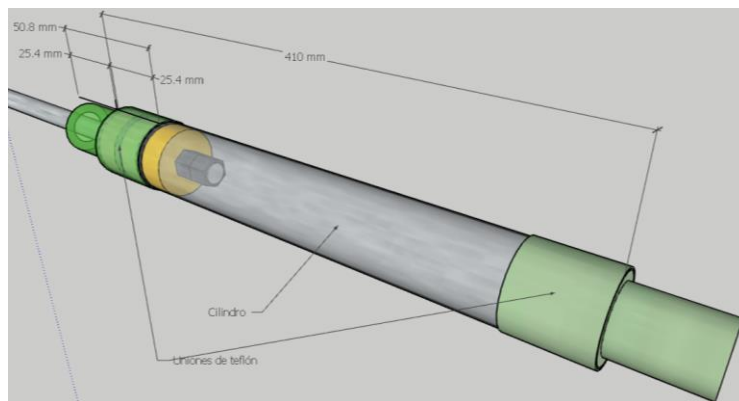
En la figura 70 se aprecia un esquema del émbolo dentro del cilindro junto con sus uniones. Para sostener todo este mecanismo se utilizará una lámina de $\frac{1}{4}$ " de espesor y 6" de ancho, solo queda calcular la longitud de la misma. Esta se encuentra en función de la longitud total del cilindro con sus uniones, la longitud de la manivela menos la holgura respectiva, la holgura entre unión y placa, la distancia entre la placa y el centro del eje con movimiento alternativo, así como la longitud de las carrileras; por lo tanto:

$$l_{carrileras} = carrera + (2 * radio\ del\ cojinete)$$

$$l_{carrileras} = 310 + 42$$

$$l_{carrileras} = 352\ mm$$

Figura 70. **Cilindro – émbolo y sus uniones**



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp.

Entonces:

$$l_{placa} = l_{cilindro+uniones} + holgura_{unión-tubo\ pvc} + holgura_{unión-placa}$$

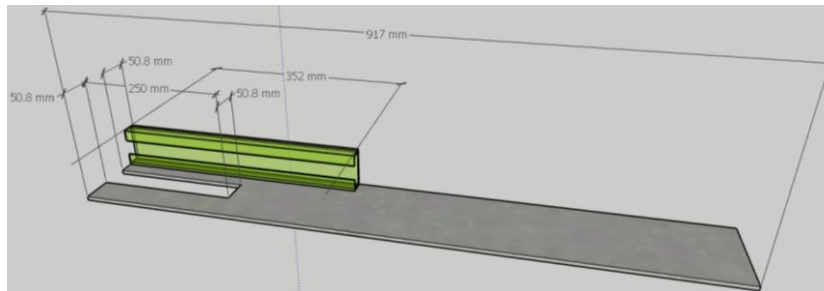
$$+ l_{placa\ u-centro\ del\ eje\ u} + l_{carrilera} - r_{cojinete}$$

$$l_{placa} = 460,8 + 25,4 + 25,4 + 74 + 352 - 21$$

$$l_{placa} = 916,6\ mm$$

Como puede observarse en la figura 71, la placa debe tener una ranura en el extremo en que se apoyan las carrileras. Esta permite el paso libre de la manivela en toda su trayectoria, ya que la misma describe un movimiento oscilante en uno de sus extremos, el cual se la traslada desde la parte superior de la placa hacia la inferior de forma alternativa y repetitiva.

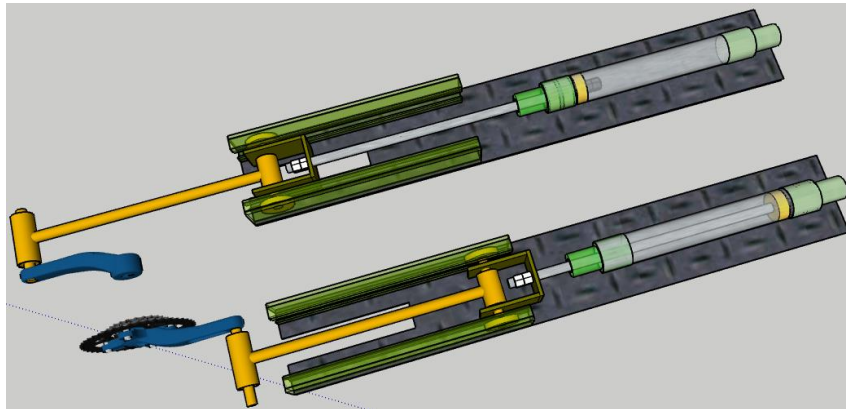
Figura 71. **Platina para soporte de mecanismo bombeante y carriles para extremo alternativo de la manivela**



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp.

Los elementos descritos conforman el mecanismo bombeante, el cual succionará y descargará del agua. El mecanismo completo se muestra en la figura 72. Una vez se cuenta con el mecanismo principal, se procede a diseñar el chasis y estructura que dará soporte y rigidez al momento del funcionamiento del mismo. Como el mecanismo se accionará mediante pedaleo, el procedimiento más sencillo consiste en conseguir dos marcos de bicicleta que estén en desuso, los cuales pueden ser entre las medidas comerciales de 20, 24 o 26 pulgadas. Las medidas del chasis y base para la bicimáquina estarán en función de los marcos de bicicleta que puedan conseguirse; aunque la estructura base no variará considerablemente, deberán adaptarse las medidas a los marcos disponibles.

Figura 72. **Mecanismo bombeante**



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp.

En este caso, fue posible obtener un marco núm. 26 y otro núm. 20, para los cuales se tienen las obtuvieron las medidas descritas a continuación; además de enlistar el resto de materiales necesarios para la construcción del chasis y base:

- Chasis
 - Marco bicicleta montaña núm. 26
 - Marco bicicleta montaña núm. 20
 - Placas sujetoras de rueda: platina, espesor de $\frac{1}{4}$ " \approx 6,4 mm
 - Estructura y soporte de mecanismo bombeante: tubo proceso, $\Phi \approx 19$ mm
- Base: angular, $1 \frac{1}{4}$ " x $\frac{3}{16}$ " x l
- Complementos
 - Sillón
 - Timón

Como primer paso para el chasis, debe tomarse el marco de la bicicleta de mayor medida, al cual debe desmontársele el timón y la horquilla en caso de tenerlos. Se debe invertir la posición de las bielas, de forma que la parte larga del

eje quede del lado izquierdo para poder acoplar de ese lado la multiplicadora. Por último, se deben realizar cortes: uno en el tubo superior y otro para retirar el tubo que aloja el sistema timón – horquilla, tal como se muestra en la figura 73.

Figura 73. **Acondicionamiento de marco de bicicleta núm. 26**



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp.

De la bicicleta más pequeña, se ocupará el tubo inferior junto con la maza que aloja al eje pedalier, así como el tubo del asiento; se harán los cortes como se observa en la figura 74. Con los marcos ya recortados, se arma el chasis, de la forma como se describirá a continuación. Se comienza por la base, como ya se indicó se hará con el angular de $1\frac{1}{4}$ " x $\frac{3}{16}$ ", se tomará como parte delantera la que sujeta el mecanismo bombeante, y la trasera, la que sujeta el asiento.

Figura 74. **Acondicionamiento de marco de bicicleta no. 20**



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp.

- Un triángulo con altura mayor a la longitud del marco de la bicicleta núm. 26, y se tomará como referencia el tubo superior que fue cortado de la misma. Dicho tubo se dispondrá angularmente como soporte inferior del marco: con el extremo superior apoyado en el mismo, mientras el extremo opuesto se carga sobre la punta de la base. Por tanto, los angulares que forman esta punta no estarán cerrados del todo, sino que existirá un espacio justo para la entrada del tubo. El marco servirá como la estructura donde el usuario se sienta y acciona la máquina pedaleando.

$$h_{\text{triángulo}} = l_{\text{marco bici 26}} + \text{holgura}$$

$$h_{\text{triángulo}} = 855 \text{ mm} + 250 \text{ mm}$$

$$h_{\text{triángulo}} = 1105 \text{ mm}$$

- En el lado opuesto al triángulo y utilizando su base como una de sus aristas, un rectángulo que funcionará como soporte para el mecanismo bombeante.

$$b_{\text{triángulo}} = a_{\text{rectángulo}} = a_{\text{bielas}} + 2a_{\text{platina de mecanismo bomeante}}$$

$$b_{\text{triángulo}} = a_{\text{rectángulo}} = 190 \text{ mm} + (2 * 152,4) \text{ mm}$$

$$b_{\text{triángulo}} = a_{\text{rectángulo}} = 494,8 \approx 495 \text{ mm}$$

$$l_{\text{rectángulo}} = l_{\text{cilindro+uniones}} + \text{holgura}_{\text{unión-tubo pvc}} + \text{holgura}_{\text{unión-placa}} \\ + l_{\text{placa u-centro del eje u}} + l_{\text{manivela}} + l_{\text{eje biela - rueda-volante}}$$

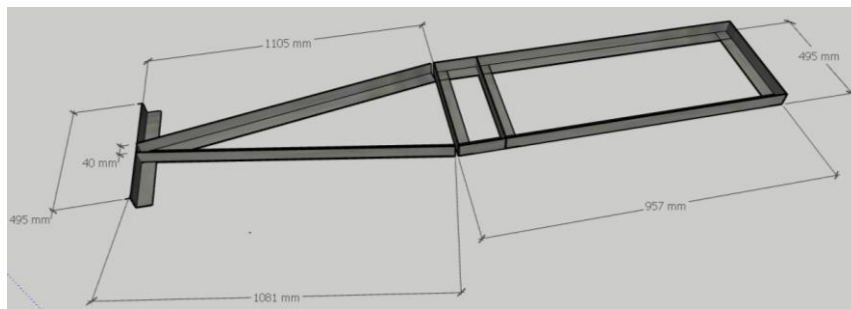
$$l_{\text{rectángulo}} = 460,8 + 25,4 + 25,4 + 74 + 361 + 10$$

$$l_{\text{rectángulo}} = 956,6 \text{ mm} \approx 957 \text{ mm}$$

- Se considera la posibilidad de algún refuerzo adicional, si existiera algún esfuerzo o vibración resultante.

El esquema de la base se aprecia en la figura 75. Luego para el chasis se parte del marco grande, se establece la altura a la cual quedará del nivel del suelo, y se toma como referencia la maza del eje pedalier: la que debe ser mayor que la longitud de la biela, ya que esta debe girar libremente. En este caso se utilizarán bielas comerciales de una bicicleta de montaña, de 170 mm de longitud.

Figura 75. **Base**



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp.

$$h_{eje\ pedalier} = l_{biela} + holgura$$

$$h_{eje\ pedalier} = 170\ mm + 150\ mm$$

$$h_{eje\ pedalier} = 320\ mm$$

Antes de acoplar el chasis a la base se necesita maquinar las placas que sujetarán el rin, ya que estas también servirán para unir el cuerpo de la bicicleta, tanto a la base como a la estructura del chasis. Debe conservarse una medida entre las placas que permita el alojamiento de la maza de la rueda, incluido el piñón utilizado; es aconsejable añadir una holgura aproximada de 10 mm que permita realizar algún ajuste de corrimiento de la maza sobre el eje, para la alineación de la cadena. Para alinear las placas paralelamente entre sí, se puede utilizar una maza diferente para acoplarla temporalmente y soldarlas una vez se consiga colocarlas de forma alineada. Al estar colocadas, se puede unir la base con el chasis a la altura determinada con el tubo proceso de diámetro $\frac{3}{4}$ ".

$$a_{entre\ placas} = l_{maza} + holgura$$

$$a_{entre\ placas} = 124\ mm + 10\ mm$$

$$a_{entre\ placas} = 134\ mm$$

Además:

$$h_{eje\ rueda-volante} = h_{eje\ pedalier} + 50\ mm$$

$$h_{eje\ rueda-volante} = 320\ mm + 50\ mm$$

$$h_{eje\ rueda-volante} = 370\ mm$$

Con el chasis base, se le añade la pieza que sostendrá el eje pedalier y las bielas del mecanismo bombeante que recibirá su movimiento desde la rueda – volante. Es necesario que la línea del eje del mismo sea paralela a la del eje de la rueda, para permitir una alineación correcta para la transmisión de cadena a una distancia vertical sobre dicho eje que permita la entrada y salida de la rueda. En este caso se ha decidido correr 50 mm el centro del eje hacia el marco de la bicicleta, lo que permite un mayor paso libre para la rueda – volante. El soporte principal es una platina maquinada con una forma triangular, adaptada a la geometría del tenedor trasero de la bicicleta núm. 26. Ya que está montado el marco de la bicicleta sobre la base, se define la altura conforme a lo mencionado, así como se define el ángulo al cual quedará sobre la platina. Luego, se añaden los refuerzos laterales al chasis, cuidando que no interfieran con la trayectoria de las bielas del mecanismo bombeante. Asimismo, se añade sobre el tubo angulado del marco núm. 26, una porción del tubo de asiento de la bicicleta núm. 20, de forma que permita una longitud mínima efectiva de 48 cm del centro del asiento al centro del eje pedalier.

$$h_{eje-mecanismo\ bombeante} = h_{eje\ rueda-volante} + h_1$$

$$h_{eje-mecanismo\ bombeante} = 370\ mm + 365\ mm$$

$$h_{eje-mecanismo\ bombeante} = 735\ mm$$

Por último, se utilizará la altura de la maza para determinar la misma dimensión para la estructura que soportará el mecanismo bombeante: eso debido a la importancia de la alineación entre el centro del eje y la línea de movimiento del émbolo. De dicha forma se puede aprovechar todo el recorrido para la acción de bombeo ya que, si existiera algún desnivel, provocaría un ángulo que reduciría el recorrido efectivo; por tanto:

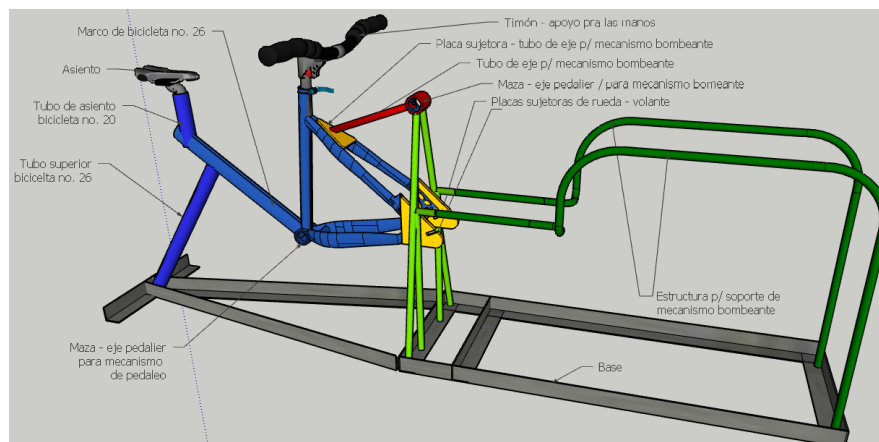
$$h_{\text{soporte mecanismo bombeante}} = h_{\text{eje-mecanismo bombeante}} - (r_{\text{unión de teflón}} + a_{\text{platina}})$$

$$h_{\text{soporte mecanismo bombeante}} = 735 - (31,75 + 6,35)$$

$$h_{\text{soporte mecanismo bombeante}} = 696,9 \text{ mm} \approx 697 \text{ mm}$$

Como puede observarse en las figuras 76 y 77, la estructura para la base del mecanismo bombeante no es uniforme en toda la línea horizontal, sino que se dobla hacia abajo, 420 mm antes de llegar la línea del eje. Esto es necesario para dejar el espacio libre del recorrido de la manivela, ya que como se explicó, esta pasa tanto sobre como debajo de la línea de la platina. Como resultado, este espacio debe coincidir con la ranura de la platina del mecanismo bombeante.

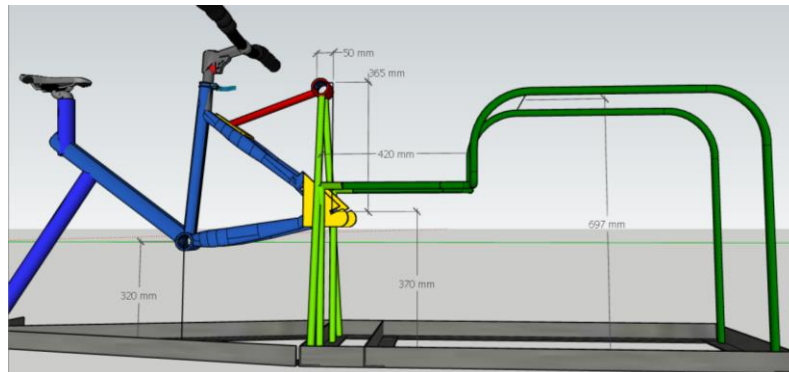
Figura 76. Chasis bicibomba



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp.

La altura a la que debe doblarse de nuevo para sujetarse al marco deberá ser menor a la del centro del eje de la rueda – volante, y permitir un espacio adecuado para la colocación de la misma; para este caso, se haría el doblado a una altura menor a 370 mm. En la figura 77 se muestra en la parte superior de la ranura para el eje, solamente para fines demostrativos, con la observación de que se tendrá que colocar en la parte inferior.

Figura 77. **Alturas y medidas de referencia para chasis de bicibomba**



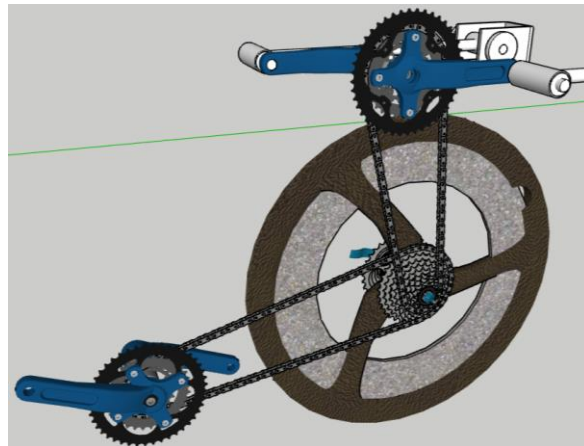
Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp.

Una vez terminado el chasis, se puede colocar el mecanismo accionante mostrado en la figura 78. Se puede observar ya montado en el mismo, en las figuras 79 y 80. Este mecanismo está conformado por:

- Eje pedalier accionante: eje sellado de montaña de tres pasos, fácilmente encontrado en el comercio.
- Rueda – volante:
 - Aro completo; maza con eje – rayos – rin, No. 26
 - Cemento, arena y piedrín: relleno para el aro, que le dará una masa sólida y pesada que tendrá la función de volante.

- Piñón conductor: recibirá el movimiento de pedaleo por parte del usuario a través de los pedales y la multiplicadora – cadena, para trasladarlo a la multiplicadora del mecanismo bombeante.

Figura 78. **Mecanismo accionante**



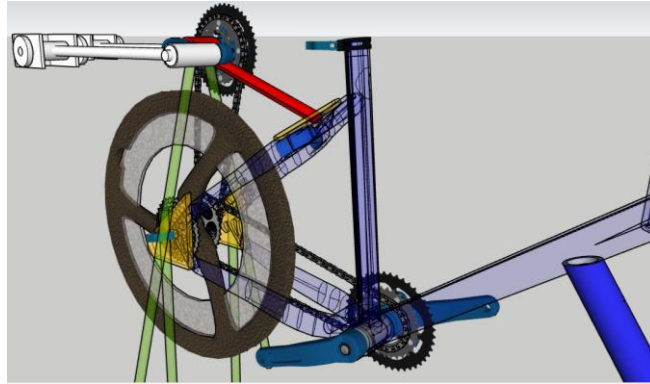
Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp.

- 2 cadenas para velocidades de bicicleta de montaña, disponibles comercialmente:
 - Una para accionamiento de la rueda – volante por medio de la misma cadena, desde las bielas acopladas a los pedales que son girados a su vez por el usuario.
 - Otra para transmitir el movimiento de la rueda – volante hacia la multiplicadora del mecanismo bombeante, de forma que pueda accionarlo y ponerlo en funcionamiento.

La instalación del mecanismo comprende los pasos siguientes:

- Fundir la rueda – volante y verificar que la masa de concreto no sobrepase el nivel de la base del piñón, dejando el paso libre para el recorrido de las cadenas.

Figura 79. **Mecanismo accionante montando en el chasis, 1**

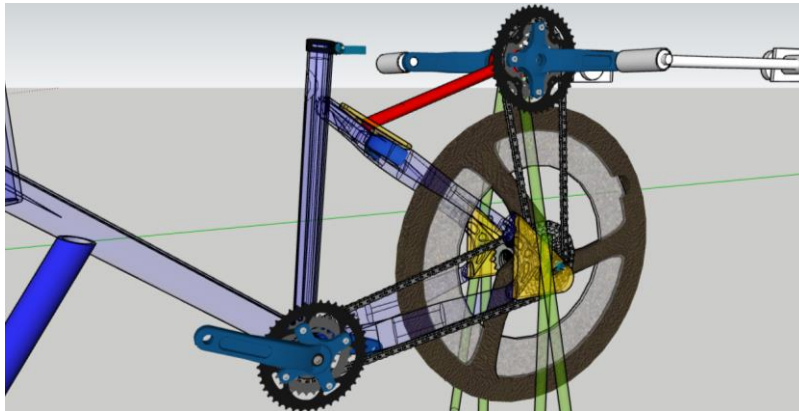


Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp.

- Establecer la posición de la maza sobre el eje, con base en la alineación de la cadena. La posición ideal es la relación más baja, es decir, el engranaje más pequeño de la multiplicadora conectada al engrane con mayor diámetro en el piñón. Con esto se consigue un torque máximo de accionamiento; además, la aplicación no precisa de velocidades excesivas. Las geometrías como el largo de los ejes, ancho de piñones, medidas de los marcos, entre otros, pueden variar según cada fabricante. Por ello la relación indicada es solamente la ideal; de dicha manera se puede ajustar a la más próxima de ser necesario. Una vez se ha establecido la posición de la maza, se desmontan la rueda y el piñón
- Verificar el engrase y ajuste adecuado del eje de la maza.
- Aplicar pegamento para metales a la rosca del piñón y enroscarlo en la maza.
- Colocar la rueda completa sobre las patinas, terminar de ajustar el espacio entre platina – contratuercas; de preferencia con otras contratuercas separadas por roldanas.

- Se instala la primera cadena nuevamente; se acondiciona un tensor simple en caso de ser necesario.
- Se acomodan tanto el eje sellado como la multiplicadora con su contrabiela, que funcionarán accionando el mecanismo bombeante.
- Para la segunda cadena, se debe presentar la misma tanto desde el engrane más pequeño de la multiplicadora del eje bombeante, como desde el intermedio; se selecciona la posición donde resulte con mejor alineación con alguno de los engranajes del piñón de la rueda – volante. Cuando se instala, se verifica la necesidad o no de un tensor simple. Una vez finalizado se obtendrá una configuración, como la observada en la figura 80.

Figura 80. **Mecanismo accionante montando en el chasis, 2**



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp.

Como siguiente paso, se debe acoplar el mecanismo bombeante comenzando por las bases. Tanto su soporte en el chasis como ellas mismas, deben alinearse y centrarse con la trayectoria horizontal que tiene la manivela en

el extremo opuesto a la biela. Esto permitirá la disminución máxima de esfuerzos indeseables y resistencias innecesarias en el funcionamiento del mecanismo.

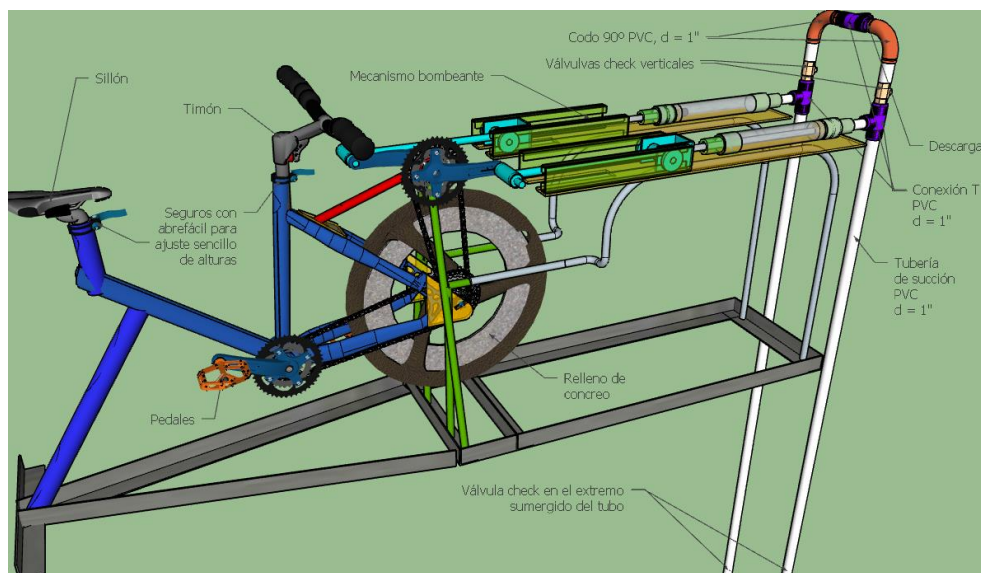
Debe verificarse, asimismo, la posición de los cilindros que permita el paso libre del émbolo en todo su recorrido. Una vez establecida, y acoplado el mecanismo bombeante con el accionante, se determina la ubicación de las abrazaderas que, atornilladas a las bases, sujetarán a los cilindros.

Para ponerla en funcionamiento se debe acondicionar con algunos accesorios que permitirán tanto las conexiones de los depósitos de succión – descarga, como el confort para el usuario al utilizar la máquina. En las figuras 81 y 82 se pueden apreciar las ilustraciones del diseño concluido, con todas sus partes y accesorios, los cuales son en su totalidad de disponibilidad comercial y se detallan a continuación:

- Pedales: se acoplan a las bielas del mecanismo accionante y sobre ellos ejerce el usuario la acción de pedaleo, lo que permite funcionar al mecanismo bombeante.
- Tubería de succión: dirigida al depósito de una profundidad no mayor a 4 m, por donde circulará el agua hacia los cilindros; tubo PVC, $\Phi = 1''$.
 - Válvula de pie: permite la retención del agua en la tubería de succión mientras el émbolo se encuentra en movimiento de descarga; válvula check vertical, $\Phi = 1''$.
- Conexión tubería de succión – cilindros – tubería de descarga: parte indispensable de la tubería, que permite el paso del agua desde la tubería de succión hasta el cilindro, y desde este último hacia la tubería de descarga; T de PVC, $\Phi = 1''$.

- Sillón de bicicleta: asiento para el usuario, con posibilidad de ajuste según la altura de la persona.
- Timón: funciona como manillar o pasamanos, puesto que no se precisa de dirección al ser una máquina estacionaria. Necesario para darle estabilidad al usuario en el momento de pedalear, con la altura modificable según la necesidad o comodidad de la persona.

Figura 81. **Bicibomba y sus accesorios**



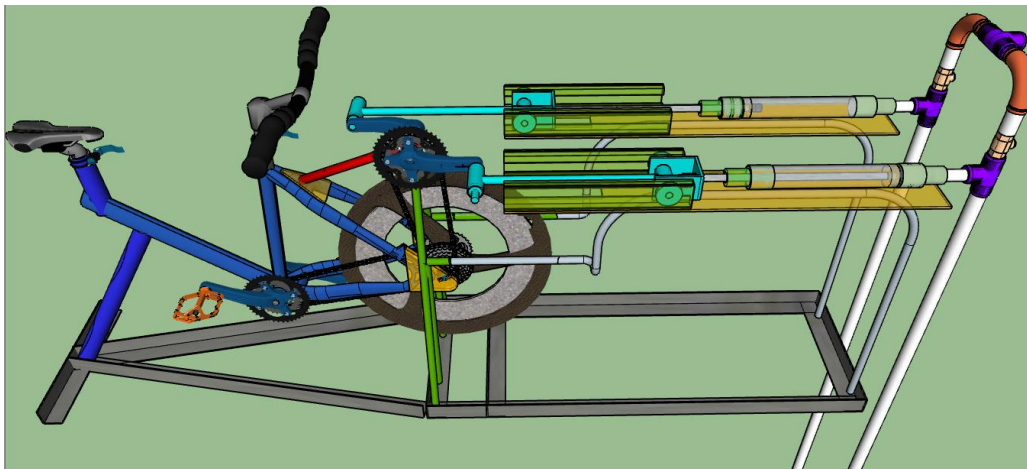
Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp.

- Tubería de descarga: traslada el líquido hacia el depósito donde se necesita llevar; tubo PVC, $\Phi = 1''$.
 - Válvula de descarga: tiene la función tanto de impedir que el agua retorne al sistema una vez ha pasado a la tubería de descarga, al mismo tiempo que ayuda a generar las condiciones de vacío que necesita el émbolo para realizar su función de succión; válvula check vertical, $\Phi = 1''$.

- Unión de descarga: permite la confluencia de las dos salidas en una sola, generando un flujo prácticamente continuo;
 - 2 codos PVC, $\Phi = 1''$
 - 1 T de PVC, $\Phi = 1''$
- Debe considerarse las uniones de las partes con rosca de las válvulas check, por medio de acoples hembra – macho roscado; así como las diferentes porciones de tubo que sirven de unión entre los accesorios que van introducidos a presión como acoples hembra, T´s y codos. Deben ser lo más corto posible, se recomienda una longitud de 2" o 50 mm.
- Se ha considerado la máquina para uso en un solo depósito, ya que no cuenta con algún mecanismo que facilite su movilización, así como el soporte firme a la superficie donde se encuentra asentada, le proporciona firmeza en el funcionamiento. Sin embargo, en caso fuera necesario realizar el traslado de la misma, puede llevarse a cabo sin ningún inconveniente, con el debido cuidado al momento de desacoplar y retirar la tubería de succión.

Cabe destacar que las medidas obtenidas son dependientes de los marcos de bicicleta encontrados para la construcción, por lo que las mismas pueden variar en caso se quiera reproducir la bomba. Al ser un prototipo, pueden surgir mejoras y modificaciones, por lo que los planos se trabajarán al estar construida. El esquema final del diseño elaborado puede apreciarse en la figura 82.

Figura 82. **Diseño final de bicibomba**



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp.

5.3. **Materiales y presupuesto**

Con base en el diseño establecido, es posible determinar los que se utilizarán y su cantidad necesaria. Esto permite cotizarlos a partir de un dato aproximado de dicha cantidad en el diseño; así como de la medición de las diferentes partes y piezas de la máquina a través del programa utilizado, *SketchUp* 2017. En la tabla desarrollada a continuación, se muestra un resumen de las piezas por parte específica de la máquina; así como el resultado de la cotización realizada para cada parte. Se indica solamente el mejor precio encontrado en base a la relación costo – calidad. Cabe destacar que no se añade el valor de los marcos de las bicicletas, debido a que ya se contaba con ambas: una por parte de la organización financiante y la otra por parte del autor.

Tabla XVI. **Materiales de la bicibomba y su cotización***

Parte	Material	Cantidad necesaria	Presentación	Cantidad relativa (lbs)	Precio unitario (Q, 5,00 / lb)	Total
Base	Angular 1 1/2 x 3/16"	6,28 m	Segmento 6 m	1	Q115,00	Q115,00
		0,28 m	chatarra	1,4	Q7,00	Q7,00
Carrileras	Angular 1/8 x 3/4 "	1,7 m	segmento 6 m	0,3	Q35,00	Q17,00
			chatarra	3,4	Q17,00	
Platinas, base para mecanismo bombeante	Platina, espesor de 1/4"	0,52 m2	plancha completa (1,20 * 2,44)	0,2	Q950,00	Q310,00
			segmento (6" * 6m)	1	Q310,00	
			segmento (4" * 6m)	0,85	Q273,15	
		0,6 m2	chatarra	66	Q330,00	
Chasis, bielas	Tubo proceso 3/4"	10,52	Segmento 6 m	2	Q70,20	Q140,40
Mazas de manivela	Cold rolled 1 1/2"	0,5 m	segmento 25"	1	Q82,67	Q82,67
	Eje acero DF-2 5/8"	0,55 m	segmento 0,6 m	1	Q68,93	Q68,93
Cilindro	Tubo acero inoxidable 2"	0,8 m	Segmento 6 m	0,15	Q135,00	Q135,00
Barra de émbolo	Barra acero inoxidable 5/8"	1,2 m	segmento 6 m	0,2	Q900,00	Q163,00
			segmento 1,5 m	1	Q163,00	
Rodamientos internos de mazas	Cojinete 6002	8	Unidad	8	Q23,30	Q186,40
Rodamientos de carrileras	Cojinete 6302	4	Unidad	4	Q29,25	Q117,00
Anillos de émbolo	Barra redonda de teflón 2"	0,12 m	segmento 0,15 m	1	Q68,40	Q68,40

Continuación de la tabla XVI.

Juntas de cilindro	Barra redonda de teflón 2 1/2 "	0,45 m	segmento 0,5 m	1	Q284,00	Q284,00
Empaquetaduras de émbolo	Empaques cuero 2 x 1/4 "	0,02 m ²	Retazo 0,02 m ²	1	Q30,00	Q30,00
Uniones de émbolo y varilla	Tuercas acero inoxidable	8	unidad	8	Q5,08	Q40,64
Tubería	Tubo PVC 1"	14,7 m	Segmento 6 m	3	Q29,00	Q87,00
Accesorios para tubería PVC	Válvulas check 1"	6	unidad	6	Q75,00	Q450,00
	T 1"	3	unidad	3	Q4,00	Q12,00
	Coplas 1"	4	unidad	4	Q8,00	Q32,00
	Codos radio largo 1"	2	unidad	2	Q6,00	Q12,00
Montaje	Tornillos sujeción 3/8 x 3"	10	unidad	10	Q12,04	Q120,40
Sujeción de cilindros	Abrazadera 2 1/2"	4	unidad	4	Q15,00	Q60,00
Piezas de bicicleta para mecanismos accionante y bombeante	Eje pedalier sellado	2	unidad	2	Q55,00	Q110,00
	Multiplicadora conductora	1	unidad	1	Q99,00	Q99,00
	Piñón	1	unidad	1	Q68,00	Q68,00
	Aro completo no, 26	1	unidad	1	Q54,00	Q54,00
	Cemento	10	libra	10	Q3,50	Q35,00
	Cadena de bicicleta (p/velocidades)	2	unidad	2	Q22,00	Q44,00
	Pedales	1 par	unidad	1	Q35,00	Q35,00
	Multiplicadora infantil	1	unidad	1	Q45,00	Q45,00

Continuación de la tabla XVI.

Complementos	Grasa	1	Unidad (bote 460 g)	1	Q35,00	Q35,00
	Aceite	1	Unidad (botella 300 ml)	1	Q20,00	Q20,00
Pintura	Pintura base	1	Medio galón	1	Q55,00	Q55,00
	Pintura color 1	1	Cuarto de galón	1	Q45,00	Q45,00
	Pintura color 2	1	Cuarto de galón	1	Q45,00	Q45,00
	Thiner	1	Galón	1	Q40,00	Q40,00
	Wipe	2	libra	2	Q6,00	Q12,00
Total de costo en concepto de materiales						Q3 280,84

* Los números en rojo son los que indican las partes a cotizar como chatarra, debido a que son fragmentos pequeños que no son vendidos comercialmente, se indica su precio total por pieza. Asimismo, las casillas marcadas con verde indican la selección de una opción entre varias del mismo material.

Fuente: elaboración propia.

Una vez se tiene el dato de los materiales, se añade los demás costos de fabricación, que consisten en la soldadura utilizada, mano de obra y depreciación de equipo. Dichos costos se añaden en la siguiente tabla:

Tabla XVII. **Gastos de fabricación**

Materiales	Q3 280,84
50 pulgadas de soldadura	Q100,00
Mano de obra y depreciación, 40 horas	Q1 700,00
SubTotal	Q5 080,84

Fuente: elaboración propia.

Con ello, se determinarán dos variantes: una con margen de utilidad en caso fuera construida con fines comerciales, mientras la otra será sin dicho margen, como el diseño aquí propuesto y desarrollado. Entonces:

Tabla XVIII. Margen de utilidad

Margen de utilidad, 30%	Q1 524,25
SubTotal	Q6 605,09

Fuente: elaboración propia.

Por último, se debe añadir el porcentaje de imprevistos, el cual es importante para solventar cualquier situación o inconveniente que pueda surgir durante la construcción. Se evalúan ambos casos descritos, tanto con margen como sin margen de utilidad:

Tabla XIX. Imprevistos con margen de utilidad

Imprevistos	Q990,76
SubTotal	Q7 595,86

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. Imprevistos sin margen de utilidad

Imprevistos	Q762,13
Costo total final de la bicibomba	Q5 842,97

Fuente: elaboración propia.

Ya que el diseño y construcción constituyen un proyecto de graduación, respaldado por una organización sin fines de lucro que busca generar un impacto positivo en la calidad de vida de comunidades históricamente desfavorecidas, se trabajará sin un margen de utilidad. Por tanto, el presupuesto estimado de construcción para el prototipo de la bicibomba es de Q 5 842,97.

6. EVALUACIÓN DEL DISEÑO

Una vez concluidas las fases de diseño – construcción – instalación del prototipo, se pueden hacer comparaciones de los rendimientos obtenidos respecto a los teóricos. Cabe resaltar que la construcción se llevó a cabo en el taller de fabricación y reparación de maquinaria agrícola e industrial CREA, quienes a su vez brindaron su apoyo y asesoramiento para el proceso de diseño – construcción, y donaron el 50% por concepto de mano de obra y depreciación. Los recursos financieros para cubrir los gastos de fabricación se lograron en trabajo conjunto con la Asociación Coordinadora Comunitaria de Servicios para la Salud, ACCSS. Dicha organización ha implementado un centro de capacitación en Nueva Jerusalén, municipio de Ixcán, departamento de El Quiché, en donde se instaló la máquina los días 17 al 21 de julio del 2017. A continuación, se detallará brevemente dicho proceso, con las características específicas de la tubería de descarga.

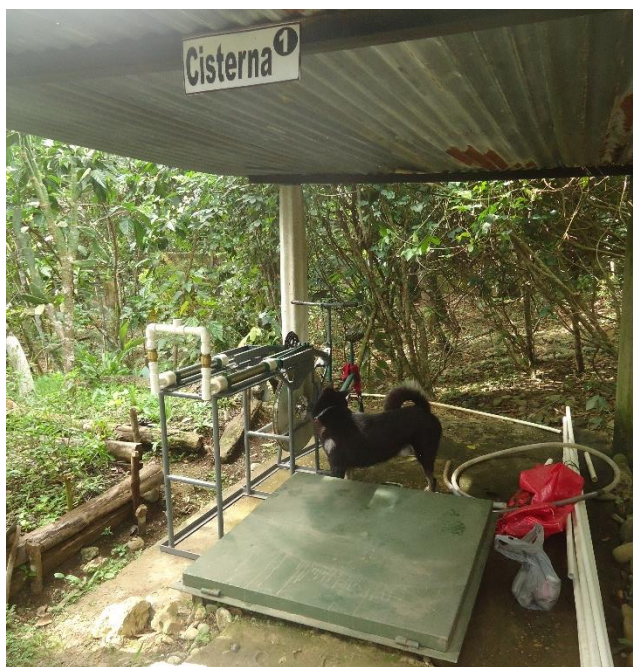
Figura 83. **Bicibomba – construcción final**



Fuente: elaboración propia.

El centro de capacitación cuenta con tres módulos: uno administrativo junto con el salón de reuniones y biblioteca; un segundo de cocina – comedor, y el tercero con las habitaciones para los usuarios del centro. Cuenta también con una bodega, un pozo, dos cisternas, estación de separación de residuos sólidos y planta de tratamiento de aguas residuales. Cada módulo, a su vez, posee sus respectivos tinacos para la distribución por gravedad dentro de las instalaciones: sanitarios, lavamanos, lavatrastos, duchas, entre otros. Dentro de las condiciones ideales para instalar la máquina, debe acondicionarse una pequeña caseta que pueda protegerla tanto de una exposición prolongada al sol como a la lluvia: esto asegura una prolongada vida útil de la máquina y genera condiciones de comodidad a la persona que la utiliza.

Figura 84. **Cisterna 1 y la bicibomba antes de la instalación de prueba**



Fuente: elaboración propia.

Al comparar las condiciones de ambas cisternas, se determinó que la que presentaba una mejor situación, es la que se denomina en el Centro, Cisterna 1.

Esta se encuentra más cercana al módulo de Administración – Biblioteca – Salón de reuniones. La conexión de la descarga se hará a los tinacos de dichos módulos. Sin embargo, las condiciones de instalación requieren de arreglos principalmente en el techo de lámina, ya que no cubre el largo total de la máquina y presenta algunas goteras. De esta forma, se determinó hacer una instalación provisional con mangueras flexibles para demostrar el funcionamiento adecuado, y se instruyó al equipo técnico del Centro en los aspectos básicos de diseño, construcción y mantenimiento. Una vez se hayan adecuado las instalaciones de la Cisterna 1, el personal técnico podrá realizar la instalación definitiva con tubo PVC; así como explicar el funcionamiento de la máquina a los visitantes del centro y otros posibles interesados de la comunidad.

A cada manguera flexible de succión se le adaptó su válvula de pie, como se aprecia en la figura 85. En este caso, una válvula check vertical, y se conectaron en las respectivas entradas de cada cilindro y se introdujo el extremo opuesto en la cisterna.

Figura 85. **Válvula de pie de manguera de succión**



Fuente: elaboración propia.

Así también, se determinó la necesidad cambiar la configuración de entrada – salida de los pistones, observada en las pruebas de funcionamiento. Dicho

cambio consiste en reemplazar las T conectadas, por unas cruces, de forma que el extremo que queda libre se utiliza para cebar la tubería de succión. Una vez cebada la bomba, se puede cerrar la entrada con tapones roscados, de forma que pueda volver a cebarse fácilmente cuando sea necesario. Esta configuración se muestra en la figura 86.

Figura 86. **Instalación de cruces, con extremo de tapón roscado para cebar la bomba**



Fuente: elaboración propia.

Con ello, ya solamente se conecta la manguera que dirige el agua hacia el tinaco del módulo necesario; esto puede tener la ventaja temporal de poder bombear el agua a diferentes puntos del centro, de ser necesario. Una vez se ha terminado la instalación se puede proceder a terminar las comparaciones, de forma que se iniciará con el cálculo teórico, como se describe a continuación. La altura determinada desde el punto de salida de la bomba, hasta el punto donde se descarga en el tinaco es de 5,75 metros; la longitud total de succión es de 2,70 metros y la longitud total de la manguera de descarga es de 26 metros.

En el mecanismo accionante, está conectado el plato de menor diámetro con el paso de mayor diámetro del piñón, con 24 y 34 dientes, respectivamente. Así, en el mecanismo bombeante está conectado en el antepenúltimo paso del piñón con 28 dientes, y el plato intermedio de la multiplicadora con 34 dientes. Para el valor de la velocidad utilizada, se ha podido establecer en el capítulo 2, un rango adecuado con el que se consigue una salida de potencia constante durante un tiempo considerable. El rango es de 60 – 80 rpm, utilizándose en este caso el valor intermedio.

$$v_{\text{mecanimo bombeante}} = v_{\text{mecanimo accionante}} * \frac{Z_b}{Z_a} * \frac{Z_d}{Z_c}$$

$$v_{\text{mecanimo bombeante}} = 70 \text{ rpm} * \frac{24}{34} * \frac{28}{34}$$

$$v_{\text{mecanimo bombeante}} = 36,3 \text{ rpm}$$

$$r_v = 0,5185$$

De esta forma, para comparar es necesario calcular el caudal teórico proporcionado por la bomba, el cual fue establecido en el capítulo 4 como:

$$Q_t = V_D * N * Z * j$$

Donde

Q_t = caudal teórico

$$V_D = \frac{\pi * D^2}{4} * L$$

V_D = volumen desplazado

D = diámetro del émbolo

L = carrera del émbolo; $L = 2r$

donde:

r = excentricidad de la manivela bombeante

N = revoluciones por unidad de tiempo: obtenido de la relación de velocidades

Z = número de cilindros

j = 1 – simple efecto

Entonces

$$Q_t = V_D * N_{\text{mecanismo bombeante}} * Z * j$$

$$Q_t = \frac{\pi * D^2}{4} * L * (N_{\text{mecanismo accionante}} * r_v) * Z * j$$

$$Q_t = \frac{\pi * (50,8 \text{ mm})^2}{4} * (2 * 15,5 \text{ mm}) * \left[70 \text{ rpm} \left(\frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ rev}} \right) * 0,5185 \right] * 2 * 1$$

$$Q_t = 0.02866 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$Q_t = 28.66 \text{ l}/\text{min}$$

Es importante recalcar que dicho caudal será obtenido al tener la velocidad promedio de 36,3 rpm en el mecanismo bombeante, lo que a su vez dependerá de generar una velocidad promedio de 70 rpm en el mecanismo accionante por parte del usuario. Dicha velocidad está determinada por la relación de velocidades existente en el sistema manivelas – piñón – cadena, como se determinó anteriormente.

Con estos datos, es posible hacer las consideraciones respectivas tanto de las fugas como de las pérdidas mecánicas e hidráulicas existentes en la máquina. Para ello, se trabajó el rendimiento volumétrico con los datos ideales comparados con el valor real obtenido del funcionamiento de la bomba; por lo que se utilizó de referencia para realizar la comparación final. Para los rendimientos mecánico e hidráulico, se comparó el valor ideal contra el promedio del rango definido en el capítulo 4.

6.1. Rendimiento volumétrico

Ya que existen fugas en el mecanismo durante el funcionamiento, generalmente producidas entre el pistón – cilindro y en las válvulas de la bomba, es necesario considerar un rendimiento volumétrico. Dicho valor hace referencia al volumen de agua que es proporcionado en relación al que debería aprovecharse en su totalidad. Cuando se aplica directamente se obtiene la expresión desarrollada a continuación:

$$Q_r = Q_t * \eta_v$$

Donde

Q_r = caudal real

Q_t = caudal teórico

η_v = rendimiento volumétrico

La bicibomba desarrollada se puede considerar con un requerimiento sencillo de operación y que produce caudales pequeños, por lo que se encuentra en el rango $\eta_v = 0,89 - 0,92$.

Ahora se determinará el caudal real obtenido en las condiciones de instalación, el cual efectuó mediante una serie de mediciones para obtener un promedio del mismo. De esta forma, al ser comparado con el gasto teórico, es posible también obtener la eficiencia y la potencia real con base en el caudal promedio. Para determinarlo se realizaron 10 mediciones una vez instalado, de forma que el promedio del caudal real obtenido es $Q_r = 0,3857 \text{ lt/s}$. Por lo tanto, se puede determinar el rendimiento volumétrico como:

$$\eta_v = \frac{Q_r}{Q_t}$$

$$\eta_v = \frac{0,3857 \text{ lt/s}}{0,4777 \text{ lt/s}}$$

$$\eta_v = 0,8074$$

6.2. Rendimiento hidráulico

En este aspecto se deben considerar las pérdidas de carga debidas a rozamientos en la tubería, accesorios y válvulas, inherentes a la construcción de la bomba. El rendimiento hidráulico resulta del cociente entre la altura que se lograría sin la existencia de dichas pérdidas, y la que realmente logra subir la máquina. Tomando en cuenta la clasificación desarrollada en el capítulo 4 se puede determinar que el tamaño de la bomba no es significativo en términos de gastos, así como tampoco presenta un alto nivel de complejidad en su diseño, por lo que se encuentra dentro del rango $\eta_H = 0,85 - 0,88$. Se ha decidido trabajar con $\eta_H = 0,86$.

6.3. Rendimiento mecánico

Se deben considerar las pérdidas de potencia o mecánicas producidas por rozamientos, principalmente en los aros, retenes, copas y elementos de cierre entre el mecanismo émbolo – cilindro. También se generan pérdidas por rozamiento en los cojinetes, pernos, elementos, accesorios, así como en las guías. El rendimiento mecánico indica qué porcentaje de la potencia entregada hacia la bomba, se está aprovechando para realizar la acción de bombeo. Como ya se mencionó, la bicibomba no constituye una máquina grande en términos de gasto volumétrico, y realiza su transmisión por sistema de engranes – cadenas. Dicho esto, y con base en la clasificación referida, se puede incluir dentro del rango $\eta_m = 0,83 - 0,86$, utilizándose el valor de $\eta_m = 0,84$.

6.4. Rendimiento total

Se obtiene al integrar todos los rendimientos descritos; es el producto de los mismos y puede ser expresado en la siguiente ecuación:

$$\eta = \eta_v * \eta_H * \eta_m$$

$$\eta_{teórica} = 0,92 * 0,88 * 0,86$$

$$\eta_{teórica} = 0,6962$$

$$\eta_{bicibomba} = \eta_v * \eta_H * \eta_m$$

$$\eta_{bicibomba} = 0,81 * 0,86 * 0,84$$

$$\eta_{bicibomba} = 0,5851$$

Tomando como referencia la eficiencia volumétrica, se puede determinar la potencia teórica desarrollada para entregar el caudal determinado a la altura requerida en el sistema instalado, de la forma siguiente:

$$P = \gamma * Q_t * H_t + P_m$$

$$P = \frac{\gamma QH}{\eta_v}$$

Donde

P = potencia requerida de la bomba

γ = peso específico del líquido

Q_t = caudal teórico

H_t = altura teórica

P_m = pérdidas mecánicas

η_v = rendimiento volumétrico teórico

Entonces

$$P = \frac{\gamma QH}{\eta}$$

$$P = \frac{(9800 \text{ N/m}^3)(0,02866 \text{ m}^3/\text{min})(1 \text{ min}/60 \text{ s})(5,75 \text{ m})}{0,92}$$

$$P = 29,26 \text{ W} * \frac{1 \text{ hp}}{745,7 \text{ W}}$$

$$P = 0,03923 \text{ hp}$$

Así, se obtiene la potencia real desarrollada por la persona, cuando pedalea a una velocidad constante de 70 rpm para bombear el agua a 5,75 metros de altura sobre el nivel de descarga:

$$P = \frac{\gamma QH}{\eta_{v \text{ real}}}$$

$$P = \frac{(9800 \text{ N/m}^3)(0,02314 \text{ m}^3/\text{min})(1 \text{ min}/60 \text{ s})(5,75 \text{ m})}{0,8074}$$

$$P = 33,34 \text{ W} * \frac{1 \text{ hp}}{745,7 \text{ W}}$$

$$P = 0,0447 \text{ hp}$$

CONCLUSIONES

1. La electrificación rural es una herramienta transformadora de la calidad de vida y actividad productiva, y es necesario habilitar procesos sustentables e inclusivos. A pesar de los avances, aún existe un buen número de hogares guatemaltecos que no cuentan con el servicio y los programas de electrificación rural generalmente no cuentan con soporte de instituciones estatales o privadas.
2. La demanda de agua en el país incrementa a medida que lo hace también la población y la economía. A la vez, la contaminación en los cuerpos de agua por un manejo inadecuado del recurso hídrico genera una gradual limitación en su disponibilidad. Más del 40% de la población rural no cuenta con un servicio adecuado de agua potable, con sus implicaciones en la calidad de vida y aspectos socioeconómicos.
3. El mecanismo de pedaleo ha resultado una forma eficiente de utilizar la energía que puede ser provista por una persona; las bicimáquinas representan una tecnología apropiada que puede aportar soluciones a problemáticas sociales.
4. La bomba de pistón es un mecanismo sencillo que, mediante un émbolo, crea condiciones de succión – presión que permiten el bombeo de fluidos. Dependiendo de la aplicación se requieren características específicas. El mecanismo biela – manivela es una de las formas posibles para su accionamiento.

5. Mediante el software SketchUp 2017 se desarrolló el planteamiento de diseño básico del prototipo propuesto, realizando los distintos análisis mecánicos e hidráulicos para dicho fin. Se utilizaron piezas y materiales fácilmente encontrados en el comercio, de forma que permita una fácil reproducción y aplicación en otros contextos. El caudal teórico determinado en las condiciones de operación fue de $Q_t = 28,66 \text{ l/min}$.
6. Luego del proceso de construcción y prueba de la bicibomba se obtuvo un caudal real de $Q_r = 23,14 \text{ lt/min}$, con lo que se tiene una eficiencia volumétrica de $\eta_v = 0,81$.

RECOMENDACIONES

1. Las políticas públicas en materia de electrificación deben enfocarse en los sectores rurales e indígenas, teniendo como objetivo fundamental, garantizar el acceso al servicio eléctrico de calidad. Debe asegurar una tarifa adecuada a la capacidad de pago y un funcionamiento que no genere un deterioro ambiental. De esta forma puede incidir positivamente en la calidad de vida y actividad productiva, al habilitar procesos sustentables e inclusivos en las poblaciones mencionadas.
2. Es urgente la implementación de procesos de investigación y proyectos que busquen mejorar y aplicar prácticas adecuadas de la extracción, utilización y disposición del recurso hídrico en el país. Dichos procesos deben ser interinstitucionales e interdisciplinarios, de modo que exista cooperación entre comunidades, instituciones del Estado, sector privado, sector académico y estudiantil, así como la sociedad civil; asesorados por técnicos y profesionales capacitados. Deben priorizarse los sectores que aún no cuentan con servicios de agua potable y saneamiento, o que presentan deficiencias en los mismos.
3. Articular esfuerzos de las ciencias exactas y sociales para la implementación de bicimáquinas y tecnologías apropiadas para la resolución de problemáticas sociales. Ambas academias deben priorizar el conocimiento del contexto nacional en función de generar herramientas y soluciones eficientes, adecuadas a los diferentes contextos y realidades de la población guatemalteca.

4. La eficiencia y utilidad de una bomba de pistón está condicionada por sus mismas características de construcción y la aplicación para la cual es requerida. Ya que el modelo de bicibomba pretende utilizar la mayor parte de piezas comerciales fácilmente asequibles, la carrera del pistón queda sujeta a las longitudes de bielas comerciales. De esta forma conviene realizar las comparaciones de capacidad teórica, considerando las posibles combinaciones de medidas disponibles de: 1) longitudes de bielas disponibles, y 2) diámetro de tubo de acero inoxidable con sus correspondientes diámetros de piezas de teflón. Para la misma capacidad, debe evaluarse el aumento o disminución en la necesidad de potencia aplicada por el usuario en cada configuración posible; asimismo, debe considerarse el aumento o reducción del costo para la misma capacidad.

5. Se permite y promueve la reproducción del prototipo desarrollado para su construcción y aplicación en comunidades donde se requiera su implementación. El autor queda abierto a participar y asesorar a quienes tengan la intención de implementar la bicibomba, así como a observaciones, recomendaciones y sugerencias que puedan hacer más eficiente el funcionamiento o implementar mejoras en materiales o diseño.

6. A fin de mantener el óptimo funcionamiento y rendimiento de la bicibomba, deben realizarse evaluaciones mensuales del estado general de las diferentes piezas y mecanismos. Se debe prestar principal atención a la lubricación de la varilla que sujeta al émbolo y las cadenas de transmisión; el cebado adecuado antes de la puesta en marcha; tensión adecuada de las cadenas; así como el estado de la pintura para evitar la corrosión.

BIBLIOGRAFÍA

1. ARRIAZA, Hugo. *Diagnóstico del sector energético en el área rural de Guatemala*. Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), Agencia Canadiense para el Desarrollo Internacional (ACDI), Universidad de Calgary, abril 2005. 117p.
2. Departamento de Análisis Económico y Estándares de Supervisión, Área de análisis económico y financiero. *Análisis de sectores económicos: sector eléctrico*. Superintendencia de Bancos, mayo 2011. 19 p.
3. Departamento de Tecnología, CEJAROSU. *Máquinas y mecanismos, parte III: Mecanismos para transmisión de movimientos*. 17 p.
4. Departamento de Tecnología I.E.S Molina Tecnologías. *Máquinas y Mecanismos*. 20 p.
5. FERNÁNDEZ DIEZ, Pedro. *Bombas centrífugas y volumétricas*. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria. 127 p.
6. FERRO, Gustavo; Letini, Emilio. *Eficiencia energética y regulación económica en los servicios de agua potable y alcantarillado*. CEPAL, 2015. 68 p.

7. GIL, Joram. *Caracterización de la demanda de energía en Zonas Rurales Aisladas de Guatemala*. Universidad Rafael Landívar (URL), Fundación Solar, diciembre 2008. 109 p.
8. Gobierno de Guatemala. *Política Nacional del Sector de Agua Potable y Saneamiento*. Guatemala 2005. 17 p.
9. GUZMÁN, Nicolás. *Los servicios de agua potable y drenajes en Guatemala 1944 – 2002*. Centro de Estudios Urbanos y Regionales (CEUR), Universidad de San Carlos de Guatemala, 2003. 16 p.
10. HERNÁNDEZ JIMÉNEZ, Mario. *Aplicación de responsabilidad social corporativa (RSC) en sistemas de energía rural en zonas aisladas – Guatemala*. Organización Latinoamericana de Energía, 2013. 124 p.
11. Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar (IARNA-URL), 2012. *Perfil Ambiental de Guatemala 2010 – 2012*. Vulnerabilidad local y creciente construcción de riesgo. 440 p.
12. Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA), Universidad de la República – Uruguay, 2004. *Bombas Volumétricas*. 18p.
13. KENNETH J. *Bombas; selección, uso y mantenimiento*. McGraw Hill 1998. 373p.

14. Latham International. *La bomba de pistón hidráulico, Bombas resistentes para alimentación de filtros, prensas y aplicaciones de transferencias*. 7p.
15. LETINI, Emilio. *Servicios de agua potable y saneamiento en Guatemala: beneficios potenciales y determinantes de éxito*. CEPAL, 2010. 95 p.
16. McCULLAGH, James C, II. Wilson, David Gordon. *Pedal-powered mechanisms*. Rodale Press, Inc. 1977. 133 p.
17. PINEDA, Xavier. *Diseño y construcción de una bomba de pistón alternativa sumergible para el molino Multipala Americano del A.A.R.N.R. de la U.N.L.* Tesis de graduación Ingeniero Electromecánico, Universidad Nacional de Loja. Ecuador 2005. 107 p.
18. POLO CASTAÑO, Christian. *Diseño y construcción de una bomba manual de émbolo para cisternas de aguas pluviales y pozos someros*. Proyecto de graduación, Ingeniero en Diseño Industrial, Universidad Politécnica de Madrid, febrero 2014. 121 p.
19. ROJAS NAVARRETE, Manuel. *Centroamérica: estadísticas de producción del subsector eléctrico, 2014*. Unidad de Energía y Recursos Naturales, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) sede México, 2015. 56 p.
20. WEIR Alex. *The dynapod: A pedal power unit*. Volunteers in Technical Assistance, 1980. 60p.

