

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



TESIS

**"EVALUACIÓN DE LOS SISTEMAS DE BOMBEO DEL
ACUEDUCTO RÍO COLORADO TIJUANA"**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:

MARGARITA GIL SAMANIEGO RAMOS

DIRECTOR:

DR. HÉCTOR ENRIQUE CAMPBELL RAMÍREZ

MEXICALI BAJA CALIFORNIA

ENERO DE 2013

Agradecimientos.

A mi esposo Eduardo y a mis hijas Margarita, Gabriela y Mariana, por su amor y apoyo incondicional.

A mis padres, por creer en mí.

A mi director de tesis, por su paciencia y generosidad al enseñarme y dedicar largas horas en revisiones, explicaciones y sugerencias.

A mi universidad, la UABC, por darme la oportunidad de desarrollarme.

Contenido

ÍNDICE DE TABLAS.....	6
ÍNDICE DE FIGURAS.....	9
RESUMEN.....	13
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	17
1.1 Justificación.....	18
1.2 Identificación y definición del problema.....	22
1.3 Hipótesis.....	23
1.4 Objetivos.....	23
Objetivo general	23
Alcance del objetivo.....	24
Objetivos específicos.....	24
1.5 Metodología	24
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	25
2.1 Bombas, sistemas de bombeo y acueductos	26
Bombas.....	26
Sistemas de bombeo.....	27
Acueductos	47
2.2 Operación eficiente y ahorro de energía en sistemas de bombeo.....	51
2.3 Indicadores de sustentabilidad para sistemas de suministro de agua.	56
2.4 Cambio climático y su impacto en la salud.....	60
CAPÍTULO 3. DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO.....	64

3.1 Panorama general	65
3.2 Situación actual del agua en el estado de Baja California.....	69
3.3 Descripción del caso de estudio.....	71
Alcance, restricciones y supuestos.....	71
Sistema de distribución de agua del área bajo estudio.	72
3.4 Historia del Acueducto Río Colorado – Tijuana.....	75
3.5 Descripción del ARCT.....	78
3.6 Situación actual del ARCT	81
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE BOMBEO.....	85
4.1 Evaluación de sistemas de bombeo	86
4.2 Factores de emisión de contaminantes a la atmósfera en el Estado de Baja California	91
4.3 Indicadores de Sustentabilidad del Acueducto Río Colorado-Tijuana	92
CAPÍTULO 5. RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA AL CASO DE ESTUDIO.....	98
5.1 Evaluación del consumo de energía de los sistemas de bombeo del acueducto Río Colorado–Tijuana.....	99
5.2 Ahorros potenciales de energía en el Acueducto Río Colorado – Tijuana.....	102
5.3 Evaluación de las emisiones por consumo de energía en los sistemas de bombeo del Acueducto Río Colorado – Tijuana.....	105
5.4 Indicadores de sustentabilidad del sistema de suministro de agua del Acueducto Río Colorado-Tijuana.....	108

Indicadores sociales.....	108
Indicadores de energía.....	114
Indicadores económicos.....	115
Indicadores ambientales.....	118
Indicadores de desempeño del ARCT	123
5.5 Escenarios.....	130
Escenario 1: Inercial.....	132
Escenario 2: Optimización de la administración y operación del Acueducto Río Colorado – Tijuana.	133
Análisis de los escenarios.....	143
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	148
UNIDADES Y FACTORES DE CONVERSIÓN.....	163
ABREVIATURAS Y SIGLAS	166
REFERENCIAS	168
ANEXOS	173

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
3.1. Grado de presión hídrica.....	66
3.2. Balance de agua en Baja California.....	70
3.3. Usos del agua en Baja California.....	71
3.4 Dotaciones de diseño por municipio.....	71
3.5 Usos urbanos del agua según la fuente, por municipio.....	74
3.6. Consumo de energía del sistema de agua de Baja California.....	75
3.7. Gastos históricos del ARCT.....	78
3.8 Potencia instalada en las plantas de bombeo del ARCT	80
3.9. Datos de operación del ARCT.....	81
3.10. Relación entre los costos fijos de suministro de agua y el costo por energía.....	82
3.11. Datos de operación mensual del ARCT en el año 2011.....	82
3.12 Indicadores energéticos de la operación del ARCT.....	83
4.1. Factores de emisión de contaminantes por tipo de combustible.....	92
4.2. Factores de emisión por generación de electricidad en Baja California, México.....	92
4.3. Indicadores sociales, económicos y ambientales de agua– energía del sistema de suministro de agua.....	93

4.4. Indicadores de energéticos, económicos y ambientales relacionados con el desempeño del ARCT	96
5.1. Datos de diseño y operación de la planta de bombeo PB-0.....	99
5.2. Datos de diseño y operación de las plantas de bombeo PB-1, PB-2 y PB-3.....	100
5.3. Datos de diseño y operación de las plantas de bombeo PB-4 y PB-5.....	101
5.4. Resultados del PSAT para la planta de bombeo PB-0.....	103
5.5. Resultados del PSAT para la planta de bombeo PB-1.....	103
5.6. Resultados del PSAT para la planta de bombeo PB-5.....	104
5.7. Ahorros potenciales anuales en las plantas de bombeo del ARCT	105
5.8. Emisiones per cápita debidas a la generación eléctrica.....	107
5.9. Tarifas de agua potable en Tijuana, B.C.....	113
5.10 Valores de referencia (Datos de 2011).....	131
5.11. Datos históricos y proyecciones de energía, costos y emisiones por la operación del ARCT	131
5.12. Ahorros potenciales anuales (2025).....	133
5.13 Volúmenes, gastos y datos de energía del ARCT para una dotación de 220 l/hab/día.....	135
5.14. Volúmenes, gastos y datos de energía del ARCT para una dotación de 200 l/hab/día.....	135
5.15. Volúmenes, gastos y datos de energía del ARCT para una dotación de 150 l/hab/día.....	136
5.16. Volúmenes, gastos y datos de energía del ARCT para una dotación de 120 l/hab/día.....	137

5.17a. Gastos del ARCT y de la bomba para una dotación de: 220 l/hab/día.....	139
5.17b. Datos de energía y emisiones del ARCT una dotación: 220 l/hab/día y las bombas operando en el rango de máxima eficiencia.....	139
5.18a. Gastos del ARCT y de la bomba para una dotación: 200 l/hab/día	140
5.18b. Datos de energía y emisiones del ARCT una dotación: 200 l/hab/día y las bombas operando en el rango de máxima eficiencia.....	140
5.19a. Gastos del ARCT y de la bomba para una dotación: 150 l/hab/día	141
5.19b. Datos de energía y emisiones del ARCT una dotación: 150 l/hab/día y las bombas operando en el rango de máxima eficiencia.....	141
5.20a. Gastos del ARCT y de la bomba para una dotación: 120 l/hab/día	142
5.20b. Datos de energía y emisiones del ARCT una dotación: 120 l/hab/día y las bombas operando en el rango de máxima eficiencia.....	142
5.21. Datos de energía y emisiones del ARCT para una dotación de 220l/hab/día y con bombas y motores óptimos	142
5.22. Datos de energía y emisiones del ARCT para una dotación: 200 l/hab/día y con bombas y motores óptimos	143
5.23. Datos de energía y emisiones del ARCT una dotación: 150 l/hab/día y las con bombas y motores óptimos	143
5.24. Datos de energía y emisiones del ARCT una dotación: 120l/hab/día y las con bombas y motores óptimos	143

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
2.1 Límites de un sistema de bombeo.....	27
2.2 Sistema de bombeo con ramales en la succión y en la descarga.....	28
2.3 Sistema de bombeo en serie y en paralelo.....	28
2.4 Curva característica de operación de una bomba sumergible marca Fairbanks Morse.....	36
2.5 Punto de operación de la bomba.....	43
2.6 Dos bombas operando en serie.....	44
2.7 Dos bombas operando en paralelo.....	46
2.8 Impactos por enfermedades atribuidas al cambio climático en países de ingresos bajos y medios de diferentes regiones del mundo.....	63
3.1 Grado de presión hídrica en el mundo.....	67
3.2 Consumo medio de agua por persona por día, en litros (1998- 2002).....	68
3.3 Precipitación media mensual en el estado de Baja California..	69
3.4 Sistema de suministro de agua para el área bajo estudio.	73
3.5 Evolución histórica del suministro de agua del ARCT	77

3.6. Desarrollo del acueducto Río Colorado-Tijuana	79
3.7 Indicadores energéticos de la operación del ARCT	84
4.1. Pantalla del paquete de cómputo PSAT con datos de la PB-0	87
5.1. Emisiones debidas a la operación del ARCT por usuario.....	106
5.2 Emisiones debidas a la operación del ARCT	107
5.3. Consumo de agua por persona en litros por persona por día en la zona costa de Baja California.....	110
5.4. Consumo de agua por persona en litros por persona por día en el municipio de Mexicali, Baja California.....	111
5.5. Cobertura en el servicio de agua potable en la zona costa del Estado de Baja California.....	112
5.6. Consumo de energía por unidad de volumen bombeado por el ARCT.....	114
5.7. Energía utilizada en el ARCT al año por persona servida.....	115
5.8. Costo de la energía eléctrica por unidad de volumen bombeado por el ARCT.....	116
5.9. Costo de la energía eléctrica por kWh utilizada para bombeo por el ARCT.....	117
5.10. Costo de la energía eléctrica para conducción de agua por	118

persona

5.11 Emisiones totales de CO ₂ asociadas al consumo de energía del ARCT.....	119
5.12 Emisiones de CO ₂ por m ³ de agua suministrada por el ARCT.....	120
5.13 Emisiones de NOx por m ³ de agua suministrada por el ARCT.....	120
5.14 Emisiones de SO ₂ asociadas al consumo de energía del ARCT.....	121
5.15 Emisiones de CO ₂ por persona servida relacionadas al servicio de agua.....	121
5.16 Emisiones de NOx por persona servida relacionadas al servicio de agua.....	122
5.17 Emisiones de SO ₂ por persona relacionadas con el servicio de agua.....	122
5.18 Eficiencia promedio de una bomba de la PB-5 comparada con la eficiencia óptima.....	124
5.19 Eficiencia promedio del motor de una bomba de la PB-5 comparada con la eficiencia óptima.....	125
5.20 Potencia en la flecha de una bomba de la PB-5 comparada con la	127

potencia óptima.....	
5.21 Ahorros potenciales anuales de energía de una bomba de la PB-5.	127
5.22 Ahorros monetarios potenciales anuales de una bomba de la PB-5	127
5. 23 Porcentaje de optimización de una bomba de la PB-5.....	128
5.24 Emisiones de CO ₂ potencialmente evitadas al año.....	129
5.25 Emisiones de NO _x potencialmente evitadas al año.....	129
5.26 Emisiones de SO ₂ potencialmente evitadas al año.....	130
5.27 Ampliación de la CCO de la Bomba United Centrifugal Pump 20x26 BF2 2 stg instalada en PB-5.	138
5.28 Comparación de las metas propuestas en los escenarios para una dotación de 220 l/hab/día	144
5.29 Comparación de las metas propuestas en los escenarios para una dotación de 200 l/hab/día	146
5.30 Comparación de las metas propuestas en los escenarios para una dotación de 150 l/hab/día	146
5.31 Comparación de las metas propuestas en los escenarios para una dotación de 150 l/hab/día	147

RESUMEN

La calidad de vida de la población y sus actividades de desarrollo dependen en gran medida de la disponibilidad, cantidad y calidad del agua. La escasez de agua en muchas regiones del mundo representa grandes retos para mejorar la eficiencia y buen uso de ésta.

El Estado de Baja California se localiza al noroeste de México en una extensa zona árida y semiárida y las incidencias de precipitación pluvial son bajas; por lo tanto, su disponibilidad de agua también es escasa. El gobierno ha hecho esfuerzos por asegurar el abasto de agua a sus centros de población. Existe el compromiso de lograr el aprovechamiento y uso racional de los recursos hídricos disponibles en el estado, a fin de asegurar el abasto de agua a la población actual y a las futuras generaciones, logrando así un desarrollo sustentable.

Las ciudades de Tecate, Tijuana y Playas de Rosarito, ubicadas en la zona costa del estado, dependen en un 80% del transporte de agua a través del Acueducto Río Colorado-Tijuana (ARCT) para su abastecimiento. Esta gran obra de infraestructura hidráulica se compone de 6 plantas de bombeo que elevan 5.33 m^3 de agua 1,060 m a lo largo de 123 km de tuberías, canales y túneles. La potencia total instalada es de 132,500 HP.

En este trabajo se propuso una metodología que integra un conjunto de indicadores para evaluar los sistemas de bombeo en el suministro de agua con un enfoque de sostenibilidad, desde el punto de vista de la empresa que proporciona el servicio. El propósito es proporcionar una herramienta práctica para ayudar a los administradores del agua en la toma de decisiones, priorizando el enfoque mencionado. Para ello se seleccionaron y describieron

una serie de indicadores que permiten cuantificar los aspectos sociales, energéticos, económicos y ambientales en el sistema objeto del estudio, el ARCT, del cual se evalúa su comportamiento en el período 2007-2011 y se proponen escenarios al 2025. El objetivo de referencia es aplicar estos indicadores para encontrar la tendencia del uso de la energía para el transporte de agua en Baja California, así como proponer acciones para inducir la tendencia en la dirección del desarrollo sostenible.

Se comprobó que el Acueducto Río Colorado-Tijuana es un gran consumidor de energía eléctrica (3.7% del total de la energía generada en el estado en 2009) y los impactos en el desarrollo sustentable del mismo son significativos.

En 2010, se bombearon 80.7 millones de metros cúbicos para lo que se utilizaron 323 GWh a un costo anual de \$309 millones de pesos. Se hizo un análisis de los ahorros potenciales en costos de operación y en emisiones si el acueducto contara con el equipo y la operación óptimos y se encontró que en un año se pudieran dejar de consumir 36 GWh, lo que representaría un ahorro de \$34'528,750 pesos. En cuanto a las emisiones que se evitarían se obtuvieron los siguientes resultados: 9,656 toneladas de CO₂, 6 toneladas de SO₂ y 17 toneladas de NOx relacionadas con el ahorro energético en la operación del ARCT.

Gestionar el ahorro y uso eficiente de energía en instalaciones hidráulicas es una prioridad a nivel mundial para poder contar con una gestión racional del agua, y en consecuencia un desarrollo nacional y regional sustentable.

Se deben aplicar metodologías como la presentada en este estudio, que mejoren los indicadores de ahorro de energía y que al mismo tiempo satisfagan

los criterios de operación para una mejor administración y desempeño de los sistemas de suministro de agua.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.

1.1 Justificación.

El uso eficiente del agua y la energía son desafíos importantes para el desarrollo sustentable de la población cada vez mayor en las comunidades de todo el mundo, y se vuelve crítica en las zonas áridas y semiáridas, donde el agua y la energía son los recursos más escasos. Además, la baja eficiencia global de la infraestructura hidráulica asociada a los altos costos de operación y mantenimiento, así como los impactos ambientales son un problema recurrente, que afecta a la calidad de vida. El aumento de la capacidad de los sistemas de suministro de agua en estas zonas críticas es costoso debido en parte a las transferencias de agua dulce desde largas distancias. En consecuencia, la conservación y el uso óptimo del agua deben ser las primeras acciones estratégicas para alcanzar el objetivo de una gestión sustentable del suministro de agua.

La problemática en relación a la demanda del recurso agua, está vinculada estrechamente con el crecimiento de la población y su distribución espacial. México cuenta con una población de 116.9 millones de personas y se estima que para el año 2025 ésta sea de 128.5 millones (CONAPO 2012). A raíz del incremento en los flujos migratorios de la población del campo a la ciudad, en el 2010 el 77.8% de la población se concentraba en las zonas urbanas. (INEGI 2012).

Dicha concentración excesiva de la población y sus demandas de servicios, producen desequilibrios regionales por la necesidad de transferir recursos de una zona a otra como el agua, alimentos, energía, etc. La falta de un adecuado ordenamiento territorial, origina que la situación de la población con relación al

agua se vuelva cada día más vulnerable, principalmente por el agotamiento de las fuentes actuales, acuíferos sobre explotados, conflictos por la escasez y contaminación del agua, baja eficiencia global de sistemas hidráulicos, baja recaudación por concepto de servicios, menos disponibilidad de agua, mayores costos de operación y mantenimiento, requerimientos importantes de inversión y escasez de recursos financieros que llevan a grandes pasivos en los organismos operadores. Lo anterior indica que de no adoptarse medidas urgentes a corto plazo del manejo responsable del agua, los problemas actuales de suministro se tornarán críticos.

El ahorro y uso eficiente de la energía en las instalaciones existentes de los sistemas hidráulicos del país son acciones prioritarias a llevar a cabo para lograr un manejo sustentable del agua, de la energía y por ende del desarrollo nacional y regional (CNA, 2007).

En México, el Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012 asume como premisa básica la búsqueda del Desarrollo Humano Sustentable, es decir, que todos los mexicanos tengamos una vida digna sin comprometer el patrimonio de las generaciones futuras. En este contexto, el adecuado manejo y preservación del agua cobra un papel fundamental, dada su importancia en el bienestar social, el desarrollo económico y la preservación de la riqueza ecológica de nuestro país. (CEA, 2008).

Otro plan estratégico es el Programa Nacional Hídrico, el cual plantea ocho objetivos rectores del sector hidráulico en México:

1. Mejorar la productividad del agua en el Sector Agrícola.

2. Incrementar el acceso y calidad de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento.
3. Promover el manejo integrado y sustentable del agua en cuencas y acuíferos.
4. Mejorar el desarrollo técnico, administrativo y financiero del Sector Hídrico.
5. Consolidar la participación de usuarios y sociedad organizada en el manejo del agua y promover la cultura de su buen uso.
6. Prevenir los riesgos derivados de fenómenos meteorológicos e hidrometeorológicos y atender sus efectos.
7. Evaluar los efectos del cambio climático en el ciclo hidrológico.
8. Crear una cultura contributiva y de cumplimiento a la Ley de Aguas Nacionales en materia administrativa.

El Estado de Baja California se localiza al noroeste de México en una extensa zona árida y semiárida y las incidencias de precipitación pluvial son bajas; por lo tanto, su disponibilidad de agua también es escasa. El gobierno ha hecho esfuerzos por asegurar el abasto de agua a sus centros de población. Existe el gran reto y compromiso de lograr el aprovechamiento y uso racional de los recursos hídricos disponibles en el Estado, a fin de asegurar el abasto de agua a la población actual y a las futuras generaciones, logrando así un desarrollo sustentable.

En este contexto, el Plan Estatal Hídrico tiene como objetivo general aumentar la disponibilidad, cobertura y calidad de los servicios básicos que permitan el desarrollo planificado de los centros de población, en un marco de armonía y

sustentabilidad con el medio ambiente, promoviendo objetivos estratégicos para el mejoramiento y diversificación de los sistemas de captación, conducción, potabilización y distribución del agua potable, así como de los sistemas de alcantarillado sanitario y tratamiento de aguas residuales.

El Programa Nacional Hídrico asigna a las universidades e institutos de investigación tareas específicas para lograr los objetivos del mismo. Colegios de profesionales, institutos de investigación, universidades e instituciones de enseñanza superior, asociaciones, cámaras industriales y de comercio son mencionadas para llevar a cabo estrategias y acciones para el uso eficiente del agua y para el cumplimiento de las normas relacionadas con el agua y desarrollar estudios e investigaciones sobre el agua que permitan tener un mejor conocimiento sobre la situación del recurso en diferentes cuencas y acuíferos; plantear y evaluar diferentes alternativas para lograr un mejor manejo y preservación del agua.

El Río Colorado es la fuente de vida para el suroeste de Estados Unidos y el noroeste de México. La cuenca transfronteriza del Colorado abarca un área de más de 630,000 km² en la que habitan más de 30 millones de personas en ambos países. Desde su nacimiento en las montañas Rocallosas en Estados Unidos, el río recorre más de 2,300 km en dirección suroeste por los estados de Wyoming y Colorado hacia Utah, Nevada, Arizona y California. Los últimos 140 km del cauce se encuentran al sur de la frontera internacional México-Estados Unidos, entre los estados de Baja California y Sonora.

Durante los últimos 100 años se han hecho esfuerzos para controlar, almacenar y derivar los flujos del Colorado. Veinticinco presas principales y cientos de

proyectos de derivación se han construido en el cauce principal y en los tributarios. La presencia y magnitud de esta infraestructura ha protegido en varias ocasiones a los usuarios del agua en la cuenca contra los impactos de sequías periódicas. Estos proyectos también permitieron la creación de extensos distritos de riego como el del Valle Imperial en California y el Distrito 014 en el Valle de Mexicali en Baja California, así como el desarrollo de grandes centros urbanos en el Suroeste de Estados Unidos y el Noroeste de México, incluyendo a Phoenix, San Diego, Tijuana, Tecate y Mexicali.

1.2 Identificación y definición del problema.

El crecimiento de la región ha causado un impacto en la disponibilidad del agua: actualmente, los usos totales del agua del Río Colorado son mayores que la producción promedio anual de agua en la cuenca, y aun así, las demandas de agua en la región seguirán en aumento, a la par con el crecimiento poblacional. En este contexto, es importante enfatizar que se debe prevenir una crisis de agua, con lo cual se evitaría un conflicto entre países, entre usuarios y entre manejadores de agua, y se podrían minimizar el impacto a las economías y al ambiente en la región (Pitt, Hinojosa y Carrillo, 2012). Por otro lado, el cambio climático debido a las emisiones a la atmósfera de gases de efecto invernadero tienen efectos negativos en la salud de las personas, y por lo tanto impactan directamente en la calidad de vida de la sociedad en su conjunto.

Una de las zonas fronterizas más vulnerables en el caso de México es la compuesta por las ciudades de Tecate, Tijuana y Playas de Rosarito, ubicadas en la frontera cercana a la costa del Pacífico del estado de Baja California, pues

dependen en un 80% del transporte de agua a través del Acueducto Río Colorado-Tijuana (ARCT) para su abastecimiento, ya que no cuentan con fuentes de agua cercanas y confiables. Este acueducto, uno de los más grandes del país, se compone de 6 plantas de bombeo que elevan 5.33 m^3 de agua $1,060 \text{ m}$ a lo largo de 147 km de tuberías, canales y túneles. La potencia total instalada es de $132,500 \text{ hp}$. El problema identificado es su alto consumo de energía eléctrica, el cual trae consigo altos costos de operación y emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la generación de electricidad, lo que como se dijo anteriormente, impacta la calidad de vida y el desarrollo sustentable de esta región transfronteriza.

1.3 Hipótesis

La metodología propuesta de análisis y evaluación de sistemas de bombeo será capaz de detectar y cuantificar oportunidades de mejora en el rendimiento técnico, económico y ambiental de sistemas de bombeo para transporte de agua.

1.4 Objetivos.

Objetivo general.

Integrar y adaptar metodologías existentes para analizar y evaluar el comportamiento hidráulico, energético y ambiental de equipos de bombeo de agua con capacidades entre 1.3 a $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$, con cargas entre 50 y 335 m.c.a. , potencias entre 1500 y 8000 hp , operando en tuberías con diámetros entre 1.22 y 1.83 m y longitudes mayores a $147,000 \text{ m}$.

Alcance del objetivo.

Desarrollar una herramienta de análisis para entender mejor el comportamiento de los sistemas de bombeo en cuanto a su eficiencia, consumo energético y emisiones al ambiente, con el fin de optimizar su funcionamiento. Este estudio ayudará a los organismos operadores a administrar mejor los recursos agua y energía, minimizando así los impactos en la sustentabilidad anteriormente descritos y gestionar eficientemente los sistemas de suministro de agua.

Objetivos específicos.

1. Evaluar las metodologías existentes a integrar.
2. Seleccionar las herramientas de análisis que mejor se adapten a resolver la problemática.
3. Definir el procedimiento a seguir para el análisis y evaluación.
4. Aplicar la metodología de análisis y evaluación de sistemas de bombeo en el caso de estudio del Acueducto Río Colorado-Tijuana.

1.5 Metodología

La metodología utilizada para la realización de este estudio consistió de las siguientes etapas:

1. Revisión de las metodologías existentes.
2. Selección de las metodologías a integrar.
3. Concepción de la metodología de análisis y evaluación propuesta.
4. Aplicación de la metodología a un caso real.
5. Obtención de resultados y conclusiones finales.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.

2.1 Bombas, sistemas de bombeo y acueductos.

Bombas.

Las bombas son dispositivos que transforman la energía mecánica con la que son accionadas en energía hidráulica de un fluido incompresible impulsándolo. El fluido incompresible puede ser líquido o una mezcla de líquidos y sólidos. Al incrementar la energía del fluido, se aumenta su presión, su velocidad o su altura, todas ellas relacionadas según el principio de Bernoulli. En general, una bomba se utiliza para incrementar la presión de un líquido añadiendo energía al sistema hidráulico, para mover el fluido de una zona de menor presión o altitud a otra de mayor presión o altitud, por lo que sus dos propósitos principales son: transferir un líquido de un lugar a otro o circular un líquido alrededor de un sistema.

Tipos de Bombas.

Existen bombas de una gran variedad de tamaños y tipos para un amplio rango de aplicaciones y se pueden clasificar, de acuerdo a su principio básico de operación, como dinámicas o de desplazamiento positivo. Las bombas dinámicas se subdividen en centrífugas y de efectos especiales. Las bombas de desplazamiento positivo se pueden sub-clasificar en reciprocantes y rotatorias.

Las bombas centrífugas son generalmente las más utilizadas por ser las más económicas, de diseño sencillo y requieren menos mantenimiento que las de desplazamiento positivo, por lo que a nivel mundial son los dispositivos que consumen el mayor porcentaje energía eléctrica. Éstas basan su funcionamiento en el aprovechamiento de la fuerza centrífuga de un impulsor

que gira a cierta velocidad dentro de una carcasa y que en su movimiento impulsa al fluido en contacto con él hacia la periferia del mismo con una energía de velocidad. La energía de velocidad del fluido se convierte en presión por medio de una voluta interna o mediante un juego de álabes estacionarios llamados difusores que rodean la periferia del impulsor. Sus componentes básicos, entonces, son: un elemento giratorio, incluyendo un impulsor y una flecha y un elemento estacionario compuesto por una cubierta o carcasa, estoperos y chumaceras.

Sistemas de bombeo.

La tubería, accesorios y equipo a través de los cuales fluye el líquido hacia y desde la bomba constituyen el sistema de bombeo. Sólo la longitud de la tubería que contiene el líquido controlado por la acción de la bomba se considera parte del sistema. Una bomba y los límites de su sistema se muestran en la Figura 2.1.



Fig. 2.1 Límites de un sistema de bombeo.

Las tuberías de succión y descarga de la bomba pueden consistir en ramales, como se muestra en la Figura 2.2.

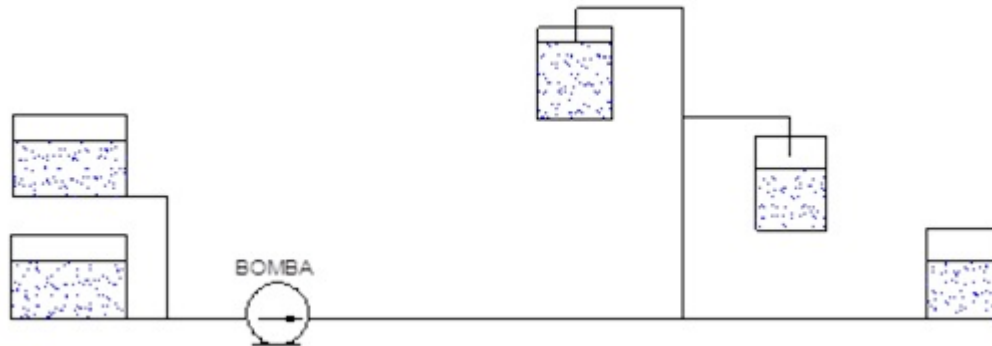


Fig. 2.2 Sistema de bombeo con ramales en la succión y en la descarga.

También puede haber más de una bomba en un sistema de bombeo, unidas por tuberías en serie, en paralelo o en ambas, como se muestra en la Figura 2.3. Cuando existe más de una bomba, el flujo a través del sistema está determinado por el comportamiento de todas las bombas.

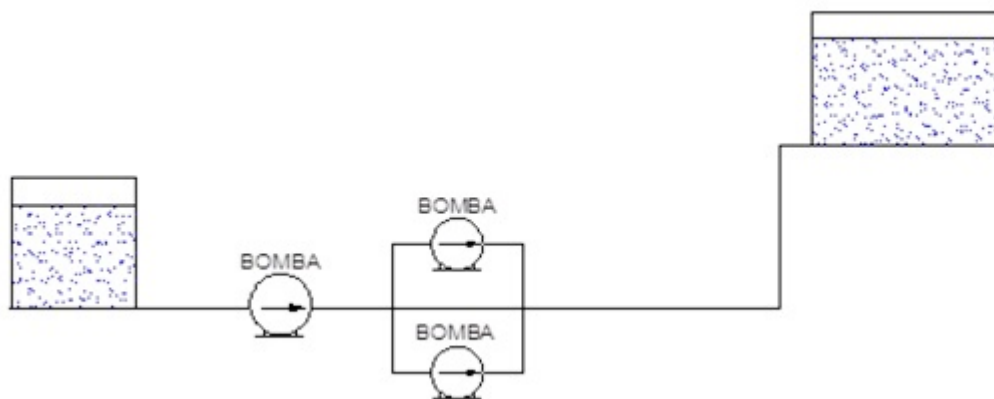


Fig. 2.3 Sistema de bombeo en serie y en paralelo.

El sistema a través del cual el líquido es bombeado ofrece resistencia al flujo por diferentes razones. El flujo a través de tuberías está obstaculizado por la fricción. Si el líquido descarga a una elevación o presión más altas, se

encuentra con resistencias adicionales. La bomba debe, entonces, vencer la resistencia total del sistema debido a la fricción y producir un incremento en la elevación o presión a la tasa de flujo o gasto deseado.

El trabajo hecho por una bomba es la diferencia entre el nivel de energía en el punto donde el líquido sale de la bomba y el nivel de energía en el punto donde el líquido entra a la bomba. También es la cantidad de energía agregada al líquido en el sistema. La energía total en cualquier punto del sistema de bombeo es un término relativo y se mide en relación a algún plano arbitrario de referencia. (Karassik 2001).

El análisis del flujo de fluidos en conductos cerrados dependen de tres principios fundamentales: La conservación de (1) la masa, (2) energía y (3) momentum.

Ecuación de continuidad para la masa.

$$\rho_1 Q_1 = \rho_2 Q_2 \quad (1)$$

donde ρ es densidad y Q es el gasto. Pero Q es igual a la velocidad promedio por el área transversal, y para un fluido incompresible tenemos que $\rho_1 = \rho_2$, por lo que

$$Q = A_1 V_1 = A_2 V_2 = \text{constante} \quad (2)$$

Ecuación de la energía.

La energía por unidad de masa en el agua que fluye por una tubería, E , expresada en kg·m/kg está dada por:

$$E = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

Donde:

Z = Carga por elevación (energía potencial), medida sobre un punto de referencia, (usualmente el ojo del impulsor de la bomba) y expresada en metros.

P/γ = Carga por presión (también se considera energías potencial). Para poner esta cantidad en las mismas unidades que z (elevación), la presión (p) se divide entre el peso específico (γ) y se expresa en metros; la carga por presión puede considerarse como la altura a la que el fluido se elevaría en un piezómetro (un tubo abierto).

$v^2/2g$ = Carga por velocidad (energía cinética). En pies o metros, donde v es la velocidad en m/s y g la aceleración de la gravedad (9.81 m/s^2).

La energía del agua que fluye entre dos puntos en un conducto cerrado se deriva de la ecuación anterior y se convierte en la ecuación de Bernoulli:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + h_f + \sum h_{accs} \quad (4)$$

donde h_f es la energía por unidad de masa disipada por la fricción entre los puntos 1 y 2, y $\sum h_{accs}$ es la sumatoria de las pérdidas de energía debidas a la turbulencia en los accesorios de la tubería.

Ecuación de Momentum.

La fuerza que actúa sobre una masa la acelera de acuerdo a la tercera ley de Newton del movimiento:

$$\mathbf{F} = \frac{d(m\mathbf{v})}{dt} \quad (5)$$

donde F es la fuerza, m es la masa, v es velocidad y t es tiempo. F y v son vectores, y F puede ser considerada la resultante (la suma vectorial) de todas las fuerzas. Si la masa permanece constante, entonces,

$$\mathbf{F} = m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = m\mathbf{a} \quad (6)$$

donde dv/dt es la aceleración en la dirección de F . En el flujo de agua, es conveniente reordenar la ecuación anterior como:

$$F = m \frac{dv}{dt} = \rho Q \Delta v = \rho Q (v_2 - v_1) \quad (7)$$

donde F es la suma de todas la fuerzas que actúan, ρ es la densidad y Q es el flujo másico (gasto).

Pérdidas por fricción en tuberías.

La primera fórmula para el flujo de fluidos dada a conocer fue propuesta por Chezy. Su coeficiente de fricción está dado por una complicada ecuación desarrollada por Kutter. Estas fórmulas no están en uso actualmente.

La fórmula de Hazen- Williams (H-W) se ha usado en Estados Unidos por más de 90 años. Esta es una fórmula irracional y sólo es válida para agua a temperatura ambiente o cercana a ella, a velocidades convencionales, el régimen de flujo debe ser turbulento y el factor C varía con el diámetro de la tubería. Estas desventajas muy frecuentemente son ignoradas y si no se toman en cuenta por lo que los errores pueden ser muy grandes.

La fórmula de Manning es algo similar a la de H-W y está sujeta a las mismas limitaciones. Se ha utilizado ampliamente para flujo de fluidos en canales, y para tuberías parcialmente llenas.

La fórmula de Colebrook-White es más exacta que la de H-W y es aplicable a un gran rango de flujos, diámetros de tubería y temperatura. Es ampliamente usada en el Reino Unido y Europa.

La ecuación de Darcy-Weisbach es la única fórmula racional, y es aplicable a flujo laminar, turbulento o en transición, es para todos los tamaños de tubería y para cualquier fluido Newtoniano incompresible, a cualquier temperatura.

Ecuación de Darcy – Weisbach.

La ecuación de Darcy – Weisbach para tuberías circulares es:

$$h = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (8)$$

donde h es la pérdida por fricción en metros (pies), f es el coeficiente de fricción (adimensional), L es la longitud de la tubería, en metros (pies), D es el diámetro interior de la tubería en metros (pies), v es la velocidad en m/s y g es la aceleración de la gravedad, 9.81 m/s².

Las ventajas de la ecuación de Darcy – Weisbach son :

- Está basada en fundamentos teóricos, no sólo empíricos.
- Es dimensionalmente consistente.
- Es útil para cualquier fluido (aceite, gas, salmuera y lodos).
- Puede ser derivada analíticamente en la región de flujo laminar.
- Es útil en la región de transición entre el flujo laminar y turbulento.
- El factor de fricción está bien documentado.

El coeficiente f depende no sólo de la rugosidad de la tubería, sino del número de Reynolds, una variable que se expresa como

$$Re = \frac{vD}{\nu} \quad (9)$$

donde Re es el número de Reynolds (adimensional), v es la velocidad en m/s, D es el diámetro interior de la tubería en metros y ν es la viscosidad cinemática en m^2/s .

Determinación de f .

En la región de flujo laminar, donde Re es menor que 2000, f es igual a $64/Re$ y es independiente de la rugosidad. Cuando los números de Reynolds están entre 2000 y 4000, el flujo es inestable y puede fluctuar entre flujo laminar y turbulento, de tal forma que f es más bien indeterminado. Cuando Re es muy grande (mayor que 10^5), el flujo es completamente turbulento y f depende sólo de la rugosidad. En la zona de transición entre flujo laminar y turbulento, tanto la rugosidad como Re afectan f , el cual puede ser calculado mediante una expresión semi-analítica desarrollada por Colebrook:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (10)$$

donde ε es la rugosidad absoluta en metros (pies) y D es el diámetro interior de la tubería en m, de tal forma que ε/D es adimensional. El diagrama de Moody, fue desarrollado a partir de esta ecuación.

Una ecuación empírica y explícita para f fue desarrollada por Swamee y Jain:

$$f = \frac{0.25}{\left[\log_{10} \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (11)$$

El valor de f calculado con esta ecuación difiere de la calculada a partir de la ecuación de Colebrook en menos del 1%.

Esta ecuación es la que se usa en el presente trabajo.

Pérdidas de energía en accesorios.

Los sistemas de bombeo pueden contener demasiadas transiciones en la tubería (vueltas, contracciones) y obstrucciones (válvulas, medidores), y las pérdidas de energía debidas a la turbulencia creada en ellas es casi siempre mayor que la fricción en la tubería. El enfoque más simple para calcular las pérdidas en los accesorios es expresarlas en términos de la carga por velocidad, y su ecuación es:

$$h_{accs} = K \frac{v^2}{2g} \quad (12)$$

donde K es el coeficiente de pérdida para cada accesorio, el cual solamente es una aproximación, y diferentes publicaciones de estos coeficientes difieren entre sí hasta en un 25%.

Otro método para calcular las pérdidas en accesorios es usar una "longitud equivalente" de tubería recta. Este método es menos exacto.

Cálculo de la energía requerida por la bomba.

Cuando en el sistema existe una bomba que agrega energía a éste, la ecuación de Bernoulli es:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + H = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + h_f + \sum h_{accs} \quad (13)$$

donde H es la energía proporcionada por la bomba, en metros.

Despejando H y reacomodando términos, tenemos la expresión de la energía requerida por la bomba, también llamada carga dinámica total:

$$H = (z_2 - z_1) + \left(\frac{p_2 - p_1}{\gamma} \right) + \left(\frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} \right) + h_f + \sum h_{f_{accs}} \quad (14)$$

donde los subíndices 1 y 2 corresponden a los puntos inicial y final del sistema.

Potencia.

La potencia entregada por la bomba al fluido, en unidades del Sistema Internacional, está dada por:

$$P = \gamma QH = \frac{qH}{102} \quad (15)$$

donde P es la potencia de la bomba en kilowatts, γ es el peso específico del fluido en kN/m³, Q es el gasto en m³/s, H es la carga dinámica total en metros, q es el gasto en l/s y 102 es un factor de conversión para agua entre 15 y 20°C.

Curvas de las bombas y del sistema de bombeo.

En la operación de las bombas, la energía entregada al fluido bombeado por unidad de peso es H y se denomina carga dinámica total con unidades m.c.a. Esta carga H es función del gasto Q que se bombea y de la velocidad angular N del impulsor del equipo.

La operación estacionaria de una bomba puede ser descrita a partir de las curvas de carga dinámica total H, eficiencia η y carga neta positiva de succión (NPSH por sus siglas en inglés (CNA 1997)).

Curvas Características de Operación.

El comportamiento hidráulico de una bomba viene especificado en sus curvas características que representan una relación entre los distintos valores del

caudal proporcionado por la misma con otros parámetros como la altura manométrica, el rendimiento hidráulico, la potencia requerida y la carga neta positiva de succión requerida, que están en función del tamaño, diseño y construcción de la bomba.

Estas curvas, obtenidas experimentalmente en un banco de pruebas, son proporcionadas por los fabricantes a una velocidad de rotación determinada (N).

Se representan gráficamente, colocando en el eje de abscisas los caudales y en el eje de ordenadas las alturas, rendimientos, potencias y alturas de aspiración.

En la Figura 2.4 se muestra un ejemplo de las curvas características de operación de una bomba sumergible marca Fairbanks Morse.

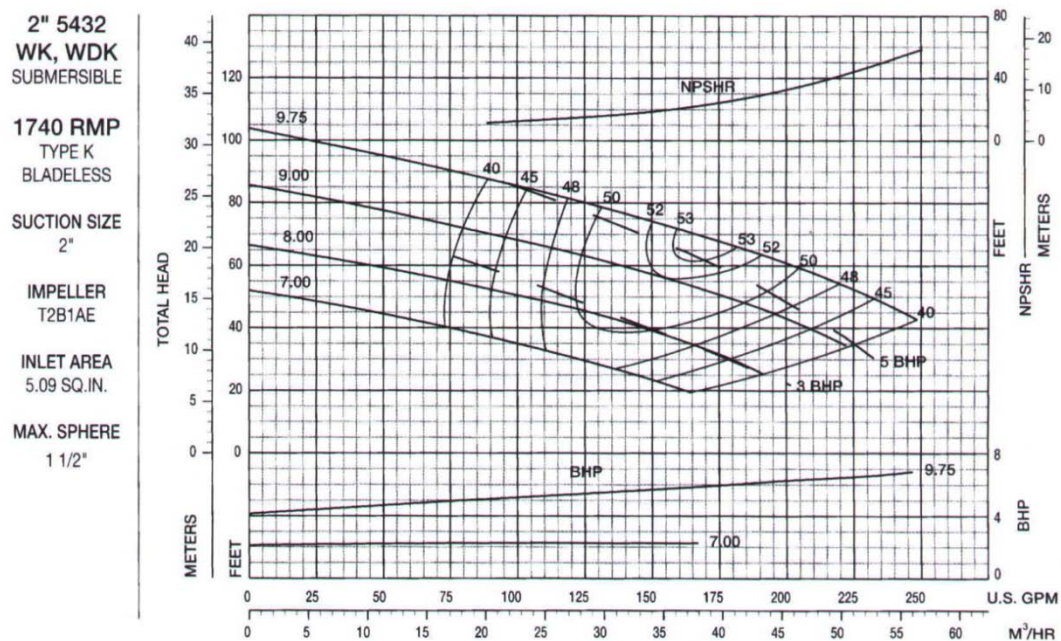


Fig. 2.4 Curva característica de operación de una bomba sumergible marca Fairbanks Morse

Existen bombas de tamaño y diseño similar que se producen por muchos fabricantes, pero su comportamiento varía debido a ligeras modificaciones en el

diseño. Las relaciones básicas que pueden usarse para caracterizar y analizar el comportamiento de las bombas bajo condiciones variables son las leyes de afinidad y la velocidad específica.

Leyes de Afinidad.

Para una bomba que opera a dos velocidades distintas (subíndices 1 y 2), se aplican las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned}\frac{Q_1}{Q_2} &= \frac{n_1}{n_2} \\ \frac{H_1}{H_2} &= \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \\ \frac{P_1}{P_2} &= \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3\end{aligned}\quad 16a, b \text{ y } c$$

donde Q es el gasto, H es la carga, P es la potencia y n es la velocidad rotacional.

Estas relaciones, conocidas como leyes de afinidad, se usan para determinar el efecto de los cambios de velocidad en el gasto, carga y potencia de una bomba. Al aplicar estas relaciones, debe recordarse que están basadas en la suposición de que la eficiencia permanece igual cuando se traslada de un punto dado en la curva característica de operación de la bomba a un punto homólogo en otra curva.

Para cubrir un amplio rango de gastos con un número mínimo de diseños de impelentes y carcazas de bombas, es una costumbre que los fabricantes ofrezcan un rango de diámetros de impulsor para cada tamaño de carcasa. En general, estos impelentes son de diseño idéntico, y el tamaño se reduce mediante un proceso de maquinado, dependiendo de los requerimientos de

gasto y carga. Las siguientes ecuaciones describen el efecto de los cambios en el diámetro del impulsor:

$$\begin{aligned}\frac{H_1}{H_2} &= \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 \\ \frac{Q_1}{Q_2} &= \frac{D_1}{D_2} \\ \frac{P_1}{P_2} &= \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^3\end{aligned} \quad 17a, b \text{ y } c$$

Velocidad Específica.

La velocidad específica puede definirse como la velocidad, en revoluciones por minuto, a la cual un impulsor dado operaría si se redujera proporcionalmente para entregar una unidad de gasto a una unidad de altura. La velocidad específica se usa para clasificar los impulsores según su tipo o proporciones, como una forma de predecir otras características importantes, tales como las limitaciones en la succión.

Entre los factores más importantes que afectan la operación de una bomba centrífuga, están las condiciones de succión. Alturas de succión anormalmente altas, más allá de lo especificado para la bomba, usualmente causarán serias reducciones en la capacidad y eficiencia, y podrá llevar a problemas de vibración y cavitación.

El efecto de la altura de succión en una bomba centrífuga está relacionado a su carga, capacidad y velocidad. La relación de estos factores para propósitos de diseño, está expresada en un índice conocido como velocidad específica:

$$n_s = \frac{nQ^{1/2}}{H^{3/4}} \quad (18)$$

donde n_s es la velocidad específica, n es la velocidad de rotación en rpm, Q es el gasto en m^3 / seg , lps (gpm) y H es la carga dinámica total en metros.

La velocidad específica asignada a un impulsor es un índice de su tipo cuando los factores de la fórmula anterior corresponden al punto de optima eficiencia. Es utilizado para diseñar impulsores para diferentes condiciones de carga, gasto y velocidad. Los impulsores para altas cargas usualmente tienen bajas velocidades específicas, mientras que impulsores para bajas cargas su velocidad específica es alta.

Se ha encontrado que la velocidad específica es un criterio muy valioso para determinar la altura de succión máxima permisible para evitar la cavitación para varias condiciones de capacidad, carga y velocidad.

Para unas condiciones de gasto y carga determinadas, una bomba de baja velocidad específica operará mejor con una altura de succión mayor que otra cuya velocidad específica es alta. Si la altura de succión es muy alta (mayor de 15 pies), deberá usarse una velocidad específica más baja, y en consecuencia, la bomba será más grande, mientras que si la altura de succión es baja, o hay una carga positiva en la succión, la velocidad puede incrementarse y podrá usarse una bomba más chica.

Carga neta Positiva de Succión. (NPSH).

Este término se refiere a la energía que causa que el líquido fluya a través de la tubería de succión y finalmente entre en el ojo del impulsor.

Esta energía proviene de la presión atmosférica, o de la carga estática más la presión atmosférica. Si una bomba opera por encima del nivel del líquido, su única fuente de energía para que el líquido suba hasta el impulsor, es la presión

atmosférica. El trabajo que ésta puede realizar es, entonces, limitado, por lo que el NPSH se convierte en un factor muy importante para el correcto funcionamiento de la bomba.

Por definición, la NPSH disponible es igual a la carga de presión absoluta en la succión de la bomba, más la altura de velocidad en ese punto menos la carga de presión absoluta de vapor a la temperatura de trabajo.

Existen dos valores de NPSH que debemos considerar:

- NPSH requerido. Este depende del diseño de la bomba. Varía entre las diferentes marcas, entre diferentes bombas de la misma marca, y cambia con la velocidad y gasto de una misma bomba. Este valor debe proporcionarlo el fabricante de la bomba.
- NPSH disponible. Es una función del sistema en el que la bomba opera. Puede calcularse para cualquier instalación, la cual debe tener un NPSH disponible igual o mayor que el requerido por la bomba en las condiciones especificadas de operación.

- Cuando el líquido está sobre la bomba:

$$\text{NPSH}_{\text{disp}} = \text{Presión atmosférica (m)} + \text{Carga estática en la succión (m)} - \text{Pérdidas por fricción en la tubería de succión (m)} - \text{Presión de vapor de líquido (m)}. \quad (19)$$

- Cuando el líquido está bajo la bomba:

$$\text{NPSH}_{\text{disp}} = \text{Presión atmosférica (m o pies)} - \text{Carga estática en la succión (m o pies)} - \text{Pérdidas por fricción en la tubería de succión (m o pies)} - \text{Presión de vapor de líquido (m o pies)}. \quad (20)$$

Cavitación.

Cavitación es la formación y colapso de burbujas de vapor en el líquido en la succión de una bomba. La Cavitación ocurre cuando la bomba está operando cerca del mínimo del $NPSH_D$.

Cuando ocurre la cavitación, parte del líquido se transforma en vapor. Si esto sucede en la sección de succión de la bomba o en el ojo del impulsor, las burbujas de vapor son conducidas hacia dentro del impulsor. A medida que la presión aumenta, las burbujas de vapor se colapsan en los alabes y el líquido se precipita con tal fuerza que desprende pequeñas partículas de metal de los alabes, ocasionando con esto la erosión de los alabes del impulsor. (Diseño de instalaciones mecánicas)

La cavitación es uno de los más serios problemas que se pueden presentar en la operación de las bombas, porque puede ocasionar daños permanentes a la bomba o reducir su capacidad.

La cavitación es un peligro potencial especialmente cuando la bomba opera a altas velocidades, a una capacidad mucho mayor o mucho menor que la del punto de mayor eficiencia. La cavitación reduce la capacidad y eficiencia de la bomba y puede dañarla, algunas veces rápidamente. Se presenta cuando la presión absoluta en la entrada de la bomba baja a niveles menores que la presión de vapor del líquido bombeado. Primero, el aire sale de la solución para formar pequeñas burbujas, seguido instantáneamente por vapor a medida que el líquido hierve. Cuando las burbujas de vapor son transportadas a través del impulsor, alcanzan una zona de alta presión donde se colapsan abruptamente.

Si el colapso ocurre en la superficie de un sólido, el líquido de los alrededores entra a gran velocidad para llenar el espacio vacío dejado por las burbujas,

impactando pequeñas áreas con presiones tremendamente grandes y localizadas. Esto ocasiona picaduras y erosión en la superficie.

Además de picaduras y erosión, la cavitación puede producir también ruido y vibración. El ruido lo produce el colapso de las burbujas de vapor al entrar a la región de alta presión. La vibración se debe a un desbalance de las presiones que se generan por la distribución irregular de las burbujas que se colapsan.

La cavitación puede evitarse si la bomba es diseñada, instalada y operada apropiadamente, de acuerdo con las recomendaciones del fabricante. Las instalaciones de bombas centrífugas deben evitar lo más que se pueda las siguientes condiciones:

- Cargas mucho menores que la carga de mayor eficiencia de la bomba.
- Gastos mucho mayores que el gasto de mayor eficiencia de la bomba.
- Alturas de succión más altas o cargas positivas menores que las recomendadas por el fabricante.
- Temperatura del líquido mayor que aquella para la que se diseñó el sistema.
- Velocidades mayores que las recomendadas por el fabricante.

Pero la forma más fácil, directa y mejor de eliminar la cavitación es asegurarse que la presión interna de la bomba permanece por arriba de la presión de vapor del líquido. (Sanks 1998)

Punto de operación de las bombas

El punto de operación de una bomba es aquel en el cual la carga de la bomba iguala a la carga del sistema esto es, el punto en donde se intersecta la curva de la bomba con la curva del sistema, como se muestra en la figura 2.5.

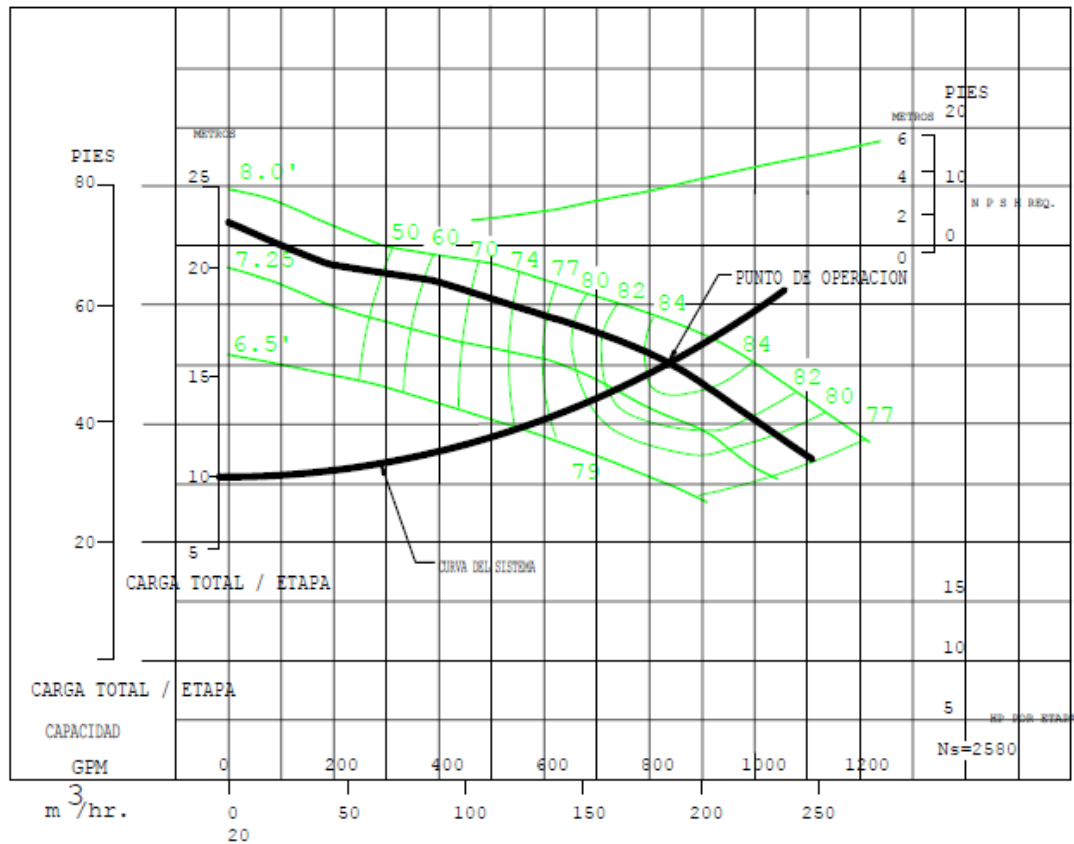


Fig. 2.5 Punto de operación de la bomba

El punto de operación y de diseño de una bomba debe localizarse en donde la eficiencia sea el máximo ó muy cercano a éste; la razón fundamental se debe a que el rendimiento y la potencia de accionamiento son inversamente proporcionales.

El punto de operación debe ser situado en un diámetro de impulsor comprendido entre los valores máximo y mínimo.

Curvas de operación de bombas en serie.

Cuando en una instalación existente, se requiera de un incremento en la carga y una sola bomba no sea suficiente para desarrollarla, el uso de dos o más

bombas de la misma capacidad en serie se hace necesario. Para este caso en particular el gasto que proporcionan las bombas es el mismo para las dos y la carga combinada es igual a la suma de las cargas individuales de cada unidad, para un gasto determinado.

$$Q_{\text{SISTEMA}} = Q_{\text{BOMBA1}} = Q_{\text{BOMBA2}} = \dots = Q_{\text{BOMBA}n} \quad (21)$$

$$H_{\text{SISTEMA}} = H_{\text{BOMBA1}} + H_{\text{BOMBA2}} + \dots + H_{\text{BOMBA}n} \quad (22)$$

La Figura 2.6 muestra la curva característica de dos bombas centrífugas operando en serie.

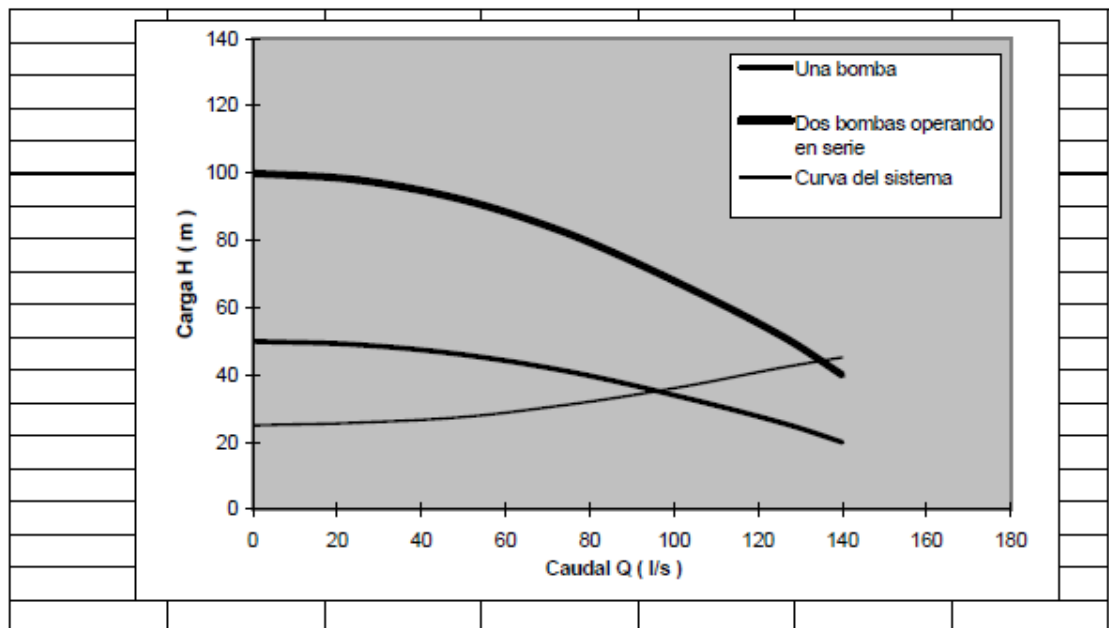


Fig. 2.6 Dos bombas operando en serie

Curvas de operación de bombas en paralelo.

Cuando los requerimientos de bombeo son variables o cuando la descarga de dos o más bombas están conectadas a una misma tubería, se tiene una instalación de bombas en paralelo.

Como la carga a presión en la tubería común es una sola, cada bomba ajustará su funcionamiento a dicha carga, luego el resultado de la operación de bombas en paralelo será que:

1. Se sumarán las capacidades o caudales de las distintas bombas a cargas iguales, para así obtener el caudal total de bombeo.
2. La potencia necesaria resultante será la suma de las potencias para las cargas iguales correspondientes a cada caudal.
3. La eficiencia de la combinación se determina para cada carga, a través de la potencia de la combinación como suma de las potencias individuales para cargas iguales.

Si las bombas colocadas en paralelo son iguales, la capacidad y la potencia necesaria para cargas iguales se duplicarán, triplicarán, etc.; según sean dos, tres o más bombas iguales las colocadas en paralelo. La eficiencia será igual que en la bomba original para el punto de la curva de la combinación que signifique doble o triple capacidad, según el caso..

Como característica fundamental a resaltar en un acoplamiento de bombas en paralelo, es que el caudal total entregado por la combinación siempre es menor que el número de bombas por el caudal que suministra una sola bomba. La relación existente entre el caudal que suministra una bomba y el que suministra la combinación dependerá de las características de cada una de las bombas acopladas, del conjunto en paralelo y de la curva característica del sistema de tuberías. (Acueductos a presión)

La operación en paralelo de varias bombas puede representarse a partir de las curvas de funcionamiento de ellas en un diagrama H-Q, el cual se obtiene al

trazar las curvas de funcionamiento en forma consecutiva multiplicando las abscisas por un factor igual al número de equipos en paralelo, como se indica en la Figura 2.7. En una conducción, la carga dinámica total H integrada por la carga de fricción h_f y la carga de elevación H_e , da origen a la denominada curva característica de la conducción, que de forma aproximada puede ser expresada por la siguiente ecuación: (Lib_CNA Ref?)

$$H = H_e + kQ^2 \quad (23)$$

Donde

K = valor para cada conducción, en función de la geometría de la tubería, rugosidad y número de Reynolds.

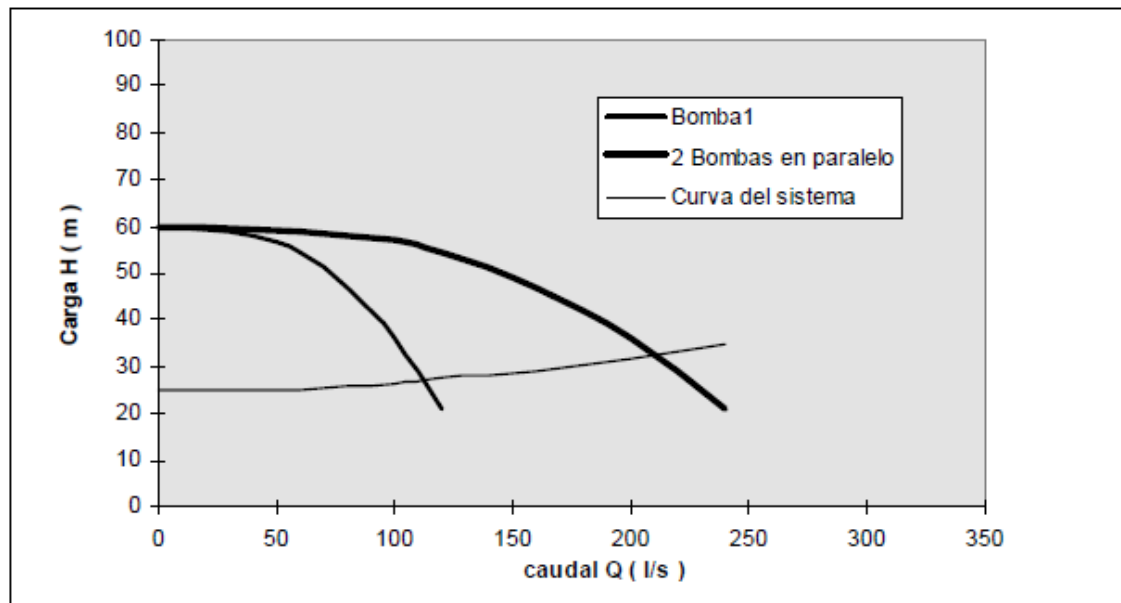


Fig. 2.7 Dos bombas operando en paralelo

La maniobra de arranque para acueductos grandes con operación de bombas en paralelo se realiza una a una, lo que implica gastos parciales, donde la

eficiencia real de trabajo para una bomba o dos es significativamente menor a la eficiencia para gasto máximo de diseño.

Una situación similar se tiene al comparar las curvas de eficiencia, carga neta positiva de succión y carga dinámica de una bomba contra la curva característica de la conducción. Se observa, por ejemplo, que la NPSH requerida aumenta mientras que la de eficiencia η disminuye con relación al punto de máxima eficiencia de la bomba. Esta situación puede dejar fuera de rango a la NPSH imposibilitando el arranque de la bomba.

Para solucionar esta problemática, desde el diseño se procede de manera conveniente, en principio, con equipos de bombeo bien seleccionados que cubran todas las condiciones que imponga la conducción. La implementación de orificios disipadores de energía o válvulas de regulación de gasto permiten la posibilidad de trabajar en los puntos de máxima eficiencia con cada gasto parcial, aunque en consecuencia disminuya el rendimiento global del sistema que sería lo menos deseable. (Pérez L 2005)

Acueductos.

Se llama acueducto al conjunto integrado por tuberías o canales, estaciones de bombeo y dispositivos de control, que permiten el transporte de agua desde una sola fuente de abastecimiento, hasta un solo sitio donde será distribuida en condiciones adecuadas de calidad y cantidad.

Los acueductos pueden funcionar a *presión* en tuberías cerradas o bien a *superficie libre* a través de canales o tuberías parcialmente llenas.

Componentes de un acueducto a presión.

Obra de Toma.

La obra de toma la forma un conjunto de estructuras y sus auxiliares que permiten extraer agua del curso de un río o de algún tipo de embalse (natural o artificial) en condiciones satisfactorias de flujo y con un control adecuado.

El diseño de la misma varía mucho de acuerdo con las condiciones geológicas y topográficas, el lugar de donde se realiza la extracción y las variaciones del caudal a extraer. En grandes ríos o en grandes presas, incluso, se puede requerir de varias tomas, o bien una toma con varios pasajes o conductos.

En general, una obra de toma consiste en una estructura de entrada, conductos, mecanismos de regulación y emergencia con su equipo de operación y dispositivos para disipación de energía.

Estaciones de bombeo.

Las estaciones de bombeo, dispuestas convenientemente a lo largo de la traza del acueducto, están constituidas por una subestación eléctrica, cárcamo de bombeo, rejillas, bombas, equipo eléctrico, tuberías, válvulas y accesorios requeridos para la operación, que proporciona las condiciones energéticas de diseño para que la conducción transporte adecuadamente el agua, de un nivel topográfico generalmente menor en la fuente a uno mayor en el sitio de distribución.

Cárcamo de bombeo.

Es una estructura diseñada para recibir y contener la cantidad de agua requerida por el equipo de bombeo, en la cual se considera la velocidad de aproximación del agua, la sumergencia mínima y su geometría en relación con la localización del equipo que permita el bombeo adecuado del gasto de diseño.

Tuberías.

Constituyen la componente indispensable en las obras de acueductos a presión ya que serán las encargadas de conducir el agua entre la obra de toma y la reserva final. Es el conjunto de tubos interconectados para formar una tubería principal, con una variedad de diámetros y materiales.

Líneas paralelas.

Las líneas de conducción paralelas se forman cuando es necesario colocar dos o más tuberías sobre un mismo trazo. Esta instalación se recomienda previo análisis económico para evitar la colocación de diámetros mayores a 1.22 m, para efectuar la construcción por etapas según sean las necesidades de la demanda de agua, la disponibilidad de los recursos y facilitar la operación a diferentes gastos.

Válvulas.

Son dispositivos que permiten el control del flujo en la conducción, atendiendo a situaciones de: corte y control de flujo, acumulación de aire por llenado y vaciado de la tubería, depresiones y sobrepresiones generadas por fenómenos transitorios, y retroceso del agua por paro del equipo de bombeo, entre otras,

Piezas especiales.

Son elementos de unión entre los componentes de la tubería de conducción; se utilizan para efectuar intersecciones de conductos, variación de diámetros, cambios de dirección, conexiones con válvulas y equipos de bombeo, etc. Entre las piezas especiales se encuentran juntas, carretes, extremidades, tes, cruces, codos y reducciones, entre otros.

Tren de piezas especiales.

Es el conjunto formado por válvulas, carretes, tes y demás accesorios ubicados según el diseño del acueducto. Este conjunto permite conectar adecuadamente los equipos de bombeo con la tubería, ofreciendo a los mismos control y protección. (CNA 1997)

Las instalaciones de bombeo constan generalmente de varias bombas acopladas en paralelo a un sistema para cubrir el gráfico de gasto variable. Aunque normalmente se piensa que la colocación de bombas en paralelo se hace para aumentar el caudal en un sistema existente, lo más común es que las instalaciones de bombas en paralelo se dispongan para fraccionar un caudal total en caudales parciales para resolver situaciones especiales de operación (Pérez, Guitelaman y Pérez 2005).

Tanque de regulación o distribución.

Estructura ubicada generalmente al final de la conducción y diseñada para almacenar agua acorde con las extracciones de la fuente de abastecimiento y demandas de los usuarios.

Dispositivos de control de transitorios.

Estructuras diseñadas para controlar depresiones, sobrepresiones, burbujas de aire y demás perturbaciones en la conducción, ocasionadas por fenómenos transitorios.

Torre de oscilación.

Es una estructura a menudo de forma circular en contacto con la atmósfera por la parte superior, cuyo diámetro es por lo general mayor que el de la conducción. Para evitar los derrames de agua cuando la conducción se encuentra funcionando, la elevación de la corona de la torre de oscilación debe

ser mayor al nivel del agua del punto de descarga y además al nivel piezométrico máximo en el punto de conexión con la conducción. Para evitar derrames cuando el sistema no está funcionando, el nivel de la corona debe ser mayor a los niveles de agua de cualquier depósito conectado a la conducción.

La torre de oscilación es de de las estructuras más confiables para el control de los transitorios, sin riesgos de funcionamiento al no tener elementos de operación.

Tanque unidireccional.

Es una estructura que se coloca generalmente a una elevación superior a la del terreno natural y en contacto con la atmósfera por la parte superior. La elevación de la corona es menor a la carga piezométrica del punto de conexión del tanque con la conducción. Su función es aliviar fundamentalmente las depresiones causadas por un fenómeno transitorio provocado por un paro repentino de la bomba. Se usa cuando las cargas piezométricas del flujo establecido son muy grandes y resulta inadecuado colocar una torre de oscilación demasiado alta.

2.2 Operación eficiente y ahorro de energía en sistemas de bombeo.

Los sistemas de abastecimiento de agua son grandes consumidores de energía, debido en gran parte a pérdidas ocasionadas por varios factores: Plantas de bombeo ineficientes por su diseño, instalación o mantenimiento; envejecimiento e incrustaciones de las tuberías que incrementan las pérdidas

de carga; bombeo excesivo o innecesario, así como estrategias de operación deficientes.

Según el Departamento de Energía de EE. UU. (DOE por sus siglas en inglés), si se implementa un sistema de administración de la energía con un enfoque sistémico en una planta industrial o de servicios públicos como suministro de agua potable o alejamiento de aguas residuales, se pueden lograr ahorros desde un 10% hasta un 15% en consumos de electricidad. Muchas mejoras no requieren inversiones significativas, son fáciles de implementar y tienen tasas de retorno menores a un año.

Para evaluar apropiadamente sistemas de bombeo, es necesario cuantificar los costos de operación del sistema. Estos costos generalmente incluyen varios componentes fijos y variables. De éstos, el debido a la energía es frecuentemente el de mayor peso.

El punto de operación de una bomba es la intersección entre la curva de resistencia al flujo y la curva característica de operación de la bomba. Se alcanza una operación eficiente cuando la curva de eficiencia está en su punto máximo. Sin embargo, la demanda del sistema cambia periódicamente, por lo que el punto de operación se mueve del punto óptimo a otros puntos menos eficientes. Para manejar estas variaciones, se operan combinaciones de varias bombas en paralelo o se trabaja con válvulas parcialmente cerradas, lo que es un gran desperdicio de energía.

Cinco causas básicas para una operación lejos de lo óptimo:

- Los componentes instalados son inherentemente ineficientes a las condiciones normales de operación.

- Los componentes instalados se han degradado por el servicio.
- Se está suministrando más flujo del que el sistema requiere.
- Se está suministrando más carga de la que el sistema requiere.
- El equipo se está operando cuando no lo requiere el sistema.

Algunos síntomas de interés:

- Sistemas controlados mediante la estrangulación de válvulas.
- Líneas de recirculación (bypass) normalmente abiertas.
- Sistemas de varias bombas en paralelo con el mismo número de bombas siempre en operación.
- Operación constante de las bombas en ambientes de producción por lote, u operación por ciclos en procesos continuos.
- Ruidos de cavitación (en la bomba o en cualquier otra parte).
- Alto mantenimiento del sistema.
- Sistemas que han sufrido cambios en su función.

Estudio de campo del sistema de bombeo.

Dada el gran consumo de electricidad atribuido a los sistemas de bombeo, aun pequeñas mejoras en la eficiencia podría significar ahorros significativos.

En una instalación de bombeo, las bombas de mayor tamaño y con muchas horas de operación al año deben ser investigadas para determinar una línea base para el consumo de energía y costos actuales, identificar bombas ineficientes, determinar medidas de eficiencia y estimar el potencial de ahorro de energía.

El equipo de trabajo debe recopilar la información sobre los datos de placa de la bomba y el motor y documentar los programas de operación para desarrollar perfiles de cargas y después obtener las curvas de gasto/carga de los fabricantes para documentar el diseño del sistema de bombeo y sus puntos de operación. El equipo también debe constatar los requerimientos de gasto y presión del sistema, tipo de bomba, velocidad de operación, número de etapas y gravedad específica del fluido bombeado. De ser posible, el equipo también debe medir el gasto real y las presiones de succión y descarga y observar aquellas condiciones asociadas con operaciones ineficientes de la bomba, tales como:

- Bombas con altos requerimientos de mantenimiento.
- Bombas sobredimensionadas que operan estranguladas.
- Bombas que cavitan o desgastadas.
- Bombas mal aplicadas.
- Sistemas de bombeo con grandes variaciones en gasto o presión.
- Sistemas de bombeo con derivaciones de flujo (bypass).
- Válvulas de control estranguladas para proveer gastos fijos o variables.
- Bombas o válvulas ruidosas.
- Bombas o tuberías obstruidas.
- Desgaste en los impulsores o carcasas que incrementan las holguras o espacios entre partes fijas y móviles.
- Desgaste excesivo en anillos de desgaste y rodamientos.

- Ajuste inadecuado del empaque que cause problemas en la flecha de la bomba.
- Sistemas con bombas múltiples donde el exceso de capacidad es derivado o suministra demasiada presión.
- Cambios en las condiciones iniciales de diseño. Conexiones cruzadas en el sistema de distribución, líneas principales paralelas o cambios en el diámetro o material de la tubería puede cambiar la curva del sistema original.

Algunas medidas para mejorar la eficiencia de la planta de bombeo incluyen:

- Pare las bombas innecesarias. Realice una nueva optimización del sistema de bombeo cuando los requerimientos cambien. Use interruptores de presión para controlar el número de bombas en servicio cuando los requerimientos de flujo varíen.
- Restablezca las holguras internas.
- Reemplace los motores con eficiencia estándar con motores NEMA Premium.
- Reemplace o modifique bombas sobredimensionadas.
 - ✓ Instale bombas nuevas seleccionadas apropiadamente.
 - ✓ Recorte o cambie los impulsores de la bomba para coincidir con los requerimientos del sistema, consultando con el proveedor sobre el tamaño mínimo.

- Cubra las demandas variables con un variador de velocidad o con un arreglo de bombas múltiples en lugar de estrangular o derivar el exceso de flujo.

Para una operación y mantenimiento eficientes de sistemas de bombeo desde el punto de vista económico, se debe poner especial atención no sólo a los equipos en lo individual, sino al sistema de bombeo como un todo.

Un enfoque sistémico involucra los siguientes tipos de acciones interrelacionadas:

- Establece condiciones y parámetros de operación actuales.
- Determina las necesidades presentes de producción y estima las futuras.
- Recopila y analiza datos de operación y detecta ciclos con las diferentes cargas de trabajo.
- Evalúa diseños de sistemas alternativos y mejoras.
- Determina las mejores opciones desde el punto de vista técnico y económico e implementa la mejor opción.
- Evalúa el consumo de energía con respecto al desempeño.
- Continúa monitoreando y optimizando el sistema.
- Continúa operando y manteniendo el sistema para su óptimo desempeño. (DOE and Hydraulic Institute 2006).

2.3 Indicadores de sustentabilidad para sistemas de suministro de agua.

Los indicadores son parámetros de medición que se integran a través de una o más variables básicas que caracterizan un evento, a través de formulaciones

matemáticas sencillas, permitiendo una fácil comprensión de las causas, comportamiento y resultados de una actividad.

Los indicadores son muy valiosos para registrar y analizar situaciones periódicamente, y el análisis de sus comportamientos es lo que permite la toma de decisiones más acertadas y el descubrimiento de oportunidades de mejora (Palacios 2012).

Los indicadores para evaluar la sustentabilidad pueden conducir a mejores decisiones y acciones más efectivas al simplificar, clarificar y hacer que la información agregada esté disponible para los responsables políticos. Asimismo, pueden ayudar a incorporar el conocimiento de las ciencias físicas y las sociales a la toma de decisiones para medir y calibrar el progreso hacia las metas de desarrollo sustentable y pueden proporcionar una advertencia temprana para prevenir problemas económicos, sociales y ambientales. También son herramientas útiles para comunicar ideas, pensamientos y valores. (ONU 2007). Una situación es considerada como sustentable cuando el resultado de estos indicadores se alinea con los objetivos buscados. Si un indicador se refiere a un criterio, un objetivo o una meta, puede ser catalogado como un indicador de rendimiento. Si varios indicadores se combinan en uno solo, entonces se conoce como índice, mientras que un conjunto de indicadores pueden representar un problema mayor (Bakkes et al, 1994). Brown y Matlock (2011) señalan que muchos índices se han desarrollado para evaluar los recursos hídricos, como la escasez de agua o presión hídrica, y que la selección de los criterios por los que el agua se evalúa depende del enfoque, y puede ser tanto una decisión política como una decisión científica. El

indicador Falkenmark es una medida ampliamente utilizada de estrés hídrico. Se define como la fracción del escurrimiento anual total disponible para el uso humano. Falkenmark recopiló información de muchos países y calculó el uso de agua por persona en cada economía. Basado en el uso per cápita, la condición del agua en un área se clasificó como: de no estrés, de estrés, de escasez y de escasez absoluta. Valores de 1 700 m³ y 1000 m³ per cápita al año se utilizan como el límite entre áreas de estrés y de escasez, respectivamente (Falkenmark 1989). Este índice se utiliza normalmente en una escala a nivel país donde los datos están disponibles y proporciona resultados que son intuitivos y fáciles de entender. Sin embargo, el uso de los promedios nacionales anuales tiende a oscurecer la información importante de escasez si se utiliza a escalas más pequeñas. (Brown ad Matlock, 2011),y Winograd et al (1999) sugieren que para desarrollar un indicador deben seguirse dos pasos: i) la identificación del problema para enfocar la selección de los indicadores y ii) el establecimiento de objetivos, de tal manera que las mediciones de puedan contrastar contra ellos. Morrison et al (2001) afirman que los objetivos de un sistema de agua urbano moderno se pueden resumir como: un suministro confiable de agua potable de calidad para todos los usuarios, y un transporte seguro, tratamiento y reúso de las aguas residuales. La mayoría de los indicadores de sostenibilidad de los sistemas de agua que se encuentran en la literatura se aplica a países, regiones o ciudades con una orientación general, pero pocos de ellos se centran en los sistemas específicos donde el uso de la energía implicada en el suministro de agua es monitoreado de cerca por los indicadores para encontrar sus problemas y malas prácticas. Un conjunto de

indicadores debe ser implementado entonces, para que los administradores del sistema de agua tengan la información fácilmente disponible para corregir rápidamente el funcionamiento del sistema hacia una mayor eficiencia. En este sentido, Lundin (2001) también afirma que la gestión del agua en las zonas urbanas es un tema clave para el desarrollo sustentable y que el reto es satisfacer las diferentes demandas en las distintas regiones del mundo, como el acceso al agua limpia y al saneamiento en el desarrollo de países, o la reducción de los efectos ambientales en el mundo industrial, y denota que un enfoque hacia la comprensión de estas partes individuales es a través de indicadores de nivel inferior. También dice que los responsables de la toma de decisiones dentro y fuera de las organizaciones requieren una información relevante que puede ayudar a identificar los efectos que sus decisiones implican, y que los indicadores de desarrollo sustentable pueden ser utilizados para la evaluación comparativa o benchmarking en comparación con otros servicios públicos. El problema identificado en este estudio es la baja eficiencia energética de los sistemas de bombeo y el objetivo es incrementarlo. La elección fue limitar la selección de los indicadores a aquellos que pueden medir directamente la eficiencia del sistema y su impacto social, económico y ambiental. Al evaluar el desempeño y el progreso hacia el desarrollo sustentable del sistema de agua urbana, los indicadores deben estar preparados sobre la base de una definición de sustentabilidad de este sector, seguido por metas y objetivos claros. Los indicadores de las presiones sociales y las respuestas, la salud de los ecosistemas, la eficiencia del uso de recursos y la eficacia de los

servicios en conjunto pueden representar a la sustentabilidad de un sistema urbano de agua. (M. Lundin 1999).

2.4 Cambio climático y su impacto en la salud.

Los efectos producidos por la contaminación atmosférica dependen principalmente de la concentración de contaminantes, del tipo de contaminantes presentes, del tiempo de exposición y de las fluctuaciones temporales en las concentraciones de contaminantes, así como de la sensibilidad de los receptores y los sinergismos entre contaminantes [CNA, 2007].

El cambio climático es un reto inevitable y global con implicaciones para el desarrollo sustentable de todos los países. El 4to. Reporte de evaluación del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático 2007 (IPCC por sus siglas en inglés) advierte de los patrones cambiantes del clima y elevaciones en los niveles del mar debidos a las emisiones aceleradas de GEI por las actividades humanas y se espera que impacte en la disponibilidad de agua potable, seguridad alimentaria y energía, por lo que estos temas conforman la agenda principal del desarrollo global. [IPPC, 2007]

El calentamiento del sistema climático es inequívoco, como evidencian ya los aumentos observados del promedio mundial de la temperatura del aire y del océano, el deshielo generalizado de nieves y hielos, y el aumento del promedio mundial del nivel del mar. Observaciones efectuadas en todos los continentes y en la mayoría de los océanos evidencian que numerosos sistemas naturales están siendo afectados por cambios del clima regional, particularmente por un aumento de la temperatura.

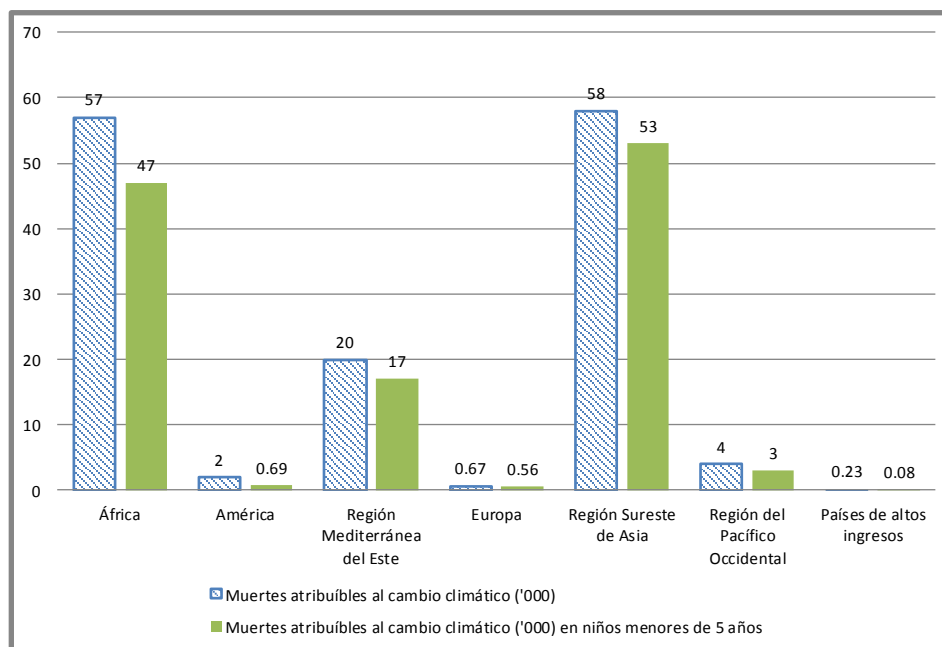
Se espera que el cambio climático intensifique el estrés actualmente padecido por los recursos hídricos, debido al crecimiento de la población y al cambio económico y de los usos de la tierra, en particular, a la urbanización. A escala regional, los bancos de nieve de montaña, los glaciares y los pequeños casquetes de hielo desempeñan un papel crucial con respecto a la disponibilidad de agua dulce. Según las proyecciones, las pérdidas de masa generalizadas de los glaciares y las reducciones de la cubierta de nieve de los últimos decenios se acelerarían durante el siglo XXI, reduciendo así la disponibilidad de agua y el potencial hidroeléctrico, y alterando la estacionalidad de los flujos en regiones abastecidas de agua de nieve de las principales cordilleras (por ejemplo, Hindu-Kush, Himalaya, Andes), donde vive actualmente más de la sexta parte de la población mundial.

Las investigaciones disponibles parecen indicar que aumentarán apreciablemente las precipitaciones de lluvia intensas en numerosas regiones, en algunas de las cuales disminuirán los valores medios de precipitación. El mayor riesgo de crecidas que ello supone plantearía problemas desde el punto de vista de la sociedad, de la infraestructura física y de la calidad del agua. Es probable que hasta un 20% de la población mundial llegue a habitar en áreas en que las crecidas aumenten posiblemente de aquí al decenio de 2080. Los aumentos de la frecuencia y gravedad de las crecidas y sequías afectarían negativamente el desarrollo sostenible. El aumento de las temperaturas afectaría también las propiedades físicas, químicas y biológicas de los lagos y ríos de agua dulce, y sus efectos sobre numerosas especies de agua dulce, sobre la composición de las comunidades y sobre la calidad del agua serían

predominantemente adversos. En las áreas costeras, el aumento de nivel del mar agravaría las limitaciones de los recursos hídricos, debido a una mayor salinización de los suministros de agua subterránea. [IPPC, 2007).

Medir los efectos en la salud del cambio climático sólo puede hacerse mediante estimaciones aproximadas. Sin embargo, en una evaluación coordinada por la Organización Mundial de la Salud (OMS) en la que tomó en cuenta únicamente un subconjunto de las posibles repercusiones sanitarias, llegó a la conclusión de que el modesto cambio climático que ha ocurrido desde la década de 1970, para el año 2004 ya estaba causando más de 140,000 muertes adicionales anuales. La evidencia de estudios epidemiológicos ha demostrado que el cambio climático está vinculado con una serie de enfermedades, como las diarreicas, malaria, así como lesiones y muertes relacionadas con inundaciones y la desnutrición.

La Organización Mundial de la Salud ha desarrollado diversos indicadores para medir los efectos en la población debidos al cambio climático. Dos de ellos son el número de muertes atribuidas al cambio climático y el número de años de vida ajustados por discapacidad (AVAD) debida al cambio climático. La Figura 2.8 muestra estos indicadores para países con ingresos bajos y medios de África, América, Europa, Región Mediterránea del Este, Sureste de Asia y del Pacífico Occidental así como para los países ricos en general. (Gil Samaniego, Campbell 2011)



Fuente: OMS, World Health Statistics, 2004.

Fig. 2.8 Impactos por enfermedades atribuidas al cambio climático en países de ingresos bajos y medios de diferentes regiones del mundo

CAPÍTULO 3. DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

3.1 *Panorama general*

Las comunidades de todo el mundo están empezando a darse cuenta de los beneficios económicos, sociales y ambientales de la conservación del agua. Los planificadores y administradores del agua están buscando planteamientos exhaustivos, integrales y a largo plazo de la administración del agua para asegurar cantidades suficientes y de alta calidad para el futuro. El interés principal está en la eficiencia al mismo tiempo que en el buen uso del agua con tecnologías, hábitos y buenas prácticas para insertar la conservación como fundamento de la gobernabilidad y la gestión del agua (WSP 2003).

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) y el UNICEF, en 2010, el 89 por ciento de la población mundial o 6,100 millones de personas, utilizaron fuentes mejoradas de agua potable, superando los Objetivos de Desarrollo del Milenio (MDG, por sus siglas en inglés), el cual es el 88%; se espera que el 92% tengan acceso en el año 2015. Sin embargo, el 11% de la población mundial, o 783 millones de personas todavía no tienen acceso. Las proyecciones indican que 605 millones seguirán sin tener acceso en el 2015.

Hoy en día, alrededor de 700 millones de personas en 43 países viven por debajo del umbral del estrés hídrico. Con una disponibilidad media anual de unos 1,200 metros cúbicos por persona el Oriente Medio es la región del mundo con mayor estrés hídrico; sólo Irak, Irán, Líbano y Turquía están por encima del umbral. Los palestinos, especialmente en Gaza, experimentan una escasez de agua de las más agudas en el mundo, con cerca de 320 m³ por persona. La Tabla 3.1 muestra el grado de presión en los recursos hídricos de ciertos

países. Estos indicadores resultan después de dividir el total de agua renovable extraída entre los recursos disponibles. Los países del Oriente medio sufren una fuerte presión mientras que México se encuentra en el lugar 58.

Tabla 3.1. Grado de presión hídrica

No.	País	Agua renovable disponible (km ³)	Agua removable extraída (km ³)	Water resources stress %
1	Kwait	0.02	0.42	2,100
2	Emiratos Árabes Unidos	0.15	2.80	1,867
3	Arabia Saudita	2.40	22.47	936
4	Libya	0.60	4.27	711
5	Quatar	0.06	0.22	381
7	Yemen	2.10	3.38	161
11	Egipto	57.30	54.26	94
13	Israel	1.78	1.55	87
14	Irak	75.61	64.49	85
17	Pakistán	225.27	169.39	75
44	Sudafrica	50.00	12.48	24
56	Francia	203.70	39.95	19
57	Turquía	213.70	39.10	18
58	México	459.35	79.95	17
66	Estados Unidos	3,051.00	283.94	9

FAO. 2012. AQUASTAT database - Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).

En la Figura 3.1 se aprecia la localización en el mundo de los países con mayor presión hídrica.

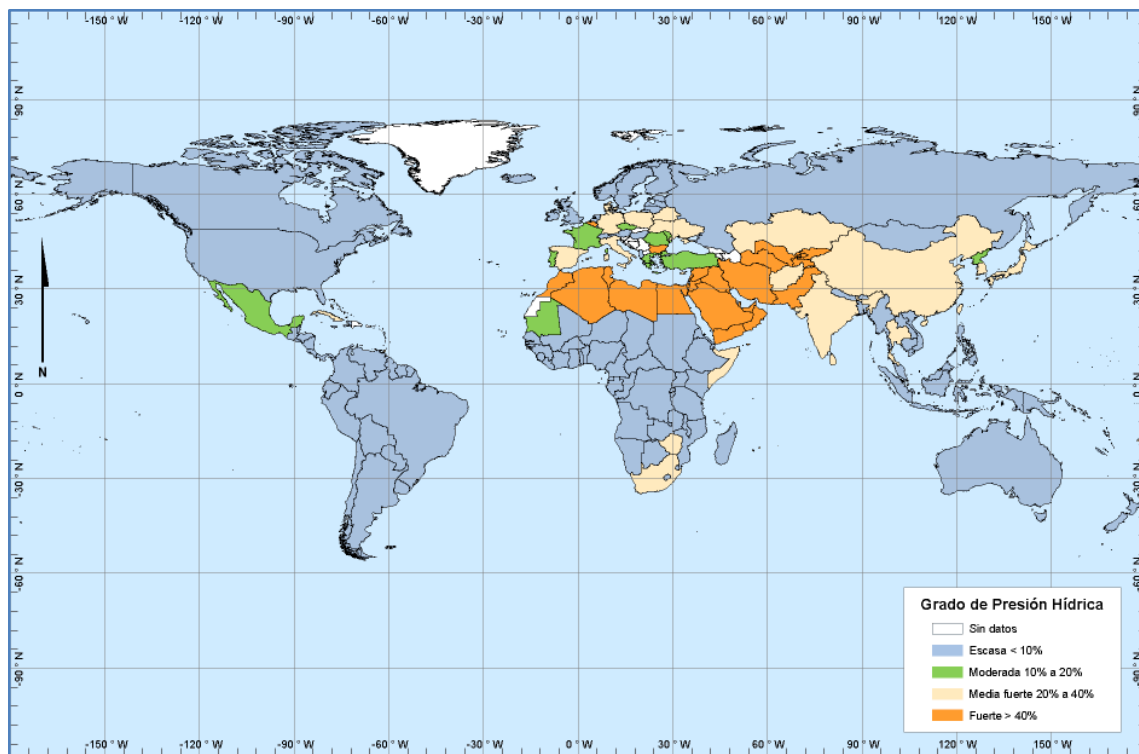
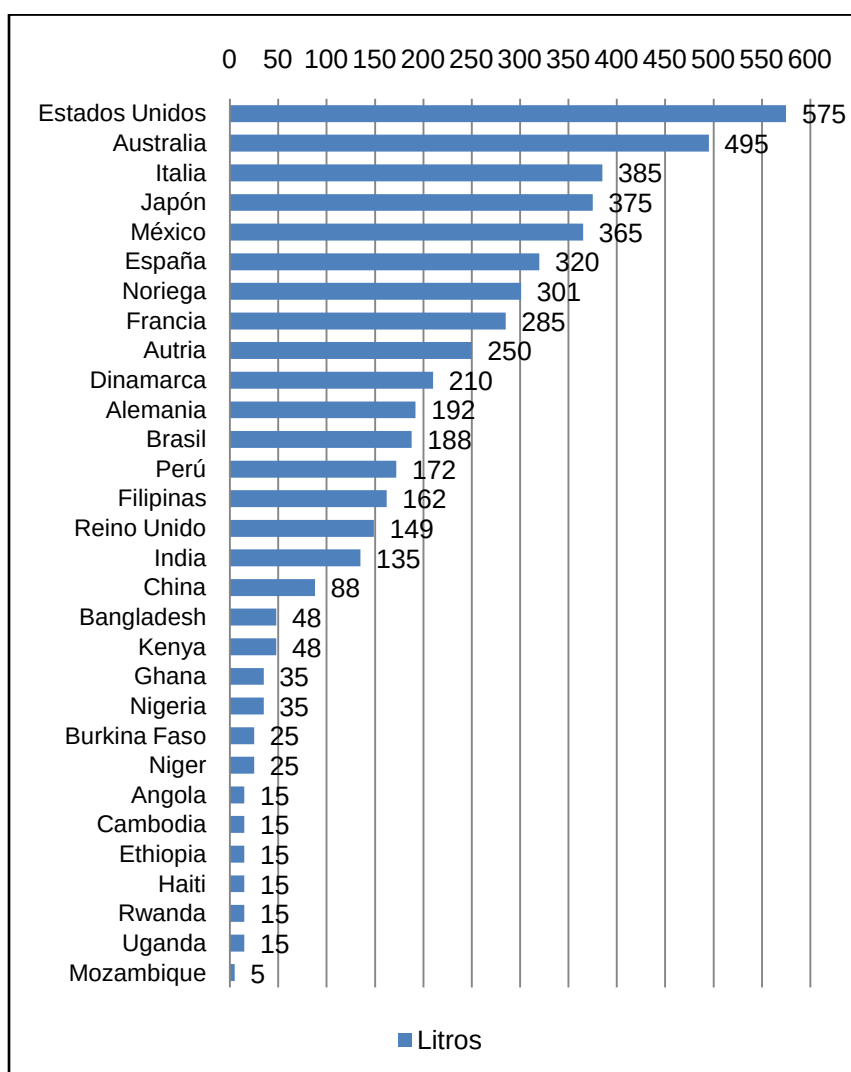


Fig. 3.1 Grado de presión hídrica en el mundo.

El uso promedio de agua oscila entre 200-300 litros por persona al día en la mayoría de los países de Europa y 575 en los Estados Unidos. En México, el promedio es de 365 y en el estado de Baja California, 217.

Aunque las necesidades básicas varían, el umbral mínimo es de aproximadamente 20 litros por persona por día. Mil cien millones de personas clasificadas como que no tienen acceso al agua limpia utilizan aproximadamente 5 litros diarios, una décima parte de la cantidad promedio diaria utilizada en los países ricos, como muestra la Figura 3.2. (Naciones Unidas, RDH 2006)



Fuente: Naciones Unidas. Reporte de Desarrollo Humano, 2006

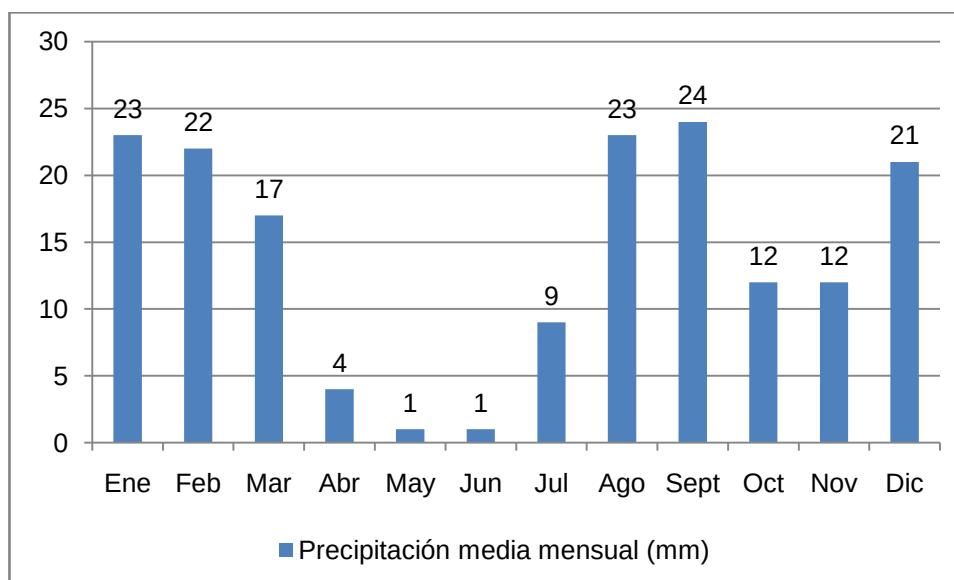
Fig. 3.2 Consumo medio de agua por persona por día, en litros (1998-2002)

Escenarios futuros del uso del agua son temas de grave preocupación. Durante casi un siglo el consumo de agua ha crecido casi dos veces más rápido que la población. Esta tendencia va a continuar. La agricultura de riego seguirá siendo el mayor consumidor de agua, en la actualidad representa más del 80% del consumo en los países en desarrollo (En México, el 77%). Sin embargo, las demandas de usuarios industriales y urbanos están creciendo rápidamente.

La escasez de agua es, entonces, en gran medida un dilema social que no puede ser resuelto sólo con innovaciones tecnológicas. Esta crisis de gobernabilidad debe ser abordada a través de nuevos enfoques integrados para la gestión del agua y la toma de decisiones que incluyan la noción de sustentabilidad en el gobierno, la industria y la sociedad civil.

3.2 Situación actual del agua en Baja California.

En México, la península de Baja California es la región más seca. Se recibe una precipitación anual de 169 mm, en comparación con la media nacional de 760 mm y 1846 mm de la región de la Frontera Sur. La Figura 3.3 muestra la distribución media mensual de las precipitaciones en el área de estudio. Cuenta con un clima seco y cálido, poca lluvia en invierno y un promedio de evaporación potencial anual de 1.838 mm (CNA, 2011).



Fuente: CNA 2011

Fig. 3.3 Precipitación media mensual en el estado de Baja California

La demanda anual de agua en Baja California es de 3,336 hm³, mientras que el total de los recursos renovables de agua dulce es de 3,622 hm³. La demanda de agua representa el 92.10% de los recursos hídricos, pero el agua subterránea es sobreexplotada en 33.36%. La Tabla 3.2 muestra la proporción entre los escurrimientos superficiales y el agua subterránea en el balance de agua para Baja California. (CEA, 2011)

Tabla 3.2. Balance de agua en Baja California

Fuente	Agua disponible (hm ³)	%	Demanda de agua (hm ³)	%
Escurreimientos superficiales	672	19	1,869	56
Río Colorado	1,850	51		
Agua subterránea	1,100	30	1,467	44
Total	3,622	100	3,336	100
Disponible	286 hm3			
Déficit de agua subterránea	367 hm3			

Fuente: CEA, 2008

Parte del agua superficial renovable (1850 hm³) proviene de los Estados Unidos por el Río Colorado, como el Tratado Internacional sobre Distribución de Aguas entre los Estados Unidos de América y México establece. Ésta es aparentemente poco utilizada, pero los volúmenes disponibles no son confiables ya que provienen de corrientes intermitentes de agua. Esto significa que los recursos de agua dulce para el Estado no son suficientes para la demanda, lo que refleja esta situación en la sobre explotación de los acuíferos. La Tabla 3.3 muestra datos de los usos del agua en el estado, y se puede constatar que el uso agrícola es el que mayor demanda representa. Es evidente

que para subsanar el déficit de agua en el estado se deben buscar usos más eficientes del líquido en todas las actividades que requieran del recurso, especialmente en el rubro de la agricultura, ya que es el mayor consumidor y el que más impacta en la disponibilidad del agua.

Tabla 3.3. Usos del agua en Baja California

Uso del agua	Volumen (hm3)	%
Agrícola	2,796	83.81
Público Urbano	273	8.18
Industria	267	8.00
Total	3,336	100

Fuente: CNA 2007

La Tabla 3.4 presenta las dotaciones de diseño establecidas en las Normas Técnicas para Proyectos de Agua Potable de la Comisión Estatal del Agua, vigentes desde el año 2007.

Tabla 3.4. Dotaciones de diseño por municipio

Municipio	Dotación de diseño (l/persona/día)
Ensenada	250
Mexicali	300
Playas de Rosarito	220
Tecate	250
Tijuana	220

Fuente: CEA 2007. Normas técnicas para proyectos de agua potable

3.3 Descripción del caso de estudio.

Alcance, restricciones y supuestos.

Alcance.

Con respecto al alcance espacial, este trabajo evalúa el sistema de transporte de agua en bloque por el ARCT desde la planta de bombeo PB-0 ubicada al pie del Cerro del Centinela en el municipio de Mexicali hasta la presa El Carrizo,

punto final donde el acueducto descarga las aguas que abastecen a las ciudades de Tecate, Tijuana y Rosarito del Estado de Baja California. Los límites temporales del estudio incluyen análisis a partir del año 2006 y hasta el mes de mayo del 2012, con prospectivas y escenarios al 2025.

Restricciones.

Las restricciones se refieren al acceso a la información, limitada por razones internas de la empresa operadora del acueducto.

Supuestos.

Se supone que los datos existentes son fidedignos y suficientes para tener una visión general del suministro de agua a la zona costa, realizar diagnósticos y generar los posibles escenarios a futuro.

Sistema de distribución de agua del área bajo estudio.

El sistema de distribución de agua en Baja California se muestra en un esquema simplificado en la Figura 3.4.

Las entradas al sistema son agua cruda y energía. El agua cruda proviene de escurrimientos superficiales, siendo la fuente principal el Río Colorado, y de aguas subterráneas. La energía es proveída por varias plantas de generación eléctrica con diferentes tecnologías de producción localizadas dentro del Estado. Estas consisten en Geotermia (40%), ciclo combinado con gas natural (54%) y vapor (6%), de acuerdo a datos de generación bruta en 2010 (CFE, 2010).

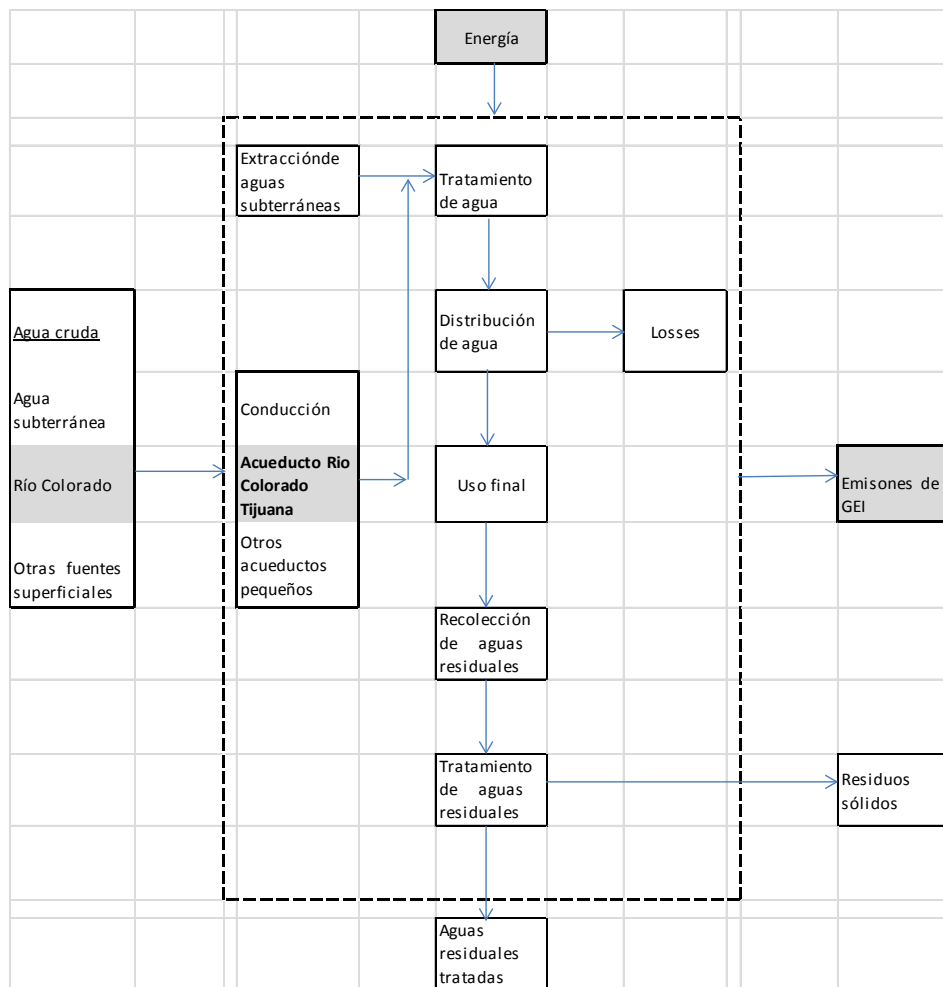


Fig. 3.4 Sistema de suministro de agua para el área bajo estudio.

Este sistema abastece a los 5 municipios que conforman el Estado: Mexicali, Tecate, Tijuana, Rosarito y Ensenada, más la ciudad de San Luis Río Colorado, Sonora. Mexicali, la capital del Estado, recibe el agua directamente del Río Colorado por gravedad a través del canal Reforma dada su proximidad al río. Ensenada, localizada al suroeste del estado, obtiene el agua principalmente de pozos profundos (95%) y en una pequeña cantidad de fuentes superficiales. De acuerdo a los datos de la Comisión Estatal del Agua (CEA) de 2011, las ciudades de Tecate, Tijuana y Rosarito dependen en 80% del agua

transportada por el ARCT; el 20% restante proviene de escurrimientos superficiales y pozos profundos. La Tabla 3.5 describe los usos urbanos del agua en Baja California en 2011 por municipio y fuente de abastecimiento. En ella se indica que la fuente principal es superficial, principalmente el Río Colorado, excepto para Ensenada.

Tabla 3.5. Usos urbanos del agua según la fuente, por Municipio

Municipio	Agua Superficial m ³	%	Agua Subterránea m ³	%	Total m ³	%
Ensenada	1,590,391	4.8	31,655,577	95.2	33,245,968	100.0
Mexicali	90,330,442	90.2	9,868,844	9.8	100,199,286	100.0
Tecate	5,521,381	65.5	2,910,107	34.5	8,431,488	100.0
Tijuana-Rosarito	106,160,371	96.4	3,971,097	3.6	110,131,468	100.0
Total	203,602,585	80.8	48,405,625	19.2	252,008,210	100.0

Fuente: CEA 2011

La CEA indica que el Acueducto Río Colorado-Tijuana es el componente de este sistema de suministro de agua con mayor consumo de energía, con un 78% del total en 2011. La Tabla 3.6 muestra los consumos de energía de los componentes del sistema para el suministro de agua a las ciudades de Tecate, Tijuana y Rosarito en 2010 y 2011. Las ciudades de Mexicali y Ensenada no están incluidas en la tabla pues no reciben agua del acueducto. La Mesa Arenosa de San Luis es un acuífero que contribuye al sistema de distribución de agua.

Tabla 3.6. Consumo de energía del sistema de agua de Baja California.

	Consumo de energía (GWh)			
	2010	%	2011	%
Distribución de agua potable	42.8	10.1	37.90	8.40
Recolección y tratamiento de aguas residuales	41.8	9.8	38.70	8.60
Administración	1.7	0.4	1.60	0.35
Acueducto Río Colorado-Tijuana	322.7	75.9	352.30	78.01
Mesa Arenosa San Luis	16.2	3.8	21.09	4.64
Total	425.2	100	451.59	100

Fuente: CEA 2011

Este estudio está enfocado en el subsistema de conducción de agua Acueducto Río Colorado-Tijuana, el cual, como se mencionó anteriormente, es el principal consumidor de energía del sistema de distribución y consecuentemente tiene los mayores impactos en la sustentabilidad. Como lo establece la regla de Pareto, si la principal causa de un problema es atacada primero, la mayor parte del problema estará resuelto. Con la metodología desarrollada se evaluó el uso del agua y la energía del ARCT con el objetivo de medir sus tendencias hacia la sustentabilidad para incrementar su eficiencia y reducir costos y emisiones de GEI asociadas.

3.4 Historia del Acueducto Río Colorado – Tijuana.

Desde su fundación, la ciudad de Tijuana, B.C. ha sufrido los rigores de la escasez de agua, para lo cual en 1937 entró en servicio la presa “Abelardo L. Rodríguez” con una capacidad para regar 1000 hectáreas de cultivo y satisfacer las demandas de agua de la ciudad. Como la mayor parte del Estado de Baja

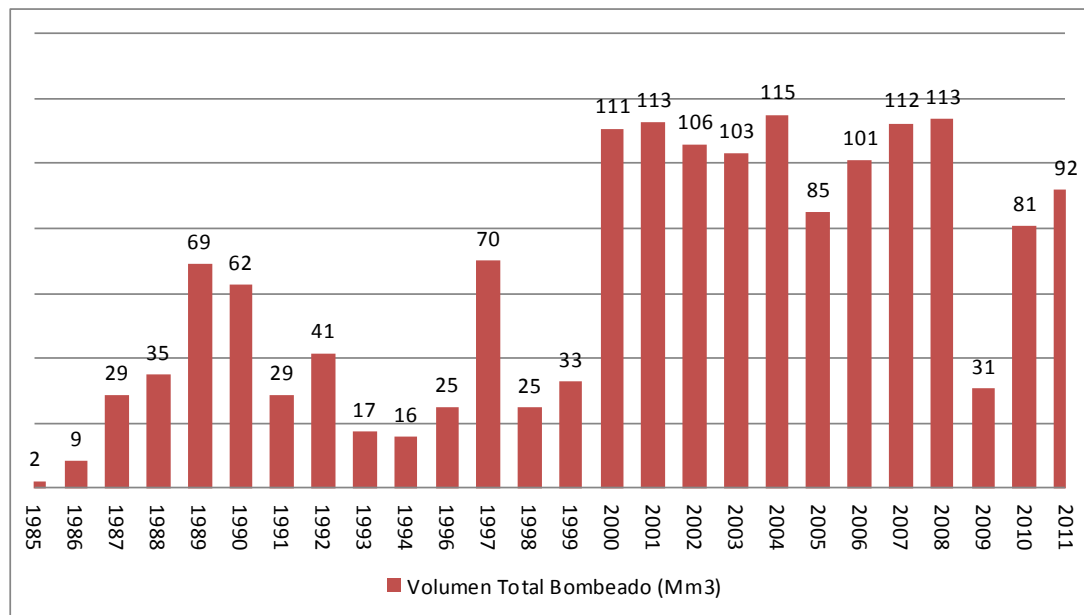
California, la ciudad de Tijuana ha tenido problemas para el abastecimiento de agua potable, agravados por el gran incremento de población.

A fin de suministrar los caudales necesarios, entre 1963 y 1964 se inició el aprovechamiento de pozos en la zona aledaña al poblado de "La Misión" y una planta desaladora de agua de mar construida en aquellos años en la planta termoeléctrica de Rosarito, B.C., de la C.F.E.

A pesar de este esfuerzo fue necesario en 1970 suscribir un convenio internacional de 5 años de duración con los EE.UU., para que Tijuana recibiera agua de la presa "Otay". En 1975 para resolver el problema, el Gobierno Federal inició la construcción del "Acueducto Río Colorado-Tijuana", con capacidad de $4 \text{ m}^3/\text{s}$, obra de grandes dimensiones que demandó cuantiosos recursos económicos y cuya realización constituyó una hazaña de la ingeniería mexicana. En 1990 las fuentes de abastecimiento eran los pozos de la ciudad de Tijuana con una aportación de 280 l/s y El Acueducto Río Colorado-Tijuana aportando 2050 l/s, dando un total de 2,330 l/s.

La Figura 3.5 muestra la evolución histórica del volumen bombeado del ARCT desde que inició sus operaciones en 1985.

A partir del año 2007 el acueducto normalizó su operación y en el 2011 entró en operación la ampliación con una bomba adicional en cada planta de bombeo que incrementó su capacidad en $1.33 \text{ m}^3/\text{s}$, para dar un total de $5.33 \text{ m}^3/\text{s}$. Esta ampliación ha satisfecho la demanda de agua dulce de la zona costa.



Fuente:CEA, 2011

Fig. 3.5 Evolución histórica del suministro de agua del ARCT

En la Tabla 3.7 se observan los gastos máximos, mínimos y promedio del acueducto reportados por la CEA, así como el mes en que se presentaron. Se puede observar que todos los gastos máximos se dieron en los meses de invierno, principalmente en Diciembre, y los mínimos en el mes de Octubre (mes destinado al mantenimiento del acueducto), excepto en 2010, cuando no se bombeó en el mes de Septiembre, tal vez debido a reparaciones después del terremoto de 7.2 grados en la escala de Richter ocurrido en el mes de Abril de ese año en el municipio de Mexicali. El mayor gasto se dio en Diciembre de 2011 con 4,388 l/s, bastante menor que la capacidad máxima de bombeo de 5.33 m³/s del acueducto.

Tabla 3.7. Gastos históricos del ARCT

Año	Qmax (mes)	Qmin (mes)	Qprom
2007	4,171 (Dic)	2,900 (Oct)	3,565
2008	4,091 (Dic)	1,943 (Oct)	3,599
2009	4,091 (Ene)	2,197 (Oct)	3,443
2010	4,081 (Feb))	0 (Sep)	2,558
2011	4,388 (Dic)	119 (Oct)	2,909

Fuente: CEA Reportes técnicos (2007 – 2012)

En 2011, el suministro total de agua para Tecate, Tijuana y Rosarito fue de 117'751,928 m³, con un consumo promedio por persona de 178 litros por día. Ese año, el ARCT suministró 91'728,087 m³, lo que representa el 78% de su demanda de agua.

3.5 Descripción del ARCT.

El acueducto se compone de seis estaciones de bombeo con capacidad de 5.33 m³ 3/s, que elevan el agua 1,061 m a través de 123 km de canales, tuberías y túneles. La potencia total instalada en sus motores es de 132,500 hp.

El abastecimiento de agua al ARCT se realiza a través del canal alimentador “Central Reforma” el cual proviene del Distrito de Riego número 14 mismo que se abastece de la presa “Morelos” que recibe el agua de CILA (Comisión Internacional de Límites y Agua) mediante un tratado internacional firmado entre EE.UU. y México en 1944 en el cual se asignan a nuestro país 1,850 millones de metros cúbicos (1.5 millones de acre-pies) por año provenientes del Río Colorado

El Canal Central “Reforma” cruza la ciudad de Mexicali y se interconecta al propio canal alimentador del Acueducto Río Colorado-Tijuana en el Km. 26+280 desde la primera planta denominada planta de bombeo “PB-0”.

La línea de conducción, con un desarrollo de 123 km hasta la Planta Potabilizadora El Florido donde se entrega en bloque el caudal requerido para su potabilización, cruza la zona desértica de la Laguna Salada, se eleva aproximadamente 1,061 metros de altura y atraviesa la zona montañosa de la Rumorosa mediante dos túneles con longitud de 6,914 metros y 3,871 metros, iniciando en ese punto la zona de gravedad y continuando el recorrido sobre las mesetas de la “Hechicera”, el “Hongo” y Tecate.

El punto de llegada del agua al final de la tubería de conducción se encuentra a una distancia de 6 Km. de la Presa “El Carrizo”; a partir de ese punto el agua hace el recorrido a través del arroyo El Carrizo hasta la presa.

La Figura 3.6 muestra esquemáticamente el desarrollo del Acueducto Río Colorado-Tijuana.

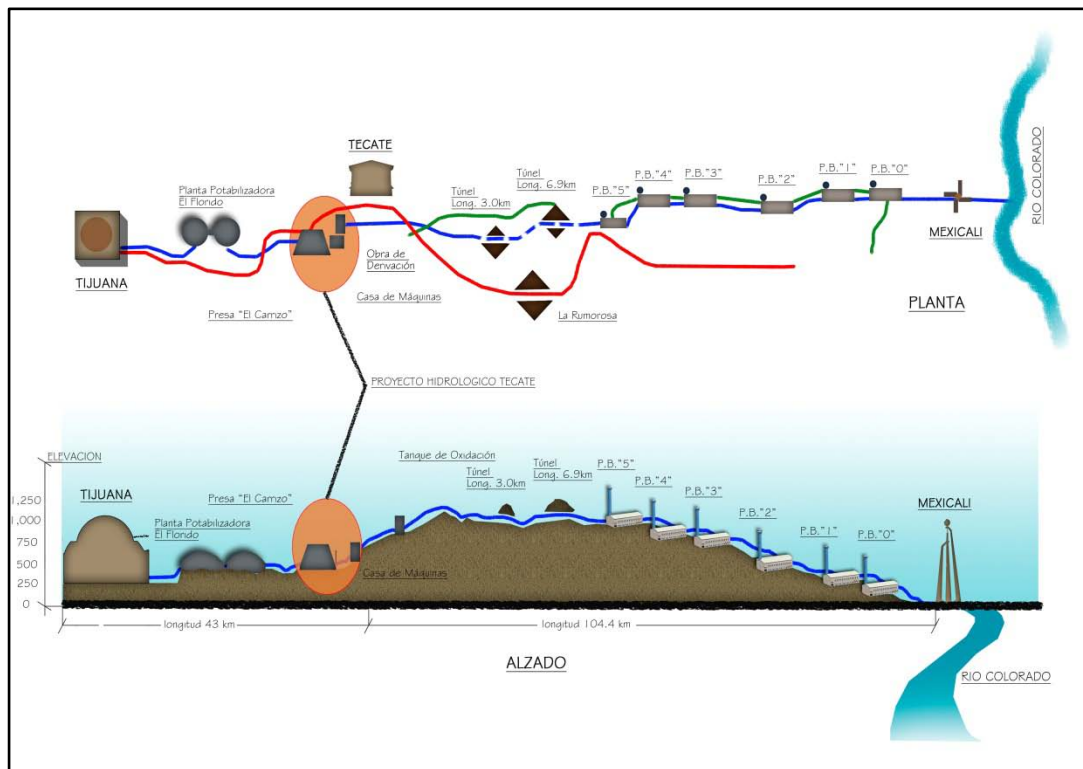


Fig. 3.6. Desarrollo del acueducto Río Colorado-Tijuana

Las plantas que integran el sistema de bombeo del ARCT, se dividen en tres grupos en base a la similitud de sus equipos de bombeo, equipadas cada una de ellas con 5 grupos motor-bomba, de los cuales uno es de emergencia y los 4 restantes suministran el 100% del gasto de diseño. A continuación se describen los equipos de bombeo que las conforman:

Planta de bombeo PB-0.

En esta planta se tienen 5 bombas verticales de flujo mixto, de dos pasos, lubricadas por agua, para 1.5 m³/s y 53.60 metros de carga, accionadas con motores eléctricos de 1,500 hp de potencia.

Plantas de bombeo PB-1, PB-2 y PB-3.

Cada una de estas estaciones de bombeo cuenta con 5 bombas centrífugas horizontales de doble succión, 1 paso, con una capacidad de 1.40 m³/seg. a 140 metros de carga con motores eléctricos de 3,000 hp.

Plantas de Bombeo PB-4 y PB-5.

Estas dos plantas también están equipadas con equipos similares: 5 bombas centrífugas horizontales de doble succión, 2 pasos, de 1.33 m³/s a 334.2 metros de carga acopladas a motores eléctricos de 8,000 hp.

Un resumen de la potencia instalada en el ARCT se muestra en la tabla 3.8:

Tabla 3.8. Potencia instalada en las plantas de bombeo del ARCT.

Planta de Bombeo	Potencia del motor, hp	No. de equipos	Potencia total instalada, hp	Porcentaje del total, %
PB-0	1,500	5	7,500	5.7
PB-1, PB-2, PB-3	3,000	15	45,000	34.0
PB-4 y PB-5	8,000	10	80,000	60.4
Total			132,500	100.0

Se puede observar que las bombas de las plantas de bombeo 4 y 5 son las de mayor potencia, y representan un 60.4% del total de la potencia instalada. Por lo anterior, la mayoría de los indicadores se calcularon en base a las bombas de estas 2 plantas.

3.6 Situación actual del ARCT

El consumo de energía anual del ARCT es en promedio de 402 GWh, lo que se traduce en un costo medio anual de 366 millones de pesos.

En la Tabla 3.9 se observa el comportamiento histórico de la operación del ARCT desde el año 2006. En ella se muestran los volúmenes bombeados, los consumos de energía y los costos por energía. [CEA, Reportes técnicos 2006-2011].

Tabla 3.9. Datos de operación del ARCT

Año	Volumen bombeado (m ³)	Consumo de energía (kWh)	Costo por energía (\$)
2006	100,559,856	399,395,315	271,727,933
2007	112,421,189	450,629,275	346,423,711
2008	113,491,894	451,957,262	525,292,319
2009	108,576,941	433,589,218	368,682,877
2010	80,655,697	322,746,911	308,929,960
2011	91,728,087	352,300,198	376,921,891

Fuente: Elaboración propia con datos de la CEA.

El costo por el consumo de energía del acueducto representa el 82.5% del costo total de operación del sistema de suministro de agua a la zona costa. En la Tabla 3.10 se muestran los costos de operación de los organismos operadores de agua de Tijuana y Tecate (CESPT y CESPTE), donde se pueden apreciar la relación entre los costos fijos y los debidos al consumo de energía del acueducto.

Tabla 3.10. Relación entre los costos fijos de suministro de agua y el costo por energía

Año	Costos de operación de CESPT y CESPTE (Pesos)	Costo por energía (Pesos)	Costo total (Pesos)	Porcentaje del costo por consumo de energía
2008	76,895,712	525,292,319	602,188,031	87%
2009	80,356,008	368,682,877	449,038,885	82%
2010	80,356,008	308,929,960	389,285,968	79%
2011	83,080,076	376,921,891	460,001,967	82%

Fuente: CEA, Reporte Técnico 2011

En la Tabla 3.11 se muestran datos de operación mensuales del ARCT durante el año 2011, en el que se observa que operaron un promedio de 3 bombas diarias por planta en horario base y 3 en horario intermedio (según la clasificación de CFE), evitando la operación en horarios punta y semipunta, cuando las tarifas se incrementan pues se les impone una penalización.

Tabla 3.11. Datos de operación mensual del ARCT en el año 2011

Año 2011	Vol. Bombeado ARCT Mm3	Consumo de agua Mm3	Consumo de energía MWh	Costo energía Millones de pesos	kWh/m ³	\$/kWh	No. de equipos por planta			
							Base	Intermedia	Semipunta	Punta
Ene	9,759	8,637	38,717	35	3.97	0.90	3	3	NA	NA
Feb	9,623	7,119	37,705	35	3.92	0.92	3	3	NA	NA
Mar	11,216	6,162	42,939	41	3.83	0.96	3	3	NA	NA
Abr	7,091	5,346	26,756	25	3.77	0.93	2	2	NA	NA
May	5,472	5,282	20,072	23	3.67	1.14	NA	2	0	0
Jun	5,226	7,160	20,034	25	3.83	1.23	NA	2	0	0
Jul	7,469	9,446	28,125	34	3.77	1.21	NA	3	0	0
Ago	7,729	10,241	29,655	35	3.84	1.17	NA	3	0	0
Sept	9,259	9,719	36,515	44	3.94	1.20	NA	3	0	0
Oct	319	9,504	1,378	3	4.32	1.84	NA	4	0	0
Nov	6,811	8,668	25,989	29	3.82	1.10	NA	1	0	0
Dic	11,754	8,712	44,415	50	3.78	1.13	3	3	NA	NA
Total	91,728	95,997	352,300	377	3.84	1.07				

Se observa que el consumo de agua en la zona costa en los primeros meses del año fue menor al bombeado; el agua sobrante se almacena en la presa El Carrizo para ser utilizada después, cuando la demanda de agua es mayor que la bombeada, como ocurrió en los meses de Junio a Diciembre. En el mes de octubre el bombeo del ARCT se redujo significativamente por razones de mantenimiento, disminuyendo al mismo tiempo la eficiencia energética en los sistemas de bombeo, ya que de un promedio de consumo de energía por m³ bombeado de 3.87 kWh, éste se incrementó a 4.32 kWh. Ese mismo mes el costo por kWh también aumentó, por lo que el costo por bombear un m³ de agua subió de \$1.14 (costo promedio en el año) a \$1.84.

La eficiencia del sistema de bombeo se refleja en la energía utilizada para conducir un metro cúbico de agua. Como se observa en la Tabla 3.12, desde el año 2006 el consumo de energía por unidad de volumen ha fluctuado entre 3.97 y 4.01 kWh/m³ con un promedio de 3.94 kWh/m³.

Tabla 3.12 Indicadores energéticos de la operación del ARCT

Año	Consumo de energía por unidad de volumen (kWh/m ³)	Costo de la energía por kWh (\$/kWh)	Costo de la energía por unidad de volumen (\$/m ³)
2006	3.97	0.68	2.70
2007	4.01	0.77	3.08
2008	3.98	1.16	4.63
2009	3.99	0.85	3.40
2010	4.00	0.96	3.83
2011	3.84	1.07	4.11
2012*	3.72	1.11	4.12

En la Figura 3.7 se puede visualizar la tendencia de estos indicadores:

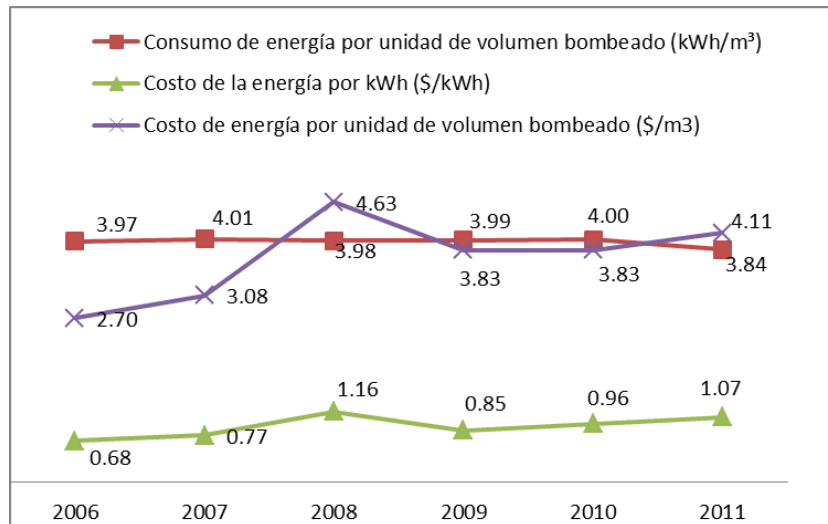


Fig. 3.7 Indicadores energéticos de la operación del ARCT

En contraste, el acueducto Río Colorado-Los Ángeles, en Estados Unidos, tiene una longitud de 389 km y eleva el agua 493 m. Su capacidad es de 51 m³/s y en promedio, usa 1.62 kWh/m³ para transportarla (California Institute for Energy Efficiency 2000). Esto representa el 41% de la energía usada por su contraparte mexicana. De aquí la importancia de evaluar la energía y las emisiones relacionadas con la operación del Acueducto Río Colorado-Tijuana con el fin de encontrar formas de reducirlas.

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE BOMBEO

4.1 Evaluación de sistemas de bombeo

Existen muchas formas de evaluar un sistema de bombeo. Dependiendo del objetivo, la evaluación puede ser del estado físico de los componentes del sistema, su nivel de eficiencia con respecto a la óptima y su capacidad de cubrir los requerimientos de éste eficazmente.

Se revisó exhaustivamente la literatura y se encontró que el Departamento de Energía de Estados Unidos a través del programa de Eficiencia Energética y Energías Renovables ha generado diversas publicaciones y recursos informáticos enfocados a servir de guía para mejorar el desempeño de los sistemas de bombeo y a facilitar su evaluación. Se comprobó que una herramienta práctica y eficaz para tal fin es el paquete de cómputo PSAT (Pumping System Assessment Tool), el cual evalúa sistemas de bombeo usando información del Instituto de Hidráulica de Estados Unidos (HI) sobre desempeños alcanzables por diferentes tipos de bombas, así como la base de datos de Motor Master+ que contiene más de 20,000 referencias sobre comportamientos y eficiencias de motores eléctricos de diferentes fabricantes para calcular ahorros de energía y costos potenciales a partir de datos de campo del sistema. Estos datos, requeridos por el PSAT, deben incluir información básica de diseño sobre la bomba, el fluido y el motor así como el perfil de operación y los costos unitarios de la energía eléctrica (Casada, 2007). En la Figura 4.1 se muestra un ejemplo de la pantalla del programa.

The screenshot displays the PSAT 2008 software interface, which is used for pump system analysis. It is divided into several sections:

- Condition A and Condition B:** Two columns of input fields for pump and motor parameters. Both conditions are set to 'Vertical turbine' and 'Direct drive'. Key inputs include Pump rpm (890), Kinematic viscosity (0.90 cS), Specific gravity (1.000), # stages (2), Line freq. (60 Hz), kW (1250), Motor rpm (890), Eff. class (Specified (below)), FL efficiency (95.3%), Voltage (4160), Full-load amps (199.9), Size margin (10%), Operating fraction (0.886), \$/kwhr (0.0760), Flow rate (1480 L/s), Head (56.2 m), Load estim. method (Current), Motor amps (185.3), and Voltage (4208 V).
- Comparison Table:** A table comparing 'Existing' and 'Optimal' values for various parameters across both conditions.

	Condition A		Condition B		
	Existing	Optimal	Existing	Optimal	Units
Pump efficiency	70.2	92.0	68.4	92.0	%
Motor rated power	1250	1000	1250	2000	kW
Motor shaft power	1159.6	885.0	1191.5	885.0	kW
Pump shaft power	1159.6	885.0	1191.5	885.0	kW
Motor efficiency	95.4	96.0	95.3	95.4	%
Motor power factor	90.0	80.0	90.3	66.1	%
Motor current	185.3	158.2	187.0	189.7	amps
Motor power	1216.0	922.1	1249.6	928.0	kW
Annual energy	9437.6	7157.0	9698.7	7202.3	MWh
Annual cost	717.3	543.9	737.1	547.4	\$1000
Annual savings potential, \$1,000		173.3		189.7	
Optimization rating, %		75.8		74.3	
- Documentation section:** Includes 'Log file controls' and 'Summary file controls' with buttons for creating, adding, retrieving, and deleting logs and summary files. It also has a 'Condition A Notes' and 'Condition B Notes' section with text input fields.

Fig. 4.1. Pantalla del paquete de cómputo PSAT con datos de la PB-0.

Características del PSAT.

- Es una herramienta de cuantificación de la oportunidad.
- Se basa en datos de campo medidos o estimados del comportamiento eléctrico y del fluido.
- Usa algoritmos del Instituto de Hidráulica para las eficiencias óptimas alcanzables por las bombas.
- Utiliza curvas de desempeño de los motores desarrolladas a partir de datos promedio disponibles en Motor Master+.
- PSAT está basado en comportamientos de componentes y puede ser usado para evaluar el comportamiento a este.

- Pero también puede ser usado para evaluar condiciones a nivel de sistema.

El PSAT calcula la carga de la bomba con los datos de presión y flujo medidos por el usuario. Requiere los siguientes datos de entrada: Información de diseño de la bomba y el fluido; información de diseño del motor; perfil de operación y costo de la energía eléctrica.

Información de diseño de la bomba y el fluido.

- Tipo de bomba.
- Velocidad de rotación.
- Gravedad específica del fluido.
- Viscosidad del fluido.

Información de diseño del motor.

- Potencia del motor.
- Clase de eficiencia.
- Voltaje.
- Amperaje de placa.
- Porcentaje de margen de operación (Factor de servicio).

Perfil de operación del equipo de bombeo.

- Fracción de operación (Porcentaje de tiempo al año).

Costo de la energía eléctrica.

- Costo promedio del kWh.

Datos de campo (medidos o estimados).

- Gasto.

- Carga total de la bomba.
- Voltaje actual.
- Corriente actual.

Con base en los datos de entrada, el PSAT genera los siguientes resultados:

- Eficiencia y potencia en la flecha estimadas de la bomba y del motor, tanto para el equipo existente como para el equipo óptimo comercialmente disponible.
- Consumo anual y costo de energía para el equipo existente y el óptimo.
- Ahorros potenciales de energía por año.
- Calificación de la optimización del equipo existente (una calificación de 100 es equivalente a un equipo considerado como “estado del arte” o del más alto nivel de eficiencia).

Para conocer el grado de eficiencia en la utilización de la energía eléctrica en sistemas de bombeo se requiere la realización de un diagnóstico de eficiencia electromecánica con lo cual se determinará la factibilidad técnica y con ello la económica para decidir si es conveniente la aplicación de recursos económicos para el ahorro de energía.

El primer paso es llevar a cabo una búsqueda y recopilación de información técnica y administrativa con sumo cuidado, puesto que de la veracidad y amplitud de los datos, depende en gran medida el alcance y confiabilidad de los resultados.

Estos datos serán después analizados para obtener un panorama de cómo se utiliza (y posiblemente se desperdicia) la energía y para ayudar al auditor a

visualizar qué áreas deberá examinar para reducir los costos por energía. Se identifican cambios específicos, llamados oportunidades de ahorro de energía y se analizan para determinar sus beneficios y su efectividad en cuanto al costo. Las diferentes alternativas para ahorro de energía son entonces evaluadas en términos de sus costos y beneficios y se realiza una comparación económica para establecer prioridades. Finalmente, se crea un plan de acción donde se seleccionan para su implementación los cambios más rentables[5 Ref?].

Un procedimiento se puede resumir como sigue:

1. Revisión de la documentación del sistema, verificación en campo y discusión de la operación de los sistemas con el personal encargado de operarlos.
2. Preparar una descripción detallada del sistema.
3. Preparar un plan de mediciones de campo, identificando las variables a medir (flujo, temperatura, presión, potencia, etc.) y bajo qué condiciones.
4. Realizar las mediciones de acuerdo al plan.
5. Evaluar el desempeño actual del sistema, comparando los datos medidos con la información de diseño (como por ejemplo, las curvas de las bombas).
6. Identificar las opciones técnicas para incrementar la eficiencia del sistema y si es posible, la capacidad de cumplir con los requerimientos de producción.

Entre ellas podrían estar: la rehabilitación de los equipos de bombeo, adecuación del tren de válvulas, cambio de las tarifas eléctricas, corrección del bajo factor de potencia, aplicación de variadores de frecuencia, optimización del número de equipos de bombeo operando y cantidad de horas en operación, administración de la demanda en horarios punta,

ahorro de energía por reducción de pérdidas por aire atrapado e incrustaciones en tuberías, entre otros conceptos.

7. Análisis de cada opción técnica para estimar los costos y ahorros de energía, con el fin de determinar la factibilidad técnica y económica del proyecto; y
8. Preparación de un reporte final con los resultados del análisis (EERE 2006).

4.2 Factores de emisión de contaminantes a la atmósfera en el Estado de Baja California.

Un componente importante de la evaluación de sistemas de bombeo, es la estimación de las emisiones a la atmósfera de gases contaminantes debidas al consumo de electricidad. Para el caso del ARCT la evaluación se hizo utilizando factores de emisión siguiendo las directrices del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) para los inventarios de gases de efecto invernadero. Asimismo, se usaron datos reportados por la Comisión para la Cooperación Ambiental de Norteamérica para el caso de México (Miller, 2002). Estos datos están basados en información del Instituto Nacional de Ecología de Estados Unidos (EPA-AP-42), de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y de Petróleos Mexicanos. Estos factores se adaptaron para Baja California, adaptación que considera los combustibles consumidos en las diferentes tecnologías de generación eléctrica en la matriz energética del Estado, integrada por geotermia (40%), ciclo combinado con gas natural (54%) y vapor (6%), según datos de generación bruta de energía en el año 2010 (CFE, 2011). La contribución de cada una de estas tecnologías a las emisiones

totales depende del tipo de combustible, su contenido de carbón, azufre y nitrógeno, su poder calorífico, la eficiencia de conversión y la capacidad de operación. (Ver Tabla 4.1)

Tabla 4.1. Factores de Emisión de contaminantes por tipo de combustible

Combustible	Unidades	SO ₂	CO ₂	NO _x
Vapor geotérmico	kg/t	0.051	8.46	
Diesel	kg/m ³	8.52	2,659.00	2.88
Combustóleo	kg/m ³	37.68	2,910.00	5.64
Gas natural	kg/m ³	0.0000096	1.92	0.00376

Fuente: Campbell et al, 2010

Los factores de emisión para Baja California calculados en kg/MWh para la matriz energética en operación se muestran en la Tabla 4.2:

Tabla 4.2. Factores de emisión por generación de electricidad
en Baja California, México

	SO ₂	NO _x	CO ₂
Factor de emisión (kg/MWh)	0.169	0.472	266.612

4.3 Indicadores de Sustentabilidad del AECT.

La evaluación del sistema de suministro de agua por el ARCT requiere de una medición, registro y análisis regular de las variables del proceso como base para encontrar las eficiencias y los consumos, además permite contar con elementos técnicos para analizar las condiciones de operación actuales y calcular sus indicadores, definir metas de mejoramiento y revisar el comportamiento en el tiempo, plantear y evaluar posibles ahorros y mejoras, estableciendo las prioridades y tomar decisiones de control.

En este trabajo se proponen un conjunto de indicadores que evalúan los tres aspectos principales del desarrollo sustentable del suministro de agua por el ARCT: impacto social, tales como la extracción de agua del acuífero en comparación con los recursos de agua existentes; el porcentaje de población cubierta por el servicio y la cantidad de agua suministrada y la utilizada por persona, los efectos económicos como la intensidad energética del transporte de agua, el costo de la energía para la conducción del agua y la influencia en el medio ambiente a través de emisiones de GEI asociadas. También se implementó un indicador del comportamiento del sistema para evaluar los posibles costos y ahorros de energía si se lograra el comportamiento óptimo del sistema. Esto se realizó con el software PSAT descrito anteriormente. Las tablas 4.3, y 4.4 resumen los indicadores seleccionados, su descripción, unidades y factores necesarios para calcularlos.

Tabla 4.3. Indicadores sociales, económicos y ambientales de agua-energía del sistema de suministro de agua

Indicador	Descripción	Unidades	Factores
Sociales			
Extracción	Extracción de agua comparada con la cantidad disponible	%	Extracción de agua ($m^3/año$)
			Recursos hidráulicos disponibles ($m^3/año$)
Consumo de agua	Consumo de agua por persona por año	l/capita/día	Uso del agua (l/cap/día)
Cobertura	Acceso al agua potable	%	Población total
			Población servida
Costo del agua en relación al ingreso	La relación entre el costo del agua y el ingreso del usuario	%	Ingreso promedio de una familia en un municipio (\$)
			Tarifa del agua por m^3 (\$/m3)

De energía			
Energía para conducción de agua	Energía consumida por los sistemas de bombeo para conducir el agua, por m ³ bombeado	kWh/m ³	Consumo total de energía por el sistema de bombeo por año (kWh)
			Volumen total bombeado por año (m ³)
Energía utilizada por persona para el suministro de agua	Energía consumida por los sistemas de bombeo para conducir el agua por persona	kWh/capita/año	Consumo total de energía por el sistema de bombeo por año (kWh)
			Población servida (Núm. de personas)

Económicos			
Costo de la energía para la conducción de agua	Costo promedio de la energía por m ³ en un año	Pesos/m ³	Costo total de la energía por año (pesos)
			Volumen total bombeado por año (m ³)
Costo de la energía	Costo promedio de la energía por kWh en un año	Pesos/kWh	Costo total de la energía por año (pesos)
			Consumo de energía total de los sistemas de bombeo por año (kWh)
Costo Total del servicio de agua por persona	Costo promedio del agua por persona en un año	Pesos/capita	Costo total del suministro de agua en un año (pesos)
			Población total servida (núm. De personas)

Ambientales			
Emisiones de CO ₂ relacionados al servicio de agua	Emisiones totales de CO ₂ debidas al suministro de agua en un año	toneladas	Factor de emission para CO ₂ (kg/kWh)
			Consumo de energía total del sistema de bombeo por año (kWh)
Emisiones de NO _x relacionados al servicio de agua	Emisiones totales de NO _x debidas al suministro de agua en un año	toneladas	Factor de emisión para NO _x (kg/kWh)
			Consumo de energía total del sistema de bombeo por año (kWh)
Emisiones de SO ₂ relacionados al servicio	Emisiones totales de SO ₂ debidas al suministro de	toneladas	Emission factor for SO ₂ kg/kWh

de agua	agua en un año		Consumo de energía total del sistema de bombeo por año (kWh)
Emisiones de CO ₂ por persona relacionados al servicio de agua	Emisiones totales de CO ₂ por persona debidas al suministro de agua en un año	kg/persona/año	Emisiones totales de CO ₂ en un año (kg)
			Población total en ese año (núm. de personas)
Emisiones de NO _x por persona relacionados al servicio de agua	Emisiones totales de NO _x por persona debidas al suministro de agua en un año	kg/capita/year	Emisiones totales de NO _x en un año (kg)
			Población total en ese año (núm. de personas)
	Emisiones totales de SO ₂ por persona debidas al suministro de agua en un año	kg/capita/año	Emisiones totales de SO ₂ en un año (kg)
			Población total en ese año (núm. de personas)
Emisiones de CO ₂ por m ³ de agua suministrada	Emisiones of CO ₂ por m ³ de agua bombeada por año	kg/ m ³ /año	Emisiones totales de CO ₂ en un año (kg)
			Población total en ese año (núm. de personas)
Emisiones de NO _x m ³ de agua suministrada	Emisiones of NO _x por m ³ de agua bombeada por año	kg/ m ³ /año	Emisiones totales de NO _x en un año (kg)
			Población total en ese año (núm. de personas)
Emisiones de SO ₂ por m ³ de agua suministrada	Emisiones of SO ₂ por m ³ de agua bombeada por año	kg/ m ³ /año	Emisiones totales de SO ₂ en un año (kg)
			Población total en ese año (núm. de personas)

Tabla 4.4. Indicadores energéticos, económicos y ambientales relacionados con el desempeño del ARCT

Indicador	Descripción	Unidades	Factores
Energéticos			
Eficiencia de la bomba	Razón de la potencia impartida al fluido y la potencia suministrada para accionar la bomba.	%	Potencia del fluido, kW
			Potencia en la fleche de la bomba, kW
Eficiencia del motor	Potencia de salida en la fleche del motor dividida entre la potencia eléctrica de entrada	%	Potencia en la fleche del motor, kW
			Potencia eléctrica suministrada al motor, kW
Potencia eléctrica del motor	La potencia entregada en la flecha de la bomba	kW	Gasto de la bomba, m³/s
			Carga de la bomba, m
			Peso específico del liquido bombeado, kN/m³
			Eficiencia de la bomba,%
Ahorros potenciales de energía anuales	Ahorros potenciales de energía si el equipo existente fuera reemplazado con uno de optima eficiencia	kWh	Entrada de energía eléctrica, kW
			Horas anuales de operación (t)
			Eficiencia actual del sistema, calculado de mediciones de campo, % (η_a)
			Eficiencia óptima del sistema, % (η_o)
Económicos			
Potencial de ahorro anual	Ahorros anuales potenciales si el equipo es reemplazado con equipo de óptima	US\$	Potencial de ahorro de energía anual, kWh
			Costo de la energía por kWh, pesos
Valoración de la optimización	Valoración global de la eficiencia actual del sistema relativa a la configuración optima de la bomba y el motor, expresada como porcentaje	%	Potencia óptima del motor, kWh
			Potencia actual del motor, kWh

Ambientales			
Emisiones de CO ₂ potencialmente evitadas al año	Emisiones de CO ₂ evitadas si se hiciera una reducción en el consumo de energía	toneladas	Potencial de ahorro de energía anual, kWh
			Factor de emission de CO ₂ , kg/kWh
Emisiones de SO ₂ potencialmente evitadas al año	Emisiones de SO ₂ evitadas si se hiciera una reducción en el consumo de energía	toneladas	Potencial de ahorro de energía anual, kWh
			Factor de emission de SO ₂ , kg/kWh
Emisiones de NOx potencialmente evitadas al año	Emisiones de NOx evitadas si se hiciera una reducción en el consumo de energía	toneladas	Potencial de ahorro de energía anual, kWh
			Factor de emission de NOx, kg/kWh

Los indicadores fueron aplicados al ARCT usando datos de Enero de 2007 a Mayo de 2012 para encontrar la tendencia del uso de la energía hacia la sustentabilidad. También se construyeron escenarios para descubrir los beneficios potenciales de implementar acciones propuestas en los escenarios analizados, como la reducción en la demanda de agua por los consumidores finales y el incremento en la eficiencia de los sistemas de bombeo en diferentes tiempos en el mediano plazo.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA AL CASO DE ESTUDIO

5.1 Evaluación del consumo de energía de los sistemas de bombeo del acueducto Río Colorado–Tijuana.

Se evaluó cuantitativamente el consumo de energía eléctrica de los sistemas de bombeo del acueducto para comparar la eficiencia de operación actual con la óptima, y detectar así oportunidades de mejora.

En las tablas 5.1 a 5.3 se muestran datos de diseño y operación del ARCT obtenidos el mes de Marzo de 2010 cuando operaban 2 bombas en cada planta. La fracción de operación se refiere a la proporción del tiempo que operan los equipos. En el acueducto se evita en lo posible su operación en los horarios “pico” en los cuales la tarifa eléctrica se eleva considerablemente.

Tabla 5.1. Datos de diseño y operación de la planta de bombeo PB-0

Planta de Bombeo	PB-0
Datos de la Bomba y el fluido	
Tipo de bomba	Vertical de flujo mixto
RPM de la bomba	890
Accionamiento	Directo
Unidades	L/s, m, kW
Visc. cinemática (cS)	0.897
Gravedad específica	1
No. de etapas	2
¿Velocidad Específica Fija?	Si
Datos del motor	
Frecuencia de Línea	60 Hz

Planta de Bombeo	PB-0
HP (kW)	1500 (1119)
RPM del motor	890
Clase de eficiencia	95.3
Voltaje	4160 V
Amperaje a plena carga	199.9
Factor de Servicio	10
Datos de operación y costo	
Fracción de operación	0.8858
\$/kWh (USD)	0.95
Datos de campo	
Grupo Motor Bomba (GMB)	2
Gasto, L/s (Marzo 2010)	1480
Carga de la bomba, m	56.2
Amperaje del motor, A	185.33
Voltaje, V	4208

Tabla 5.2. Datos de diseño y operación de las plantas de bombeo PB-1, PB-2 y PB-3

Planta de Bombeo	PB-1	PB-2	PB-3
Datos de la Bomba y el fluido			
Tipo de bomba	Doble succión		
Velocidad de rotación, rpm	1800		
Accionamiento	Directo		
Unidades	l/s, kW		
Visc. cinemática (cS)	0.897		
Gravedad específica	1		
No. de etapas	1		
¿Vel. Esp. Fija?	si		
Datos del motor			
Frec. Línea	60 Hz		
HP (kW)	3000 (2237.1)		
Velocidad de rotación del	1800		

Planta de Bombeo	PB-1		PB-2		PB-3	
motor, rpm						
Clase de eficiencia	Estándar					
Voltaje, V	4160					
Amperaje a plena carga, A	355.8					
% Margen (tamaño)	10					
Datos de operación y costo						
Fracción de operación	0.8858					
\$/kWh (pesos)	0.95					
Datos de campo						
Planta de Bombeo	PB-1		PB-2		PB-3	
Grupo Motor Bomba	2	3	1	3	3	4
Gasto, L/s (Marzo 2010)	1489	1400	1400	1350	1400	1400
Carga de la bomba, m	139	141	141	144	142	142
Amperaje del motor, A	365	349	375	360	360	356
Voltaje, V	4250	4233	4243	4238	4287	356.33

Tabla 5.3. Datos de diseño y operación de las plantas de bombeo PB-4 y PB-5

Planta de Bombeo	PB4	PB-5
Datos de la Bomba y el fluido		
Tipo de bomba	Doble succión	
Velocidad de rotación, rpm	1800	
Accionamiento	Directo	
Unidades	l/s, kW	
Viscosidad cinemática (cS)	0.897	
Gravedad específica	1	

Planta de Bombeo	PB4		PB-5	
No. de etapas	2			
¿Vel. Esp. Fija?	si			
Datos del motor				
Frec. Línea	60 Hz			
HP (kW)	8000 (5960)			
Velocidad de rotación del motor, rpm	1800			
Clase de eficiencia	Estándar			
Voltaje, V	4160			
Amperaje a plena carga, A	355.8			
% Margen (tamaño)	10			
Datos de operación y costo				
Fracción de operación	0.8858			
\$/kWh (pesos)	0..95			
Datos de campo				
Grupo Motor Bomba	2	3	1	3
Gasto, L/s (Marzo 2010)	1320	1380	1283	1300
Carga de la bomba, m	344.16	342.28	349	348
Amperaje del motor, A	849	840	845	844
Voltaje, V	4198.6	4221.1	4185	4201

5.2 Ahorros potenciales de energía en el ARCT

Una vez alimentados los datos de entrada al PSAT para cada grupo motor bomba en operación de cada una de las plantas, se ejecutó el programa, el cual

arrojó resultados para cada una de ellas como los que se muestran a manera de ejemplo en las tablas 5.4 a 5.7.

Tabla 5.4. Resultados del PSAT para la planta de bombeo PB-0

	PB-0			
	GMB-2		GMB-3	
	Existente	Óptimo	Existente	Óptimo
Eficiencia de la bomba, %	70.2	92.0	68.4	92.0
Potencia nominal del motor, kW	1,250	1,000	1,250	1,000
Potencia del motor en la flecha, kW	1,159.6	885.0	1,191.5	885.0
Eficiencia del motor, %	95.4	96.0	95.2	96.0
Corriente del motor, A	185.3	158.2	187.0	156.4
Potencia del motor, kW	1,216.0	922.1	1,252.0	922.1
Energía anual, MWh	9,437.6	7,157.0	9,717.2	7,157.0
Costo anual, USD/1000	717.3	543.9	738.5	543.9
Potencial de ahorro anual, Pesos/\$1,000		2,166.25		2,432.5
% de optimización		75.8		73.7

Tabla 5.5. Resultados del PSAT para la planta de bombeo PB-1

	PB-1			
	GMB-3		GMB-4	
	Existente	Óptimo	Existente	Óptimo
Eficiencia de la bomba, %	85.4	92.8	86.1	92.8
Potencia nominal del motor, kW	2,250	2,500	2,250	2,500
Potencia del motor en la flecha, kW	2368.7	2,179.9	2,246.1	2,083.0
Eficiencia del motor, %	95.5	96.6	95.6	96.6
Amperaje del motor, A	365.0	345.8	365.0	332.9
Potencia del motor, kW	2,481.3	2,255.8	2,350.6	2,156.3
Energía anual, MWh	19,258.0	17,507.9	18,243.6	16,735.5
Costo anual, USD/1000	1,463.6	1,330.6	1,386.5	1,271.9
Potencial de ahorro anual, Pesos/\$1,000		1,662.5		1,432.5
% de optimización		90.9		91.7

Tabla 5.6. Resultados del PSAT para la planta de bombeo PB-5

	PB-5			
	GMB-1		GMB-3	
	Existente	Óptimo	Existente	Óptimo
Eficiencia de la bomba, %	82.0	92.6	82.7	92.8
Potencia nominal del motor, kW	6,000	5,500	6,000	5,500
Potencia del motor en la flecha, kW	5,346.9	4,733.7	5,357.6	4,776.4
Potencia de la bomba en la flecha, kW	5,346.9	4,733.7	5,357.6	4,776.4
Eficiencia del motor, %	96.2	96.7	96.2	96.7
Amperaje del motor, A	845.0	759.4	844.0	763.5
Potencia del motor, kW	5,558.7	4,897.3	5,569.8	4,941.1
Energía anual, MWh	43,142.9	38,009.5	43,229.0	38,349.6
Costo anual, USD/\$1000	3,278.9	2,888.7	3,285.4	2,914.6
Potencial de ahorro anual, Pesos/\$1,000		4,876.25		4,635
% de optimización		88.1		88.7

Algunos aspectos a resaltar de los resultados son los siguientes:

- En la planta PB-0, la eficiencia de la bomba 2 es de 70.2% y la de la bomba 3 es de 68.4%, cuando lo óptimo para ese tipo de bomba es de 92%, observándose así una oportunidad de mejora en este rubro.
- La eficiencia de los motores existentes es aceptable (95.4%), ya que se acerca bastante a la óptima (96%).
- El porcentaje de optimización global es bueno, siendo del 85.9% en promedio.
- La PB-1 presenta un mejor desempeño en ambas bombas, aunque se detecta una sobrecarga en los motores, ya que su potencia nominal es de 2 250 kW y su potencia de operación es de 2 368.7 kW. A pesar de lo anterior, el PSAT otorga un porcentaje de optimización del 91.3% en promedio a esta planta. En las plantas de bombeo PB-3 y PB-4 se

presentan situaciones similares, como son eficiencias regulares en las bombas y motores sobrecargados, con un porcentaje de optimización promedio del 85.9% y del 88.9%.

- Las plantas PB-4 y PB-5 exhiben un mejor desempeño con buenas eficiencias actuales en las bombas; sin embargo, se detecta capacidad sobrada de los motores, lo que significa otra oportunidad de mejora.

En cuanto los ahorros potenciales de energía y costos, los resultados pueden resumirse como se muestra en la Tabla 5.7.

Tabla 5.7. Ahorros potenciales anuales en las plantas de bombeo del ARCT

	Ahorros Potenciales en un Año	
	Energía (MWh)	Costo de Energía (Pesos)
PB-0	4 836	\$4'598750
PB-1	3 528	\$3'470,000
PB-2	5 469	\$5'195,000
PB-3	4 224	\$4'012500
PB-4	8 149	\$7'741,250
PB-5	10 013	\$9'511,250
Total	35 949	\$34'528,750

En resumen, si en el ARCT se tuvieran las eficiencias y capacidades óptimas en todos los equipos de bombeo, se podría tener un ahorro de energía anual de 35 949 MWh y un ahorro económico de \$34'528,750 pesos.

5.3 Evaluación de las emisiones por consumo de energía en los sistemas de bombeo del ARCT

Con respecto a las emisiones que se dejarían de producir por una operación óptima del ARCT según lo analizado en la sección anterior en cuanto al ahorro

de energía, se obtuvieron los siguientes resultados: 9,656.33 toneladas de CO₂, 6.08 toneladas de SO₂ y 16.92 toneladas de NO_x evitados.

El gas que se emite en mayor cantidad por la operación del ARCT es el CO₂, y como se observa en la Figura 5.1, en el año 2007 la emisión por usuario del ARCT de los municipios de Tijuana, Rosarito y Tecate debida a esta actividad fue de 6.36×10^{-02} toneladas, (63.6 kg) incrementándose en 2008 a 7.01×10^{-02} toneladas (70.1 kg). Las emisiones de SO₂ y NO_x son menores pero no dejan de ser significativas y representan un riesgo latente a la salud si se siguen incrementando, debido a que éstos son gases altamente tóxicos cuando se dan en grandes concentraciones.

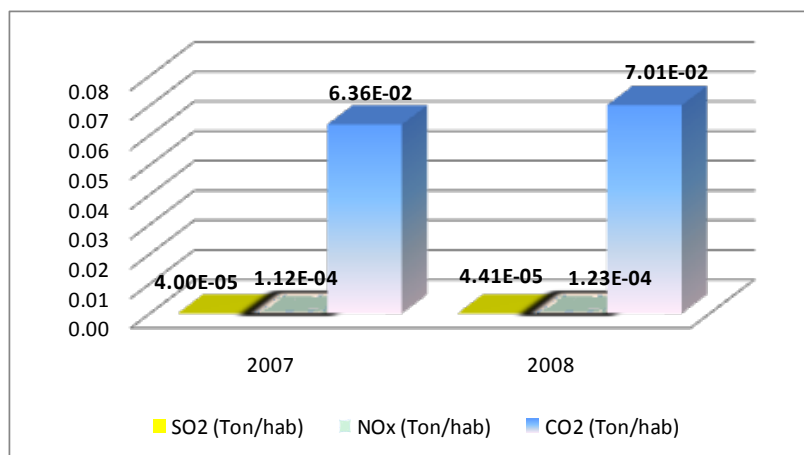


Fig. 5.1. Emisiones debidas a la operación del ARCT por usuario.

La Tabla 5.8 presenta datos reportados por la Agencia Internacional de Energía (IEA por sus siglas en inglés) de emisiones de CO₂ per cápita para diferentes regiones del mundo. Las emisiones en México son de 3.72 Toneladas de CO₂ por persona, menor que el promedio mundial y de los países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), pero mayor que las

emisiones en los países latinoamericanos. (México se encuentra dentro de la OCDE y no está considerado en los países latinoamericanos).

Tabla 5.8. Emisiones per cápita debidas a la generación eléctrica (IEA, 2011)

País/Región	CO2/hab (t)
OECD	9.83
Mundo	4.29
México	3.72
Latinoamérica	1.80
Brasil	1.74

Estas cifras indican que se deben realizar grandes esfuerzos por disminuir las emisiones, ya que la contribución de México al calentamiento global en Latinoamérica supera con mucho a los países que integran esta región, incluyendo a Brasil.

La Figura 5.2 muestra la evolución de las emisiones al ambiente de CO₂, NO_x y SO₂ del año 2006 al 2010 y la tendencia es ascendente, excepto para el año 2010, cuando se dejó de bombear varias semanas debido al terremoto de 7.2 grados que afectó a la región.

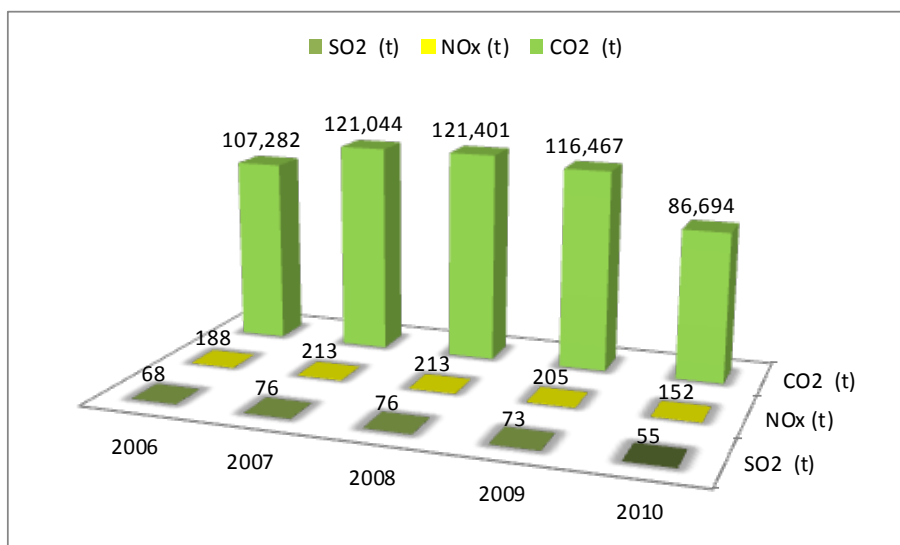


Fig. 5.2 Emisiones debidas a la operación del ARCT

5.4 Indicadores de sustentabilidad del sistema de suministro de agua del ARCT.

En esta sección se presentan gráficamente los resultados obtenidos después de calcular los indicadores de sustentabilidad del ARCT para el periodo de Enero del 2007 a Mayo del 2012, con el fin de analizar las tendencias y detectar su avance hacia la sustentabilidad.

Indicadores sociales

Uno de los hitos recientes más importantes ha sido el reconocimiento en julio de 2010 por la Asamblea General de Naciones Unidas del derecho humano al agua y al saneamiento, estableciendo que el agua debe ser:

Suficiente. El abastecimiento de agua de cada persona debe ser continuo y suficiente para los usos personales y domésticos. Estos usos comprenden normalmente el consumo, el saneamiento, la preparación de alimentos, lavado de la ropa, higiene personal y del hogar. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), entre 50 y 100 litros de agua por persona al día son necesarios para asegurar que las necesidades más básicas están cubiertas.

Segura. El agua necesaria para cada uso personal o doméstico debe ser potable, por lo tanto, libre de microorganismos o sustancias químicas o radiactivas que puedan constituir una amenaza para la salud de una persona. Las medidas de seguridad del agua potable se definen generalmente por las normas nacionales y/o las normas locales para ésta.

Aceptable. El agua debe ser de un color aceptable, olor y sabor para cada uso personal o doméstico. Todas las instalaciones y servicios de agua deben ser

culturalmente apropiados y sensibles a las necesidades de género, ciclo vital y la intimidad.

Físicamente accesible. Toda persona tiene derecho a un servicio de agua y saneamiento que es físicamente accesible dentro o en las inmediaciones del hogar, institución educativa o lugar de trabajo. Según la OMS, la fuente de agua tiene que estar a menos de 1.000 metros del hogar y la recolección no debe superar los 30 minutos.

Económicamente accesible. Las instalaciones de agua, y el agua y los servicios deben estar al alcance de todos. El Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) indica que los costos del agua no deben superar el 3 por ciento del ingreso familiar.

- **Extracción de agua del acuífero en relación a la disponibilidad, o grado de presión hídrica**

El porcentaje que representa el agua empleada en usos consuntivos (extracción) respecto al agua renovable es un indicador del grado de presión que se ejerce sobre el recurso hídrico en un país, cuenca o región. Se considera que si el porcentaje es mayor al 40% se ejerce una fuerte presión sobre el recurso.

A nivel nacional, México experimenta un grado de presión del 17.5%, lo cual se considera de nivel moderado; sin embargo, la zona centro, norte y noroeste del país experimenta un grado de presión fuerte sobre el recurso. (CNA 2011)

En el año 2009, el agua renovable media en Baja California fue de 4,667 millones de m³, mientras que el total de agua concesionada fue de 3,420

millones de m³ (CNA, 2011), por lo que el indicador del grado de presión hídrica fue de 73.3 %, mucho mayor que la media nacional, el cual se considera alto.

- **Consumo de agua por persona**

El Reporte 2012 de las Naciones Unidas sobre las Metas del Milenio para el Desarrollo indica que el consumo de agua promedio es de entre 200 y 300 litros por persona por día para la mayoría de los países en Europa y de menos de 10 litros en países como Mozambique. En un estudio hecho en Cd. Juárez, Chihuahua, México, se encontró que el promedio de agua servida por usuario era de 279 l/hab/día (Cervera 2007). En Baja California, la zona costa es la que registra mayor escasez de agua y sus consumos por persona han fluctuado desde el 2006 de 168 a 186 l/pers/día, con una tendencia hacia la baja, como se ve en la Figura 5.3.

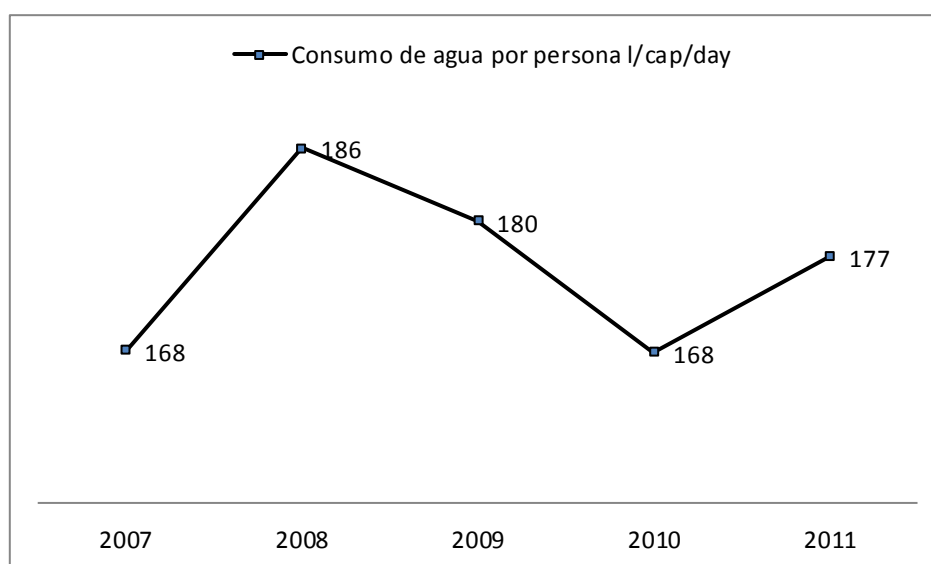


Fig. 5.3. Consumo de agua por persona en litros por persona por día en la zona costa de Baja California.

El alto costo del agua puede ser una de las razones para el consumo de moderado a bajo que presenta la zona costa ya que es menor que la dotación marcada por las normas de proyecto de agua potable mostradas en la Tabla 3.4 (220 l/persona/día para Tijuana y Rosarito y 250 l/hab/día para Tecate). Sin embargo, en el municipio de Mexicali, donde el agua es abundante y barata se presentan patrones de consumo mayores, como lo muestra la Figura 5.4. El consumo fluctúa entre 350 y 387 l/hab/día, cuando la dotación es de 300 l/hab/día. Este desbalance entre la disponibilidad y demanda de agua en las diferentes zonas del estado puede acarrear conflictos de suministro y cobertura de las necesidades de la población de este recurso.

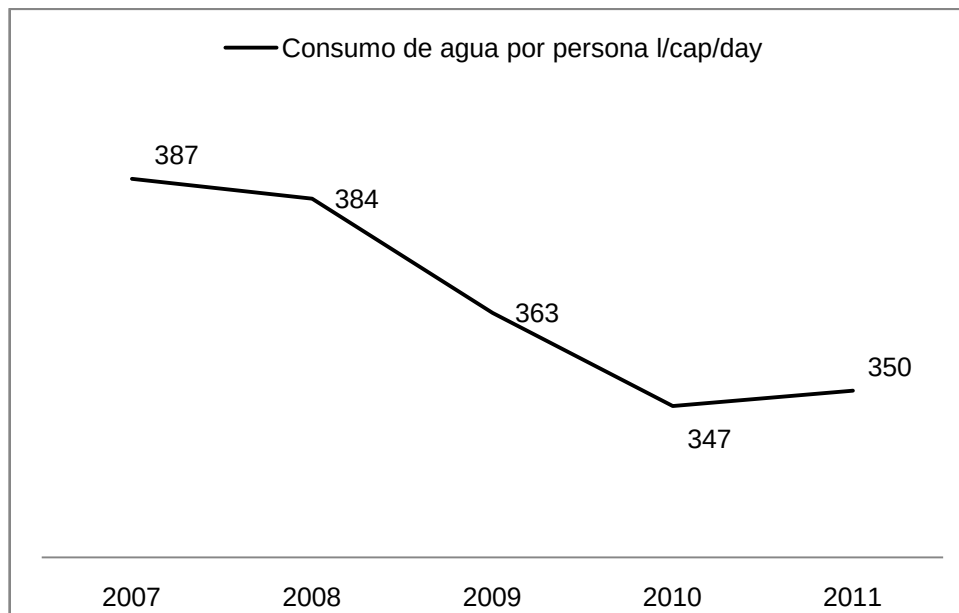


Fig. 5.4. Consumo de agua por persona en litros por persona por día en el municipio de Mexicali, Baja California.

- **Cobertura.**

La Comisión Estatal del Agua (CEA) fue creada con el objetivo principal de desarrollar y coordinar los sistemas relacionados con la entrega de agua en bloque a las comunidades del Estado, planear, regular y coordinar los sistemas de distribución de agua potable y recolección, tratamiento y disposición de aguas residuales, así como su reúso. Entre sus metas principales está el crecimiento en término reales en la cobertura de los servicios de agua potable. La Figura 5.5 muestra que del 2006 al 2010 se incrementó el porcentaje de personas que reciben el servicio de agua potable en la zona costa en un 5.29%, aunque este avance disminuyó en 2011 un 0.92% y en el 2012 bajó aún más para tener un 97.6% de cobertura hasta el mes de mayo. Esto puede deberse a las altas tasas de migración que se registran en la zona, por lo que deben redoblar esfuerzos para regresar la tendencia hasta llegar al 100%

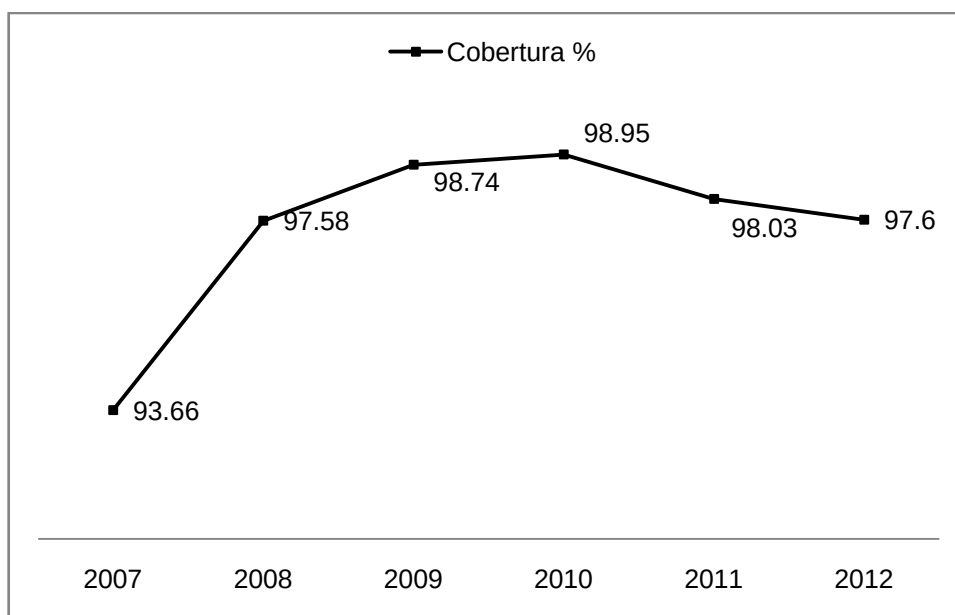


Fig. 5.5. Cobertura en el servicio de agua potable en la zona costa del estado de Baja California

- **Costo del agua en relación al ingreso.**

El Programa de Desarrollo de las Naciones Unidas (UNDP) establece que el agua debe ser accesible para todos, y sugiere que su costo no debe exceder del 3% del ingreso familiar.

La tarifa de agua en Tijuana está dada en la Tabla 5.9:

Tabla 5.9. Tarifas residencial de agua potable en Tijuana, B.C.

DE (m ³)	A (m ³)	IMPORTE
0	5	67.55*
6	10	13.67
11	15	13.97
16	20	15.94
21	25	26.73
26	30	27.63
31	35	34.91
36	40	35.22
41	45	39.82
46	50	39.97
51	60	46.52
61	200000	46.85

* De 0 a 5 m³ cargo mínimo por consumo de agua

Fuente: CESPT 2012

Según las estadísticas mostradas en la Figura 5.3, el consumo de agua diario promedio por persona en la zona costa es de 177 litros. Si se consideran 4 personas por vivienda, se consumen, en promedio, 20 m³ de agua al mes, con un costo de \$306.65 según la tarifa para el año 2012. Esta cifra corresponde a una tarifa de \$15.33 pesos por m³. Comparada con la de Cd. Juárez Chihuahua, mencionada en el estudio referido anteriormente, es de \$8.5 pesos/m³ para el mismo rango de consumo, significativamente menor. La media del ingreso en los hogares en Baja California es de \$5,400/mes (INEGI 2010). El indicador de costo del agua

es $\$306.65/\$5,400 = 0.051$. Es decir, el costo del agua representa el 5.1% del ingreso familiar, mayor al recomendado por la ONU. Comparativamente, en la región del acuífero de Artois Picardie en Francia, con aproximadamente 5 millones de habitantes, el peso del recibo del agua con respecto a su ingreso es del orden del 2%. (Courtecuisse, 2005)

Indicadores de energía

- **Energía para conducción de agua.**

Estos indicadores se utilizan para medir la intensidad energética de los servicios de agua. Entre los calculados se encuentran el consumo de energía por unidad de volumen en la Figura 5.6 y la energía utilizada por persona para el suministro de agua en la Figura 5.7

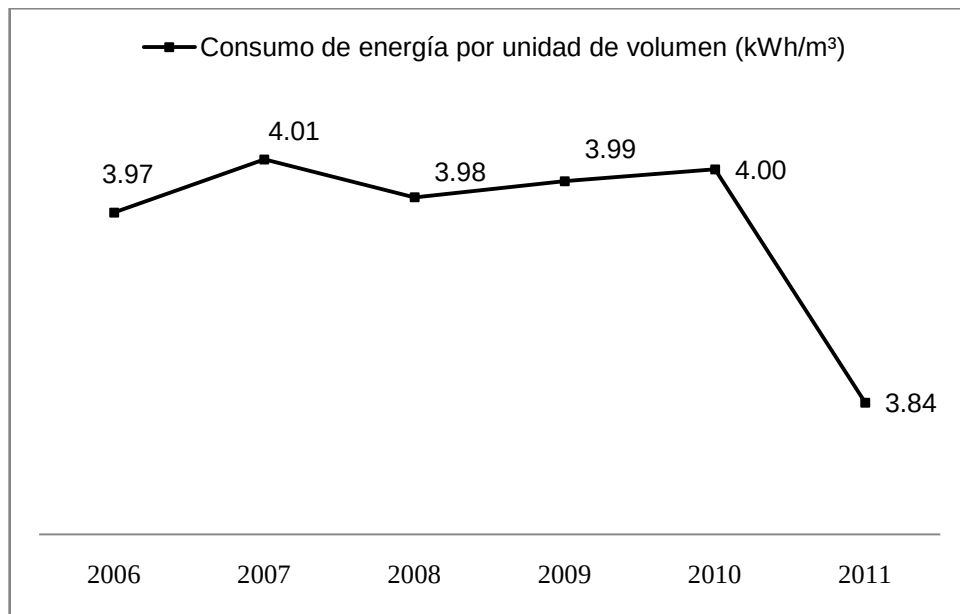


Fig. 5.6. Consumo de energía por unidad de volumen bombeado por el ARCT

Como se mencionó en el capítulo 5, el acueducto Río Colorado-Los Ángeles, en California, Estados Unidos, usa 1.62 kWh/m^3 para transportar el agua. El ARCT utiliza más del doble de la energía para conducirla, por lo que su ineficiencia es evidente.

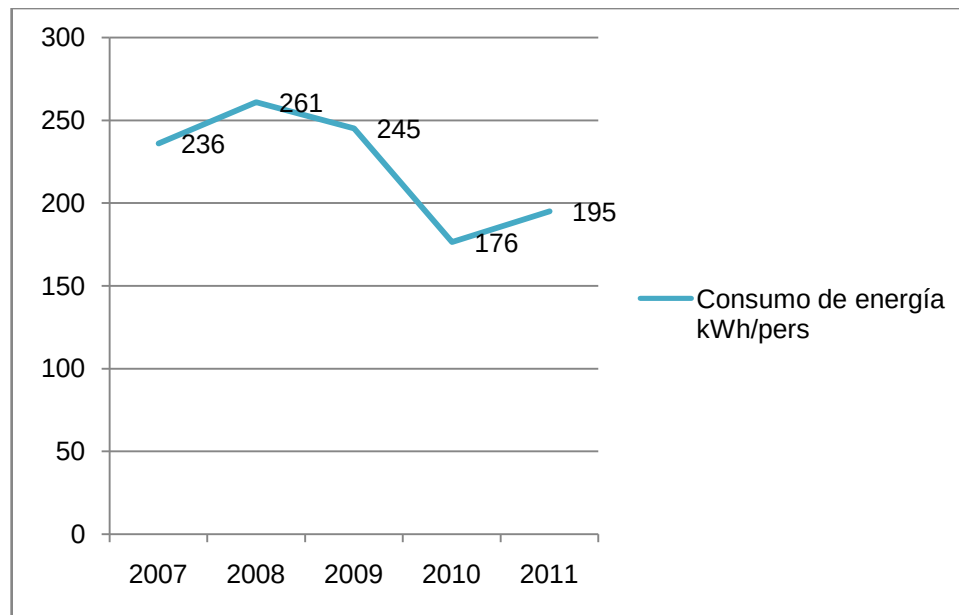


Fig. 5.7. Energía utilizada en el ARCT al año por persona servida

Indicadores económicos.

Los costos de conducción en un sistema de suministro de agua se deben principalmente al consumo de electricidad por bombeo, y el ARCT no es la excepción, dada la gran distancia y elevación a donde debe conducirla. En esta sección se presentan tres indicadores: el costo de conducción por unidad de volumen bombeado, el costo de la energía eléctrica por kWh utilizada para tal fin y el costo por usuario atendido desde el año 2007.

- **Costo de la energía para la conducción de agua.**

En la Figura 5.8 se muestra el costo de la energía por unidad de volumen, observándose un incremento inusual en 2008 con una pendiente menos pronunciada pero ascendente hasta el mes de mayo de 2012.

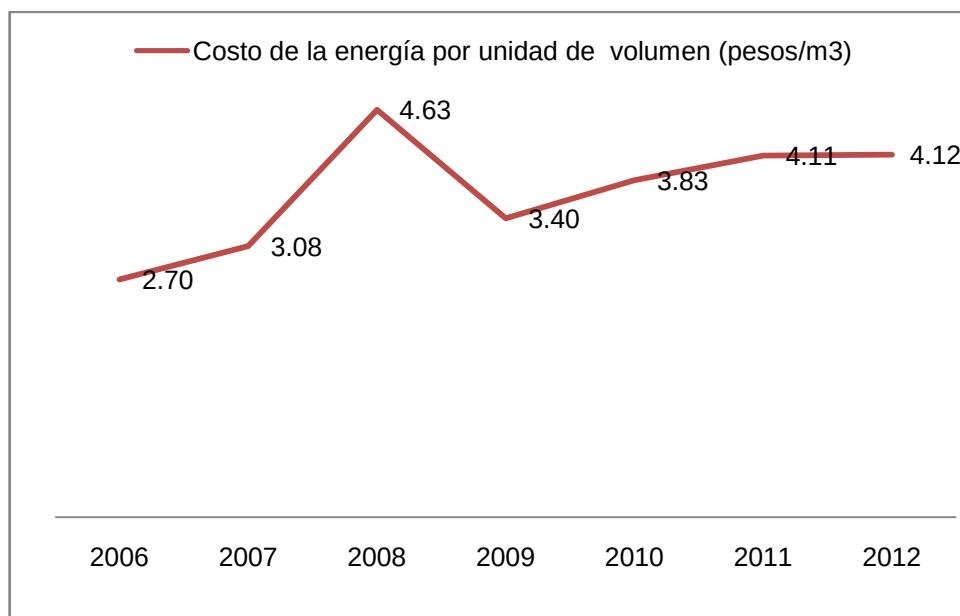


Fig. 5.8. Costo de la energía eléctrica por unidad de volumen bombeado por el ARCT

- **Costo de la energía**

En la Figura 5.9 se muestran los incrementos en el costo del kWh, indicando un costo significativamente mayor en el 2008.

Analizando los reportes de operación de ese año, se encontró que en los meses de Mayo a Septiembre se operaron 3 equipos de bombeo en horario semipunta y de Mayo a Julio se trabajó con un equipo en horario punta, lo cual incrementa considerablemente la tarifa de energía eléctrica.

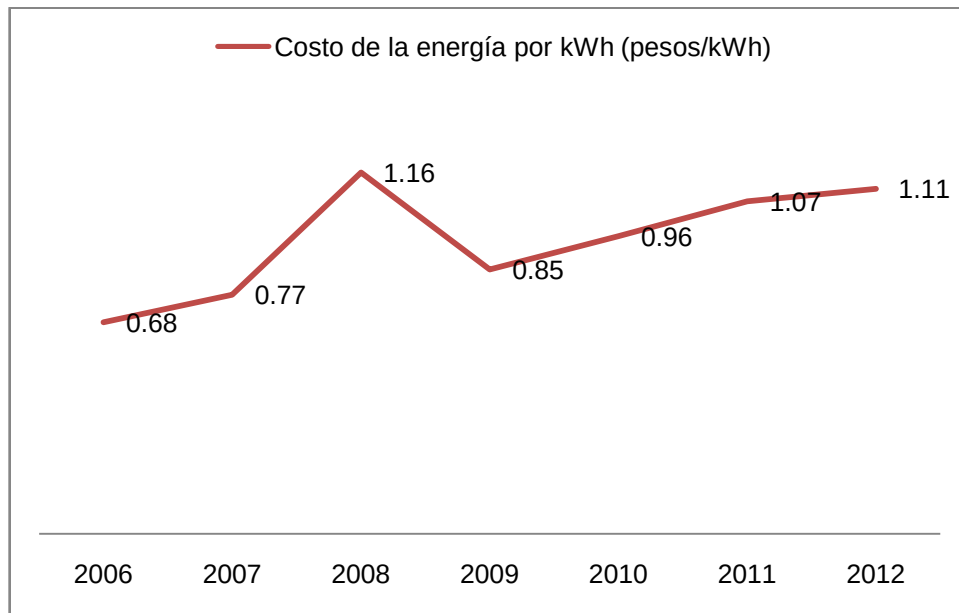


Fig. 5.9. Costo de la energía eléctrica por kWh utilizada para bombeo por el ARCT

- **Costo del servicio de agua por persona**

En la Figura 5.10 se observa la cantidad invertida por persona para conducir el agua a la zona costa del estado, observándose un aumento de \$181 pesos en 2007 a \$209 pesos en 2011. Esto pudiera relacionarse a un incremento en la cobertura del servicio a un porcentaje mayor de habitantes en 2011, como se indicó en la Figura 5.5.

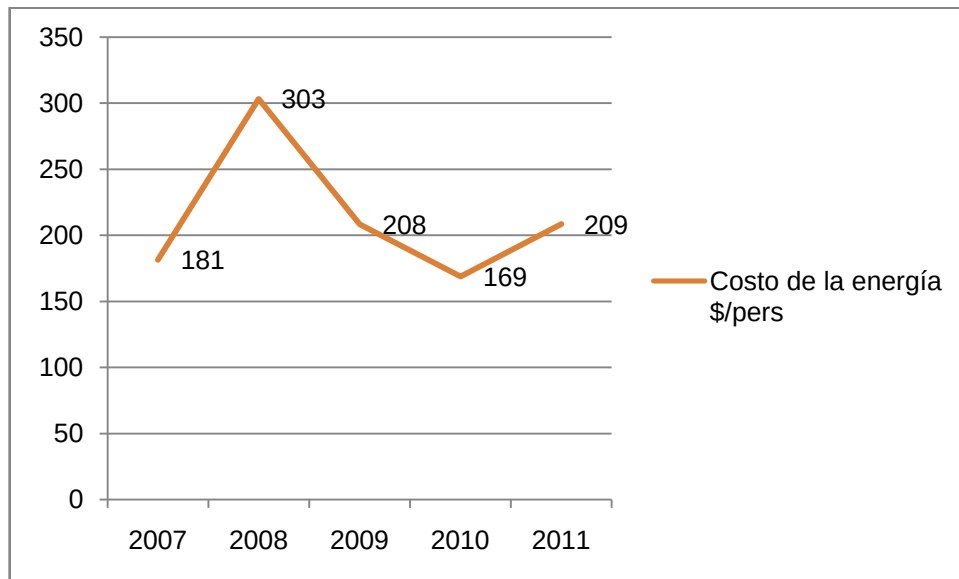


Fig. 5.10. Costo de la energía eléctrica para conducción de agua por persona

Indicadores ambientales.

Para evaluar el impacto histórico al medio ambiente de bombear el agua a la zona costa, se calcularon las emisiones totales de CO₂ relacionados al suministro de agua por el ARCT, así como las de CO₂, Nox y SO₂ por persona y por metro cúbico bombeado.

- **Emisiones totales de CO₂, relacionadas con la energía usada para el transporte de agua.**

Las emisiones totales de CO₂, el principal gas de efecto invernadero, han disminuido en la misma proporción que el consumo de energía del ARCT, el cual fue mayor en 2011 (352,300,198 kWh) que en 2010 (322,746,911 kWh) como se muestra más adelante en la Tabla 5.10. En dicha tabla también se pueden observar las emisiones totales de NOx y SO₂.

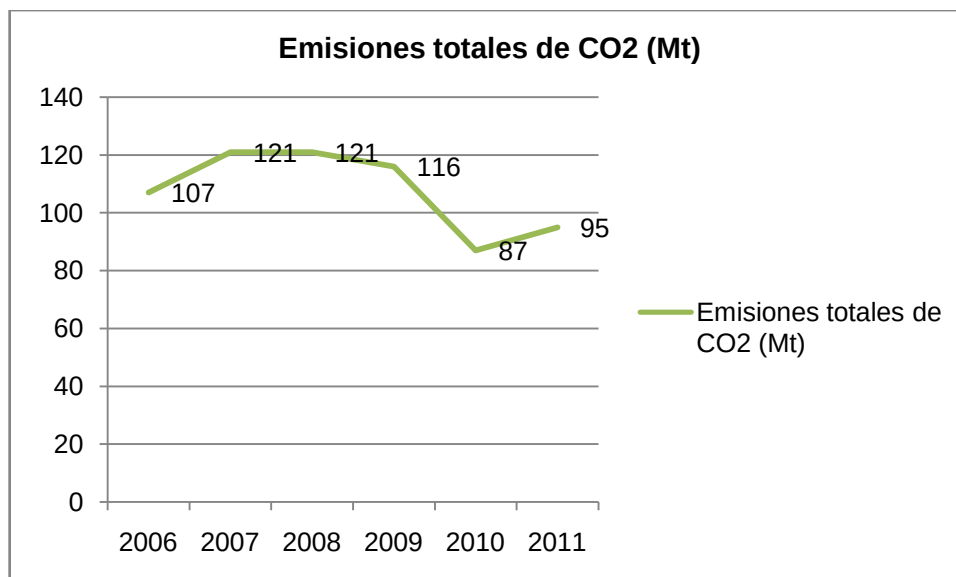


Fig. 5.11 Emisiones totales de CO₂ asociadas al consumo de energía del ARCT

- **Emisiones de CO₂, NO_x y SO₂ relacionadas al consumo de energía por el ARCT, por m³ bombeado y por persona atendida.**

En las figuras 5.12 a 5.14 se muestran las tendencias de los indicadores de emisiones por unidad de volumen bombeado, presentando la misma pendiente descendente, debido a que se consumió menos energía por unidad de volumen, lo cual es una señal positiva en la sustentabilidad del sistema de suministro de agua.

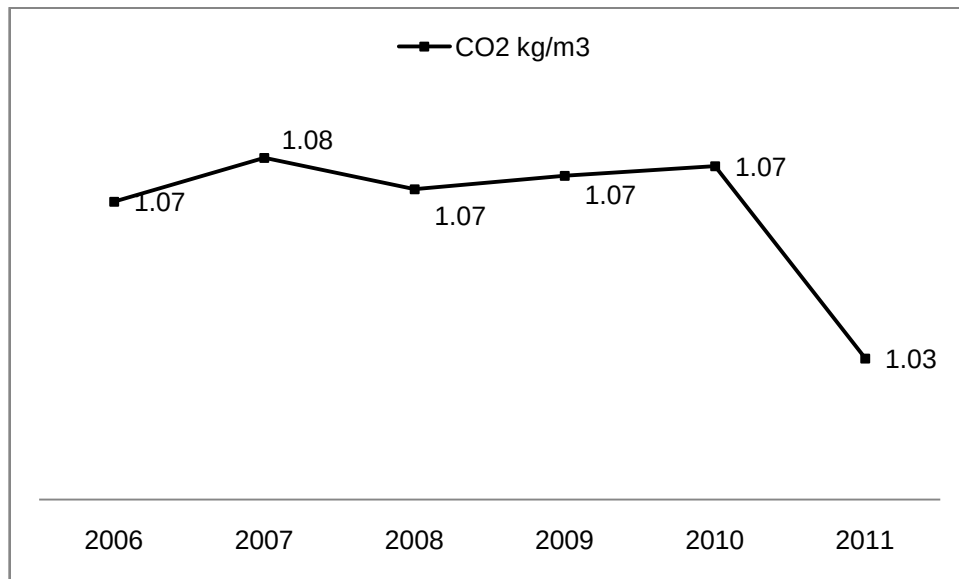


Fig. 5.12 Emisiones de CO₂ por m³ de agua suministrada por el ARCT

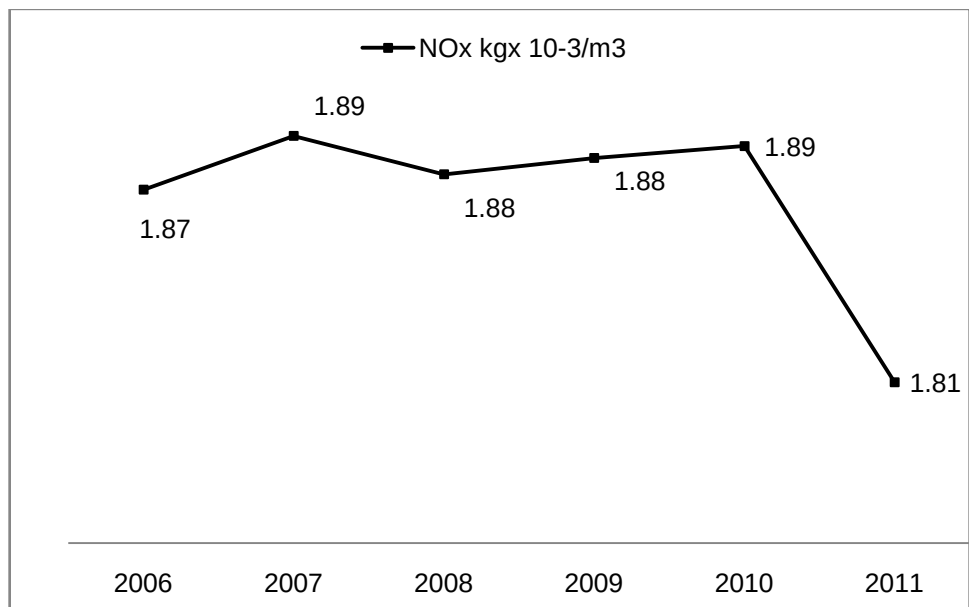


Fig. 5.13 Emisiones de NO_x por m³ de agua suministrada por el ARCT

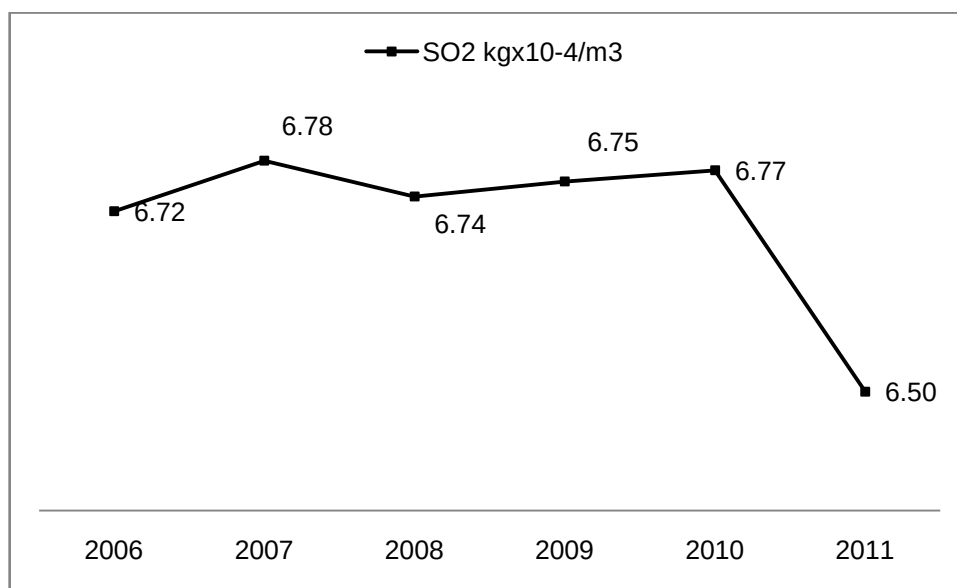


Fig. 5.14 Emisiones de SO₂ asociadas al consumo de energía del ARCT

Observando las emisiones por persona en las figuras 5.15 a 5.17 resalta el incremento en el 2011, debido a que se incrementó el consumo de energía por persona atendida, como se muestra en la Figura 5.7.

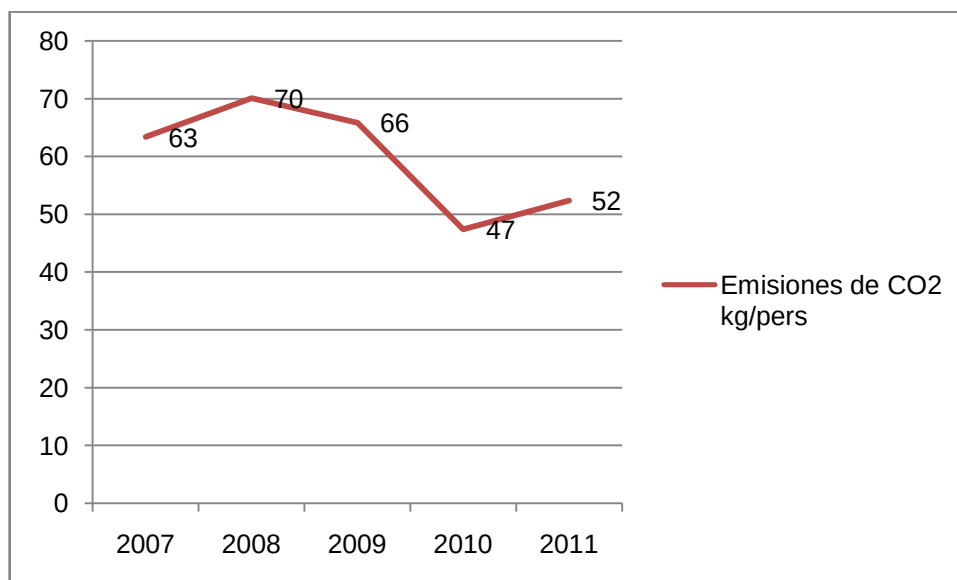


Fig. 5.15 Emisiones de CO₂ por persona servida asociadas al consumo de energía del ARCT

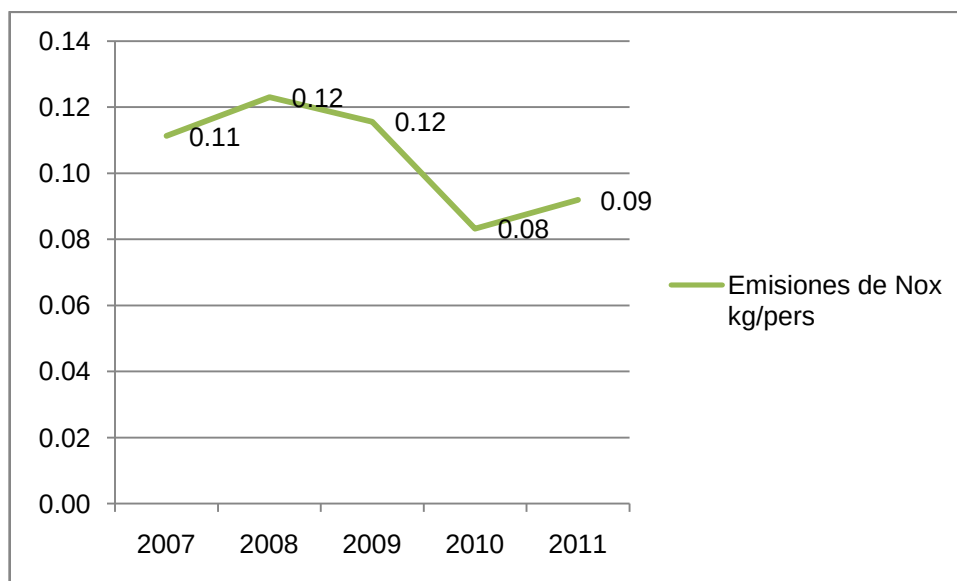


Fig. 5.16 Emisiones de NOx asociadas al consumo de energía del ARCT

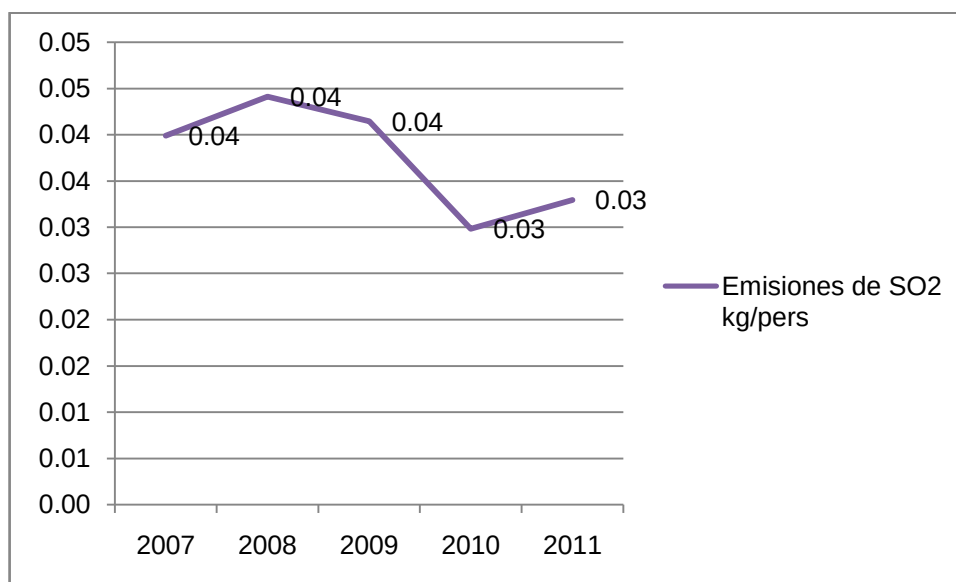


Fig. 5.17 Emisiones de SO₂ por persona servida relacionadas al servicio de agua

Indicadores de desempeño del ARCT.

Esos indicadores se calcularon con el PSAT con el fin de comparar el desempeño de los equipos de bombeo a través de los años. Se seleccionaron datos de operación promedio de una bomba de la planta de bombeo PB-5 para calcular las eficiencias del motor y la bomba, así como la potencia en la flecha. Se escogió esta planta por ser la que tiene la mayor potencia de sus motores. Los resultados se graficaron juntos con el parámetro objetivo; en el caso de la bomba es la eficiencia óptima para el tipo de bomba instalada, lo mismo que para el motor; para el caso de la potencia en la flecha, el objetivo es la potencia óptima que se obtendría si el equipo óptimo se estuviera usando.

- **Eficiencia de la bomba.**

La Figura 5.18 muestra que las eficiencias de las bombas a través de los años ha ido disminuyendo desde un 2.1 % menos que la eficiencia óptima, hasta un 6.2 % en el año 2010. Las variaciones en los gastos de las bombas hacen que los puntos de operación se muevan con respecto al punto de máxima eficiencia en las curvas características de operación a otros puntos con menor eficiencia. Estas variaciones pueden deberse a cambios en la demanda, en el suministro por parte del módulo de riego o en la cantidad almacenada en las presas. También el desgaste en los impulsores y en otros componentes de las bombas por el paso del tiempo influyen en una disminución de la eficiencia.

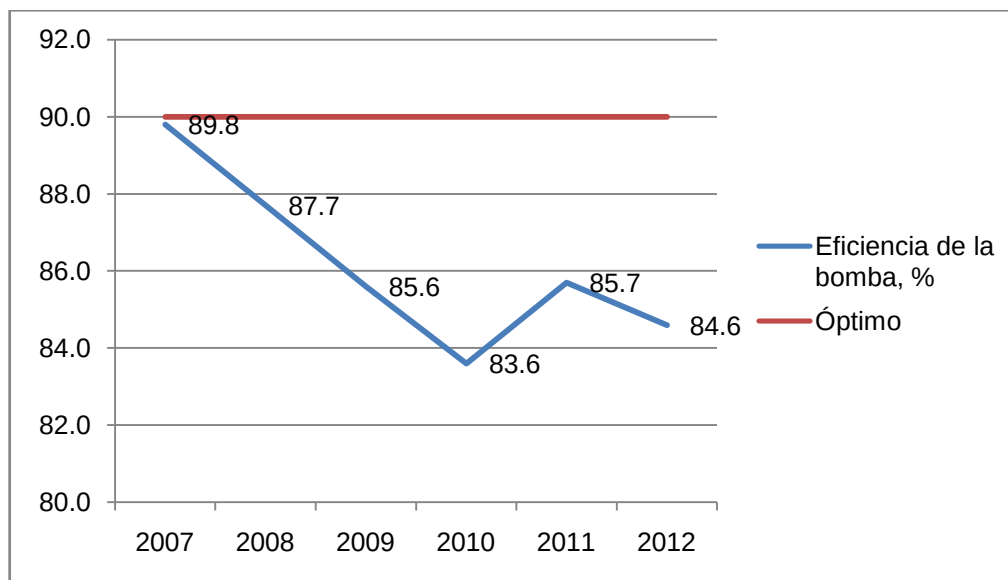


Fig. 5.18 Eficiencia promedio de una bomba de la PB-5 comparada con la eficiencia óptima (90%)

- **Eficiencia del motor.**

Para el caso del motor, la Figura 5.19 muestra que la diferencia entre la eficiencia real y la óptima fue de 1.17% en el 2012, con diferencias muy similares en los años anteriores, lo que indica un desempeño razonablemente bueno en éste.

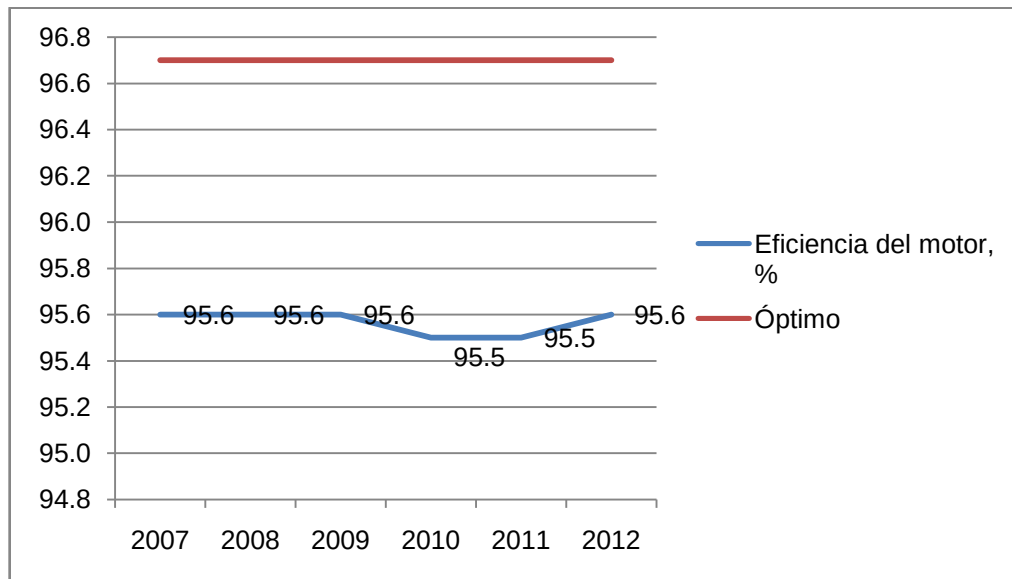


Fig. 5.19 Eficiencia promedio del motor de una bomba de la PB-5 comparada con la eficiencia óptima (96.7%)

- **Potencia eléctrica del motor.**

La potencia en la flecha real contra la óptima mostrada en la Figura 5.20 demuestra que los motores instalados de 8,000 hp de capacidad en la planta de bombeo 5 están sobredimensionados, ya que la máxima potencia utilizada fue de 4,862 kW en 2008 o 6,517 hp. Esto significa que un motor de 7,000 hp sería más apropiado para hacer el trabajo requerido por la bomba.

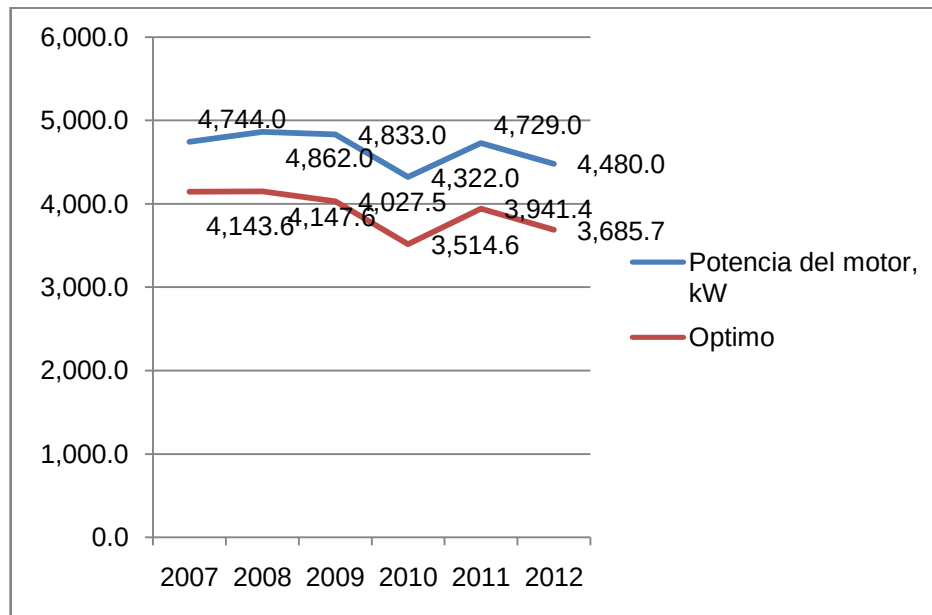


Fig. 5.20 Potencia en la flecha de una bomba de la PB-5 comparada con la potencia óptima

- **Ahorros potenciales de energía anuales.**

Otro resultado del PSAT es el potencial de ahorro anual tanto en energía (Figura 5.21) como en dólares (Figura 5.22) que se tendría si el equipo existente fuera reemplazado con equipo que se desempeñara de forma consistente con el indicado para la eficiencia óptima de bombas y motores mencionado anteriormente. Estos “ahorros potenciales” en realidad significan “pérdidas” anuales por no contar con el mejor equipo disponible o por no operar en la región de máxima eficiencia de la bomba.

La Figura 5.21 muestra la energía que se hubiera podido ahorrar, y la 5.22 son las pérdidas económicas que se tuvieron cada año, ambos por tener equipos operando menos eficientemente que lo óptimo.

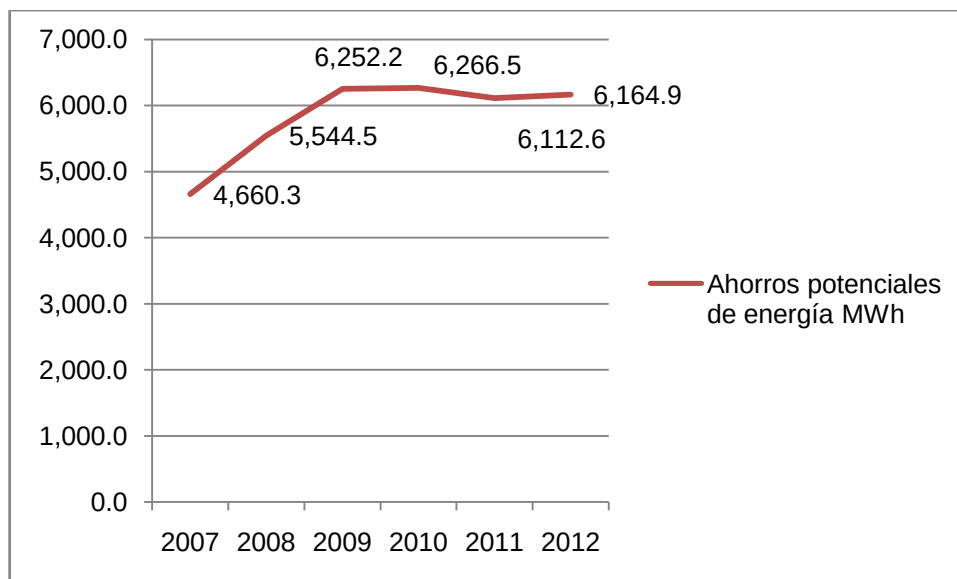


Fig. 5.21 Ahorros potenciales anuales de energía de una bomba de la PB-5

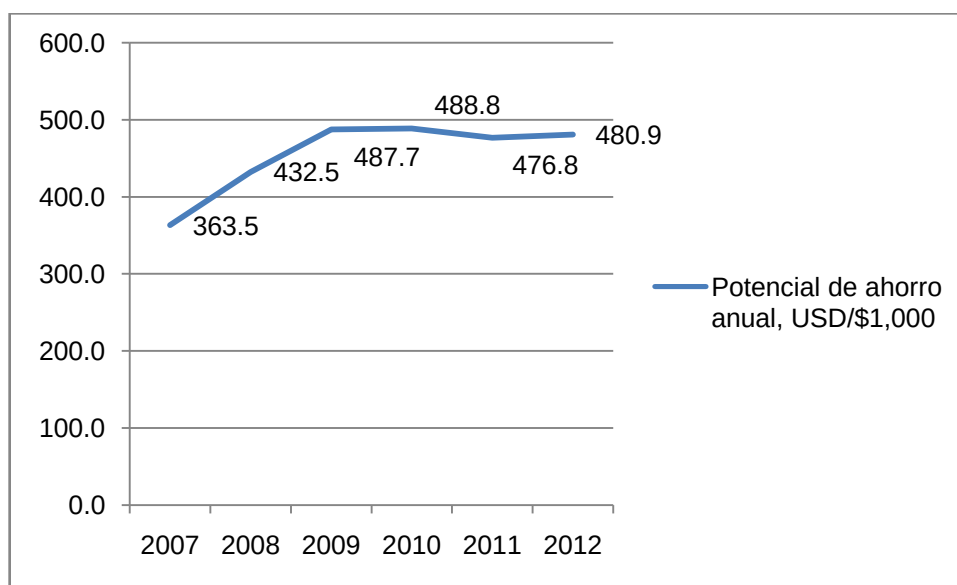


Fig. 5.22 Ahorros monetarios potenciales anuales de una bomba de la PB-5

- **Tasa de optimización (Calificación del sistema de bombeo).**

Otro indicador muy práctico es el porcentaje de optimización del sistema de bombeo, mostrado en la Figura 5.22, ya que da una idea del desempeño global del equipo con respecto a lo óptimo. Es una calificación global sobre la eficiencia que se asigna al equipo en funcionamiento, relativa a la

configuración óptima de bomba y motor, expresada en porcentaje. Un valor de 100 significa que el equipo existente es óptimo, mientras que un valor de 50 indica que el equipo existente es la mitad de eficiente que el óptimo. Matemáticamente, la calificación se obtiene dividiendo la potencia del motor óptima entre la existente, expresada en porcentaje.

En el caso de la bomba analizada, su calificación indica que actualmente (2012) la oportunidad de mejora es del 17.7%.

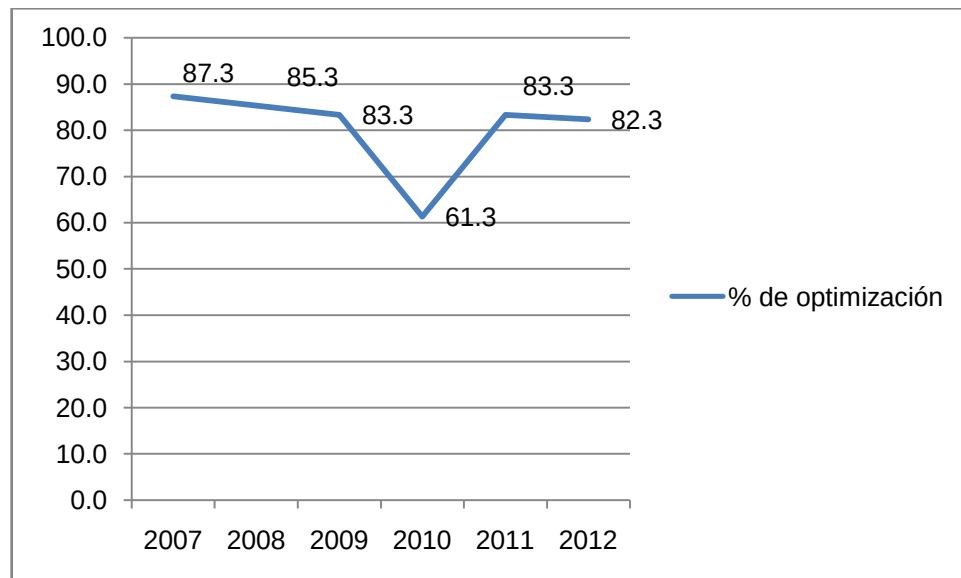


Fig. 5. 23 Porcentaje de optimización de una bomba de la PB-5

- **Emisiones de CO₂, NO_x y SO₂ potencialmente evitadas al año.**

Este indicador calcula las emisiones que se han producido desde el 2007 por no contar con los equipos más eficientes.

Aplicando los factores de emisión de la matriz de generación eléctrica del Estado (descritos en el capítulo 4) a los ahorros potenciales de energía eléctrica que se obtendrían al tener un funcionamiento óptimo del ARCT, podemos conocer la cantidad de gases contaminantes que se evitaría descargar a la

atmósfera, con el consiguiente beneficio al medio ambiente de la región. Las figuras 5.24 a 5.26 muestran la evolución de este indicador desde el 2007 para CO₂, NO_x y SO₂, mostrando una tendencia a la alza, lo cual confirma la necesidad de mejorar la eficiencia de la operación del ARCT.

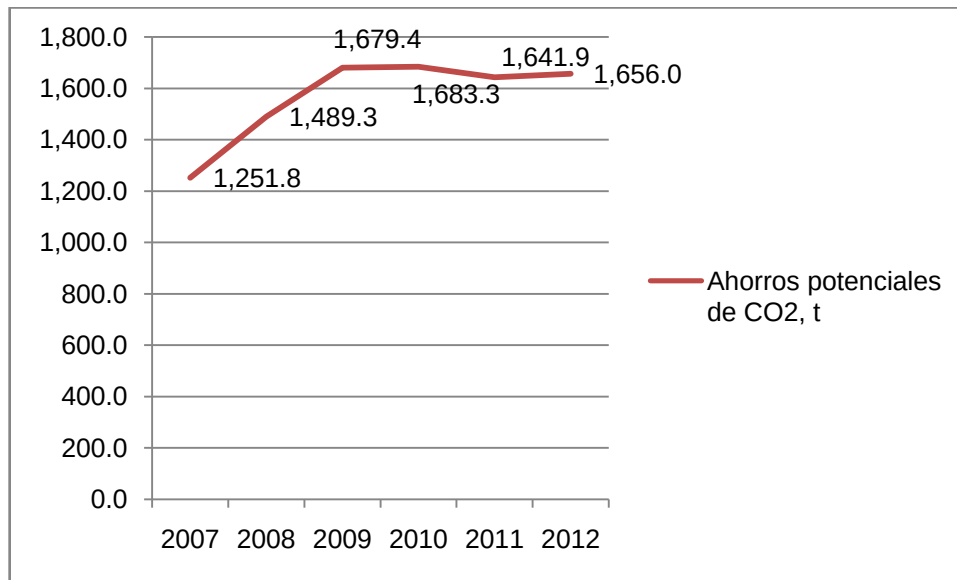


Fig. 5.24 Emisiones de CO₂ potencialmente evitadas al año

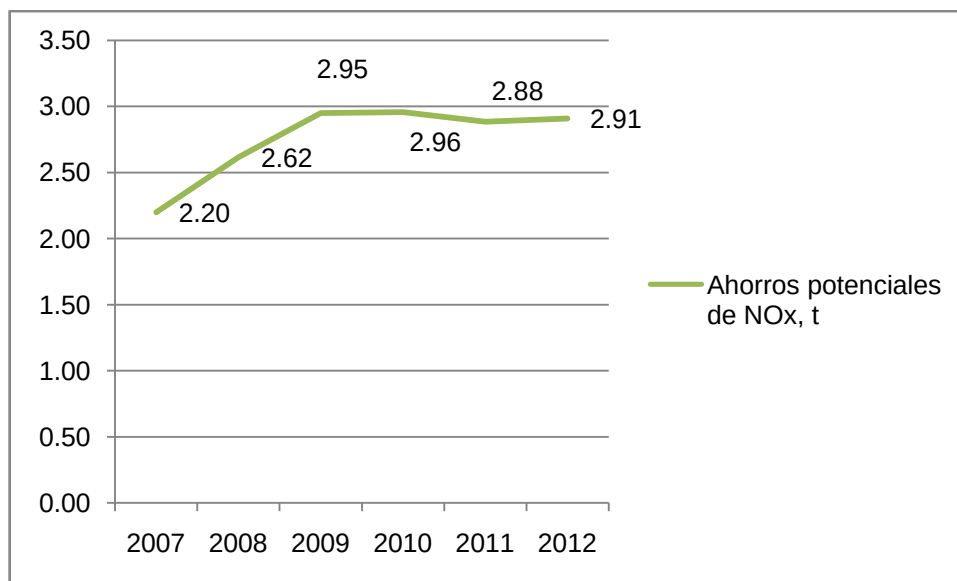


Fig. 5.25 Emisiones de NO_x potencialmente evitadas al año

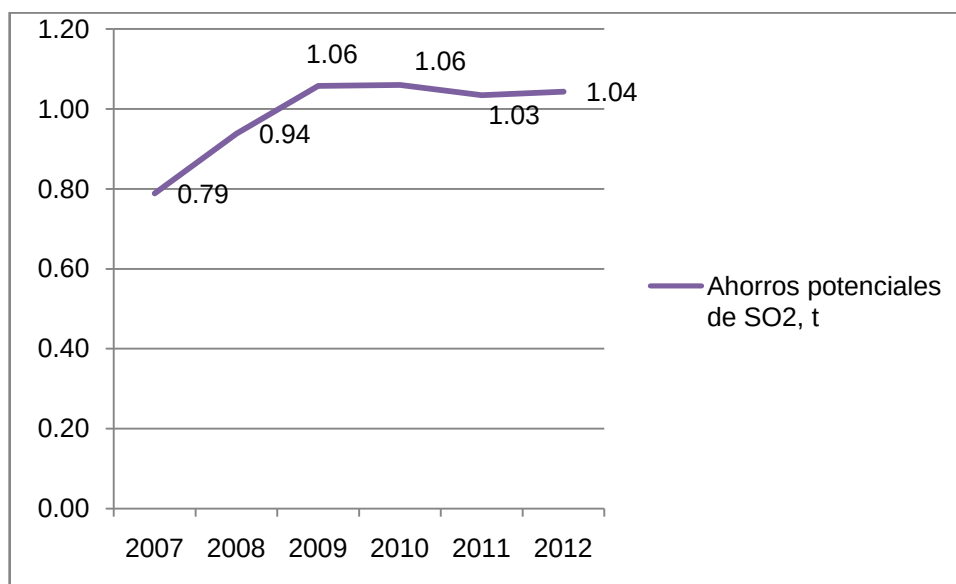


Fig. 5.26. Emisiones de SO₂ potencialmente evitadas al año

5.5 Escenarios.

En base a las tendencias de los indicadores presentados se construyeron varios escenarios con el fin de analizar las posibles situaciones futuras del suministro de agua a la zona costa por el Acueducto Río Colorado-Tijuana.

Primero se elaboró un escenario inercial, es decir, una proyección al 2025 sin cambios en las tendencias históricas de parámetros tales como dotación de agua por habitante, consumo de energía por unidad de volumen bombeado y costo unitario de la energía eléctrica. En un segundo escenario estas tendencias son modificadas a través de acciones alternativas de mejora como sustitución de equipos a otros más eficientes, cambios en las políticas de operación del acueducto o introducción de modificaciones menores en los equipos que pudieran incrementar su eficiencia. En los escenarios propuestos

se evaluaron los impactos energéticos, económicos y ambientales de implementar cada una de las acciones descritas.

Se tomó el año 2011 como base y los valores de referencia para las prospectivas se muestran en la Tabla 5.10:

Tabla 5.10. Valores de referencia (Datos de 2011).

Dotación, l/hab/día	177
Porcentaje de la demanda suministrado por el ARCT	80%
Volumen bombeado, m ³	91,728,087
Gasto promedio del ARCT, l/s	2,909
Consumo de energía, kWh	352,300,198
Costo total de la energía \$pesos	376,921,891
Costo unitario de la energía \$pesos/kWh	1.07
Emisiones de CO ₂ , t	94,632

La Tabla 5.11 presenta datos históricos de la operación del ARCT desde el año 2006 hasta el 2011, así como proyecciones hasta el 2025 basadas en el crecimiento demográfico y en el consiguiente aumento en la demanda de agua.

Tabla 5.11. Datos históricos y proyecciones de energía, costos y emisiones por la operación del ARCT

Año	Volumen bombeado (m ³)	Consumo de energía (GWh)	Costo de Energía (Millones de pesos)	Consumo de energía (kWh/m ³)	Costo de energía (\$/kWh)	Costo de energía (\$/m ³)	Emisiones (t)		
							SO ₂	NO _x	CO ₂
2006	100,559,856	399.3	271.7	3.97	0.68	2.70	68	188	107,282
2007	112,421,189	450.6	346.4	4.01	0.77	3.08	76	213	121,044
2008	113,491,894	451.9	525.3	3.98	1.16	4.63	76	213	121,401
2009	108,576,941	433.6	368.7	3.99	0.85	3.40	73	205	116,467
2010	80,655,697	322.7	308.9	4.00	0.96	3.83	55	152	86,694
2011	91,728,087	352.3	376.9	3.84	1.07	4.11	60	166	94,632
<i>Proyección</i>									
2015	109,371,711	419.9	449.3	3.84	1.07	4.11	76	212	120,711
2020	115,989,590	445.4	476.6	3.84	1.07	4.11	81	225	128,015
2025	121,653,967	46.,1	499.8	3.84	1.07	4.11	85	236	134,266

Fuente elaboración propia con datos de la CEA

Desde el 2006, la eficiencia energética de los sistemas de bombeo del ARCT, reflejada en el consumo de energía por unidad de volumen bombeado, ha fluctuado entre 3.97 y 4.01 kWh/m³, para dar un promedio de 3.97 kWh/m³. El costo de la energía también se ha incrementado, al mismo tiempo que las emisiones relacionadas al consumo de energía.

Escenario 1: Inercial

En el primer escenario propuesto, si la tasa de crecimiento demográfico permanece igual y el ARCT continúa suministrando aproximadamente el 80% de la demanda de agua de Tecate, Tijuana y Rosarito, los indicadores de operación serían los indicados en la proyección para los años 2015, 2020 y 2025 en la Tabla 5.11. Actualmente el consumo promedio de agua de la zona Costa es de 177 l/hab/día, y es el que se tomó como base para calcular los volúmenes a bombear por el ARCT en las proyecciones. La población prevista para esos años se tomó de proyecciones hechas por CONAPO de 2010 a 2030 en el documento “Indicadores Demográficos” disgregados por entidad federativa.

Para el fin de la fecha proyectada, el uso de energía para el bombeo de agua sería aproximadamente 467 GWh, o el 17% más que en 2006, con la misma proporción de incremento de las emisiones y los consecuentes efectos negativos en el medio ambiente. Únicamente las emisiones indirectas de CO₂ debidas al consumo de energía del ARCT pueden alcanzar 134 toneladas para contribuir al calentamiento global. Pero el mayor impacto sería el incremento en el costo de la energía para transportar el agua a la zona Costa:

aproximadamente el 84% o casi \$500 millones de pesos (a un tipo de cambio de 13 pesos/US\$) anuales en el 2025. Esto pudiera implicar alzas en las tarifas de agua potable y una disminución en la accesibilidad de las familias más pobres a este servicio.

Usando la capacidad de bombeo predicha del ARCT para el año 2025 y siguiendo la metodología de aplicación del PSAT, se encontraron oportunidades de mejora en cuanto a los ahorros potenciales de energía y costos para el periodo proyectado y se resumen en la Tabla 5.12.

Tabla 5.12. Ahorros potenciales anuales (2025)

	Ahorros potenciales en un año	
	Energía (MWh)	Costo de la energía (Miles de pesos)
PB-0	2,171	2,199.6
PB-1	5,276	3,525.6
PB-2	5,276	3,525.6
PB-3	5,276	3,525.6
PB-4	9,079	9,207.9
PB-5	9,079	9,207.9
Total	30,754	31,192.2

Los anteriores resultados indican que optimizando la operación de los equipos o instalando nuevos, la conservación de energía eléctrica sería de 30.7 GWh al año, lo que significaría un ahorro de más de 31 millones de pesos anuales.

Escenario 2: Optimización de la administración y operación del ARCT.

En este escenario se introducen como metas las siguientes modificaciones a las tendencias históricas:

1. La dotación se aumenta a 220 l/hab/día de acuerdo a las Normas Técnicas para Proyectos de Agua Potable de la Comisión Estatal del Agua, vigentes desde el año 2007, los cuales se muestran en la Tabla 3.4 (Capítulo 3).
2. La dotación se establece en 200 l/hab/día.
3. La dotación es de 150 l/hab/día.
4. La dotación es de 120 l/hab/día.
5. Las bombas existentes trabajan en el rango de mejor eficiencia para cada dotación.
6. Se sustituyen bombas y motores por nuevos con eficiencias óptimas (Bombas: 90%, motores: 96.7%).

Se analizaron las primeras cuatro metas por separado y después combinándolas con las últimas dos para evaluar los impactos y posibles efectos de interacción entre ellas.

Para encontrar el gasto del acueducto en los escenarios futuros se dividió el volumen a bombear entre el tiempo de operación resultante si se evita operar en horarios punta y semipunta, el cual es de 7,760 horas.

En las tablas 5.13 a 5.16 están representadas las metas 1 a 4 y se muestran los volúmenes a bombear por el acueducto para la dotación indicada, el gasto de éste si se opera fuera de los horarios semipunta y punta. También se indica el consumo de energía si la eficiencia no ha variado (83.9% según el PSAT), el costo de ésta si el precio por kWh se mantiene igual (1.07 \$pesos/kWh), así como las emisiones de CO₂ al ambiente que se producirían con el factor de emisión constante (268.61kg/MWh). La intensidad energética considerada es la que se tuvo en 2011: 3.84 kWh/m³.

Meta 1. Dotación: 220 l/hab/día.

La CNA y la CEA elaboraron estudios detallados sobre los requerimientos de agua de la población, y en el 2007 establecieron en las Normas Técnicas para Proyectos de Agua Potable de la Comisión Estatal del Agua, que esta debe ser de 220 l/hab/día. Sin embargo, la dotación actual es de 177 l/hab /día, debido al alto costo y a ineficiencias en el servicio de distribución del agua. Si se suministrara esta dotación a la población en los años 2020 y 2025, se tendrían las cifras mostradas en la Tabla 5.13:

Tabla 5.13. Volúmenes, gastos y datos de energía del ARCT para una dotación de 220 l/hab/día

Año	Volumen requerido, m ³ /año	Volumen a bombear (80% de la demanda), m ³	Gasto del ARCT si no bombea en horario punta y semipunta, l/s	Consumo de energía, kWh	Costo de la energía, \$pesos	Emisiones de CO ₂ , t
2020	183,316,881	146,653,505	5,250	511,954,054	547,790,838	151,269
2025	192,269,201	153,815,360	5,506	536,955,440	574,542,321	158,656

Se detecta que la capacidad actual del ARCT de 5.33 m³/s ya no sería suficiente en el año 2025, pues se requerirán 5,506 l/s. En el 2020 estaría casi al límite de su capacidad.

Meta 2. Dotación: 200 l/hab/día.

Tabla 5.14. Volúmenes, gastos y datos de energía del ARCT para una dotación de 200 l/hab/día

Año	Volumen requerido, m ³ /año	Volumen a bombear (80% de la demanda), m ³	Gasto del ARCT si no bombea en horario punta y semipunta, l/s	Consumo de energía, kWh	Costo de la energía, \$pesos	Emisiones de CO ₂ , t
2020	183,316,881	133,321,368	4,772	511,954,054	547,790,838	137,517
2025	192,269,201	139,832,146	5,005	536,955,440	574,542,321	144,233

Una dotación de 200l/hab/día podría ser suministrada holgadamente con la capacidad actual del ARCT todavía en el 2025. Comparando con la situación actual, el consumo de energía se incrementaría en un 45% en el 2020 y en un 52% en el 2025. Los costos por energía y las emisiones al ambiente aumentarían en porcentajes similares.

Meta 3. Dotación: 150 l/hab/día.

Disminuir aún más la dotación a 150 l/hab/día representaría incrementos menores en consumos de energía, costos y emisiones, siendo éstos del 9% en 2020 comparado con lo actual, y del 14% en el 2025.

Tabla 5.15. Volúmenes, gastos y datos de energía del ARCT para una dotación de 150 l/hab/día

Año	Volumen requerido, m ³ /año	Volumen a bombear (80% de la demanda), m ³	Gasto del ARCT si no bombea en horario punta y semipunta, l/s	Consumo de energía, kWh	Costo de la energía, \$pesos	Emisiones de CO ₂ , t
2020	124,988,783	99,991,026	3,579	383,965,540	410,843,128	383,965,540
2025	131,092,637	104,874,109	3,754	402,716,580	430,906,741	402,716,580

Meta 4. Dotación: 120 l/hab/día.

Suministrar 120 l/hab/día lógicamente consumiría mucho menos energía que las alternativas anteriores y comparando con el consumo actual, no sólo no se incrementaría, sino que el consumo de energía eléctrica, costos y emisiones se reducirían en un 12% para el 2020 y en un 9% aproximadamente para el 2025. Las cifras totales se muestran en la Tabla 5.16.

Tabla 5.16. Volúmenes, gastos y datos de energía del ARCT para una dotación de 120 l/hab/día

Año	Volumen requerido, m ³ /año	Volumen a bombear (80% de la demanda), m ³	Gasto del ARCT si no bombea en horario punta y semipunta, l/s	Consumo de energía, kWh	Costo de la energía, \$pesos	Emisiones de CO ₂ , t
2020	99,991,026	79,992,821	2,863	307,172,432	328,674,503	307,172,432
2025	104,874,109	83,899,288	3,003	322,173,264	344,725,393	322,173,264

Meta 5: Las bombas existentes trabajan en el rango de mejor eficiencia para cada dotación.

¿Qué pasa si cambia el número de bombas en operación para variar el gasto y se corrija el punto de operación quedando en el rango de máxima eficiencia?

Como se mencionó anteriormente, según cálculos con el PSAT, actualmente las bombas de PB-5 trabajan con el 83.9% de eficiencia, contra un óptimo de 90%

En la Figura 5.28 se muestra una parte de la curva característica de operación de la bomba tipo centrífuga de carcasa partida de 2 etapas instalada en la PB—5.. En ella se indica el rango de operación en la región de máxima eficiencia. El intervalo de eficiencias es de 85% a 88%, (3 puntos porcentuales por debajo y por encima del máximo de 88%). Los gastos de la bomba para este intervalo van de 1.33 m³/s a 1.8 m³/s. El punto de diseño de la bomba es de 1.33 m³/s a 334.2 m.c.a.

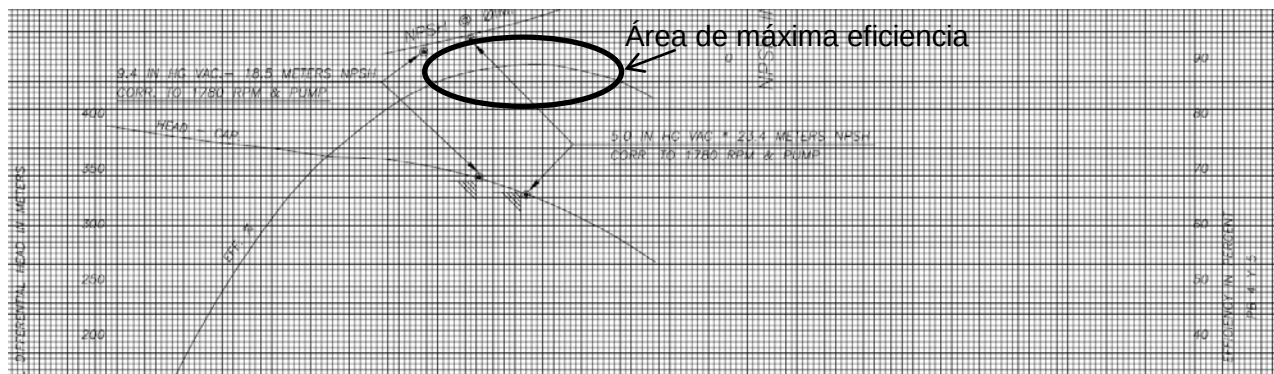


Fig. 5.27 Ampliación de la CCO de la Bomba United Centrifugal Pump 20x26 BF2 2 stg instalada en PB-5.

Los gastos por bomba mostrados en las siguientes tablas son estimados, tomando en cuenta que los dos sistemas de tuberías (el original y el de la ampliación) están diseñados para operar: 1) el original con tres bombas y 2) el nuevo con una bomba.

En las tablas 5.17a, 5.18a, 5.19a y 5.20a se muestran, para cada dotación, los gastos del ARCT y por bomba según el número de equipos en operación. De entre estos gastos, se seleccionó el que cae dentro de la región de máxima eficiencia para proponer el funcionamiento de ese número de bombas. En la CCO de la bomba en cuestión, se encontró la eficiencia para el gasto correspondiente, y con ella se estimó la intensidad energética del ARCT para la dotación de la meta.

En las tablas 5.17b, 5.18b, 5.19b y 5.20b se observan los consumos de energía, costos y emisiones que se tendrían si se operaran las bombas en la región de máxima eficiencia de la bomba para la dotación correspondiente a la meta en cuestión.

Tabla 5.17a. Gastos del ARCT y de la bomba para una dotación: 220 l/hab/día

Año	Gasto del ARCT si no bombea en horario punta y semipunta	Qbomba con dos bombas en operación, l/s	Qbomba con tres bombas en operación, l/s	Qbomba con 4 bombas* en operación, l/s	Eficiencia de la bomba cuando operan 4 bombas*, %	Consumo de energía por unidad de volumen con la nueva eficiencia de la bomba, kWh/m ³
2020	5,250	2,625	1,750	1,312	84.0	3.84
2025	5,506	2,753	1,835	1,376	85.5	3.77

*Se seleccionan tres bombas porque el gasto está dentro del rango de máxima eficiencia

Como se mencionó anteriormente, la capacidad del acueducto estaría en su límite en el año 2020, teniendo que operar las 4 bombas simultáneamente para suministrar el caudal necesario. Según la CCO de la bomba analizada, los gastos tanto del 2020 como del 2025 caerían dentro de la región de máxima eficiencia, pudiendo suministrar en el año 2025 un gasto mayor al de diseño con una eficiencia del 85.5%

Tabla 5.17b. Datos de energía y emisiones del ARCT una dotación: 220 l/hab/día y las bombas operando en el rango de máxima eficiencia

Año	Consumo de energía, kWh	Costo de la energía, \$pesos	Emisiones de CO ₂ , t
2020	562,479,043	601,852,576	151,089
2025	579,597,866	620,169,717	155,687

Con el aumento de la dotación, según el gasto requerido la eficiencia de las bombas en el año 2020 no se incrementa, sino que permanece igual, en 3.84 kWh/m³. Aunado al incremento del caudal, el consumo de energía, costos y emisiones se incrementaría en un 60% con respecto al actual. Para el 2025 el incremento sería del 64%.

Si se funcionara con las eficiencias anteriores, se tendrían los consumos, costos y emisiones mostrados en la Tabla 5.17b.

En la Tabla 5.18a se muestra que el gasto por bomba cuando operan 3 equipos se ubica en la región de máxima eficiencia de la CCO. Sin embargo, el gasto máximo de la bomba es de 1,550 l/s, por lo que deberán operar 4 bombas para cubrir el gasto necesario, en lugar de 3, ya que en este caso se requeriría bombear 1591 l/s en 2020 y 1,668 l/s en 2025, gastos que exceden la capacidad de la bomba. Los gastos de 1,193 l/s para 2020 y 1,251 l/s para 2025 (cuando operan 4 bombas) no están dentro del rango deseado, por lo que se deberá disminuir el tiempo de operación para trabajar con un gasto de 1,333 l/s en ambos casos para proporcionar el volumen total requerido. Para el gasto de 1,193 l/s se deberá operar 6,946 horas al año (en lugar de las 7,760 previstas originalmente). Para el gasto de 1,251 l/s, se deberá bombear 7,285 horas para cubrir el volumen requerido para una dotación de 200 l/hab/día.

Tabla 5.18a. Gastos del ARCT y de la bomba para una dotación: 200 l/hab/día

Año	Gasto del ARCT si no bombea en horario punta y semipunta	Qbomba con dos bombas en operación, l/s	Qbomba con tres bombas en operación, l/s	Qbomba con 4 bombas+ en operación, l/s	Eficiencia de la bomba cuando operan 4 bombas*, %	Consumo de energía por unidad de volumen con la nueva eficiencia de la bomba, kWh/m ³
2020	4,772	2,386	1,591	1,193	85	3.79
2025	5,005	2,503	1,668	1,251	85	3.79

*El gasto está dentro de la región de máxima eficiencia

Tabla 5.18b. Datos de energía y emisiones del ARCT una dotación: 200 l/hab/día y las bombas operando en el rango de máxima eficiencia

Año	Consumo de energía, kWh	Costo de la energía, \$pesos	Emisiones de CO ₂ , t
2020	505,328,766	540,701,780	135,737
2025	530,006,605	567,107,068	142,366

Al igual que en el caso de la dotación de 200 l/hab/día, cuando la dotación es de 150 l/hab/día, se deberían operar dos bombas, pero el gasto supera lo permitido para la bomba, por lo que se seleccionan tres bombas para operar al mismo tiempo. Con el fin de aumentar su gasto para que entre al rango de operación más eficiente, estas bombas deberán operar 7,285 horas al año.

Tabla 5.19a. Gastos del ARCT y de la bomba para una dotación: 150 l/hab/día

Año	Gasto del ARCT si no bombea en horario punta y semipunta	Qbomba con dos bombas en operación, l/s	Qbomba con tres bombas en operación, l/s	Qbomba con 4 bombas en operación, l/s	Eficiencia de la bomba cuando operan 3 bombas*, %	Consumo de energía por unidad de volumen con la nueva eficiencia de la bomba, kWh/m3
2020	3,579	1,790	1,193	895	84%	3.84
2025	3,754	1,877	1,251	939	84%	3.84

*El gasto está dentro de la región de máxima eficiencia

Tabla 5.19b. Datos de energía y emisiones del ARCT una dotación: 150 l/hab/día y las bombas operando en el rango de máxima eficiencia

Año	Consumo de energía, kWh	Costo de la energía, \$pesos	Emisiones de CO ₂ , t
2020	383,508,439	410,354,029	103,015
2025	402,237,156	430,393,757	108,046

Para el caso de una dotación de 120 l/hab/día se disminuye la intensidad energética del ARCT a 3.75 y 3.72 kWh/m3 en los años 2020 y 2025 respectivamente como se muestra en la Tabla 5.20a lo cual, aunado a la

disminución en el volumen total bombeado se refleja en menores consumos, costos y emisiones, como lo indica la tabla 5.20b.

Tabla 5.20a. Gastos del ARCT y de la bomba para una dotación: 120 l/hab/día

Año	Gasto del ARCT si no bombea en horario punta y semipunta	Qbomba con dos bombas en operación, l/s	Qbomba con tres bombas en operación, l/s	Qbomba con 4 bombas en operación, l/s	Eficiencia de la bomba cuando operan 2 bombas*, %	Consumo de energía por unidad de volumen con la nueva eficiencia de la bomba, kWh/m ³
2020	2,863	1,432	954	716	86.0	3.75
2025	3,003	1,502	1,001	751	86.5	3.72

Tabla 5.20b. Datos de energía y emisiones del ARCT una dotación: 120 l/hab/día y las bombas operando en el rango de máxima eficiencia

Año	Consumo de energía, kWh	Costo de la energía, \$pesos	Emisiones de CO ₂ , t
2020	299,671,710	320,648,730	80,495
2025	312,489,444	334,363,705	83,938

Con una dotación de 120 l/hab/día. el consumo de energía en el 2020 sería menor un 15% que en el 2011 y en el 2020, disminuirá en un 11%.

Meta 6. Se sustituyen bombas y motores por nuevos con eficiencias óptimas (Bombas: 90%, motores: 96.7%).

Si se implementara esta meta con la eficiencia mencionada, la intensidad energética del acueducto sería de 3.58 kWh/m³, y de acuerdo ella se calcularon los datos de las tablas 5.21 a 5.24.

Tabla 5.21. Datos de energía y emisiones del ARCT para una dotación: 220 l/hab/día y con bombas y motores óptimos

Año	Consumo de energía, kWh	Costo de la energía, \$pesos	Emisiones de CO ₂ , t
2020	524,980,440	561,729,071	141,016
2025	550,617,973	589,161,231	147,903

Con bombas y motores nuevos y de mayor eficiencia, se lograrían reducciones relativas en los consumos de energía eléctrica y en consecuencia, en los costos de bombeo y en las emisiones asociadas. Comparando con el 2011, el consumo de energía sería el 49% más que en 2011.

Tabla 5.22. Datos de energía y emisiones del ARCT para una dotación: 200 l/hab/día y con bombas y motores óptimos

Año	Consumo de energía, kWh	Costo de la energía, \$pesos	Emisiones de CO ₂ , t
2020	477,290,498	510,700,833	128,206
2025	500,599,082	535,641,018	134,467

Tabla 5.23. Datos de energía y emisiones del ARCT una dotación: 150 l/hab/día y las con bombas y motores óptimos

Año	Consumo de energía, kWh	Costo de la energía, \$pesos	Emisiones de CO ₂ , t
2020	357,967,874	383,025,625	96,154
2025	375,449,312	401,730,764	100,850

Tabla 5.24. Datos de energía y emisiones del ARCT una dotación: 120 l/hab/día y las con bombas y motores óptimos

Año	Consumo de energía, kWh	Costo de la energía, \$pesos	Emisiones de CO ₂ , t
2020	286,374,299	306,420,500	76,924
2025	300,359,449	321,384,611	80,680

Análisis de los escenarios.

Una dotación de 220 l/hab/día es moderada pero suficiente para cubrir holgadamente las necesidades de la población, sin considerarse excesiva, aunque es mayor que la que se tuvo en el 2011 de 177 l/hab/día. Se elaboraron gráficas para comparar los consumos de energía, costos y emisiones para cada dotación con los equipos existentes sin hacer ningún cambio (Meta 1), si se operan en su punto de máxima eficiencia haciendo modificaciones en los

equipos y en las políticas de operación de las bombas (Meta 5a) y por último, si se sustituyen los grupos motor bomba por otros más eficientes (Meta 6a). En todas ellas se puede observar que esta última opción es la que tiene menor consumo de energía, menor costo y menos emisiones de CO₂ al ambiente. Las figuras 5.28 a 5.31 dan cuenta de lo anterior.

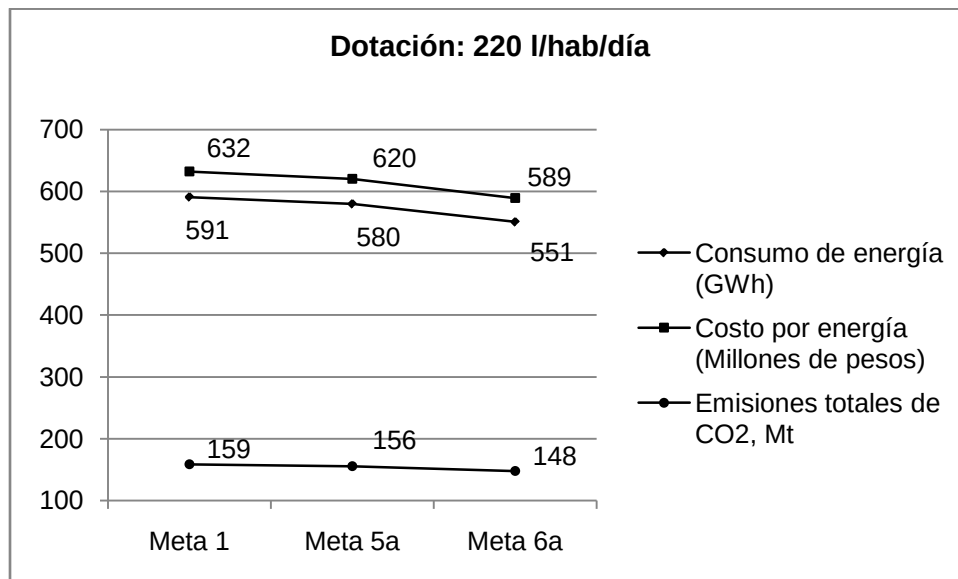


Fig. 5.28 Comparación de las metas propuestas en los escenarios para una dotación de 220 l/hab/día

De acuerdo a la reciente ampliación del acueducto, donde se instaló un nuevo grupo motor bomba en cada planta de bombeo, el costo total fue de \$211'147,007 pesos (CEA 2011), el cual puede tomarse como referencia para el costo de adquisición de nuevos equipos con la eficiencia óptima para la aplicación. La adquisición de otros 4 nuevos equipos costaría entonces \$844'588,028 pesos. Si se instalaran dichos equipos, el ahorro anual en el costo de energía eléctrica con respecto a bombear con el equipo existente sería

de \$42'835,322 pesos, por lo que haciendo un cálculo de retorno simple de inversión, en poco más de 19 años se recuperaría ésta. Sin embargo, cabe mencionar que la sustitución podría hacerse sólo en PB-4 y PB-5, por ser las que tienen el 60% de la capacidad instalada y las que contribuyen en mayor medida al costo total de la energía del ARCT.

El costo de implementar la meta 5a es mucho menor, ya que sólo implicaría realizar mantenimiento mayor a bombas y motores, y ajustar los caudales de operación a los especificados en el rango de eficiencia máxima. Si se considera un costo de \$1,000,000 pesos por bomba, el costo total sería de \$30'000,000 pesos, el cual se recuperaría en 2.53 años si se tiene en cuenta que el ahorro con estas acciones sería de \$11,826,836 al año con respecto a no hacer nada sino sólo modificar la dotación. Es importante notar que pequeños cambios en la eficiencia de las bombas ocasionan grandes cambios en el consumo y costo de energía, así como en emisiones. Las eficiencias consideradas son: en la meta 1 (eficiencia actual): 83.9%, en la meta 5a: 85.5% y en la meta 6a: 90%. Es decir, con un aumento de 1.6% en la eficiencia de las bombas al implementar la meta 5a o del 6.1% al implementar la meta 6a se obtienen grandes ahorros, tanto en consumo de energía como en costo y emisiones al ambiente.

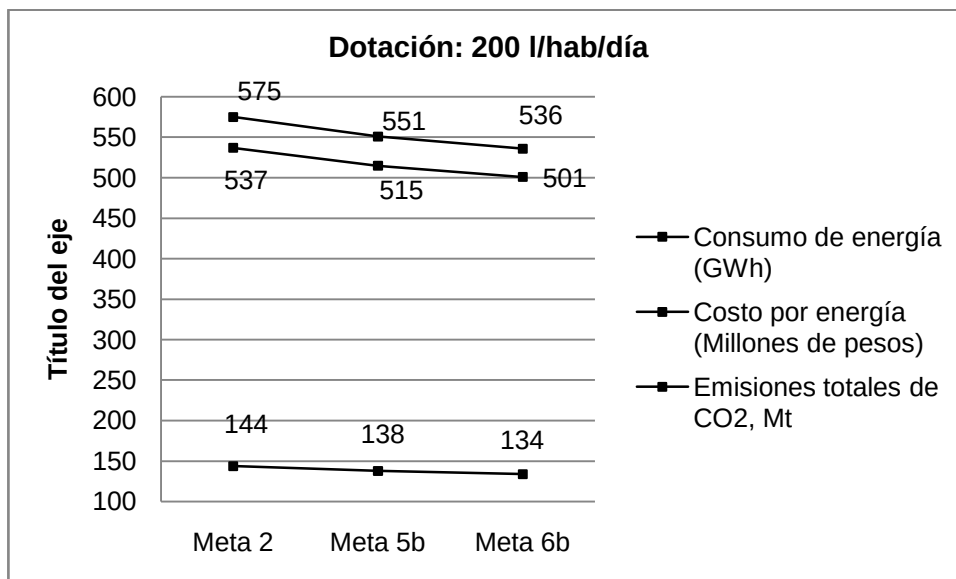


Fig. 5.29 Comparación de las metas propuestas en los escenarios para una dotación de 200 l/hab/día

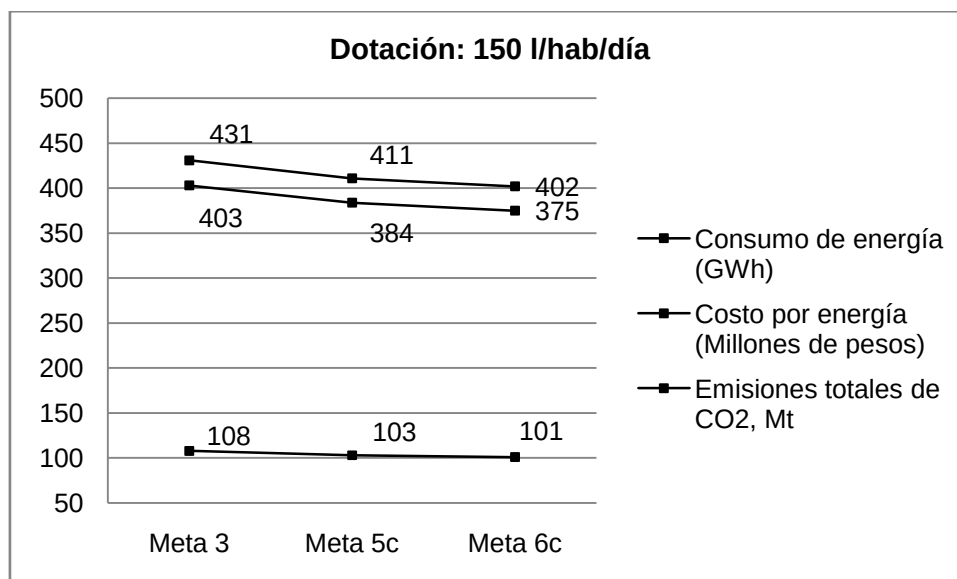


Fig. 5.30 Comparación de las metas propuestas en los escenarios para una dotación de 150 l/hab/día

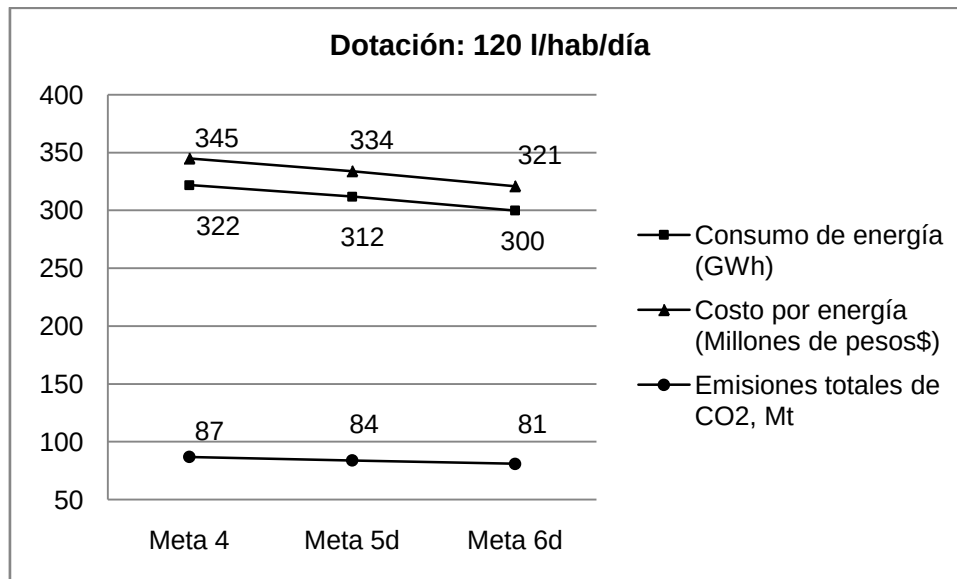


Fig. 5.31 Comparación de las metas propuestas en los escenarios para una dotación de 120 l/hab/día

Según se desprende de la información presentada en las gráficas anteriores, la mejor opción sería la meta 5d, es decir, modificar el tiempo de operación y el número de bombas en funcionamiento para ubicarlas en el rango de máxima eficiencia para proporcionar una dotación de 120 l/hab/día. Los ahorros con respecto a la situación actual serían: 51,9 GWh, 42.9 Mm pesos y 13.6 Mt CO₂.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Es conveniente enfatizar que la aportación principal de este trabajo es proponer e integrar un conjunto de indicadores para evaluar los sistemas de bombeo en el suministro de agua con un enfoque de sostenibilidad, desde el punto de vista de la empresa que proporciona el servicio. El propósito es proporcionar una herramienta práctica para ayudar a los administradores del agua en la toma de decisiones, priorizando el enfoque mencionado. Para ello se seleccionaron y describieron una serie de indicadores que permiten cuantificar los aspectos sociales, energéticos, económicos y ambientales en el sistema objeto del estudio, el ARCT, del cual se evalúa su comportamiento en el período 2007-2011 y se proponen escenarios al 2025. El objetivo de referencia es aplicar estos indicadores para encontrar la tendencia del uso de la energía para el transporte de agua en Baja California, así como proponer acciones para inducirla en la dirección del desarrollo sostenible.

Para soportar las conclusiones y recomendaciones de este estudio es conveniente resumir una serie de hechos que identifican y definen el devenir de los últimos cinco años y la problemática actual del ARCT.

De los 250 millones de metros cúbicos de agua (Mmc) destinados en el 2011 para el uso urbano en Baja California el 80% (202 Mmc) proviene del Río Colorado y el 55% de este recurso (112 Mmc) fue transportado por el ARCT hacia las ciudades costeras. El ARCT es el principal consumidor de electricidad en el sistema de suministro de agua de las ciudades de la Costa y en el 2011 representó 352 GWh (78% del total del sistema), los cuales fueron generados en el municipio de Mexicali (Zona Valle), por lo que los impactos ambientales no están en las ciudades que reciben los beneficios del agua transportada.

El ARCT está compuesto por seis estaciones de bombeo que elevan $5.33 \text{ m}^3/\text{s}$ de agua a una altura de 1,061 m y la conducen por 147 kilómetros de tuberías, canales y túneles con una potencia total instalada de los motores de 132,500 hp. PB-0 contribuye sólo con el 6% de la potencia instalada, PB-1, PB-2 y PB-3 contribuyen con el 34% mientras que PB-4 y PB-5 contribuyen con el 60% de la potencia instalada, y por ello en este estudio el enfoque de las acciones de ahorro y uso eficiente son priorizadas proporcionalmente.

Conclusiones

En relación con el impacto social se concluye que:

En las ciudades de Baja California atendidas por el ARCT, el acceso de la población al agua potable es prácticamente del 100%, creciendo paulatinamente del 2007 al 2010 con una ligera disminución en el 2011 y 2012, lo cual se atribuye al crecimiento poblacional por la migración y su asentamiento en zonas de difícil urbanización.

El consumo de agua por habitante en el período analizado 2007-2012 no alcanzó la dotación de diseño establecida por la CEA de 220 litros/habitante/día (l/hab/d) para Tijuana y Rosarito y menos la de 250 l/hab/d para Tecate, lográndose un máximo de 186 l/hab/d en el 2008, dotación que disminuyó hasta 177 l/hab/d en el 2011 lo cual puede ser atribuido a la elevación del costo del agua o bien a la insuficiencia de capacidad operativa del sistema de distribución. Si bien, desde el punto de vista de sostenibilidad es deseable que esta dotación disminuya, esto debe lograrse mediante acciones de ahorro y uso eficiente del recurso. En contraste la dotación de agua en la ciudad de Mexicali decreció de 387 l/hab/d en el 2007 a 350 l/hab/d en el 2011 cuando su dotación

de diseño es de 300 l/hab/d, mostrando que si bien se ha logrado una disminución en este indicador se requieren aún más esfuerzos para contrarrestar los efectos de la gran disponibilidad del recurso y los bajos precios asociados.

El impacto del costo agua sobre el ingreso del usuario es del 5%, valor alto comparado con el recomendado por las Naciones Unidas que es del 3%, por lo cual el reto es cómo satisfacer una demanda con enfoque de sostenibilidad y al mismo tiempo abatir los costos, si bien hay que tomar en cuenta que existe un problema social de bajos ingresos en la región.

Este estudio no consideró la estimación de los indicadores de extracción del recurso (indicador Falkenmark) por la orientación del mismo hacia el nivel del ARCT. Sin embargo, en el 2009 el indicador de presión hídrica para Baja California fue de 73.3%, una fuerte presión sobre el recurso y muy superior al valor nacional que es de 17.5%. Esto enfatiza la importancia de estudios como el presente.

En relación a los aspectos energéticos se concluye que:

El indicador de energía consumida por unidad de volumen (kWh/m^3) en el sistema de bombeo del ARCT de 2006 a 2010 prácticamente fue de 4 kWh/m^3 disminuyendo a 3.84 kWh/m^3 en el 2011, sin que se tengan elementos para explicar esta disminución, excepto que en ese año se puso en funcionamiento la ampliación del ARCT con un equipo nuevo en cada planta de bombeo. También, del 2009 al 2012 ocurrió un incremento en el costo unitario de energía ($\$/\text{kWh}$). En este sentido la tendencia debe ser abatir el valor de este indicador mediante acciones de ahorro y uso eficiente de la energía, ya que está

asociado directamente al costo del transporte de agua y a las emisiones de GEI a la atmósfera.

En el indicador de consumo de energía por persona atendida (kWh/hab), después de alcanzar un valor máximo en el 2008 de 261 kWh/hab fue disminuyendo hasta alcanzar 195 kWh/hab en el 2011, lo cual es un comportamiento deseable en el indicador, siempre y cuando se analice en el contexto de otros indicadores como el del consumo por habitante, pues este efecto puede atribuirse a la disminución de este último indicador sin la existencia de acciones de ahorro y uso eficiente de ambos recursos: agua y energía.

Analizando los efectos económicos las conclusiones son:

El indicador de costo de la energía para el transporte de agua (\$/m³) se incrementó de 2006 a 2008 para alcanzar un valor máximo de 4.63 \$/m³ disminuyendo en el 2009 a 3.40 \$/m³ para presentar una tendencia de incremento llegando al 2012 a 4.12 \$/m³. La tendencia en este indicador debe ser a la disminución, sin embargo, sus componentes están asociados a el ahorro y uso eficiente de la energía pero también al sistema de tarifas de la electricidad, que si bien su tendencia es a la alza se carece de una política nacional de precios consistente, lo cual refuerza la premisa de que las políticas de agua y de energía deben estar fuertemente relacionadas. Lo anterior es más evidente al analizar el costo de la electricidad para el sistema de bombeo (\$/kWh) que también de 2006 al 2008 alcanzó un valor máximo de 1.16 \$/kWh, disminuyó en el 2009 a 0.85 \$/kWh incrementándose en el 2012 a 1.11 \$/kWh.

El costo del servicio de agua por habitante (\$/hab) alcanzó un máximo de 303 \$/hab en el 2008 disminuyendo en el 2011 a 209 \$/hab sin que se muestre una tendencia clara ni esfuerzos evidentes de acciones de ahorro y uso eficiente en agua y energía para este comportamiento.

En los indicadores ambientales las conclusiones señalan que:

Las emisiones de SO₂ disminuyeron de 2007 a 2011 para situarse en 60 toneladas anuales (t/a) al final del período lo que se explica al salir el combustóleo de la matriz energética, las emisiones de NO_x se incrementaron a 203 t/a en el 2008 para disminuir a 166 t/a en el 2011 un efecto combinado de mayor uso de sistemas de ciclo combinado con gas natural y un menor consumo específico en el ARCT (kWh/m³), esto también se manifiesta en las emisiones de CO₂ que después de alcanzar un valor de 121,400 t/a en el 2008 se abatieron a 94,632 t/a en el 2011.

Por otra parte las emisiones per cápita (kg/hab) tuvieron un comportamiento similar al pasar del 2007 al 2011 de 0.04 kg de SO₂ por habitante a 0.03 kg/hab, las de NO_x de 0.11 kg/hab a 0.09 kg/hab, mientras que las de CO₂ pasaron de 63 kg/hab a 52 kg/hab en el mismo período. Si estas emisiones son asociadas al volumen bombeado, del 2007 al 2011 los indicadores variaron para el SO₂ de 0.67 a 0.65 gramos/m³, para el NO_x 1.87 a 1.81 de gramos/m³, mientras que para el CO₂ de 1.07 a 1.03 kilogramos/m³ en el mismo período.

Una variación de 4.2% en este último indicador (gr/m³, kg/m³), representa una variación de 25% en el indicador de emisiones per cápita y de 22% en las toneladas anuales emitidas, siendo significativas para el caso del CO₂, así como

para el caso de NOx cuyas emisiones tienen un efecto de 310 veces en CO₂ equivalente.

En lo que se refiere a los indicadores de rendimiento del sistema, se tomó como caso representativo los datos promedio de una bomba de la estación PB-5, ya que como se mencionó anteriormente PB-4 y PB-5 contribuyen con el 60% de la potencia instalada y por ello el enfoque de las acciones de ahorro y uso eficiente deben ser priorizadas proporcionalmente.

En lo que se refiere al rendimiento energético del sistema las conclusiones son: La eficiencia de la bomba seleccionada en el 2007 fue de 89.8%, muy cercana al valor óptimo de 90%, sin embargo en el período 2007-2010 presentó una tendencia decreciente para llegar en este último año a 83.6%, incrementándose en el 2011 a 85.7%. En general esta diferencia de 4% con respecto a la óptima se considera aceptable, ya que los equipos tienen más de 20 años de antigüedad.

La eficiencia del motor de la bomba, en el período analizado 2007-2011 se mantuvo prácticamente en 95.6% que comparado con el valor óptimo de 96.7% por lo que también es considerado un comportamiento aceptable.

La potencia entregada por el motor de la bomba o potencia de flecha del motor, se observó que la máxima óptima fue de 4147.6 kW en 2008 y la potencia real fue de 4862 kW (6517 hp) lo cual indica por una parte un excedente de potencia real de 17% con respecto a la óptima y un sobredimensionamiento de 14%, ya que un motor de 7,000 hp sería suficiente, comparado con el motor de 8,000 hp instalado actualmente.

Comparando los valores promedio de consumo anual de energía entre el comportamiento real y óptimo existe un potencial de ahorro de 16.2%, equivalentes a 5834 MWh anuales, lo cual corresponde a una calificación de optimización promedio de 83.8%.

Las conclusiones para el comportamiento económico del sistema son:

El comportamiento energético reflejado en el económico representa en promedio un ahorro anual de 455,000 dólares, o sea del orden de 6 millones de pesos anuales por cada bomba, lo que representa 30 millones de pesos anuales por cada estación de bombeo. La calificación de optimización promedio es la misma en términos energéticos y económicos, es decir, podemos considerar que el sistema es 83.8% eficiente comparado con el óptimo (100%).

Para el comportamiento ambiental del sistema se concluye que:

Considerando que es posible ahorrar en promedio por bomba 5,834 MWh anuales y considerando los factores de emisión reportados en este documento, potencialmente se pueden dejar de emitir del orden de 1 t/a de SO₂, 2.75 t/a de NO_x y 1,555 t/a de CO₂, o bien 2409 t/a de CO_{2,eq}, lo cual representa del orden de 12,000 t/a de CO_{2,eq} por cada estación de bombeo, PB-4 y PB-5. Es conveniente indicar que los factores de emisión están siendo aplicados sobre el consumo final de energía y que al considerar los usos propios y las pérdidas del sistema de suministro eléctrico estos valores serían 1.24 veces superiores en base a la generación bruta evitada.

Del análisis de los escenarios al 2025 se concluye lo siguiente:

De seguir funcionando con las mismas tendencias actuales, para el fin de la fecha proyectada, el uso de energía para el bombeo de agua sería

aproximadamente 467 GWh, o el 17% más que en 2006, con la misma proporción de incremento de las emisiones y los consecuentes efectos negativos en el medio ambiente. Únicamente las emisiones indirectas de CO₂ debidas al consumo de energía del ARCT pueden alcanzar 134 toneladas para contribuir al calentamiento global. Pero el mayor impacto sería el incremento en el costo de la energía para transportar el agua a la zona costa: aproximadamente el 84% o casi \$500 millones de pesos (a un tipo de cambio de 13 pesos/US\$) anuales en el 2025. Esto pudiera implicar alzas en las tarifas de agua potable y una disminución en la accesibilidad de las familias más pobres a este servicio.

Aplicando el PSAT, se encontraron oportunidades de mejora en cuanto a los ahorros potenciales de energía y costos para el periodo proyectado: la conservación de energía eléctrica sería de 30.7 GWh al año, lo que significaría un ahorro de más de 31 millones de pesos anuales.

Incrementar la dotación a la de diseño de 220 l/hab/día, como se establece en la meta 1) se encontró que la capacidad actual del ARCT de 5.33 m³/s estaría en su límite en el año 2020 y para el 2025 ya no sería suficiente para suministrar el volumen requerido a la población, por lo que desde ahora deben plantearse posibles soluciones, como las que se recomiendan más adelante.

La meta 2 contempla suministrar una dotación de 200 l/hab/día, la cual sería suficiente para cubrir las necesidades de agua de la población si se usa razonablemente y se eliminan fugas e ineficiencias en el sistema de distribución. Comparando con la situación actual, el consumo de energía se

incrementaría en un 45% en el 2020 y en un 52% en el 2025. Los costos por energía y las emisiones al ambiente aumentarían en porcentajes similares.

La meta 3 propone establecer la dotación de agua en 150 l/hab/día la cual sería menor que los actuales patrones de consumo de la población, pero que representaría ahorros que permitirían ampliar la cobertura no sólo de personas atendidas, sino de su demanda de agua. Si se implementara esta meta, los incrementos en los consumos de energía con respecto a lo actual serían bastante menores que los de la meta 2: 9% en 2020 y 14% en 2025.

Suministrar 120 l/hab/día como se propone en la meta 4, lógicamente consumiría mucho menos energía que las alternativas anteriores y comparando con el consumo actual, no sólo no se incrementaría, sino que el consumo de energía eléctrica, costos y emisiones se reducirían en un 12% para el 2020 y en un 9% aproximadamente para el 2025.

La meta 5 establece mejorar la eficiencia de las bombas actuales cambiando las políticas de operación en cuanto a número de bombas en operación y tiempo de operación. Se analizaron efectos energéticos, económicos y ambientales de los gastos del ARCT que se tendrían para cada dotación propuesta (220, 200, 150 y 120 l/hab/día), así como los gastos por bomba si se trabajara con una, dos, tres o cuatro simultáneamente. Y se propone el número de bombas en operación cuyo gasto se ubicaría en la región de máxima eficiencia en la CCO de la bomba instalada en la PB-5 y que fue tomada como referencia. En algunos casos se propone variar el tiempo de operación para lograr un gasto localizado en dicha región de la curva.

Por último, la meta 6 plantea la adquisición de nuevos equipos con eficiencias máximas (90% para ese tipo de bomba) lo cual reduciría la intensidad energética del ARCT a 3.58 kWh/m³, con el consecuente ahorro en energía, costos y emisiones. Al igual que en la meta 5, se analizaron los efectos energéticos, económicos y ambientales para cada dotación propuesta.

En resumen, después de analizar los escenarios, la mejor opción sería la meta 5d, es decir, modificar el tiempo de operación y el número de bombas en funcionamiento existentes para ubicarlas en el rango de máxima eficiencia para proporcionar una dotación de 120 l/hab/día. Los ahorros con respecto a la situación actual serían: 51,9 GWh, 42.9 Mm pesos y 13.6 Mt CO₂.

Conclusión final acerca de los objetivos e hipótesis planteados.

En relación a los objetivos planteados al inicio de esta investigación, se integraron y adaptaron metodologías que evalúan la eficiencia energética de equipos de bombeo de gran tamaño, el consumo de energía y las emisiones al ambiente asociadas a dicho consumo así como sus impactos en la sustentabilidad, por lo que se cumplen los objetivos propuestos.

La hipótesis planteada al inicio de este estudio: “la metodología propuesta de análisis y evaluación de sistemas de bombeo será capaz de detectar y cuantificar oportunidades de mejora en el rendimiento técnico, económico y ambiental de sistemas de bombeo para transporte de agua” es verdadera al haber desarrollado un esquema que permite estimar tanto los ahorros potenciales en energía y costos como las emisiones al ambiente, así como sus efectos en la sustentabilidad de los sistemas de suministro de agua.

Recomendaciones

En relación a los indicadores sociales se recomienda:

Incorporar en los planes de desarrollo urbano y uso del suelo así como en la normatividad correspondiente como un criterio prioritario la disponibilidad y/o facilidad para el acceso al agua potable.

Considerando el indicador de presión hídrica para Baja California se recomienda reducir las dotaciones de diseño tanto en las ciudades de la costa como en el Valle de Mexicali, así como reducir la demanda actual mediante programas de ahorro y uso eficiente del agua tanto en los usuarios finales (dispositivos ahorradores) como en la empresa de suministro (reducción de fugas). Una disminución del 5% anual a partir del 2013 en el caso de Tijuana y Rosarito permitiría el suministro actual de 177 l/hab/d en el 2017 y para el 2025 se alcanzaría una dotación de 120 l/hab/d. No se considera que Tecate deba tener una dotación diferente, pero con el valor de 250 l/hab/d se lograría el suministro actual en el 2020 y para el 2025 la dotación sería de 135 l/hab/d. Para el caso de Mexicali con un suministro de 350 l/hab/d se lograría la dotación de diseño de 300 l/hab/d en el 2016 y para el 2025 se lograrían valores de 190 l/hab/d.

El efecto final deseado es satisfacer los requerimientos de los usuarios disminuyendo la tasa de crecimiento en la extracción y en el bombeo de tal forma de extender en el tiempo la disponibilidad del recurso así como el uso de la capacidad actual del ARCT. Esta recomendación también afectará positivamente la tasa de crecimiento en el uso de la energía y en la emisión de contaminantes.

Para mitigar el impacto del costo del agua sobre el ingreso del usuario se recomienda subsidiar directamente a los usuarios de bajos ingresos, no subsidiando a las tarifas. Reducir los precios del agua mediante el abatimiento de los costos de operación incrementando la eficiencia de los sistemas de bombeo actuales y reinvertiendo parte de los ahorros logrados en la sustitución con bombas y motores más eficientes. Considerar también el uso de plantas generadoras para el autoabastecimiento del ARCT en sistemas híbridos con energías renovables así como la aplicación a programas de créditos para reducción de emisiones.

En lo que se refiere a los indicadores energéticos se recomienda desarrollar y aplicar auditorías y programas de ahorro y uso eficiente de la electricidad en los sistemas de bombeo del ARCT, definiendo metas cuantificables en base a la disminución del indicador de energía consumida por unidad de volumen (kWh/m^3) buscando efectos sinérgicos con la reducción del indicador del costo unitario de energía ($\$/\text{kWh}$) y del indicador de consumo de energía por persona atendida (kWh/hab). Estos programas deben estar asociados horizontalmente con los programas sociales y ambientales.

Para indicadores económicos se recomienda fijar sus metas a la baja como un resultado de los programas sociales y del ahorro y uso eficiente de la energía y el del costo de la energía para el transporte de agua ($\$/\text{m}^3$) debe estar estrechamente relacionado con el costo de la electricidad para el sistema de bombeo ($\$/\text{kWh}$). Para ello es necesario plantear, definir y lograr políticas nacionales en agua y energía, en las cuales estos recursos no sean utilizados como medios de recaudación fiscal, evitando los subsidios a las tarifas y

dirigiendo estos últimos recursos a usuarios de bajos ingresos y programas de ahorro y uso eficiente. El marco de referencia para el suministro de los servicios de agua y energía debe ser una economía real basada en relaciones de costo/beneficio. Lo anterior debe reflejarse en una tendencia sustentable a la disminución del costo del servicio de agua por habitante (\$/hab).

Se recomienda que la mejora de los indicadores ambientales sean una consecuencia y una referencia de la mejora de los indicadores sociales, energéticos y económicos, de tal forma que al implementar los programas recomendados tengan como criterios de selección y como restricciones que los indicadores de emisiones por kWh utilizado y las emisiones per cápita (kg/hab) tiendan a la baja reflejándose en el total de toneladas anuales de GEI emitidas.

Por lo que se hacen las siguientes recomendaciones para la operación del ARCT

Elaborar las curvas de operación actuales haciendo una campaña de medición de campo de gastos, presiones, voltajes y amperajes, determinando eficiencias, potencias y cargas en función al caudal entregado por la bomba, Con estas se puede estar monitoreando la eficiencia de funcionamiento y haciendo ajustes cuando se requiera.

Planear los volúmenes y gastos con anticipación para determinar el punto de operación de las bombas sin estrangular válvulas, sino con tiempos de operación y cantidad de bombas en funcionamiento

Continuar con el “lanzamiento de diablos” o limpieza de las tuberías en los tramos donde está instalada la estructura para ello, e implementarla en todos los tramos que faltan. Esto con el fin de disminuir las incrustaciones que elevan

el factor de fricción y para eliminar el aire atrapado en las tuberías, que disminuyen la eficiencia de operación del ARCT.

Realizar fuertes campañas de ahorro y uso eficiente del agua en la población para lograr disminuir la dotación implementando programas de sustitución de aditamentos ahorradores como regaderas, sanitarios, lavadoras, etc.

Implementar una base de datos para el cálculo de los indicadores de sustentabilidad y monitorearlos continuamente para hacer que sus tendencias vayan hacia un suministro de agua sustentable.

Para cualquier dotación que se elija establecer en el futuro, la mejor opción es ajustar el funcionamiento de los equipos de bombeo para que operen en el rango de máxima eficiencia de la bomba, ya sea cambiando el número de bombas en funcionamiento o el tiempo de operación según la demanda, la disponibilidad en la entrega del agua por el Distrito de Riego y los niveles de las presas reguladoras. Un aspecto muy importante son los programas de operación, pues deben evitarse los horarios punta y semipunta en los que se incrementa la tarifa eléctrica considerablemente.

Es recomendable la aplicación de este tipo de metodologías enfocadas a su aplicación no sólo en el sector de agua potable y saneamiento, sino en los sectores comercial e industrial y así ayudar a reducir los impactos ambientales, económicos y sociales que se tienen actualmente.

UNIDADES Y FACTORES DE CONVERSIÓN

Longitud

1 metro (m)	1.093613 yardas
	3.28083 pies
	39.37 pulgadas
	100 cm
	1000 mm

1 kilómetro (km)	0.062137 millas
	3,281 pies
	1000 m
	10 hectómetros

Superficie

Kilómetros cuadrados (km ²)	0.3861 mi ²
	100 hectáreas
	247.104 acres
	1'000,000 m ²
	100 hm ²

Volumen

1 metro cúbico	1.30795 yd ³
	35.31447 pie ³
	264.1728 gal (US)
	1000 litros (1 dm ³)

1 galón	3.78543 litros
	0.13368 pie ³
1 acre-pie	1233.48184 m ³
1 kilómetro cúbico (km ³)	1000 hm ³
	1000'000,000 m ³
Masa	
Kilogramos (kg)	2.204585 lb
	1000 gr
Tonelada (t)	1000 kg
	2,204.58 lb
Caudal (Gasto) en base al volumen	
m ³ /s	35.3147 pie ³ /s
	15850.4 gal/min (US)
	1000 l/s
Presión	
1 kiloPascal (kPa)	0.010197 kg/cm ²
	0.14504 lb/pulg ² (psia)
	7.5 mm Hg
	0.00987 atm
	0.01 bar
lb/pulg ² (psia)	6.89474 kPa
	0.07031 kg/cm ²
	51.715 mm Hg

0.06895 bar

0.0604 atm

Potencia

Kilowatt (kW)	1.341 hp
	1000 W

Múltiplos.

kilo: (k),	(10^3)	1,000
Mega: (M),	(10^6)	1,000,000
Giga: (G),	(10^9)	1,000,000,000
Tera: (T)	(10^{12})	1,000,000,000,000
Peta: (P)	(10^{15})	1,000,000,000,000,000

Prefijos

tera	T
giga	G
mega	M
kilo	k
hecto	h
deca	da

ABREVIATURAS Y SIGLAS

ARCT	Acueducto Río Colorado-Tijuana
CCO	Curva característica de operación de una bomba
CEA	Comisión Estatal del Agua
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CESPM	Comisión Estatal de Servicios Públicos de Mexicali
CESPT	Comisión Estatal de Servicios Públicos de Tijuana
CESPTE	Comisión Estatal de Servicios Públicos de Tecate
CESPE	Comisión Estatal de Servicios Públicos de Ensenada
CNA	Comisión Nacional del Agua
CONAPO	Consejo Nacional de Población
DOE	Departamento de Energía de Estados Unidos
EERE	Energy Efficiency and Renewable Energy (Programa perteneciente al Departamento de Energía de Estados Unidos)
GEI	Gases de Efecto Invernadero
INEGI	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e
IPPC	Panel Intergubernamental para el Cambio Climático
m.c.a.	Metros de columna de agua

NPSH	Carga Neta Positiva de Succión
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico
OMS	Organización Mundial de la Salud
ONU	Organización de las Naciones Unidas
PB-0,PB-1.	
PB-2, PB-3, PB-4, PB-5	Plantas de Bombeo 0, 1, 2, 3, 4, 5
PSAT	Pumping System Assessment Tool (Software para la evaluación de sistemas de bombeo)
RDH	Reporte de Desarrollo Humano de la ONU

REFERENCIAS

- Bakkes J A, Van der Born G J, Helder J C, Swart R J, Hope, C W, Parker J D (1994) An overview of Environmental Indicators: State of the Art and Perspectives. Environmental Assessment Technical Reports, UNEP/RIVM New York, N Y.
- Brown A, Matlock M (2011) A Review for Water Scarcity Indices and Methodologies. White paper, University of Arkansas Sustainability Consortium.
- California Institute for Energy Efficiency (2000) Methodology for analysis of the energy intensity of California Water systems and its potential benefits.
- Campbell H, Montero G Pérez C, Lambert A (2011) Efficient energy utilization and environmental issues applied to power planning. *Energ Policy*, 39(6)2011, p. 3630
- Campbell H, Gil Samaniego M, Montero G, Lambert (2010). Emisión de gases a la atmósfera por la generación de electricidad. Proc. XXXIII National Conference of AMIDIQ, Huatulco, Oax, México
- Casada, D. (2007), "Overview of the Pumping System Assessment Tool (PSAT)", Energy Savings Assesment (ESA), U. S. Department of Energy.
- Casada D (2008) Pumping System Assessment Tool User's Manual PSAT . Diagnostic Solutions, LLC
http://www1.eere.energy.gov/manufacturing/tech_deployment/pdfs/psat_user_manual.pdf
- Cervera L (2007) Indicadores de uso sustentable del agua. R. de Estudios Fronterizos, Vol. 8, Num. 16.
- CNA Estadísticas del Agua en México (2011) SEMARNAT
<http://www.conagua.gob.mx>
- CNA, 1997 Manual de Conducción. Subdirección General Técnica, Gerencia de Ingeniería Básica y Normas Técnicas
- CNA, 2007 Metodologías de evaluación socioeconómica para proyectos de Agua Potable, Alcantarillado, Saneamiento y Protección a Centros de Población. Comisión Nacional del Agua, Ed. SEMARNAT, México.
- CNA 2007 Manual de Agua potable, Alcantarillado y Saneamiento. Diseño de Instalaciones Mecánicas

- CNA 2008, "Programa Nacional Hídrico 2007-2012"
- CEA Comisión Estatal del Agua de Baja California, (2008) "Programa Estatal Hídrico 2008-2013", 2008.
- CEA Comisión Estatal del Agua de Baja California, Reporte técnico Diciembre 2007
- CEA Comisión Estatal del Agua de Baja California, Reporte técnico Diciembre 2008
- CEA Comisión Estatal del Agua de Baja California, Reporte técnico Diciembre 2009
- CEA Comisión Estatal del Agua de Baja California, Reporte técnico Diciembre 2010
- CEA Comisión Estatal del Agua de Baja California, Reporte técnico Diciembre 2011
- CEA Comisión Estatal del Agua de Baja California, Reporte técnico Mayo 2012
- CEA Comisión Estatal del Agua de Baja California, Ampliación del Acueducto Río Colorado-Tijuana a 5.33 m³/s, Junio de 2011.
- CFE CONSEJO CONSULTIVO, Comisión Federal de Electricidad, Estado de Baja California, Reporte de la Decimotercera Sesión Ordinaria, Febrero de 2008.
- Consejo Nacional de Población (2012) Proyecciones de la Población en México 2010-2015. <http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Proyecciones>
- Consejo Nacional de Población (2010) Indicadores Demográficos http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Indicadores_demograficos_basicos
- Courtecuisse A (2005) Water Prices and Households' Available Income: Key Indicators for the Assessment of Potential Disproportionate Costs - Illustration from the Artois-Picardie Basin, France. Economic and Environment Assessment Department. Agence de l'Eau Artois-Picardie, France.
- DOE and Hydraulic Institute (2006) Improving Pumping System Performance: A Sourcebook for Industry. United States Department of Energy. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. Industrial Technologies Program in cooperation with the Hydraulic Institute.
- Estadísticas del Agua en México 2011. Comisión Nacional del Agua (CNA). Mexico, D. F.
- Falkenmark The massive water scarcity threatening. Africa-why isn't it being addressed Ambio 18, no. (1989): 112-118.

- Gil-Samaniego Margarita, Campbell Ramírez Héctor (2010) Evaluación de las Emisiones por Consumo de Energía en los Sistemas de Bombeo del Acueducto Río Colorado–Tijuana. Memorias del XXXI Encuentro Nacional de la Academia Nacional de Ingenieros Químicos (AMIDIQ). Huatulco, Oax,
- Gil-Samaniego M, Campbell H (2011) Impactos Económicos, Sociales y Ambientales de la Energía Asociada al Transporte de Agua a la Zona Costa de Baja California. Congreso International de Ingeniería Industrial. ARGOS 2011. Tijuana,
- Gil-Samaniego Margarita, Campbell Ramírez Héctor (2012) Repercusiones Ambientales, Sociales y Económicas del Transporte de Agua y la Energía Asociada en La Región Transfronteriza del Río Colorado. Memorias del XXXIII Encuentro Nacional de la Academia Nacional de Ingenieros Químicos (AMIDIQ), San José del Cabo, Baja California Sur.
- Guio-Torres D (2007). Sustainability indicators and the assessment of Urban Water Systems: Seeking for a Robust way forward. UNESCO-IHE Institute for Water Education Young Scientific Workshop. Urban Water Innovation Delft University of Technology, NL
http://www.switchurbanwater.eu/outputs/pdfs/WP1-1_PAP_Sustainability_indicators_for_assessment_of_UWS.pdf
- International Energy Agency, (2011) Key World Energy Statistics, <http://www.iea.org/statistics/>
- IPCC, 2007: Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 págs.
- James K, Campbell S, Godlove C (2002) Watergy: Taking advantage of untapped energy and water efficiency opportunities in municipal water systems. Alliance to save energy, Washington, D.C.
- Karassik Y, Messina P, Cooper P, Heald C (2001) Pump Handbook, 3ra edición. Ed. McGraw-Hill
- James K, Campbell S, Godlove C (2002) Watergy: Taking advantage of untapped energy and water efficiency opportunities in municipal water systems. Alliance to save energy, Washington, D.C.
- Lundin, M. (1998) Assessment of the Environmental Sustainability Of Urban Water Systems, Dissertation, Chalmers University of Technology. <https://www.chalmers.se/ee/SV/forskning/forskargrupper/miljosystemanalys/p>

ublikationer/tep-rapportserie-
7722/tep1999/downloadFile/attachedFile_2_f0/TEP19997.pdf

Mario Molina Center, "Greenhouse Gas Emmissions Inventory for the State of Baja California", preparado para la Secretaría de Protección al Ambiente del Estado de Baja California por el Mario Molina Center, 2005.

Miller Paul J., Zachary Patterson and Scott Vaughan, (2002) "Estimating Future Air Pollution from New Electric Power Generation", Working Paper, Commission for Environmental Cooperation of North America

Morrison G, Fatoki OS, Zinn E, Jacobsson, D (2001) Sustainable Development Indicators for Urban Water Systems. A case Study evaluation of King William's Town, South Africa and the applied indicators. <http://www.wrc.org.za>

Pérez L, Guitelman A, Pérez S (2005) Acueductos a presión, Nociones Básicas de Diseño. Universidad de Buenos Aires

Pitt Jennifer; Hinojosa O, Carrillo Y (2012) Colaboración Binacional en la Cuenca del Río Colorado: recomendaciones .para Prevenir una Crisis de Agua. Memorias de IV Coloquio Internacional del Agua <http://www.atl.org.mx/coloquio/images/stories/curricula/Osvel%20Hinojosa-Jennifer%20Pitt%20ponencia%20espa%C3%B1ol.pdf>

ONU (2008) Human Development Report 2006. United Nations Development Programme (UNDP).

ONU (2007) Indicators for Sustainable Development. Guidelines and Methodologies. United Nations Publications.

OMS (2012) Global Health Observatory Data Repository. World Health Organization (WHO), <http://apps.who.int/ghodata/?vid=590>

Palacios R, Campbell H (2012) Metodología de Análisis de Tendencias en Indicadores Energéticos. Caso Ejemplo Baja California, México" Tesis de Doctorado. Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California.

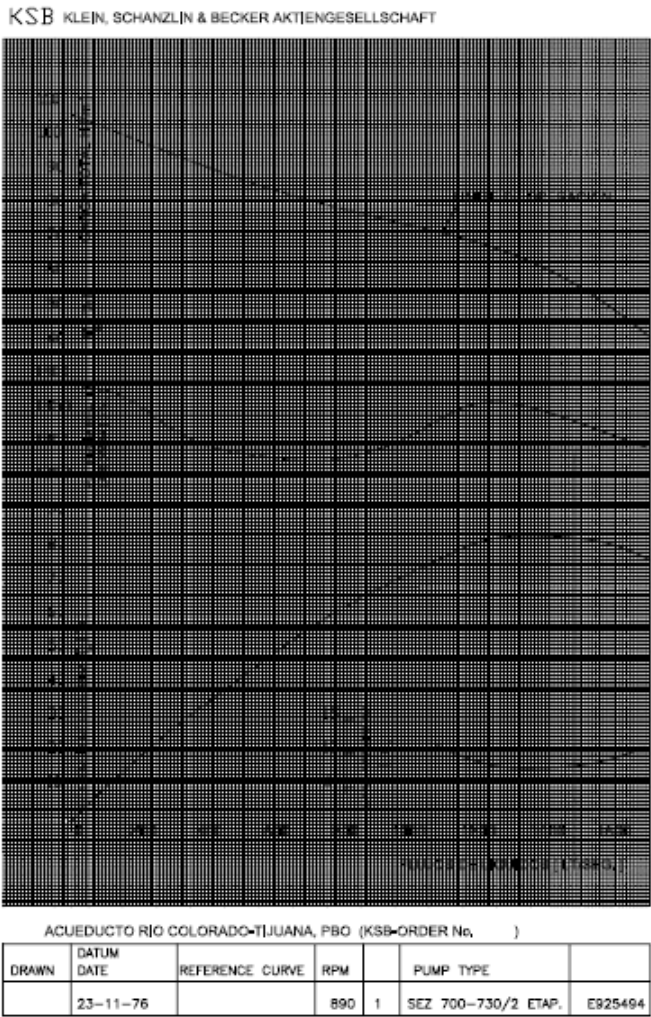
Ranganathan J (1998) Sustainability Rulers: Measuring Corporate Environmental and Social Performance. WRI's Sustainable Enterprise Initiative. http://pdf.wri.org/sustainability_rulers.pdf

Sahely H, Kennedy C (2007) Water use model for Quantifying Environmental and Economic Sustainability Indicators. ASCE J. Water Resour. Plann. Manage. Vol. 133, No. 6, November/December 2007, pp. 550-559, doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2007\)133:6\(550\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2007)133:6(550))

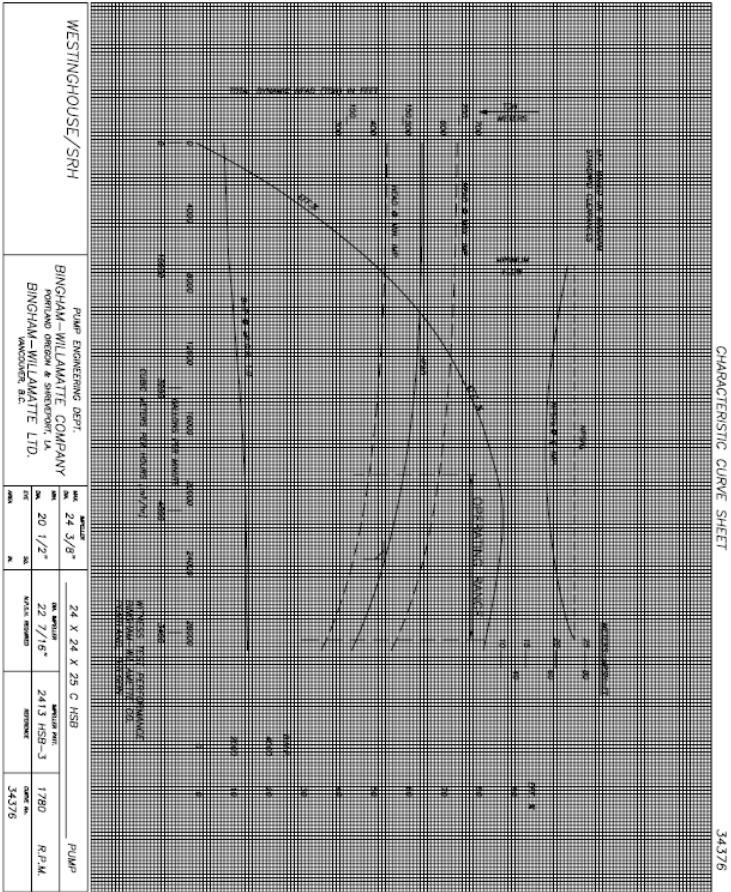
- Sanks, R (1998) Pumping Station Design, 2da. Edición, Editorial Butterworth Heinemann, Estados Unidos.
- Trask, M (2005) Water-Energy Relationship, Environmental Office Systems Assessment and Facilities Siting Division. California Energy Commission.
- Viera F, Ramos H (2009) Optimization of the Energy Management in Water Supply Systems. Water Science and Technology. Water Supply. IWA Publising.
- Watkins K (2006) Human Development Report. Beyond Scarcity: Power, poverty and the global water crisis. United Nations Development Programme. Palgrave Macmillan, New York, N. Y.
- Winograd M, Aguilar M, Farrow A, Segnestam L, Linddal M, Dixon J (1999) Conceptual Framework to Develop and Use Water Indicators. CIAT/World Bank/ UNEP Proyect Technical Note, Cali, Colombia
- World Health Organization, "Climate and Health", Fact Sheet No. 266, 2002; World Health Statistics, Climate Change, Burden of Disease, 2004.
- WSP Water Sustainability Project (2003). Polis Project on ecological Governance. University of Victoria, British Columbia, Canada.
<http://www.poliswaterproject.org/>

ANEXOS

Curvas Caracaterísticas de Operación de las Bombas del ARCT



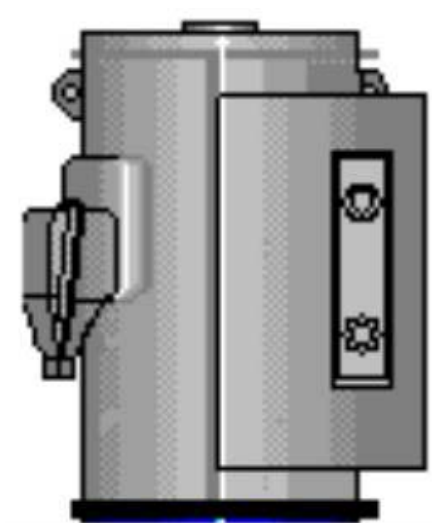
CCO de las bombas de PB-0



CCO de las bombas de PB-1, 2 y 3

CARACTERISTICAS GENERALES DE LOS MOTORES DE PB0

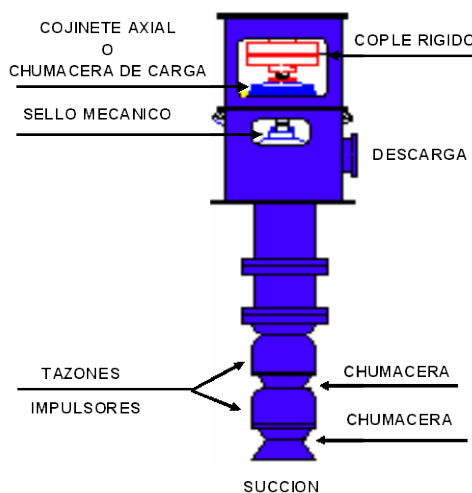
El tipo de motor es vertical, de inducción jaula de ardilla, trifásico, 60 hz. servicio interior y enfriamiento por intercambiador de calor agua-aire y operación conforme a los requerimientos de la bomba, temperatura ambiente y altitudes.



MARCA	SIEMENS
MODELO	1RN5 566
TIPO	INDUCCION JAULA DE ARDILLA
POSICION DE EJE	VERTICAL
VELOCIDAD NOMINAL	890 R.P.M.
MAXIMA SOBREVELOCIDAD PERMITIDA	1,185 R.P.M.
SENTIDO DE ROTACION	DERECHO (VISTO DEL MOTOR HACIA LA BOMBA)
FRECUENCIA	60 HZ.
VARIACION DE FRECUENCIA	± 5%
NUMERO DE FASES	3
TENSION NOMINAL	4,160 VOLTS
VARIACION DEL VOLTAJE	± 10%
POTENCIA	1,500 HP
ENFRIAMIENTO	AIRE CON ENFRIADOR DE AGUA
SERVICIO	INTERIOR
TIEMPO DE OPERACION	24 HORAS POR DIA
TIPO DE ARRANQUE	TENSION PLENA
CORRIENTE NOMINAL	205 AMP.

CARACTERISTICAS GENERALES DE LAS BOMBAS DE PB0

En esta planta se tienen cuatro bombas verticales de flujo mixto, dos pasos, lubricadas por agua y accionadas con motor eléctrico vertical de inducción jaula de ardilla



MARCA	K S B (KLEIN SCHANZLIN BECKER)
POSICION DEL EJE	VERTICAL
TIPO	FLUJO MIXTO
SUCCION	SIMPLE
CARCAZA	TUBULAR
NUMERO DE PASOS	2
VELOCIDAD ANGULAR	890 RPM
LIQUIDO A MANEJAR	AGUA DE RIO
SENTIDO DE ROTACION	DERECHO (VISTO DEL MOTOR HACIA LA BOMBA)
POSICION DEL MOTOR	VERTICAL
TIEMPO DE OPERACIÓN	24 HORAS POR DIA
GASTO	1,500 LPS
CARGA	55.33 M.C.A.
NIVEL MINIMO DE OPERACION	- 2.25 EN CARCAMO DE BOMBEO
VELOCIDAD MAXIMA EN SENTIDO INVERZO	1,317 R.P.M.
COTA DE DESPLANTE	- 0.80 m.s.n.m.
SUCCION	CARCAMO HUMEDO
DESCARGA	MULTIPLE
EFICIENCIA	84%
DIAMETRO DE SUCCION	24 "
DIAMETRO DE DESCARGA	24 "

CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS MOTORES DE PB1. PB2 Y PB3

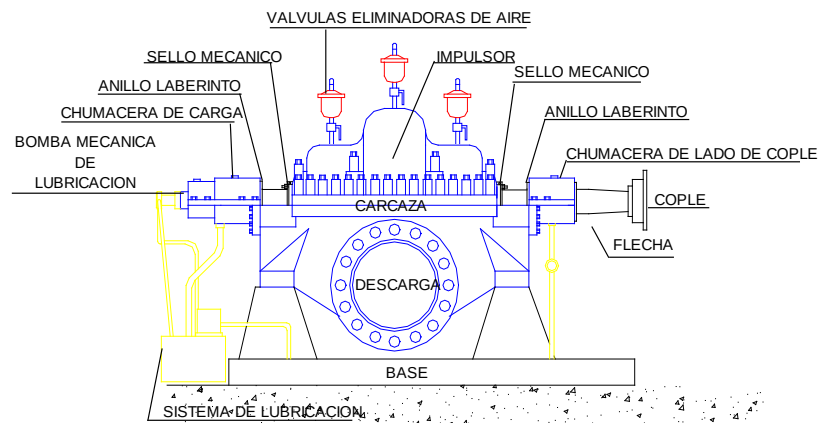
El tipo de motor es horizontal, de inducción jaula de ardilla, trifásico, 60 hz servicio interior y enfriamiento por intercambiador de calor agua-aire y operación conforme a los requerimientos de la bomba, temperatura ambiente y altitudes.



MARCA	WESTINGHOUSE
TIPO	INDUCCION JAULA DE ARDILLA
POSICION DE EJE	HORIZONTAL
VELOCIDAD NOMINAL	1,783 R.P.M.
SENTIDO DE ROTACION	DERECHO (VISTO DEL MOTOR HACIA LA BOMBA)
FRECUENCIA	60 HZ.
VARIACION DE FRECUENCIA	± 5%
NUMERO DE FASES	3
TENSION NOMINAL	4,160 VOLTS
VARIACION DEL VOLTAJE	± 10%
POTENCIA	3,000 HP
ENFRIAMIENTO	AIRE CON ENFRIADOR DE AGUA
SERVICIO	INTERIOR
TIEMPO DE OPERACION	24 HORAS POR DIA
TIPO DE ARRANQUE	TENSION PLENA
CORRIENTE NOMINAL	358 AMP.

CARACTERISTICAS GENERALES DE LAS BOMBAS DE PB1. PB2 Y PB3

Las 4 bombas instaladas en cada una de estas plantas son similares, ya que las condiciones de operación, gasto y carga de dichas plantas son iguales. Las bombas son del tipo centrífugo, con posición horizontal, doble succión y un solo paso accionadas con motor eléctrico de inducción jaula de ardilla.



MARCA	B.W. (BINGHAM WILLAMATTE)
POSICION DEL EJE	HORIZONTAL
TIPO	CENTRIFUGA
SUCCION	DOBLE
CARCAZA	BIPARTIDA
NUMERO DE PASOS	1
VELOCIDAD ANGULAR	1780 R.P.M.
LIQUIDO A MANEJAR	AGUA DE RIO
SENTIDO DE ROTACION	DERECHO (VISTO DEL MOTOR HACIA LA BOMBA)
POSICION DEL MOTOR	IZQUIERDO
TIEMPO DE OPERACIÓN	24 HORAS POR DIA
GASTO	1,333 LPS
CARGA	137 M.C.A.
NIVEL MINIMO DE OPERACION	1 MTS. EN TANQUE DE SUCCION
VELOCIDAD MAXIMA EN SENTIDO INVERZO	2,232 R.P.M.
SUCCION	TANQUE
DESCARGA	MULTIPLE
EFICIENCIA	86%
DIAMETRO DE SUCCION	24 "
DIAMETRO DE DESCARGA	24 "

CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS MOTORES DE PB4 Y PB5

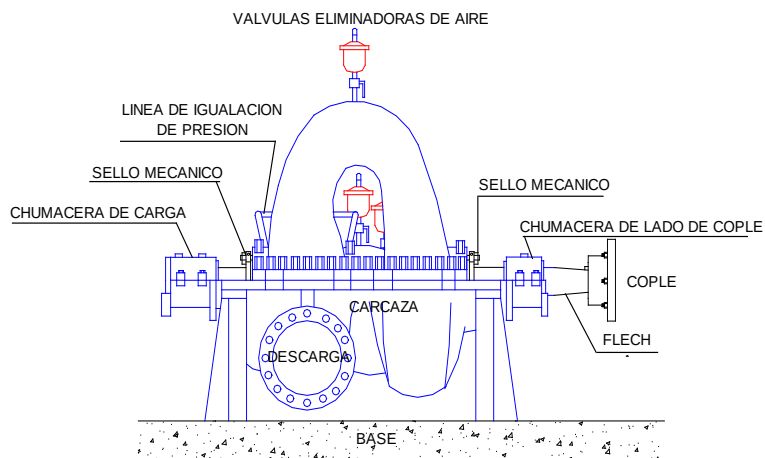
El tipo de motor es horizontal, de inducción jaula de ardilla, trifásico, 60 hz. servicio interior y enfriamiento por intercambiador de calor agua-aire y operación conforme a los requerimientos de la bomba, temperatura ambiente y altitudes.



MARCA	WESTINGHOUSE
TIPO	INDUCCION JAULA DE ARDILLA
POSICION DE EJE	HORIZONTAL
VELOCIDAD NOMINAL	1,790 R.P.M.
SENTIDO DE ROTACION	DERECHO (VISTO DEL MOTOR HACIA LA BOMBA)
FRECUENCIA	60 HZ.
VARIACION DE FRECUENCIA	± 5%
NUMERO DE FASES	3
TENSION NOMINAL	4,160 VOLTS
VARIACION DEL VOLTAJE	± 10%
POTENCIA	8,000 HP
ENFRIAMIENTO	AIRE CON ENFRIADOR DE AGUA
SERVICIO	INTERIOR
TIEMPO DE OPERACION	24 HORAS POR DIA
TIPO DE ARRANQUE	TENSION REDUCIDA
CORRIENTE NOMINAL	931 AMP.

CARACTERISTICAS GENERALES DE LAS BOMBAS DE PB4 y PB-5

En esta planta se tienen cuatro bombas verticales de flujo mixto, dos pasos, lubricadas por agua y accionadas con motor eléctrico vertical de inducción jaula de ardilla.



MARCA	U.C.P. (UNITED CENTRIFUGAL PUMPS)
POSICION DEL EJE	HORIZONTAL
TIPO	CENTRIFUGA
SUCCION	DOBLE
CARCAZA	BIPARTIDA
NUMERO DE PASOS	2
VELOCIDAD ANGULAR	1,790 R.P.M.
LIQUIDO A MANEJAR	AGUA DE RIO
SENTIDO DE ROTACION	DERECHO (VISTO DEL MOTOR HACIA LA BOMBA)
POSICION DEL MOTOR	IZQUIERDO
TIEMPO DE OPERACIÓN	24 HORAS POR DIA
GASTO	1,333 LPS
CARGA	334.71 M.C.A.
NIVEL MINIMO DE OPERACION	1 MTS. EN TANQUE DE SUCCION
VELOCIDAD MAXIMA EN SENTIDO INVERZO	2,000 R.P.M.
SUCCION	TANQUE
DESCARGA	MULTIPLE
EFICIENCIA	86%
DIAMETRO DE SUCCION	20 "
DIAMETRO DE DESCARGA	20 "