



01162  
2  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO  
FACULTAD DE INGENIERIA



COMPUERTA ABATIBLE AUTOMATIZADA CON  
HIDROGENERACIÓN DE ENERGIA ELECTRICA

**EDGAR ANTÚNEZ LEYVA**

**T E S I S**

PRESENTADA A LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN INGENIERÍA (HIDRÁULICA)

CAMPUS-MORELOS

303  
2001



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **DEDICATORIAS**

*Al creador de todas las cosas por permitirme culminar una meta más.*

*A mis padres Efrén y Graciela por el ejemplo que me han dado.*

*A mis hermanas Maribel e Ivonne por su apoyo incondicional.*

*A mi esposa e hijos; Lilia, Yair, Dylan y Emmanuel  
por todo su amor y ternura depositados en mí.*

## **AGRADECIMIENTOS**

*A la Universidad Nacional Autónoma de México por mi formación académica.*

*Al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua por el apoyo y facilidades otorgadas de sus instalaciones e infraestructura para llevar a cabo este trabajo de tesis.*

*Al Dr. Nahún Hamed García Villanueva por la confianza depositada al aceptar dirigir este trabajo de tesis así como por su asesoría y valiosa ayuda en el desarrollo del mismo.*

*A la comisión revisora de tesis integradas por el Dr. Polioptro F. Martínez Austria, el Dr. Víctor M. Ruiz Carmona, el M.I. Víctor M. Arroyo Correa y el M.I. Leonel Ochoa Alejo por los consejos, correcciones y sugerencias para mejorar la elaboración de este trabajo de tesis.*

*Al Ing. Efraín Aguilar Hernández por sus acertados comentarios y oportuna intervención en el desarrollo del trabajo.*

*A todos mis profesores y amigos quienes me han apoyado durante todo este tiempo y en quienes encontré el entusiasmo de superación en todos los aspectos.*

# ÍNDICE

---

Página

1	INTRODUCCIÓN .....	1
2	OPCIONES PARA GENERAR UNA FUENTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA .....	5
2.1	Turbinas hidráulicas .....	6
2.2	Ruedas hidráulicas .....	9
2.3	Uso de bombas centrífugas como turbinas hidráulicas .....	9
2.4	Generación de energía eléctrica con un motor diesel .....	12
2.5	Generación de energía eléctrica aprovechando la energía solar .....	13
2.6	Generación de energía eléctrica por medio de generadores .....	16
2.6.1	Dínamo .....	17
2.6.2	Alternador .....	18
2.7	Ramificación de una línea eléctrica .....	20
2.8	Conclusiones de las alternativas de generación de energía eléctrica .....	20
2.9	Automatización fluidica .....	21
2.10	Compuertas .....	22
3	DISPOSITIVOS QUE INTEGRAN EL SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y AUTOMATIZACIÓN DE LA COMPUERTA ABATIBLE. ....	24
3.1	Planteamiento del sistema de hidrogenación .....	24
3.2	Características de la rueda hidráulica .....	26
3.3	Selección del generador de corriente .....	29
3.4	Material de la flecha y las aspas .....	32
3.5	Tren de engranajes .....	34
3.6	Rodamientos .....	37
3.7	Controlador de niveles .....	38
3.8	Acumulador .....	40
3.9	Alternativas de control de la compuerta .....	44
3.9.1	Control neumático por medio de pistones .....	44
3.9.2	Control electromecánico con engranes (piñón y cremallera) .....	45
3.9.3	Control electromecánico con actuador eléctrico y operador de engranes .....	46
3.10	Fuerza hidrostática sobre la compuerta abatible .....	48

<b>4</b>	<b>DISEÑO, ADAPTACIÓN, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DEL SISTEMA INTEGRAL PRELIMINAR</b>	<b>50</b>
4.1	Descripción del canal de pruebas .....	50
4.2	Diseño y adaptación de los elementos del sistema en su versión inicial .....	52
4.3	Construcción del sistema integral .....	59
4.4	Evaluación del sistema integral preliminar .....	60
4.4.1	Procedimiento de las pruebas .....	60
4.4.2	Pruebas realizadas y resultados .....	61
4.4.3	Observaciones y modificaciones .....	68
<b>5</b>	<b>SISTEMA INTEGRAL FINAL</b> .....	<b>71</b>
5.1	Cambios finales del sistema integral .....	72
5.1.1	Sistema de control .....	72
5.1.2	Cambios en el rodete .....	73
5.1.3	Amplificador de voltaje .....	75
5.2	Evaluación del sistema final .....	76
5.3	Resultados del sistema final .....	77
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>80</b>
	Conclusiones .....	80
	Recomendaciones .....	82
	ANEXOS .....	83
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	88

## ÍNDICE DE LÁMINAS

---

	Página
Lámina 2.1 Diferentes rodetes de una turbina Francis .....	6
Lámina 2.2 Rodetes de una turbina Kaplan .....	6
Lámina 2.3 Rodetes de una turbina Pelton .....	7
Lámina 2.4 Alimentación de una turbina Francis .....	7
Lámina 2.5 Elementos principales de una turbina Pelton .....	8
Lámina 2.6 Ruedas hidráulicas según la forma de entrada del fluido .....	9
Lámina 2.7 Bomba centrífuga funcionando a la inversa .....	10
Lámina 2.8 Elementos principales de un motor diesel .....	13
Lámina 2.9 Panel de celdas fotoeléctricas .....	14
Lámina 2.10 Concentración de energía solar .....	15
Lámina 2.11 Diagrama del principio de funcionamiento de un motor solar .....	16
Lámina 2.12 Sección de un dínamo .....	17
Lámina 2.13 Partes que integran un alternador .....	19
Lámina 2.14 Compuertas deslizantes .....	22
Lámina 2.15 Compuertas abatibles .....	23
Lámina 3.1 Planteamiento del sistema en forma general .....	25
Lámina 3.2 Proceso de transferencia de energías .....	25
Lámina 3.3 Fuerza del fluido sobre una aspa o álabe .....	26
Lámina 3.4 Velocidad con que el agua golpea las aspas de una rueda que gira.....	27
Lámina 3.5 Dimensionamiento del rodete en función del tirante del canal .....	28
Lámina 3.6 Gráfica del generador de corriente continua (alternador) .....	31
Lámina 3.7 Gráfica del generador de corriente continua (dínamo) .....	32
Lámina 3.8 Sistema mecánico de transmisión .....	35
Lámina 3.9 Unidad central (control de niveles) .....	38
Lámina 3.10 Elementos internos de un acumulador .....	41
Lámina 3.11 Sistema de control neumático .....	45
Lámina 3.12 Sistema de control electromecánico (piñón cremallera) .....	46
Lámina 3.13 Control electromecánico de actuador y operador de engranes .....	47
Lámina 3.14 Estimación del torque para seleccionar la unidad de potencia .....	48
Lámina 4.1 Vistas del canal de laboratorio .....	51
Lámina 4.2 Vertedor rectangular de contracciones laterales .....	51
Lámina 4.3 Dimensionamiento del rodete .....	53
Lámina 4.4 Cuerpo de la compuerta .....	54

continuación

---

	Página
Lámina 4.5	Vistas de la compuerta y posición del rodete ..... 55
Lámina 4.6	Dimensionamiento de flechas y elementos que las integran ..... 56
Lámina 4.7	Dimensionamiento del sistema de transmisión, alternador y motor de control 57
Lámina 4.8	Posición del acumulador ..... 58
Lámina 4.9	Puntos de muestreo sobre la compuerta abatible ..... 63
Lámina 4.10	Perfil de tirantes sobre la compuerta ..... 64
Lámina 4.11	Perfil de velocidades sobre la compuerta ..... 65
Lámina 4.12	Perfil de velocidades promedio medida en la posición $Y_1$ ..... 66
Lámina 4.13	Comportamiento del rodete ..... 68
Lámina 5.1	Resistencias mecánicas en el sistema de transmisión ..... 73
Lámina 5.2	Elementos que integran el rodete y su equivalencia en resistencias ..... 74
Lámina 5.3	Resultados obtenidos de las pruebas finales y sus gráficos respectivos ..... 78
Lámina 5.4	Rangos de operación y generación ..... 79



## ÍNDICE DE TABLAS

---

	Página
Tabla 1.1 Pérdidas en varios canales principales .....	1
Tabla 3.1 Características estimadas del rodete respecto a una carga mínima .....	28
Tabla 3.2 Resultados obtenidos del alternador .....	30
Tabla 3.3 Resultados obtenidos de las pruebas realizadas al dínamo .....	31
Tabla 3.4 Propiedades de algunas aleaciones de aluminio .....	33
Tabla 3.5 Composiciones y propiedades de algunos aceros inoxidables .....	34
Tabla 3.6 Características de los engranes rectos .....	36
Tabla 3.7 Algunas características de aleaciones metálicas para rodamientos .....	38
Tabla 3.8 Estado de carga aproximada del acumulador .....	43
Tabla 3.9 Demandas típicas de corriente en automóviles de pasajeros .....	43
Tabla 3.10 Tipo de acumulador respecto a la demanda de energía .....	44
Tabla 4.1 Datos existentes de la calibración del vertedor rectangular .....	52
Tabla 4.2 Resultados preliminares de la prueba No. 1 .....	63
Tabla 4.3 Resultados obtenidos de la prueba No. 2 .....	67
Tabla 5.1 Cargas mínimas de generación .....	77

## ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

---

		Página
Fotografía I	Equipo utilizado en las pruebas de los generadores .....	30
Fotografía II	Cuerpo de la compuerta .....	59
Fotografía III	Rodete dentro de la compuerta .....	59
Fotografía VI	Sistema integral preliminar .....	60
Fotografía V	Motor y rueda dentada .....	72
Fotografía VI	Extensión y operador de engranes .....	72
Fotografía VII	Elementos que integran el rodete .....	74
Fotografía VIII	Generador de corriente continua. ....	74
Fotografía IX	Instalación de los generadores .....	75
Fotografía X	Engrane interior o anular .....	75
Fotografía XI	Amplificador de voltaje .....	75
Fotografía XII	Ubicación del amplificador .....	75
Fotografía XIII	Ubicación de la compuerta dentro del canal de pruebas .....	76
Fotografía XVI	Evaluación del sistema final puesto en operación .....	76

---

# CAPÍTULO

# 1

## INTRODUCCIÓN

México está pasando por un proceso de modernización de las zonas de riego y como parte de la política hidráulica que se ha establecido con el fin de alcanzar la sustentabilidad del medio rural, se ha planteado la necesidad de mejorar y aprovechar al máximo la infraestructura hidroagrícola existente. Bajo este marco de referencia se contempla actualizar y mejorar la infraestructura asociada a la operación de la red principal de canales.

En particular, se han planteado y se están llevando a cabo una serie de estrategias y acciones para modernizar las estructuras de control de niveles y de caudales con el fin de incrementar la eficiencia y la flexibilidad en la operación y distribución del recurso agua para riego. En este sentido es importante hacer notar que las pérdidas por operación en las zonas de riego del país son del orden del 20%<sup>[1]</sup>, mientras que en los países más avanzados tecnológicamente son del orden del 10%<sup>[2]</sup>. A manera de ejemplo, en la tabla 1.1 se incluyen algunos datos al respecto.

Tabla 1.1 Pérdidas en varios canales principales.<sup>[3]</sup>

Canal	Pérdidas (%)		
	Evaporación	Infiltración	Operación
Principal Humaya	1.24	2.49	17.81
Alto Yaqui	0.34	4.28	9.35
Bajo Yaqui	0.19	2.31	12.83
El carrizo	0.28	1.76	13.18
Río Florido	0.18	4.88	31.93
A. Coria	0.23	11.14	13.48

En atención a esta problemática, la Comisión Nacional del Agua, a través de la Subdirección General de Operación, y esta a su vez por medio de la Gerencia Nacional de Distritos y Unidades de Riego, está promoviendo una serie de proyectos de transferencia tecnológica para automatizar la operación utilizando estructuras auto-operantes. Así, por ejemplo, se han realizado importantes esfuerzos para automatizar diversos canales como son, el Canal Anzaldúas, en el distrito de riego 026 Bajo Río San Juan, y el Rode, en el distrito de riego 025 Bajo Río Bravo. En estos canales se han instalado compuertas auto-operantes tipo AMIL; sin embargo y no obstante que estas compuertas son apropiadas para el control aguas arriba, que es el que predomina en estos canales, por otro lado, tienen la restricción de controlar un solo nivel, o sea, tienen poca flexibilidad en la variación de niveles durante la operación del canal.

Esta restricción ha frenado sustancialmente la introducción de esta tecnología, esto se debe fundamentalmente a que los usuarios se resisten a modificar las prácticas de operación que realizan y, por consecuencia, argumentando una pérdida de flexibilidad, se han manifestado en contra de esta opción tecnológica.

Si bien la posición de los usuarios es un tanto extrema, por otra parte también se debe de reconocer que en cierta medida tienen razón, así por ejemplo, es importante señalar que las compuertas AMIL no cierran en forma hermética y por consecuencia resultan sumamente ineficientes para el manejo de gastos pequeños (situación muy común durante los periodos en que únicamente circulan los gastos requeridos para usos domésticos e industriales, o sea, durante los periodos en que no se riega) ya que obligan a mantener el canal lleno con las consecuentes pérdidas por infiltración, las cuales pueden llegar a ser significativamente altas e incluso del orden de los gastos circulantes.<sup>[4]</sup>

Con base en lo anterior, se justifica tanto proponer como realizar estudios de investigación experimental orientados al desarrollo de tecnología para automatizar el control de diferentes niveles en los canales de riego. Una opción, en este sentido, y que es la que da origen a esta tesis, consiste en utilizar compuertas abatibles (del tipo OVERSHOT<sup>[5]</sup>) automatizadas electromecánicamente. La desventaja de este tipo de alternativa tecnológica radica en su dependencia de una fuente de energía eléctrica, situación que no es muy común en las zonas de riego. Para solucionar esta problemática se propuso aprovechar la energía hidráulica disponible en el mismo canal. Esto se logró haciendo su conversión a energía eléctrica a través de un sistema electromecánico ubicado en la propia estructura de control.

Aquí, y antes de entrar en materia, es importante hacer notar que para el desarrollo de este producto tecnológico se establecieron a priori, las siguientes consideraciones de partida:

1. Técnica y económicamente es viable el desarrollo de una compuerta abatible automatizada con sistema de autogeneración de energía ya que se cuenta con los conocimientos básicos para su diseño y, por otra parte, existen en el mercado los elementos necesarios para su construcción.
2. La disponibilidad energética que se puede extraer del agua circulante por el canal garantiza los requerimientos exigidos para el funcionamiento del producto en desarrollo. Es importante hacer notar que los requerimientos de energía son sumamente bajos, por lo que realmente se trata de un sistema de microgeneración a una escala fuera de lo convencionalmente conocido.
3. Se cuenta dentro del Laboratorio de Hidráulica Enzo Levi, del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), con la infraestructura necesaria para realizar los estudios y trabajos de carácter teórico-experimental para validar el producto resultante.
4. Dada la tecnología existente en el mercado nacional, es viable proponer un sistema de microgeneración de energía eléctrica y control automático integral; condicionando que la mayoría de los componentes que lo integren formen parte de la misma compuerta.

Afortunadamente, como se demuestra en el cuerpo del trabajo, las consideraciones planteadas se cumplieron durante este estudio, por lo que fue posible desarrollar y validar un primer prototipo de la compuerta. Con el fin de informar al lector sobre el contenido de la tesis, a continuación se realiza una breve descripción de cada uno de los capítulos subsecuentes que la integran.

En el capítulo 2 se realiza el estudio teórico sobre la viabilidad de aprovechar la energía hidráulica disponible en canales abiertos para generar energía eléctrica comparándola con otras opciones alternas de generación de energía eléctrica, también se realiza una revisión referente a compuertas y automatización fluídica.

En el capítulo 3 se incluyen las propuestas originales relacionadas tanto en componentes como en materiales necesarios para transferir la energía hidráulica a energía eléctrica, también se proponen diferentes alternativas de control para obtener la automatización de la compuerta.

---

El capítulo 4 presenta el diseño preliminar del sistema integral, criterios de diseño, construcción, evaluación general del funcionamiento y resultados, con base a estos resultados obtenidos se proponen los cambios y ajustes necesarios del sistema integral preliminar.

En el capítulo 5 se muestran los cambios y ajustes realizados al sistema preliminar; una vez terminados se realiza una evaluación del sistema final, confirmándose de manera experimental la viabilidad de aprovechar la energía hidráulica disponible en canales para generar energía eléctrica y automatizar una compuerta abatible.

Finalmente en el capítulo 6 se realiza un análisis del trabajo de tesis, presentándose las conclusiones y recomendaciones finales del sistema integral

Como se puede apreciar el trabajo de tesis esta relacionado con una problemática actual, tiene interés técnico y académico, además se propone el desarrollo de una tecnología novedosa y acorde a las necesidades del país.

---

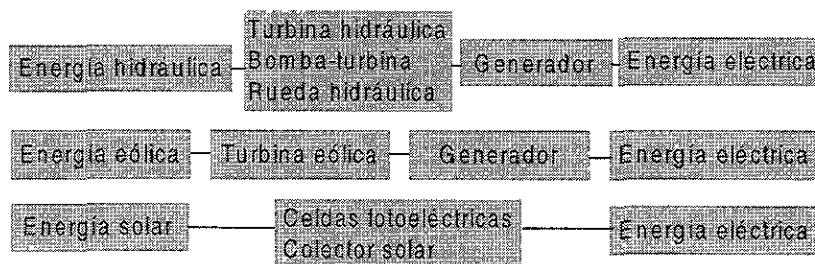
## CAPÍTULO

# 2

## OPCIONES PARA GENERAR UNA FUENTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA

En este capítulo se presenta una breve descripción de algunas de las alternativas que existen para generar una fuente de energía eléctrica y que eventualmente se podrían utilizar para operar la compuerta abatible; se incluye y se discute con más detalle la opción de aprovechar la energía hidráulica asociada con el agua que circula por los canales.

Uno de los primeros objetivos es el de obtener la fuente de energía eléctrica que pueda abastecer la demanda de los dispositivos que tendrá a cargo el control de la compuerta abatible. Expuesto lo anterior, a continuación se muestra en forma de bloques las diferentes opciones para obtener la fuente de energía eléctrica requerida al pie de la estructura.



Además de estas, existen otras fuentes de energía, como son los hidrocarburos o bien la ramificación de una línea eléctrica hasta el punto donde se requiera su demanda.

A continuación se realiza una breve reseña de las fuentes de energía eléctrica que se han mencionado, considerando que alguna de ellas podría adaptarse para obtener la fuente de energía eléctrica que se requiere al pie de la compuerta abatible.

## 2.1 Turbinas hidráulicas

Las turbinas hidráulicas son turbomáquinas que permiten la transferencia de energía del agua a un rotor provisto de alabes, mientras el flujo pasa a través de éstos.<sup>[6, pág. 13]</sup>

Cuando el paso del agua por el rotor se efectúa en dirección radial, las máquinas se llaman radiales, de las cuales, el tipo más representativo es la turbina Francis (ver lámina 2.1). Cuando el paso entre los alabes se hace en la dirección del eje de la máquina se dice que ésta es de tipo axial, de las que son ejemplo la turbina Kaplan (ver lámina 2.2) y la turbina Pelton (ver lámina 2.3), aunque a esta última se le clasifica también como turbina tangencial, por la forma particular de ataque del agua al rotor.

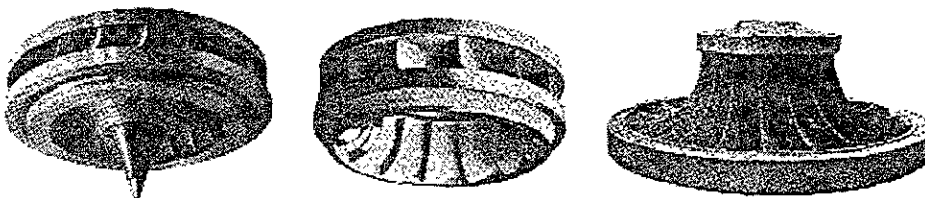


Lámina 2.1 Diferentes rodetes de una turbina Francis

Por otra parte, si la turbina aprovecha solamente la energía cinética del agua, se le denomina de impulso, de la que es ejemplo característico la Pelton. Cuando la turbina es capaz de utilizar la energía estática del agua se llama de reacción, como son la Francis y la Kaplan. El grado de reacción de estas máquinas es siempre inferior a la unidad,<sup>[6, pág. 126]</sup> lo que quiere decir que también puede aprovechar la energía dinámica del agua.

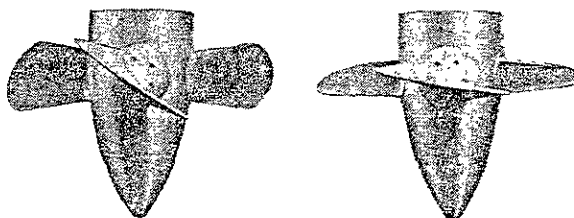


Lámina 2.2 Rodetes de una turbina Kaplan



Ahora bien, dado que la turbina es el órgano fundamental de todo aprovechamiento hidroeléctrico, por ser el que transforma la energía hidráulica en energía mecánica, el rotor de la turbina con sus álabes resulta ser el elemento central de la turbina, pues en él se logra la transferencia energética. Completan la máquina otros elementos auxiliares que contribuyen a que la transformación de energía hidráulica a eléctrica pueda realizarse eficientemente. [6. pág. 122]

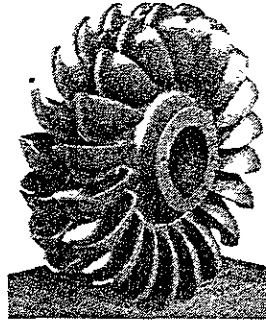


Lámina 2.3 Rodete de una turbina Pelton

Así en las turbinas de reacción (Francis y Kaplan) se dispone un ducto alimentador (ver lámina 2.4) en forma de caracol circundando la máquina, el cual recibe el agua de la tubería de llegada y la sirve al rodete móvil por medio del distribuidor; este último regula el gasto de acuerdo con la potencia exigida a la turbina y además impone al líquido el giro necesario para su acción sobre los álabes.

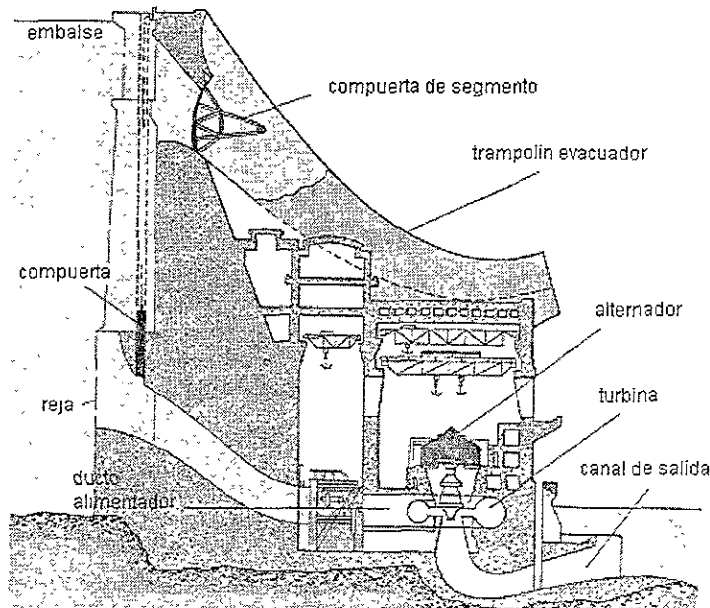


Lámina 2.4 Alimentación de una turbina Francis

En la descarga del agua de la máquina se instala otro ducto abocinado llamado tubo de desfogue, que permite una ganancia en el gradiente de presión y mejora el rendimiento de la máquina. [6. pág. 122]

En la turbina Pelton, la alimentación se efectúa a través de las toberas (ver lámina 2.5), que transforman la energía estática del agua en dinámica para que así pueda ser aprovechada por la rueda móvil provista de álabes. Después de su acción sobre los álabes, el agua cae directamente al socaz a la presión atmosférica. [6. pág. 116]

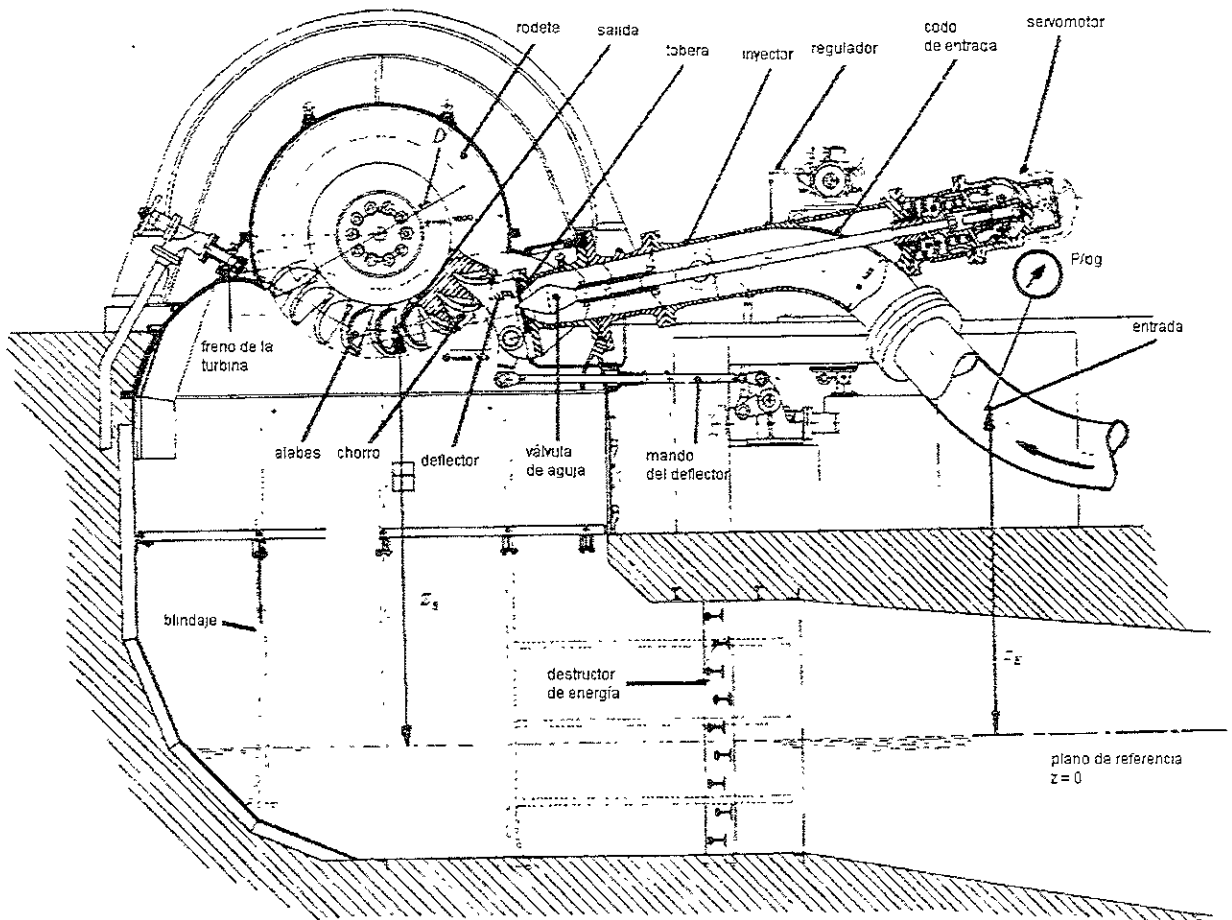


Lámina 2.5 Elementos principales de una turbina Pelton

De las turbinas mencionadas, la turbina Pelton es la que eventualmente podría adaptarse con mayor facilidad a ciertos canales (principales) que cuenten con gastos y cargas elevados; sin embargo, en la práctica y a nivel comercial no existen turbinas lo suficientemente pequeñas para aprovechar eficientemente el potencial hídrico existente en los canales de riego, razón por la cual se descarta la alternativa de emplear una turbina

comercial, sin embargo, no se descarta utilizar una variante de éstas como lo podrían ser las ruedas hidráulicas.

### 2.2 Ruedas hidráulicas

Son cilindros, o coronas, unidos mediante brazos a un árbol horizontal y provisto en su superficie exterior de paletas o álabes, que determinan concavidades, cámaras o cajones. El agua incide con cierta velocidad, choca con las paletas o penetra en las cámaras formadas por los álabes, produciendo en la rueda un movimiento de rotación alrededor del eje horizontal donde va soportada.

Se construyen de madera (que resultan más económicas, aunque son de poca duración y de bajo rendimiento), de hierro y fundición (de elevado precio) y, más generalmente mixtas, de madera y metálicas, que son económicas. Según la forma de entrada del fluido estas se clasifican en ruedas movidas por encima, a la altura del eje y por debajo; en la siguiente lámina se muestran algunas de ellas.

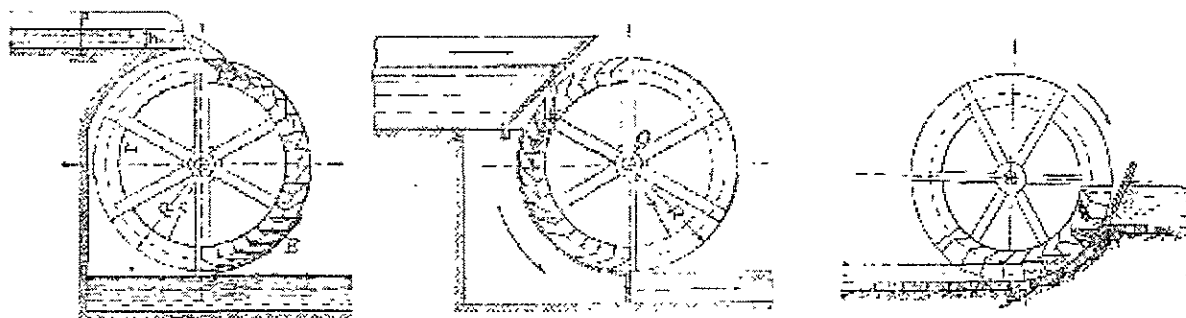


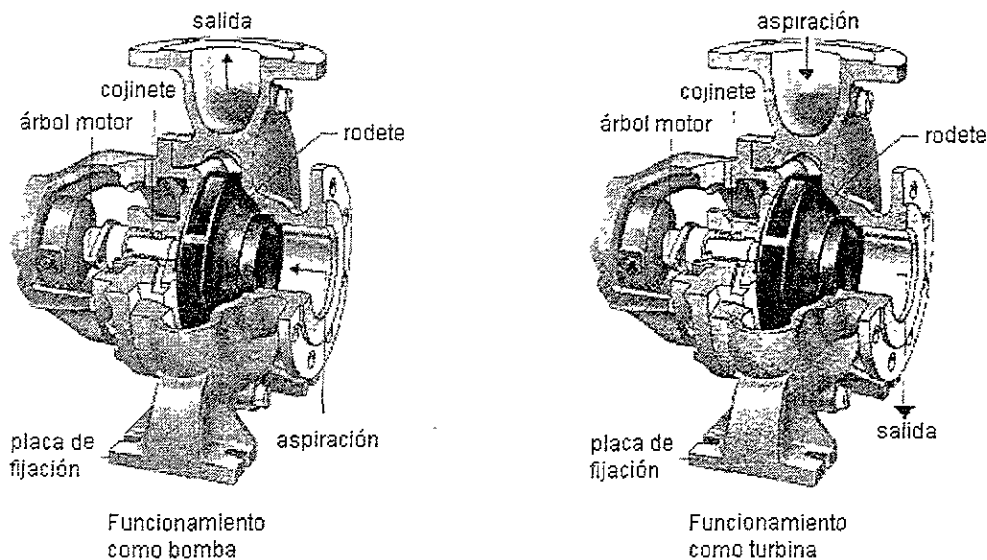
Lámina 2.6 Ruedas hidráulicas, según la forma de entrada del fluido

### 2.3 Uso de bombas centrífugas como turbinas hidráulicas

La posibilidad de utilizar bombas centrífugas ordinarias como turbinas hidráulicas directamente acopladas a generadores síncronos o de inducción para generar energía eléctrica es una solución técnica y económicamente factible.<sup>[8, pág.3]</sup> El uso de estos equipos podría constituir una solución para pequeños aprovechamientos hidroeléctricos destinados a la generación de energía a pequeña escala.

Esta alternativa de utilización de las bombas trae consigo ventajas, como un menor costo de inversión. mayor facilidad de obtención en el mercado nacional. facilidad de instalación, operación y mantenimiento.

En nuestro país se cuenta con un gran potencial hídrico poco explotado, del que se puede obtener la suficiente energía eléctrica para alimentar los dispositivos de control y automatización como son las compuertas abatibles. De aquí que esta opción se pueda plantear como una alternativa de generación de energía eléctrica no convencional, así por ejemplo se puede pensar en el uso de bombas centrífugas funcionando a la inversa (ver lámina 2.7), en vez de las turbinas hidráulicas convencionales (Pelton, Kaplan, Francis, etc.).



**Lámina 2.7 Bomba centrífuga funcionando a la inversa**

Las curvas características<sup>[9]</sup> de una bomba describen su comportamiento bajo cualquier condición de operación. Las curvas características de una bomba operando como turbina se obtienen en forma experimental y su forma depende principalmente del diseño hidrodinámico de la bomba caracterizado por su número específico.<sup>[8, pág.3]</sup>

El punto de máximo rendimiento (P.M.R.) es una buena condición de operación para una turbomáquina, por lo tanto, es de interés conocer la relación que existe en este punto, entre los valores de altura (H) y caudal (Q) de una bomba y de ésta funcionando como turbina hidráulica.<sup>[8, pág. 4]</sup>

Generalmente la máxima eficiencia de la bomba utilizada como turbina es ligeramente inferior al de una turbina convencional, pero esta diferencia puede reducirse si se pone especial cuidado en la fabricación del rodete y de los sellos. lo que dará como consecuencia una reducción en las pérdidas internas.

En muchas instalaciones, especialmente en pequeños aprovechamientos hidroeléctricos, esta diferencia en la máxima eficiencia no es importante toda vez que en muchos casos se dispone de un exceso de agua. La máxima eficiencia de la bomba-turbina dependerá de la velocidad específica y del tamaño de la unidad.<sup>[8, pág. 5]</sup>

La bomba, al funcionar como turbina, trabajará fuera de sus regímenes normales de operación; de allí que, una vez hecha la selección, debe revisarse el diseño de la bomba.

Puesto que las bombas no tienen ningún mecanismo de regulación de flujo, debe esperarse considerable variación de la velocidad de rotación a menos que la carga permanezca constante.

Para que la velocidad de rotación permanezca casi constante se plantean dos modos de regulación de velocidad:

- El primero es el de controlar los parámetros  $Q$  y  $H$ . el sistema consiste básicamente en regular el flujo automáticamente mediante una válvula aguas arriba de la unidad.
- El segundo modo es controlar la variación de carga; esto sólo será posible si el control se hace al nivel del generador eléctrico.

En cualquiera de los dos casos debe utilizarse un regulador de frecuencia.

La velocidad más desfavorable de una bomba cuando funciona como turbina es la velocidad de embalamiento,<sup>[8, pág. 7,8]</sup> por lo que, para unidades que no cuenten con dispositivos de protección de sobrevelocidad, se deberá verificar que la velocidad de embalamiento sea inferior a la condición límite de diseño mecánico de la bomba. De aquí que sea importante y necesario incluir una protección contra la sobrevelocidad, ya que dicha magnitud puede afectar la integridad estructural del equipo.

El costo de inversión de una bomba-turbina es considerablemente menor que el de una turbina convencional; esto se debe principalmente a que su diseño es más simple y además

presenta la ventaja de tener costos de fabricación bastante menores debido a su producción en serie derivado de la gran demanda existente para estas unidades.

Finalmente, las bombas HIDROSTAL norma ISO/DIS-2858 se adaptan satisfactoriamente al funcionamiento como turbinas; el rango de potencia que pueden cubrir está entre 20 a 180 Kw, particularmente se han ensayado los modelos 125-315 y 125-250, habiendo alcanzado rendimientos del orden del 77 y 80% respectivamente.<sup>[8, pág. 12]</sup>

Este tipo de dispositivo genera energía eléctrica a menor escala que una turbina hidráulica convencional, por lo que las características hidráulicas de operación son también muy similares (cargas y gastos elevados), razón que es una limitante para utilizar directamente este tipo de bombas en canales destinados a la agricultura.

## **2.4 Generación de energía eléctrica con un motor diesel**

Para los poblados no muy alejados de grandes ciudades y situados a lo largo de las rutas principales la solución de utilizar un motor diesel es eventualmente posible ya que el costo de la instalación es relativamente bajo.<sup>[10]</sup>

Sin embargo, el motor diesel no es una buena solución para los lugares muy aislados y con pocas facilidades de acceso. Un motor diesel cualquiera, (ver lámina 2.8) requiere de un servicio regular y de un técnico competente; por otra parte, el propietario debe tener un vehículo para poder desplazarse a los lugares de las instalaciones, y para transportar combustible, lo que aumenta el costo de operación.

El motor diesel tiene otra desventaja, que es la contaminación del medio ambiente con humos, ruido, derrame de combustible y aceite. La dificultad de emplear esta solución es obvia; además la crisis de energéticos la llevará cada vez más a situaciones poco competitivas.

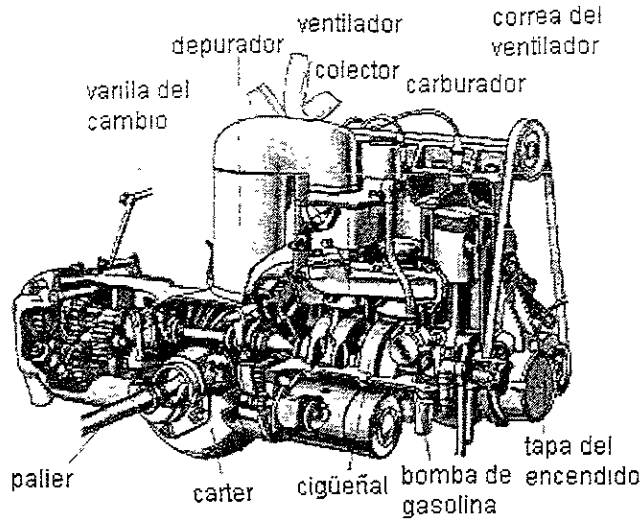


Lámina 2.8 Elementos principales de un motor diesel

## 2.5 Generación de energía eléctrica aprovechando la energía solar

La energía solar posee características muy benéficas tales como el ser completamente gratuita e inagotable, que se encuentra ampliamente distribuida y que no es contaminante, considerándose competitiva con las clásicas fuentes de energía, cuando el sitio que requiere de ella se encuentra relativamente lejos de los centros de producción de energía eléctrica.

Es aparentemente inexplicable que el aprovechamiento de la energía solar no esté más generalizado, después de varias décadas de investigaciones, sobre todo debido a que al nivel del suelo, en días despejados, la cantidad de energía solar recibida es de más de 1 Kw/m<sup>2</sup>, o sea abundante. La razón de esto es que puede ser en algunas ocasiones, difícil de aprovechar para aplicaciones especiales, pues en esos casos se requiere de técnicas y diseños adecuados.

Sin embargo, existen factores que condicionan el uso de la energía solar, entre los que destacan la presencia de nubes, las cuales disminuyen la energía recibida a nivel del suelo, por lo tanto deben adaptarse técnicas tendientes a satisfacer las necesidades propias de las regiones de acuerdo al porcentaje de días despejados al año. También se sabe que la energía solar que se recibe no es continua, así que deberá ser aplicada a satisfacer necesidades que tampoco sean continuas, o en su defecto, captar energía en exceso para ser almacenada y usada después.

Por último, se debe agregar que en las naciones en vías de desarrollo, son las áreas rurales las más necesitadas; razón por la que podemos considerar que las zonas propias para instalaciones solares son aquellas regiones inaccesibles y en las que sus habitantes carecen de los medios más elementales. Algunos de los métodos para aprovechar la energía solar son:

- a) *La conversión directa de la energía solar, en energía eléctrica.*- Para esta conversión se pueden utilizar celdas fotoeléctricas (ver lámina 2.9). Si se considera que en un metro cuadrado se recibe 1 Kw, en una superficie de 36 por 48 cm que contiene 64 celdas, es posible obtener 8 watt y se necesitaría una superficie de aproximadamente 25 m<sup>2</sup> de celdas para obtener 1.5 HP, lo que a primera vista hace aparecer esta solución como atractiva, sin embargo, actualmente resulta más costosa que utilizando motores solares, y es por ahora de uso exclusivo de la industria espacial.

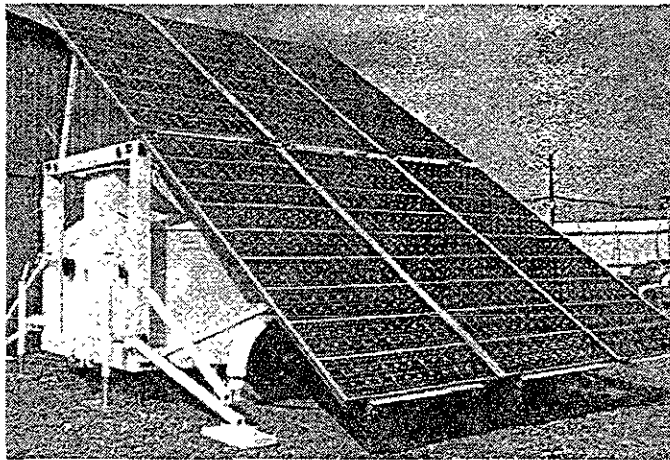


Lámina 2.9 Panel de celdas fotoeléctricas

- b) *La producción de energía mecánica por concentración de la energía solar.*- Esta se lleva a cabo usando espejos parabólicos que concentran los rayos solares sobre un punto, de tal forma que el calor así producido, integra un sistema termodinámico convencional y logra un resultado atractivo (ver lámina 2.10).

No obstante este sistema presenta inconvenientes tales que no se utiliza excepto en casos especiales, ya que la concentración requiere de rayos paralelos y de la ausencia de nubes, lo cual es relativamente poco frecuente; requiere además de una constante y precisa reorientación de los espejos lo que implica mecanismos complicados y difíciles



de mantener y finalmente la superficie de los espejos debe mantenerse constantemente en buenas condiciones y perfectamente limpia, operación que puede ser embarazosa y costosa.

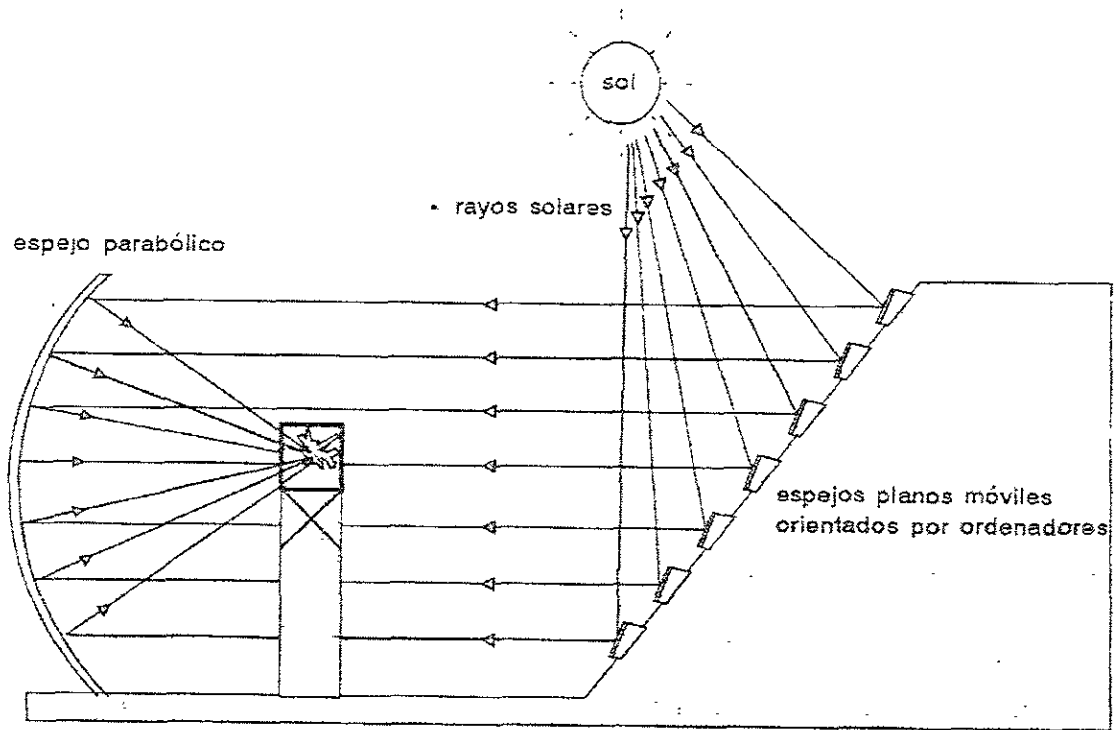


Lámina 2.10 Concentración de energía solar

- c) **La producción de energía mecánica sin concentrar los rayos solares.**- Este método ha empezado a utilizarse con éxito en las zonas áridas de México, empleando motores solares con buenos resultados para el riego, abrevaderos y dotación de agua para pequeños poblados.

Los motores solares que utilizan este último método trabajan básicamente con agua calentada por el sol, a temperaturas de alrededor de  $70^{\circ}\text{C}$ , las que son producidas fácilmente por los colectores fijos. La instalación tiene un funcionamiento diario de alrededor de 7 horas, y funciona aún cuando se presenten nubes ligeras.

La energía solar se capta en una superficie plana fija, la que es llamada superficie colectora, que tiene una capacidad térmica suficientemente grande para poder soportar la ausencia de sol por algunos minutos. El funcionamiento se ilustra en la lámina 2.11. Esta superficie está construida con canaletas estructurales de asbesto y transmite el calor al agua que circula en unos tubos en un circuito sellado, por termosifón.

Esta tecnología no está limitada en potencia, dependiendo del área colectora y del tamaño del equipo, y bajo el mismo principio pueden construirse instalaciones prácticamente tan grandes como se desee.

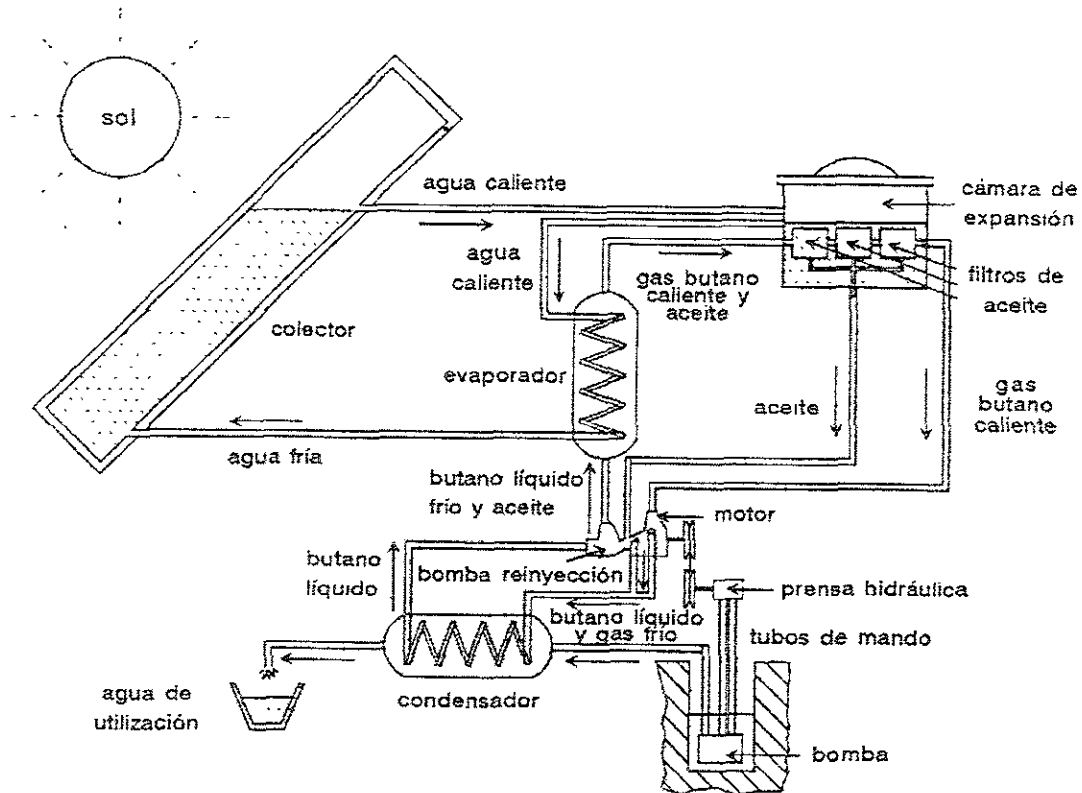


Lámina 2.11 Diagrama del principio de funcionamiento de un motor solar

De las desventajas que presenta este tipo de sistemas son:

- Tiene mayor éxito en zonas áridas (al norte del país)
- Para instalaciones grandes se requieren de elevados costos
- Instalación visible con probabilidad de la pérdida del equipo o algún componente
- Se vuelve ineficiente en temporada de lluvias.

## 2.6 Energía eléctrica por medio de generadores

Los generadores de corriente continua requieren de energía mecánica para generar energía eléctrica, esta energía mecánica puede ser proporcionada por la energía cinética del fluido en el canal; existen generadores tan variados como se desee utilizar, sin embargo, es conveniente utilizar un generador pequeño y comercial como es el caso de los dínamos o

alternadores, si se toma en cuenta que la energía que se puede extraer de los canales de riego es limitada (pero suficiente como para operar una compuerta abatible).

**2.6.1 Dínamo.-** Un dínamo,<sup>[11]</sup> como cualquier convertidor electromecánico de energía, está constituido desde el punto de vista mecánico, por una parte fija denominada estator y por una parte móvil llamada rotor, que gira en su interior; entre ambas queda un pequeño intervalo de aire, denominado entrehierro.

En el estator se dispone el inductor, destinado a producir el campo magnético de excitación. El inductor está constituido por un número par de devanados dispuestos sobre igual número de polos salientes unidos a una corona de acero dulce denominado culata. Según el número de pares de polos, el dínamo se denomina bipolar si tiene dos polos, o multipolar si tiene más de dos.

En el rotor se encuentra el inducido (ver lámina 2.12), formado por un núcleo cilíndrico laminado constituido por chapas magnéticas al silicio, sobre el cual se dispone el devanado del inducido.

Las bobinas de este devanado se alojan en unas ranuras practicadas sobre el núcleo. La forma de arrollamiento puede ser: en las máquinas bipolares, en forma de anillo o en tambor, y en las máquinas multipolares, imbricado cuando se conectan las bobinas cuando tienen sus lados homólogos bajo un mismo polo, o bien ondulado en el caso de que se encuentren bajo polos distintos.

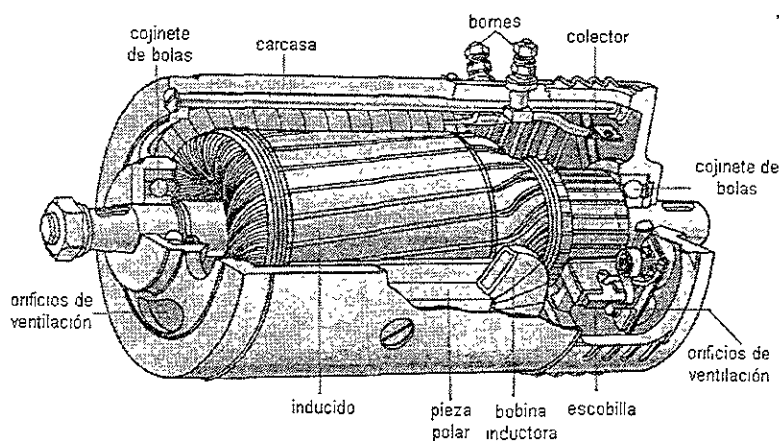


Lámina 2.12 Sección de un dínamo

Como elemento muy importante del dínamo debe citarse el colector, que tiene como misión mantener constante la polaridad de los bornes de la máquina. Las delgas del colector se hallan conectadas a las bobinas del inducido y sobre ellas se apoyan unos contactos especiales de rozamiento denominadas escobillas, que están fijos al estator. Las escobillas, que se colocan en un número igual al de los polos de la máquina y se sitúan en su zona neutra magnética, constituyen los bornes del generador.

El campo magnético de excitación del dínamo es producido por una corriente continua que circula por el devanado inductor; según la procedencia de esta corriente se pueden considerar dos tipos de excitación:

- Excitación independiente, cuando la corriente inductora se obtiene a partir de una fuente externa a la máquina.
- Autoexcitación, cuando la corriente inductora la suministra el propio inducido de la máquina.

Si el arrollamiento inductor se conecta en paralelo con el inducido, la autoexcitación se denomina excitación derivación o shunt; si se conecta en serie, excitación serie. Una combinación muy interesante de estas dos excitaciones la constituye la excitación compuesta o compoud, que se emplea para mantener constante la tensión en bornes en los casos que se prevén variaciones rápidas de la carga.

Cuando los dínamos funcionan en carga, la corriente que circula por el inducido da lugar a un campo magnético perpendicular al creado por el inductor. Este campo, que se denomina campo de reacción del inducido, origina el desplazamiento de la zona neutra de la máquina y obliga al decalado de las escobillas.

**2.6.2 Alternador.-** El alternador<sup>[12, pág 249]</sup> tiene el mismo propósito que el dínamo, que es convertir la energía mecánica en energía eléctrica, y así poder almacenarla y suministrar el equipo de control de la compuerta abatible.

El alternador funciona bajo la misma teoría eléctrica que un dínamo, la lámina 2.13 muestra algunos de los elementos que lo integran y su descripción se da a continuación:

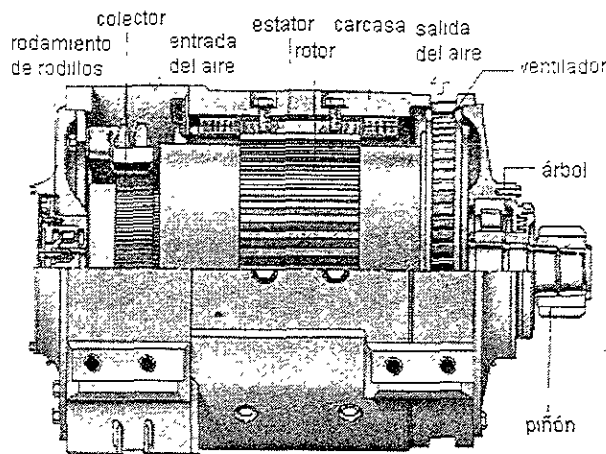


Lámina 2.13 Partes que integran un alternador

- Un rotor hecho de dos polos de dedos múltiples montado en un eje sobre una bobina de alambre (un electromagneto), cada extremo de la cual está unida a un anillo aislado, deslizante.
- Un juego de escobillas que llevan la corriente de la batería a los anillos deslizantes del electromagneto del rotor.
- Un estator montado en el armazón del alternador y que consiste en alambres enrollados y conectados entre sí, de tal manera que la corriente producida por un alambre se agrega a la de los demás.
- Los extremos del armazón y los cojinetes que soportan el rotor en el armazón; además, de una polea que está unida al eje del rotor.
- Dos juegos de tres diodos que son usados para convertir la corriente alterna producida en el estator en la corriente directa que requiere el sistema eléctrico de control.

**Regulador del alternador.-** Para controlar la producción del alternador se usa una unidad llamada regulador de voltaje,<sup>[12, pág. 250]</sup> su función es la de mantener el control de corriente y voltaje, así como el de conectar y desconectar el alternador al sistema eléctrico de control.

Para utilizar cualquier generador de corriente se requiere de un mecanismo que proporcione energía mecánica; se puede obtener esta energía si se aprovecha la energía hidráulica del mismo canal, que es energía que siempre esta disponible y que raras veces se le encuentra un uso adecuado.

## **2.7 Ramificación de una línea eléctrica**

Cuando un poblado tiene los medios económicos para ramificar una línea eléctrica, no solamente aporta una línea para suministrar el equipo que utilice, sino también la electrificación general. En este caso la solución es mejor a la de cualquier otro medio de los antes descritos para obtener el suministro de energía eléctrica.

En cambio, para las grandes regiones que se dedican a la ganadería o irrigación, el costo de ramificación de una línea eléctrica es elevado (existen casos, por ejemplo, en que líneas de alta tensión atraviesan una región, sin que ningún ejido o rancho se beneficie debido al alto costo de una subestación y ramificación eléctrica).

## **2.8 Conclusiones de las alternativas de generación de energía eléctrica.**

De las diferentes opciones citadas que podrían adoptarse con relativa facilidad para obtener la fuente de energía eléctrica requerida al pie de la estructura son: la energía solar o una combinación de la rueda hidráulica y los generadores de corriente continua.

Sin embargo, es conveniente hacer mención del especial interés que se tiene del potencial y viabilidad de aprovechar la energía hidráulica que fluye por el canal para generar una fuente de energía eléctrica; razón por la cual se decidió utilizar la segunda opción. Claro sin hacer a un lado la primera opción en donde existen estudios amplios, detallados y comprobados de utilizar la energía solar como una fuente de energía eléctrica fiable y segura para operar una infinidad de dispositivos de automatización que así lo requieran.

Para aprovechar la energía hidráulica del canal es necesario utilizar una rueda hidráulica (rodete) que permita la transferencia de la energía del agua al rodete provisto de álabes mientras el flujo pasa a través de ellos. La energía obtenida en el rodete se transfiere al generador de corriente continua el cual se encarga de generar la energía eléctrica para suministrar el equipo de control o automatización.

Tomando en cuenta que las cargas y gastos de los canales en las zonas de riego son pequeños se contemplo utilizar un sistema de transmisión (tren de engranes) para aumentar las velocidades de giro cedidas en la misma flecha de la rueda hidráulica y que acoplan al generador de corriente continua.

## 2.9 Automatización fluidica

Los dispositivos automáticos se han empleado exitosamente en varios campos de la ingeniería; en las obras hidráulicas ofrecen muchas ventajas, entre otras aumentan su eficiencia de operación, reducen los gastos de mantenimiento y de vigilancia, y en caso de que se tomen las medidas de seguridad necesarias, aumentan la confiabilidad de trabajo del sistema hidráulico en el que se colocan.<sup>[13]</sup>

En los dispositivos fluidicos se lleva a cabo un aprovechamiento racional de la energía hidráulica, de tal manera que el agua se convierte en el elemento que ejecuta una o varias labores específicas con la ayuda de algún elemento mecánico, y/o disposición geométrica especial.

La utilización de dispositivos fluidicos permite que la operación de una obra hidráulica determinada sea casi, si no es que completamente, independiente de la responsabilidad de vigilantes, operarios y personal de mantenimiento, así como una tendencia hacia la optimización en el logro de los objetivos para los cuales fue planeada la obra misma.

De acuerdo con la labor que el agua desarrolle dentro de ellos, aquí se consideran tres tipos de dispositivos fluidicos automáticos: de control, disipadores de energía y de servicio.

**Dispositivos de control.** Su objetivo, como su nombre lo indica, es regular, limitar o fijar el intervalo de variación de ciertos parámetros físicos que se desea controlar en una estructura hidráulica determinada (sifones, dispositivos de vórtice, compuertas y válvulas automáticas, derivaciones de gasto constante).

**Dispositivos para disipación de energía.** El diseño de dispositivos amortiguadores de energía, que como estructuras terminales se utilizan en vertedores de demasías, es uno de los problemas más importantes a los que se enfrenta el proyectista de obras hidráulicas (tanque amortiguador y la cubeta deflectora, interacción de chorros libres, acción de chorros sumergidos).

**Dispositivos de servicio.** Se consideran dispositivos fluidicos (automáticos) de servicio aquellos en los que el agua desarrolla una labor sin necesidad de intervención humana. De acuerdo con lo anterior, cualquiera sería de servicio; sin embargo, en el caso particular

de estos el agua se trata como el agente que ejecuta un trabajo en el que se ven involucrados de manera importante sustancias extrañas a ella (remoción u acumulación de materiales sólidos, desarenadores fluídicos, tratamiento de aguas).

En este caso se trata de una compuerta abatible automatizada, que se clasifica como un dispositivo de control, cuyo propósito es precisamente controlar las variaciones de niveles (tirante) dentro de un canal.

### 2.10 Compuertas

Para fines prácticos, se puede decir que existen dos tipos de compuertas:

- a) **Descarga por debajo de la estructura (orificio)**, consiste en una placa móvil, plana o curva (normalmente radial), que al levantarse permite graduar la altura del orificio que se va descubriendo, a la vez que controla la descarga producida (ver lámina 2.14). El orificio generalmente se hace entre el piso de un canal y el borde inferior de la compuerta, por lo que su ancho coincide con el del canal.<sup>[14, pág. 213]</sup>

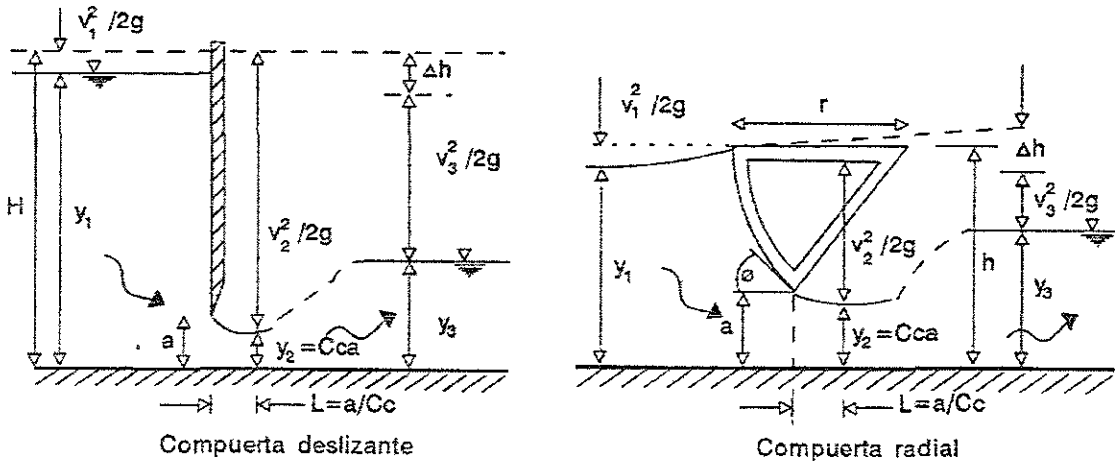


Lámina 2.14 Compuertas deslizantes

Para determinar el gasto se utiliza la ecuación del orificio

$$Q = \mu ab \sqrt{2g \Delta h} \tag{2.1}$$

donde:

- $\mu$  = coeficiente de caudal
- $b$  = ancho del canal [m]



$a$  = altura de apertura [m]

$\Delta h$  = diferencia de cargas [m]

$g$  = aceleración de la gravedad [ $m/s^2$ ]

- b) **Descarga sobre la estructura (vertedor)**, cuando la descarga del líquido es a superficie libre y se efectúa por encima de un muro o de una placa, la estructura hidráulica en la que ocurre se llama vertedor; este puede presentar diferentes formas según la finalidad a que se destine.<sup>[14, pág. 241]</sup> Para la determinación del gasto que vierte sobre ella se utiliza la ecuación 2.2 siendo  $h$  la carga sobre el vertedor.

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g\mu} b h^{3/2} \quad (2.2)$$

donde:

$\mu$  = coeficiente de caudal

$b$  = ancho del canal [m]

$h$  = carga sobre la compuerta [m]

$g$  = aceleración de la gravedad [ $m/s^2$ ]

Las compuertas abatibles no son más que un vertedor móvil cuya finalidad es mantener el nivel de la superficie libre hacia aguas arriba constante.<sup>[15]</sup> Las compuertas abatibles pueden tener diferentes formas desde una simple placa inclinada hasta tener la forma de una compuerta radial (ver lámina 2.15).

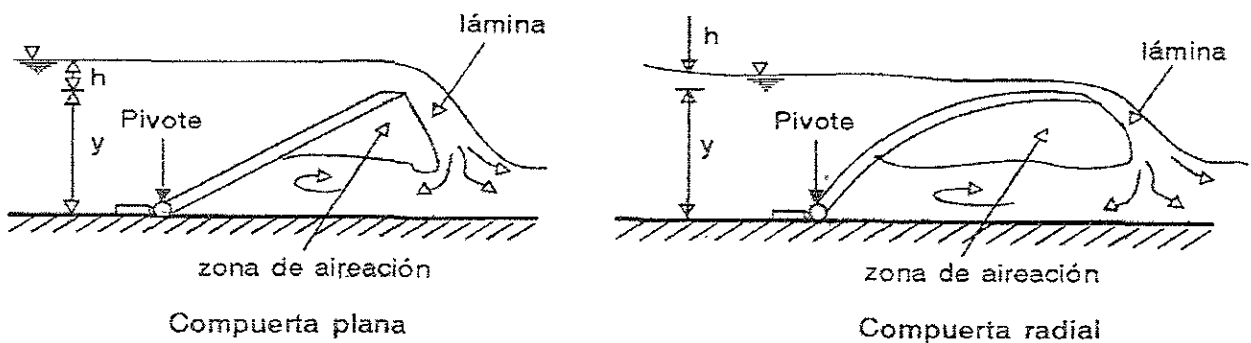


Lámina 2.15 Compuertas abatibles

---

## CAPÍTULO

# 3

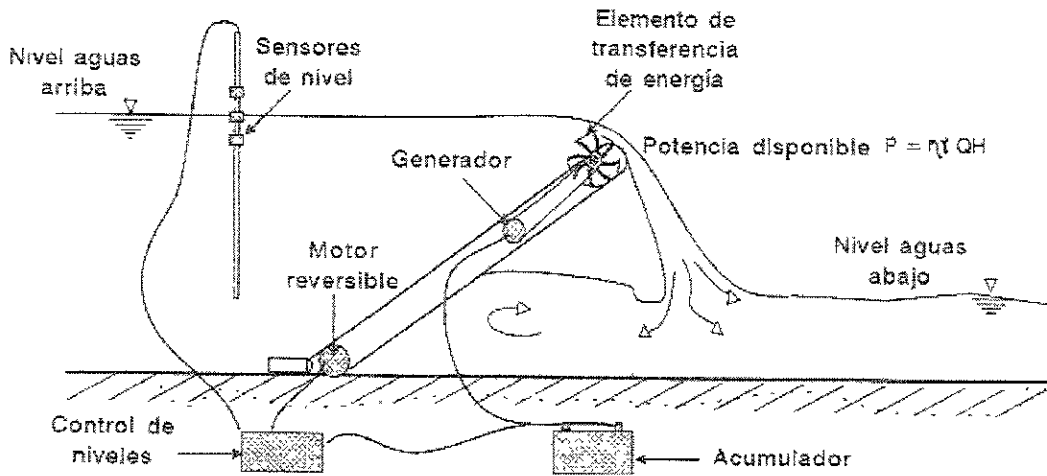
### **DISPOSITIVOS QUE INTEGRAN EL SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y DE LA AUTOMATIZACIÓN DE LA COMPUERTA ABATIBLE.**

Puesto que los objetivos de la tesis son: generar una fuente de energía eléctrica al pie de la compuerta que pueda abastecer la demanda energética de los dispositivos que tendrán a cargo el control de dicha compuerta mediante la automatización. Para lograr este fin, primeramente, se propone obtener dicha fuente de energía del agua que circula en el propio canal realizando la transformación de energía hidráulica a energía eléctrica.

#### **3.1 Planteamiento del sistema de hidrogenación**

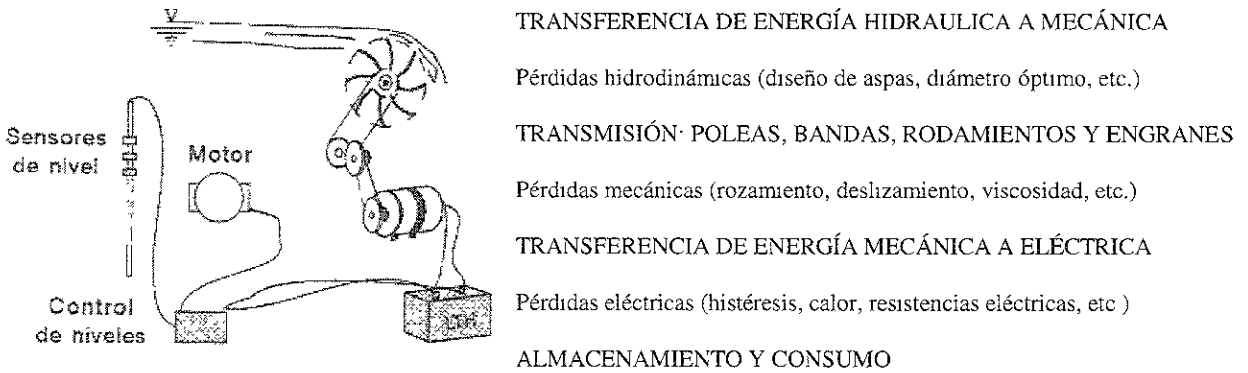
Es conveniente describir de manera general la forma en que se pretende obtener la fuente de energía eléctrica al pie de la compuerta y posteriormente la automatización de la misma; la siguiente lámina 3.1 muestra los elementos necesarios de partida para lograr los objetivos propuestos.

Para tener el control de los niveles aguas arriba de la compuerta abatible, es necesario contar con sensores de nivel que registren las variaciones en el canal, dependiendo de la respuesta de los sensores la unidad de control de niveles activará un motor reversible en un sentido u otro hasta ajustar la compuerta al nivel aguas arriba determinado por los propios sensores; la demanda de energía eléctrica será abastecida por un acumulador de 12 V y 100 A/H; esta fuente de energía deberá mantenerse recargada mediante la transformación que se realice de energía hidráulica a energía eléctrica (hidrogenación).



**Lámina 3.1 Planteamiento del sistema en forma general**

En la lámina que a continuación se presenta se puede comprender de manera general el proceso de transformación de la energía que al ser capturada en su forma natural pasa por diversos elementos vitales para su transformación hasta llegar a formar parte de la fuente de energía requerida al pie de la compuerta.



**Lámina 3.2 Proceso de transferencia de energías.**

A continuación se muestra un análisis de la selección de los componentes y materiales que conforman el sistema integral que aquí se propone; también se muestra un arreglo para que la mayoría de los componentes del sistema queden alojados en el interior de la compuerta evitando los siguientes inconvenientes:

- Pérdida del equipo o algún componente.
- Tener equipo que sea visible al pie de la compuerta.
- Deterioro del equipo por agentes extraños o animales.

### 3.2 Características de la rueda hidráulica

Con base en el principio de la cantidad de movimiento<sup>[7, pág. 332]</sup> se demuestra que a partir del flujo de agua que incide en el aspa con la velocidad  $V$  (ver lámina 3.3), se obtiene la fuerza (reacción) que ésta ejerce sobre el aspa, y que es igual y de sentido contrario a la fuerza expresada en la ecuación 3.1.

$$F = \rho QV = mV \quad (3.1)$$

donde:

$\rho$  = densidad del fluido [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$Q$  = flujo volumétrico o caudal que atraviesa la sección [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$V$  = velocidad del fluido [ $\text{m}/\text{s}$ ]

$m$  = flujo másico que pasa a través de una sección transversal [ $\text{kg}/\text{s}$ ]  
y se puede expresar como  $\rho AV$

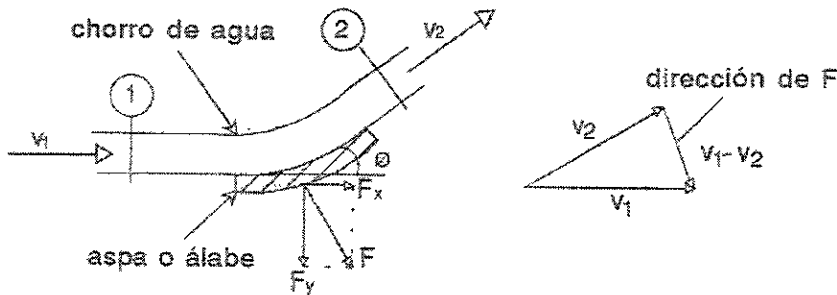


Lámina 3.3 Fuerza del fluido sobre un aspa o álabe

Si se considera que la velocidad con que el agua golpea las aspás de una rueda hidráulica que gira es  $(V-U)$  entonces la fuerza ejercida por el agua es:

$$F = \rho Q(V-U)(1-\text{Cos}\theta) \quad (3.2)$$

siendo  $U$  la velocidad lineal absoluta de las aspás en el centro de las mismas (ver lámina 3.4), con un valor teórico de  $U \approx \frac{1}{2}V$ .<sup>[16, pág. 28]</sup>

El trabajo realizado por la fuerza  $F$ , se define como la fuerza multiplicada por la distancia recorrida en la dirección de la fuerza.<sup>[17]</sup> En una revolución (vuelta) completa, la fuerza habrá recorrido una distancia igual a la circunferencia de la rueda hidráulica, o sea, una longitud igual a  $2\pi r$ , lo que da origen a la cantidad de trabajo expresado por la ecuación (3.3).

$$Tr = F2\pi r \tag{3.3}$$

Si la rueda hidráulica está girando a  $n$  revoluciones por minuto (r.p.m.), la distancia total recorrida por minuto es  $(2\pi r)n$ . Si la potencia se define como la cantidad de trabajo realizado en la unidad de tiempo,<sup>[17]</sup> entonces la potencia desarrollada por la fuerza  $F$  sería:

$$P = (F2\pi r)n \tag{3.4}$$

donde  $n$  tiene una relación directa con la velocidad lineal del aspa como  $U=2\pi rn$ , de donde la potencia también se puede representar como:

$$P = FU \tag{3.5}$$

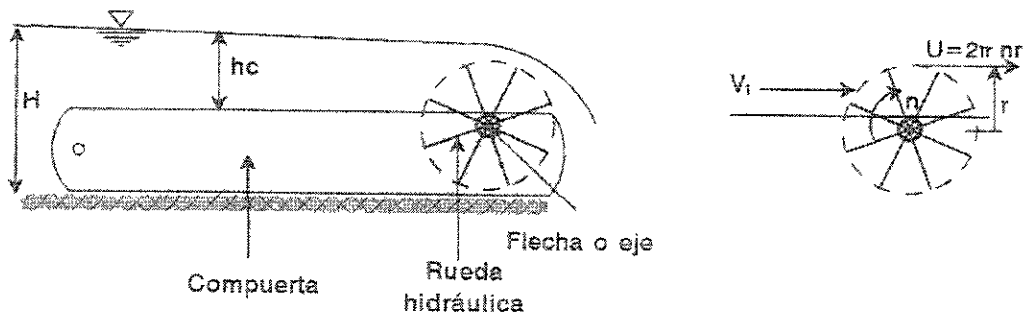


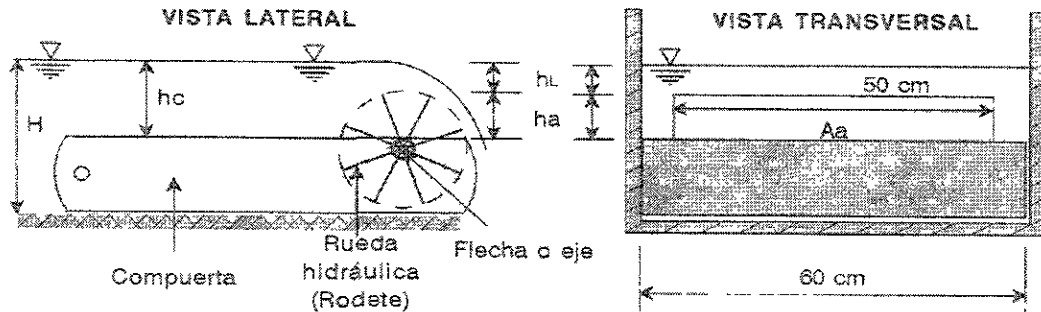
Lámina 3.4 Velocidad con que el agua golpea las aspa de una rueda hidráulica que gira

El diámetro de la flecha o eje se calcula con la potencia y las revoluciones por minuto desarrolladas por la rueda hidráulica (rodete), mediante la siguiente ecuación:<sup>[18]</sup>

$$d = 14.4 \left[ \frac{\text{Potencia (cv)}}{\text{Revoluciones (r.p.m.)}} \right]^{1/3} \tag{3.6}$$

Pensando en utilizar como canal de pruebas el existente en el laboratorio Enzo Levi del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, el cual tiene un ancho de 60 cm por 1 m de

altura (ver detalles en sección 4.1), y suponiendo una velocidad del flujo de 1 m/s, entonces, se puede hacer una primera estimación de las dimensiones del rodete a utilizar en el canal aprovechando eficientemente la energía hidráulica disponible. En este sentido, y a partir de la lámina 3.5, es posible imaginar la función que desempeña el rodete, el cual transforma la energía cedida por el fluido en energía mecánica aplicada a la flecha del mismo rodete, que posteriormente será también transformada por el generador a energía eléctrica.



donde.  
 $h_c$  = altura de agua sobre la compuerta  
 $h_l$  = altura libre sobre el rodete  
 $h_a$  = altura del aspa  
 $A_a$  = área efectiva del aspa

**Lámina 3.5 Dimensionamiento del rodete en función del tirante del canal**

Tomando en cuenta el valor teórico de  $U \approx \frac{1}{2}V \approx 0.5$  m/s, y sustituyendo en las ecuaciones anteriores (3.2 a 3.6) se obtienen las características para diferentes diámetros del rodete, respecto a los niveles del canal, como se muestra en la tabla 3.1.

**Tabla 3.1 Características estimadas del rodete respecto a una carga mínima de operación**

Fila No.	$h_c$ (m)	$h_a$ (m)	$A_a$ (m <sup>2</sup> )	F (N)	Trabajo (N-m)	n r.p.m.	Potencia			d*	Rodamiento número
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	(watts)	(hp)	(cv)	(cm)	[12]
1	0.08	0.05	0.03	9.87	3.10	95.49	4.93	0.007	0.007	0.59	**
2	0.10	0.07	0.04	13.82	6.08	68.21	6.91	0.009	0.009	0.74	**
3	0.12	0.09	0.05	17.77	10.05	53.05	8.88	0.012	0.012	0.88	**
4	0.14	0.11	0.07	21.71	15.01	43.41	10.86	0.015	0.015	1.00	6200
5	0.16	0.13	0.08	25.66	20.96	36.73	12.83	0.017	0.017	1.12	6201
6	0.18	0.15	0.09	29.61	27.91	31.83	14.80	0.020	0.020	1.24	6201
7	0.20	0.17	0.10	33.56	35.84	28.09	16.78	0.022	0.023	1.34	6201
8	0.30	0.27	0.16	53.30	90.42	17.68	26.65	0.036	0.036	1.83	6204
9	0.40	0.37	0.22	73.04	169.79	12.90	36.52	0.049	0.050	2.26	6205
10	0.50	0.47	0.28	92.78	273.98	10.16	46.39	0.062	0.063	2.65	6205
11	1.00	0.97	0.58	191.47	1166.97	4.92	95.74	0.128	0.130	4.29	6209

\* los diámetros de la flecha se deberán ajustar al diámetro interior del rodamiento especificado

\*\* no existen rodamientos con diámetros interiores para los especificados por d, ajústese al siguiente

La selección se realizó de la siguiente manera:

El diámetro de la rueda hidráulica no deberá ser de grandes dimensiones debido a que será alojada en el cuerpo de la propia compuerta lo que limita el espesor de la misma, además deben tenerse en cuenta grandes cargas para moverlas, sobre todo para vencer la fuerza de inercia al iniciar su funcionamiento, las r.p.m. entregadas en la flecha son pequeñas que es otra limitante debido a que el generador trabajará con estas r.p.m. cedidas por la rueda hidráulica lo que significa tener grandes cadenas cinemáticas (tren de engranes) para lograr las r.p.m. requeridas por el generador

Ruedas hidráulicas pequeñas tienen el inconveniente de ceder una baja potencia que al ser conectados con el generador no se cuenta con la suficiente fuerza para moverlos, a pesar de que cuentan con altas r.p.m. en la flecha de la misma.

Las estimaciones se realizaron considerando una carga mínima de operación sobre la rueda hidráulica ( $h_L = 3$  cm.) a la que esta pueda girar a una velocidad considerable donde las r.p.m. marquen un punto de partida para su selección, tomando en cuenta que esta carga de operación podrá aumentar sobre la rueda hidráulica en el laboratorio y con ello las r.p.m. y la potencia, claro, sin perder de vista las observaciones expuestas anteriormente.

Por ello se seleccionó una rueda hidráulica con las características estimadas que se muestran en la fila 6 de la tabla anterior.

### **3.3 Selección del generador de corriente**

Con el fin de seleccionar la opción más apropiada, se realizaron una serie de pruebas con dos tipos de generadores de corriente para determinar sus características de trabajo (voltaje  $V_s$  r.p.m.). A partir de los resultados obtenidos, se determinaron las dimensiones y características que debe satisfacer el sistema de transmisión (tren de engranes) para obtener las revoluciones requeridas por el generador.

En la fotografía I se muestra el equipo utilizado en las pruebas de laboratorio, para determinar los voltajes y r.p.m. de los generadores.



**Fotografía I. Equipo utilizado en las pruebas de los generadores.**

**Equipo utilizado**

- Generador (dínamo): 12 volt, 6 watt, 2 bornes, (s=borne de alto voltaje, t=borne de bajo voltaje).
- Generador (alternador): 12 volt, 55 amper, 4 bornes (2 bornes <sup>o</sup>/regulador de voltaje b<sub>1</sub> y b<sub>2</sub>, 2 bornes <sup>o</sup>/regulador de voltaje b<sub>3</sub> y b<sub>4</sub>).
- Motor: 2 polos, salida 90 watt, 0.9 amper. 50/60 Hz, 100-125 volt.
- Motor de inducción: 1 HP, 50/60 Hz, 127 volt
- Variac (reostato): 0-100 porcentaje de tensión máxima.
- Banda dentada: para acoplar el motor con el dínamo.
- Banda trapecial en V para acoplar el motor con el alternador.
- Poleas de 4", 2 voltímetros, 1 tacómetro.

La tabla 3.2 muestra los resultados obtenidos de las pruebas del alternador y la lámina 3.6 muestra las curvas obtenidas de estos resultados. De manera similar la tabla 3.3 muestra los resultados obtenidos de las pruebas realizadas al dínamo y la gráfica de resultados se muestra en la lámina 3.7.

**Tabla 3.2 Resultados obtenidos del alternador**

r.p.m.	Voltaje obtenido en los bornes (volt)			
	sin regulador de voltaje		con regulador de voltaje	
	borne b1	borne b2	borne b3	borne b4
790	9.9	8.8	9.0	9.0
800	10.1	9.1	10.0	10.0
850	11.0	10.0	11.0	10.8
880	12.0	11.0	11.2	11.1
890	12.2	11.2	11.7	11.6
945	12.7	11.7	12.0	11.9
960	13.0	12.0	12.5	12.5
990	13.6	12.5	12.7	12.7
1000	13.8	12.7	12.8	12.8
1010	14.1	12.8	13.0	13.0
1030	16.0	13.0	13.1	13.1
1050	17.6	13.1	13.2	13.2
1070	18.0	13.2	13.4	13.3
1415	21.0	13.4	13.6	13.6
1770	19.9	13.6	13.9	13.8
2180	19.1	13.9	14.0	14.0
2510	18.5	14.0	14.1	14.1
2900	18.1	14.1	14.1	14.1
3100	18.0	14.1	14.1	14.1



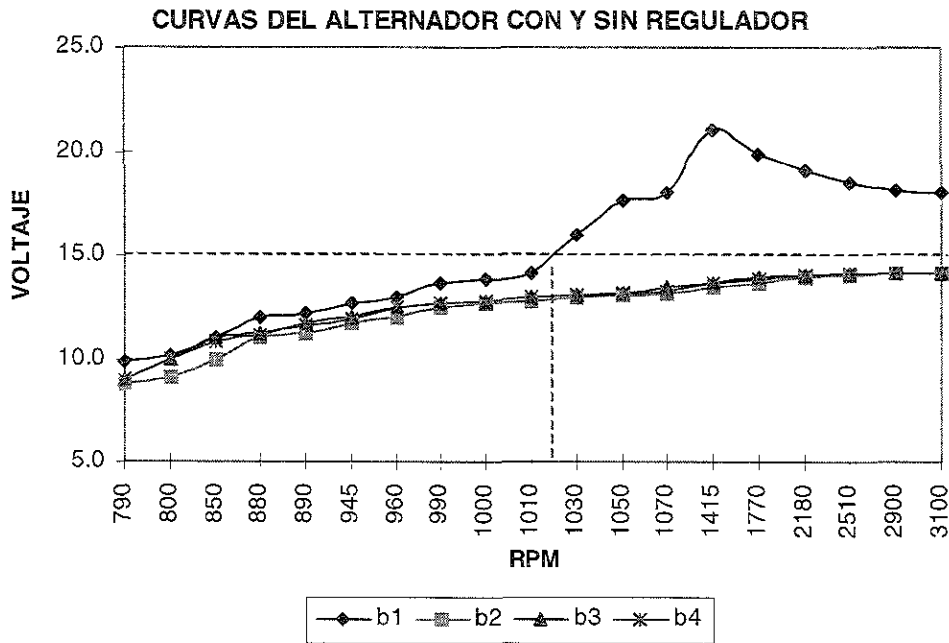


Lámina 3.6 Gráfica del generador de corriente continua (alternador)

Tabla 3.3. Resultados obtenidos de las pruebas realizadas al dínamo

Prueba No. 1			Prueba No. 2			Prueba No. 3			Prueba No. 4		
r.p.m.	voltaje		r.p.m.	voltaje		r.p.m.	voltaje		r.p.m.	voltaje	
	borne s	borne t		borne s	borne t		borne s	borne t		borne s	borne t
270	0.60	0.05	500	1.40	0.15	530	2.00	0.40	350	1.30	0.20
350	1.30	0.20	570	2.20	0.40	550	2.10	0.40	400	1.40	0.20
550	2.10	0.40	690	2.70	0.60	700	2.80	0.60	700	2.80	0.60
700	2.80	0.60	820	3.30	0.75	850	3.50	0.70	710	2.90	0.60
1150	4.80	1.20	1000	4.00	0.95	1050	4.30	1.00	850	3.50	0.70
1600	6.60	1.60	1180	4.90	1.15	1350	5.60	1.30	890	3.60	0.80
1950	8.10	2.00	1430	5.90	1.45	1600	6.60	1.60	1180	4.90	1.15
2050	8.60	2.20	1710	7.10	1.75	1710	7.10	1.75	1600	6.60	1.60
2150	9.00	2.25	1850	7.70	1.90	1740	7.20	1.80	1710	7.10	1.75
2250	9.50	2.40	2000	8.30	2.10	1950	8.10	2.00	1740	7.20	1.80
2320	9.70	2.40	2150	9.00	2.25	2050	8.60	2.20	2000	8.30	2.10
2500	10.50	2.60	2320	9.70	2.40	2235	9.30	2.40	2150	9.00	2.25
2650	11.10	2.80	2450	10.20	2.60	2400	10.10	2.56	2235	9.30	2.40
2800	11.80	3.00	2670	11.20	2.80	2500	10.50	2.70	2400	10.10	2.56
2900	12.30	3.15	2800	11.80	3.00	2680	11.30	2.85	2650	11.10	2.80
2950	12.50	3.20	2890	12.20	3.10	2900	12.30	3.15	2890	12.20	3.10

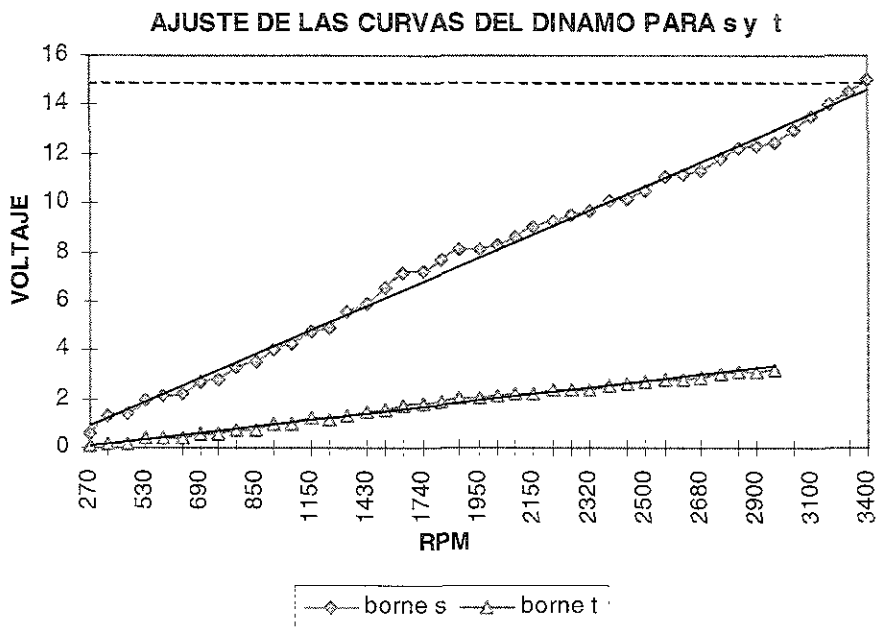


Lámina 3.7 Gráfica del generador de corriente continua (dínamo)

Con base a los resultados obtenidos por los generadores se concluyó que el alternador es el elemento que a menos revoluciones (1020 r.p.m. contra las más de 3300 r.p.m. del dínamo) puede obtener el voltaje de carga necesario de 15V para mantener cargado un acumulador de 12 volt manteniendo así la fuente de energía disponible para operar el sistema de control y automatización de la compuerta abatible.

### 3.4 Material de la flecha y las aspas

Debido a que los componentes del rodete estarán en contacto directo con el agua, la elección del material se determina por las propiedades que presentan dos metales como lo son el aluminio y el acero inoxidable.

**Aluminio.** El aluminio es un metal ligero, con una densidad de  $2.70 \text{ g/cm}^3$ , o sea con un tercio de la densidad del acero. Aunque las aleaciones de aluminio tienen propiedades a la tensión relativamente bajas comparadas con las de acero. El aluminio se utiliza cuando el peso es un factor importante, como ocurre en las aplicaciones aeronáuticas y de automotores.

Las aleaciones pueden ser 30 veces más resistentes que el aluminio puro. Debido a su bajo punto de fusión, el aluminio no se comporta bien a temperaturas elevadas. Finalmente, las aleaciones de aluminio tienen escasa dureza, lo que origina poca resistencia al desgaste abrasivo en muchas condiciones. Las composiciones y las propiedades de aleaciones típicas se muestran en la tabla 3.4.

**Tabla 3.4 Propiedades de algunas aleaciones de aluminio.** <sup>[19, pág. 238]</sup>

Aleación	Resistencia a la tensión (psi)	Esfuerzo de fluencia (psi)	Elongación (%)	Comentarios
Aleaciones para forja no tratables térmicamente				
1100-O >99% Al	13,000	5,000	40	Componentes eléctricos, hojas metálicas finas ("papel"), resistencia a la corrosión.
1100-H18	24,000	22,000	10	
3003-O 1.2% Mn	16,000	6,000	35	Latas para bebidas, aplicaciones arquitectónicas
3003-H18	29,000	27,000	7	
4043-O 5.2% Si	21,000	10,000	22	Metal de relleno en soldadura recipientes, componentes marinos.
5056-O 5% Mg	42,000	22,000	35	
5056-H18	60,000	50,000	15	
Aleaciones para forja tratables térmicamente				
2024-O 4.4% Cu	27,000	11,000	20	Transportes, aeronáutica, astronáutica y otras aplicaciones de alta resistencia
2042-T4	68,000	47,000	20	
4032-T6 12% Si-1% Mg	55,000	46,000	9	
6061-T6 1% Mg-0.6% Si	45,000	40,000	15	
7075-T6 5.6% Zn-2.5% Mg	83,000	73,000	11	

**Aceros inoxidables.** Los aceros inoxidables se seleccionan por su excelente resistencia a la corrosión. Para que el acero sea inoxidable debe contener un mínimo de 12% de Cr, lo que permite la formación de una delgada capa protectora de óxido de cromo cuando el acero se expone al oxígeno. <sup>[19, pág. 275]</sup>

Hay cuatro categorías de aceros inoxidables basadas en la estructura cristalina y el mecanismo de endurecimiento. Los cuatro tipos disponibles son los aceros al cromo ferríticos, los aceros al cromo-níquel austeníticos y los aceros inoxidables martensíticos y templables por precipitación. La tabla 3.5 muestra las propiedades de cada tipo.

**Tabla 3.5 Composiciones y propiedades de algunos aceros inoxidable.** <sup>[19, pág. 276]</sup>

Acero	% C	% Cr	% Ni	Otros	Resistencia a la tensión (psi)	Esfuerzo de fluencia (psi)	Elongación (%)
<b>Austenítico</b>							
201	0.15	16-18	3.5-5.5	5.5-7.5% Mn	95,000	45,000	40
304	0.08	18-20	8.0-10.5		75,000	30,000	30
304L	0.03	18-20	8-12		75,000	30,000	30
321	0.08	17-19	9-12	Ti (5 x % C)	85,000	35,000	55
347	0.08	17-19	9-13	Nb (10 x % C)	90,000	35,000	50
<b>Ferrítico</b>							
430	0.12	16-18			65,000	30,000	22
442	0.12	18-23			75,000	40,000	20
<b>Martensítico</b>							
416	0.15	12-14		0.60% Mo	180,000	140,000	18
431	0.20	15-17	1.25-2.50		200,000	150,000	16
440C	0.95-1.2	16-18		0.75% Mo	285,000	275,000	2
<b>Endurecimiento por precipitación</b>							
17-4	0.07	16-18	3-5	0.15-0.45% Nb	190,000	170,000	10
17-7	0.09	16-18	6.5-7.8	0.75-1.25% Al	240,000	230,000	6

Para los componentes del rodete y la flecha se decidió utilizar una aleación de aluminio, por las propiedades que presenta y debido al bajo costo en comparación con los aceros inoxidables.

### 3.5 Tren de engranes

Para obtener un voltaje mayor de 15 volt es necesario que la flecha del alternador gire alrededor de 1020 r.p.m. (ver tabla 3.2 o lámina 3.6); debido a que la flecha del rodete proporciona bajas revoluciones (32 - 70 r.p.m., según la tabla 3.1), es necesario utilizar un tren de engranes para aumentar estas revoluciones a las requeridas por el alternador.

**Valor del tren.** Un mecanismo que transmite movimiento desde una flecha motriz (rodete) hasta una flecha accionada (generador), por mediación de dos o más engranes se denomina un tren de engranes. <sup>[20, pág. 249]</sup> El valor del tren  $e$  se define como la relación de:

$$e = \frac{\text{Producto de los números de dientes impulsores } (N_2)}{\text{Producto de los números de dientes impulsados } (N_3)} \quad (3.7)$$

ó también

$$e = \frac{\text{Diámetro impulsor } (D_2)}{\text{Diámetro impulsado } (D_3)} \quad (3.8)$$

La lámina 3.8 muestra la cadena cinemática que proporcionará las r.p.m. requeridas en la flecha del alternador y este a su vez mantenga cargado el acumulador.

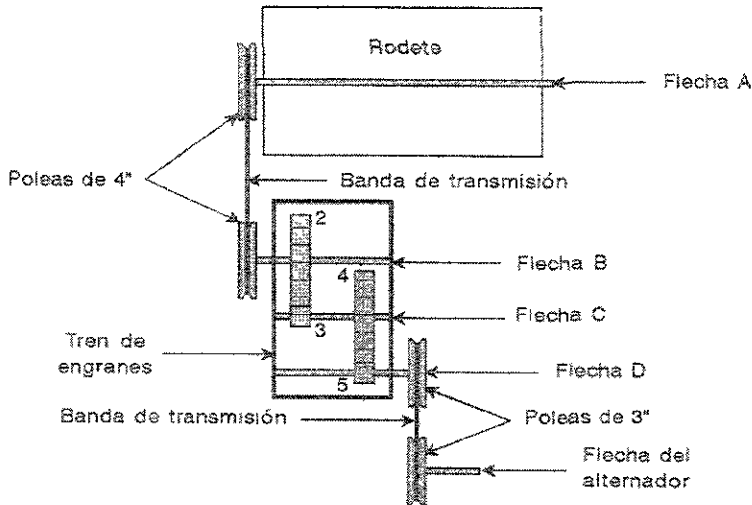


Lámina 3.8 Sistema mecánico de transmisión

En el cálculo del tren de engranes se utilizaron las siguientes ecuaciones:<sup>[21, pág. 598]</sup>

$$n_5 = \left( \frac{N_2}{N_3} \right) \left( \frac{N_4}{N_5} \right) n_2 \quad (3.9)$$

$$P_d = \left( \frac{N}{D} \right) \quad (3.10)$$

$$P_c = \pi \frac{D}{N} = \pi / P_d \quad (3.11)$$

donde:

$n$  = número de vueltas o r.p.m.

$P_c$  = paso circular, pulgada (in)

$P_d$  = paso diametral, dientes por pulgada (dte/in)

$N_i$  = número de dientes del engrane  $i$

$D$  = diámetro de paso, pulgada (in)

El funcionamiento del mecanismo de transmisión de la lámina anterior es como se describe a continuación:

La flecha A transmite la velocidad proporcionada por el rodete hacia la flecha B, por medio de una banda y las poleas 1 y 2; sobre la flecha B se encuentra el engrane 2 que impulsa al engrane 3 soportado en la flecha C, la cual gira  $N_2 / N_3$  veces más rápido que la flecha B; la flecha C hace girar otro engrane 4 que impulsa al engrane 5 soportado sobre la flecha D, la cual gira  $N_4 / N_5$  veces más rápido que la flecha C; lo que se traduce a tener  $(N_2 \times N_4) / (N_3 \times N_5)$  revoluciones en la flecha D (engrane 5) por cada revolución de la flecha A (rodete).

Si se considera una relación de diámetros de 5 a 1 se tiene que el valor del tren es:  $e = 5/1 \times 5/1 = 25$  lo que significa que por cada vuelta del rodete se tendrán 25 vueltas en el último engrane 5 que es igual a la velocidad de la polea 3 que esta enclavada sobre la misma flecha D.

Finalmente esta polea 3 transmite la potencia y velocidad al generador por medio de una banda, con lo cual se genera la energía eléctrica que será almacenada en un acumulador para posteriormente utilizarla en el control o automatización de la compuerta abatible u otros elementos que la requieran.

La tabla 3.6 muestra las características de los engranes que se necesitan para conformar el tren de engranes requerido y transmitir las revoluciones necesarias en el alternador.

**Tabla 3.6 Características de los engranes rectos<sup>[22]</sup>**

Parámetros de dientes (de la cremallera básica)	Símbolo	Envolvente de paso grueso, engranes rectos	Piñón (engrane impulsor)	Cremallera (engrane impulsado)
1. Patrocinadores del sistema		AGMA		
2. Ángulo de presión	$\phi$	20°	20°	20°
3. Número de dientes	N	$DP_d$	40	8
4. Diámetro de paso	D	$N/P_d$	5 in	1 in
5. Paso diametral	$P_d$	N/D	8 dte/in	8 dte/in
6. Addendum	$a_d$	$1.0/P_d$	0.125 in	0.125 in
7. Dedendum mínima	$b_{rn}$	$1.25/P_d$	0.15625 in	0.15625 in
8. Modulo	m	$1.0/P_d$	3.175 mm	3.175 mm
9. Profundidad total mínima (altura total del diente)	$b_t$	$2.25/P_d$	0.28125 in	0.28125 in
10. Profundidad de trabajo	$b_k$	$2.0/P_d$	0.25 in	0.25 in
11. Claro mínimo	c	$0.25/P_d$	0.03125 in	0.03125 in

12. Espesor de diente circular básico en la línea de paso	t	$\pi/2 P_d$	0.19635 in	0.19635 in
13. Circulo de base	$D_b$	$D \cos \phi$	4.6984 in	0.93969 in
14. Distancia entre centros	d	$(D_1 + D_2)/2$	3 in	3 in
15. Radio de filete en la cremallera básica	$r_f$	$0.3/ P_d$	0.0375 in	0.0375 in
16. Norma correspondiente		201.02		

Los engranes deberán ser de un material como el Bronce de aluminio por las propiedades que presenta, o bien de un material plástico como el Nylamid o impac 2000.

### 3.6 Rodamientos

Es necesario contar con rodamientos que soporten la flecha del rodete y las fuerzas que se ejercen sobre el mismo, evitando así posibles flexiones de la flecha y pérdidas por fricción que disminuyen la potencia transmitida; el sistema de transmisión también cuenta con rodamientos que soportan los engranes y las fuerzas que se producen.

Los factores que influyen en la selección de rodamientos son numerosos y es casi imposible establecer una regla general de selección. No obstante, posiblemente las de mayor importancia son: pequeña capacidad de carga, sólo se presentan cargas radiales, bajas velocidades de rotación y el hecho de estar sumergidos en agua, como es el caso del rodete.

Generalmente para pequeños montajes se emplean rodamientos de bolas; en este caso se tomó en cuenta solamente el diámetro de la flecha que se ajuste al del rodamiento  $\pm$  el ajuste requerido. <sup>[23,pág.732]</sup>

Este criterio de selección se realiza tomando en cuenta que las cargas sobre el rodamiento son muy pequeñas y no influyen de ninguna manera en el resultado, a menos que las cargas sobre el rodamiento sobrepasen de los 100 kg. entre la fuerza del agua y el peso del rodete, en tal situación deberá realizarse un análisis para seleccionar nuevamente el tipo de rodamiento a utilizar. <sup>[23,pág 20]</sup>

La tabla 3.7 muestra algunas características de aleaciones metálicas para rodamientos, es recomendable utilizar una aleación de aluminio o bronce que presentan alta resistencia a la corrosión.

Tabla 3.7 Algunas características de aleaciones metálicas para rodamientos<sup>[21, pág. 548]</sup>

Nombre	Espesor (in)	Número SAE	Relación de holgura r/c	Capacidad de carga	Resistencia a la corrosión
Babbitt a base de estaño	0.022	12	600-1000	1.0	Excelente
Babbitt a base de plomo	0.022	15	600-1000	1.2	Muy buena
Babbitt a base de estaño	0.004	12	600-1000	1.5	Excelente
Babbitt a base de plomo	0.004	15	600-1000	1.5	Muy buena
Bronce al plomo	Macizo	792	500-1000	3.3	Muy buena
Cobre-plomo	0.022	480	500-1000	1.9	Buena
Aleación de aluminio	Macizo		400-500	3.0	Excelente
Plata más revestimiento	0.013	17P	600-1000	4.1	Excelente
Cadmio	0.022	18	400-500	1.3	Buena
Trimetal 88				4.1	Excelente
Trimetal 77				4.1	Muy buena

### 3.7 Controlador de niveles

Este controlador es la unidad central que tiene a cargo la operación de la unidad de potencia (motor reversible) que controla la compuerta en un sentido u otro; también en el se registran los niveles de carga en el canal por los sensores que de manera automática operan el motor mediante un circuito lógico de operación como se muestra en la siguiente lámina 3.9.

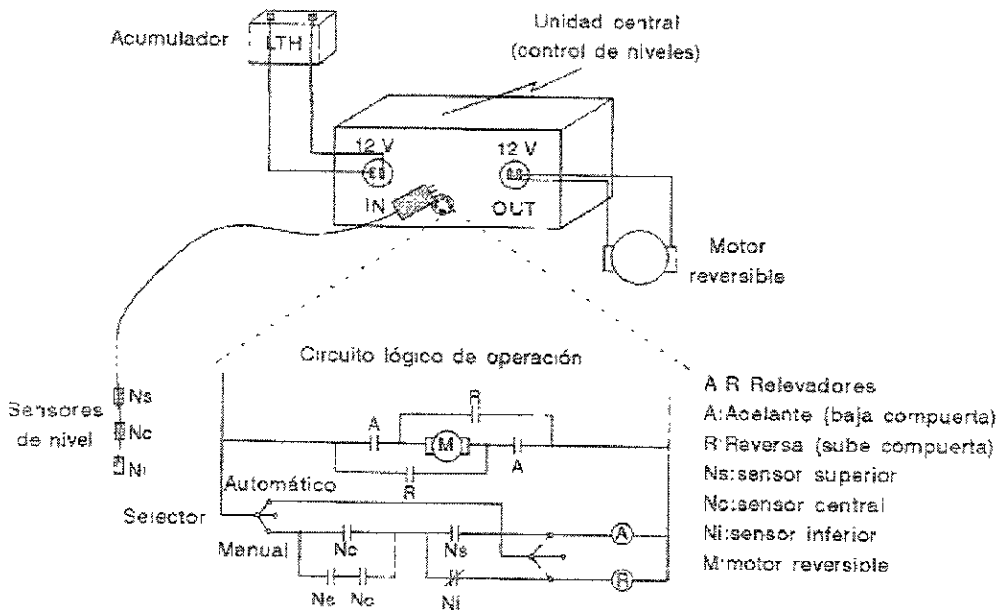


Lámina 3.9 Unidad central (control de niveles)

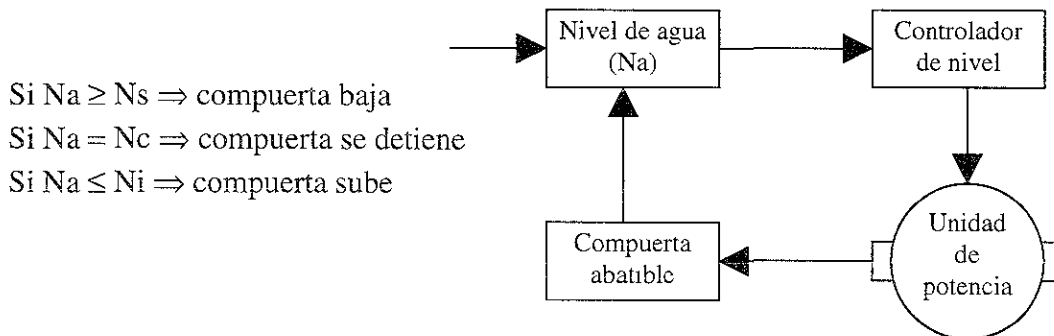


De manera más detallada de los componentes electrónicos en que se basa el funcionamiento del controlador de niveles se muestra el diagrama esquemático en el anexo A.

**Características del controlador:**

1. Control de encendido del sistema y su respectivo indicador
2. Selector para el modo de operación *manual /automático* y su respectivo indicador
3. Control *manual* para subir, detener y bajar la compuerta
4. Control *automático*, en este modo de operación el controlador electrónico debe detectar el nivel del agua (Na) en un rango especificado por el usuario; el rango consta del nivel superior (Ns), nivel central (Nc) y nivel inferior (Ni); en cada caso realizara lo siguiente:
  - Si se tiene que el nivel de agua es mayor o igual al nivel superior entonces el controlador activará la unidad de potencia para bajar la compuerta y se detendrá cuando el nivel de agua sea igual al nivel central
  - Cuando el nivel del agua sea menor o igual al nivel inferior entonces el controlador activará la unidad de potencia para subir la compuerta y se detendrá cuando el nivel de agua sea igual al nivel central.
  - Si el nivel del agua es igual al nivel central, el controlador desactiva la unidad de potencia y la compuerta se detiene.
5. Indicadores de nivel: luz roja para nivel superior, luz amarilla para nivel central y luz verde para nivel inferior

**Diagrama de flujo**



### 3.8 Acumulador

Un acumulador es un dispositivo electro-químico. Almacena energía química que puede liberarse en forma de energía eléctrica. Cuando el acumulador se conecta a una demanda externa de corriente, como un motor, la energía química se convierte en energía eléctrica y fluye corriente a través del circuito.

Las funciones del acumulador en el sistema son:

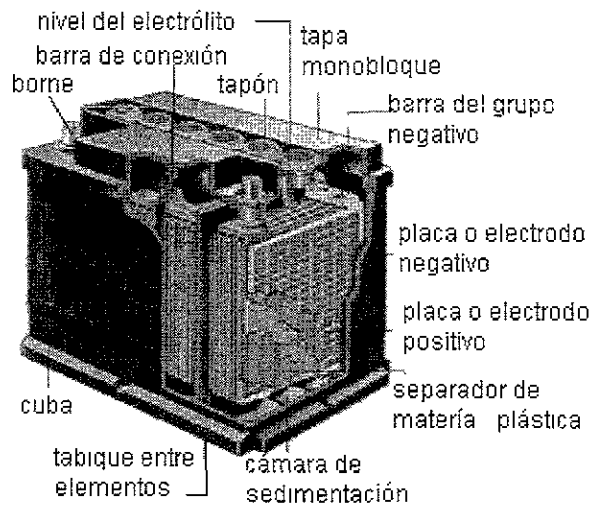
- Almacenar la energía que se genere del aprovechamiento hidráulico del canal
- Proporcionar energía eléctrica a los sistemas de medición y control
- Proporcionar energía adicional si los dispositivos del sistema así lo requieren
- Seguir suministrando energía en caso de mantenimiento del rodete o alternador
- Actuar como estabilizador de voltaje del sistema eléctrico

El acumulador opera de la siguiente forma; la acción del acumulador de plomo-ácido es determinada por los compuestos químicos que contiene.<sup>[24, pág. 11]</sup> Estos son:

- Dióxido de plomo ( $\text{PbO}^2$ ) - material en las placas positivas
- Plomo esponjoso (Pb) - material en las placas negativas.
- Ácido sulfúrico ( $\text{H}^2\text{SO}^4$ ) - electrólito

Cuando dos metales distintos, como las placas positivas y negativas se sumergen en ácido sulfúrico (el electrólito), se activa el acumulador y se desarrolla un voltaje. Este voltaje depende de los metales y el electrólito usados. Es de aproximadamente 2.1 voltios por celda en un acumulador típico de plomo-ácido. Se produce energía eléctrica por la acción química entre los metales y el electrólito.

Al establecerse un circuito entre los postes terminales positivo y negativo, se inicia la acción química y el flujo de energía eléctrica del acumulador. La corriente eléctrica fluye en forma de electrones en el circuito externo y en forma de iones entre las placas, dentro del acumulador. La lámina 3.10 muestra la estructura interna de un acumulador típico de plomo-ácido.



**Lámina 3.10 Elementos internos de un acumulador.**

**Ciclo de descarga.** Cuando se conecta el acumulador a una demanda externa, fluye corriente y el acumulador se está descargando. El dióxido de plomo ( $PbO^2$ ) de las placas positivas es un compuesto de plomo (Pb) y oxígeno ( $O^2$ ). El ácido sulfúrico (el electrolito) es un compuesto de hidrógeno ( $H^2$ ) y el radical sulfato ( $SO^4$ ). Al descargarse el acumulador, el plomo contenido en el material activo de la placa positiva se combina con el sulfato del ácido sulfúrico, formando sulfato de plomo ( $PbSO^4$ ). El oxígeno del material activo de la placa positiva se combina con el hidrógeno del ácido sulfúrico para formar agua ( $H^2O$ ) en el electrolito.

En la placa negativa ocurre una reacción similar al mismo tiempo. El plomo (Pb) del material negativo activo se combina con sulfato del ácido sulfúrico para formar sulfato de plomo ( $PbSO^4$ ) en la placa negativa.

Al avanzar la descarga, se consume el ácido sulfúrico, que es sustituido por agua. El electrolito se está diluyendo, de manera que baja su densidad. La densidad se puede medir con un hidrómetro, que nos da un método exacto y conveniente para la determinación del estado de carga de un acumulador.

Durante la descarga, el material activo de ambas placas pasa a sulfato de plomo. La composición de las placas va siendo cada vez más parecida y el ácido se va diluyendo. Por tanto, el voltaje va siendo menor, porque depende de la diferencia entre los materiales de las placas y de la concentración del ácido. Eventualmente, el acumulador se hace incapaz

de proporcionar electricidad a un voltaje determinado y entonces se dice que está descargado.

El acumulador de plomo-ácido es químicamente reversible. Se puede cargar un acumulador descargado (pasando corriente en la dirección opuesta a la de descarga) y sus materiales químicos recuperan su condición de "cargados". El acumulador esta listo, entonces, para dar toda su potencia. Este ciclo de descarga y carga puede repetirse muchas veces.

**Ciclo de carga.** Las reacciones químicas que ocurren en un acumulador durante la carga son, básicamente, las opuestas de las que se dan durante la descarga. El sulfato de plomo de ambos tipos de placas se separan en sus formas originales de plomo (Pb) y sulfato ( $\text{SO}^4$ ). El agua se descompone en hidrógeno ( $\text{H}^2$ ) y oxígeno (O). Al desprenderse el sulfato de las placas, se combina con el hidrógeno para formar ácido sulfúrico ( $\text{H}^2\text{SO}^4$ ). Al mismo tiempo, el oxígeno se combina químicamente con el plomo de las placas positivas para formar dióxido de plomo ( $\text{PbO}^2$ ). La densidad del electrólito aumenta durante la carga, porque se está produciendo ácido sulfúrico, que sustituye a agua del electrólito.

Un acumulador despidе gases durante la carga. El hidrógeno se desprende en las placas negativas y el oxígeno en las positivas. Estos gases son el resultado de la descomposición del agua ( $\text{H}^2\text{O}$ ). Un acumulador gasifica (y consume agua) al estarse cargando a una corriente mayor de la que es capaz de aceptar. Esto puede ser porque el acumulador está completamente cargado, a que sus placas están sulfatadas, o a que está demasiado frío para aceptar carga.

Generalmente un acumulador produce gases cerca del final de una carga, porque la corriente es demasiado alta para que la pueda aceptar en su totalidad. Un cargador que reduce automáticamente la corriente de carga al acercarse el acumulador a la carga completa, elimina la mayor parte de esta gasificación, por supuesto, ningún acumulador se debe sobrecargar por largo tiempo.

**Revisión de la carga del acumulador.** La cantidad de carga que necesita un acumulador se puede determinar midiendo la densidad con un hidrómetro, en donde se mostrará el porcentaje de carga. La lectura del voltaje es también una medida del porcentaje de la carga del acumulador, ambas lecturas se presentan en la tabla 3.8.

Ya que el voltaje varía poco con la carga, la mayoría de los probadores de acumuladores usan voltímetros especiales con escalas amplias para mostrar mejor el porcentaje de carga. Si la carga es de 75% o más, el acumulador se considera bien cargado.

**Tabla 3.8 Estado de carga aproximada del acumulador**<sup>[24, pág. 15,42]</sup>

Porcentaje de carga (%)	Densidad (kg/cm3) Hidrómetro	Tensión en circuito abierto Voltímetro (volt)
100	1.250	12.6 o más
75	1.210	12.4
50	1.160	12.2
25	1.120	12.0
Descargado	1.100	11.7 o menos

La tabla 3.9 muestra una comparación de las demandas de corriente al acumulador en vehículos típicos chicos y grandes con sistema de 12 volt.

**Tabla 3.9 Demandas típicas de corriente en automóviles de pasajeros (Amper)**<sup>[24, pág. 13]</sup>

	Coches pequeños	Coches grandes
Encendido	4.2	3.5
Radio	1.0	1.0
Limpiadores de parabrisas	2.2	3.5
Faros - Luz baja	8.6	9.0
Faros - Luz alta	10.2	13.9
Luces de estacionamiento	3.8	6.0
Luces interiores	1.2	1.1
Abanico calentador (sin aire acondicionado)	8.6	9.3
Abanico calentador (con aire acondicionado)	16.4	19.0
Aire acondicionado – Verano	17.5	23.0
Demanda básica (con C.A.) – Verano	41.3	50.3
Demanda básica (con C.A.) – Invierno	39.6	47.3
Arranque en Verano	150	250
Arranque en Invierno	225	400

De la misma manera, la estimación de la demanda de energía requerida por la unidad de potencia y dispositivos de medición, que se utilizan para controlar la compuerta abatible se muestra en la tabla 3.10. Como se podrá observar se requiere un acumulador de 100 amper-hr/día, pero tomando en cuenta que se debe tener una reserva de por lo menos un 20% más,

entonces el acumulador requerido es de aproximadamente 120 amper-hr/día; en las tres últimas columnas de dicha tabla se muestra el tipo de acumulador a utilizar.

**Tabla 3.10. Tipo de acumulador respecto a la demanda de energía estimada de la compuerta**

Demanda	Corriente (Amper)	Horas de trabajo	Amper-hr/día	Tipo de acumulador	Amp/hr	Costos (\$)
Unidad de potencia (motor reversible)	8.00	8	64.00	4DLT	127	750-850
Control de niveles	1.00	24	24.00	30H	100	600-650
Luces, sensores, etc.	0.50	24	12.00	30HE	98	500-600
				RD-65	100	550-700
Suma			100.00			

### 3.9 Alternativas de control de la compuerta

Se requiere de un equipo electromecánico o neumático para controlar el cierre y apertura de la compuerta abatible dentro del canal, para ello se tienen contemplado tres posibles soluciones para lograrlo, de las cuales se presentan sus ventajas y desventajas.

#### 3.9.1 Control neumático por medio de pistones

Este sistema consta de un par de pistones de acero inoxidable y de doble efecto colocados a cada lado de la compuerta para levantarla y bajarla, o bien de un sólo pistón más robusto con un vástago dentado que actúe sobre una rueda dentada montada sobre la flecha de soporte, el control del vástago lo determina una válvula detectora de la carrera del mismo con lo cual se puede tener una gran precisión de la posición de la compuerta; la presión dentro de la cámara del cilindro puede obtenerse con aire o aceite, en el primer caso se necesita de un compresor de aire, y en el segundo caso, de una bomba de aceite. La lámina 3.11 muestra los elementos de un sistema de control neumático.

Las ventajas de este sistema son las de precisión y eficiencia; de las desventajas se exponen las siguientes:

En el caso de utilizar los pistones por debajo de la compuerta y trabajar con aire presurizado como elemento de control, implica tener demasiado equipo fuera de la compuerta (además de los pistones el compresor). También se tiene en cuenta el alto costo

de los componentes que lo conforman (aproximadamente \$32,000 más IVA, precio de Agosto de 1999) sin tomar en cuenta el costo del compresor.

Utilizar el pistón dentro de la compuerta implica aumentar el peso de la misma (motor, bomba, depósito de aceite, rueda dentada y pistón) y consecuentemente el torque que se deberá vencer en la flecha de soporte (el costo de este sistema se reduce mucho más que el caso anterior).

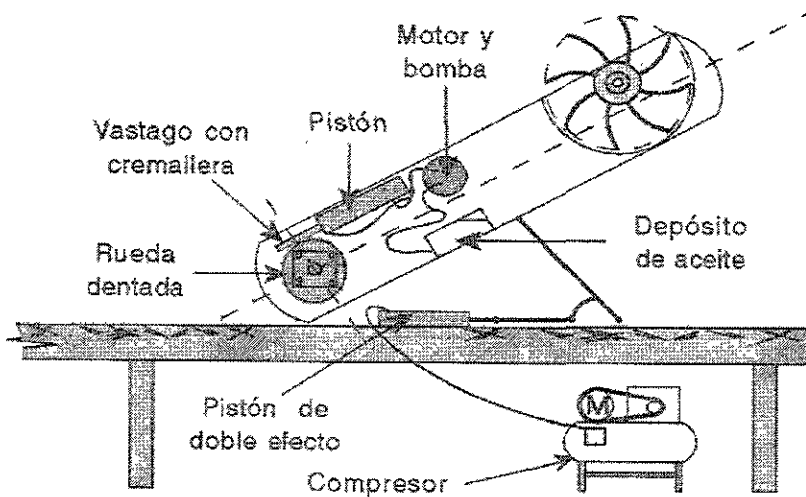


Lámina 3.11 Sistema de control neumático.

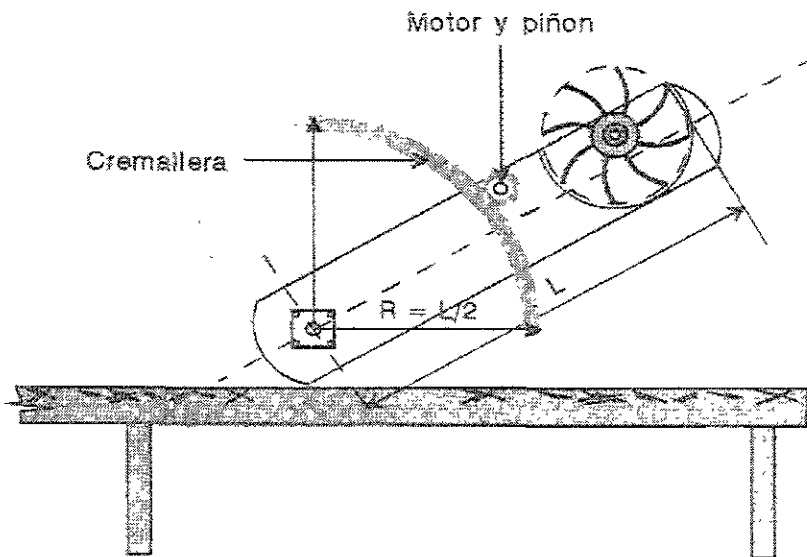
### 3.9.2 Control electromecánico con engranes (piñón y cremallera)

El sistema consta de un motor eléctrico sobre el cual se encuentra montado un pequeño engrane (piñón), el motor está fijo a un costado de la compuerta por la parte interior, sobresaliendo solamente el piñón fuera de la compuerta.

La posición del motor dentro de la compuerta depende de las cargas y fuerzas que se ejercen sobre la misma; siendo la condición más desfavorable de la compuerta cuando ésta se encuentra en posición horizontal, por lo que el motor deberá colocarse a la mitad de la compuerta, que es el punto donde se concentra el peso del agua y de la compuerta.

El piñón rueda sobre la corona de la cremallera semicircular, la cual sirve de riel para el movimiento de la compuerta, haciéndola bajar o subir según sea el sentido de giro del motor, la cremallera estará incrustada a un costado del canal, de tal forma que el contacto

de los engranes este perfectamente alineado. La lámina 3.12 muestra el mecanismo electromecánico para controlar la compuerta abatible.



**Lámina 3.12 Sistema de control electromecánico (piñón y cremallera).**

Las principales ventajas de este mecanismo de engranes son que posee una alta precisión dependiendo del paso diametral que se utilice, buena eficiencia y poco ruidosa si se utiliza un material plástico como el Nylamid o Impac 2000; otra de las ventajas es la de tener el motor dentro de la compuerta.

Las desventajas que se presentan son las de tener altos costos de maquinado o vaciado en fundición (engrane con un radio de aproximadamente 50 cm. para este caso, pero para compuertas más grandes...); lo que implica para este tipo de piezas, herramientas especiales para el tallado de los dientes y además el corte de la corona del engrane, que es la parte a utilizar; en caso de una pieza en fundición, implica hacer un molde, fundición del metal y vaciado, para terminar con un rectificado de la pieza.

### 3.9.3 Control electromecánico con actuador eléctrico y operador de engranes.

Un actuador instalado en la parte interior de la compuerta proporciona el par a la flecha donde se encuentra acoplado un operador de engranes, el cual tiene la función de aumentar la potencia cedida del actuador para facilitar el movimiento de apertura y cierre de la compuerta.



De las ventajas que presenta este tipo de mecanismos electromecánicos es la de ser fiables y seguros, de fácil adaptación por ser mecanismos comerciales (actuador y operador de engranes), además, cuentan rangos de torques muy elevados que aseguran el éxito de operación.

Aunque estos elementos son comerciales su costo es considerablemente elevado (300 USD, precio de Agosto de 1999), por si esto fuera poco, las dimensiones del actuador y del operador de engranes podrían ser más grandes del espacio que se tiene contemplado para su instalación, en tal caso se tendrá la necesidad de instalarlos fuera de la compuerta tal como se muestra en la siguiente lámina 3.13.

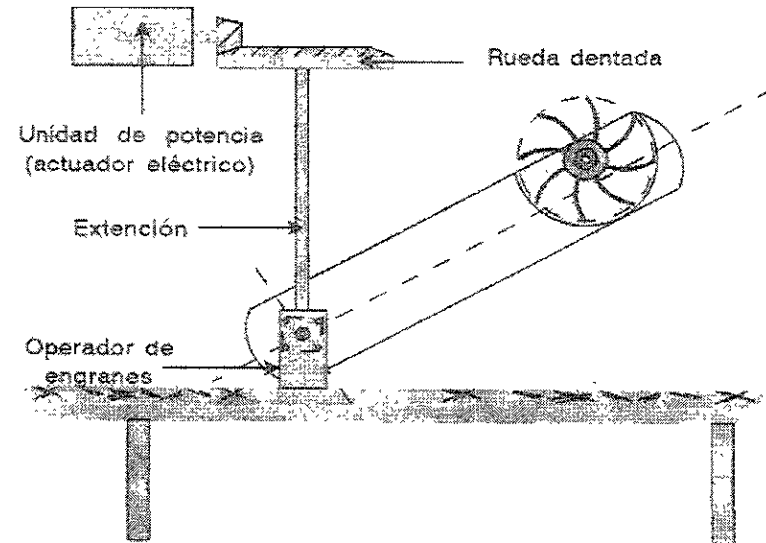


Lámina 3.13 Control electromecánico con actuador y operador de engranes

Teniéndose en cuenta de que el sistema final que resulte deberá ser un sistema integral, queriendo decir con esto que todos sino es que la mayoría de los elementos que conformen éste sistema deberán quedar alojados o instalados en la propia compuerta, formando un sistema compacto (pensando en facilitar su instalación en el canal).

Con base a lo expuesto anteriormente se decidió utilizar la segunda alternativa (control electromecánico con engranes), con las siguientes modificaciones: Para un primer intento se consiguió una cremallera semicircular de radio  $R=10$  cm. (ver lámina 3.12,  $R=L/10$ ) la cual se instaló a un costado de la compuerta, a esta distancia se instaló el motor en el interior de la compuerta acoplado perfectamente la sincronización de ambos engranes.

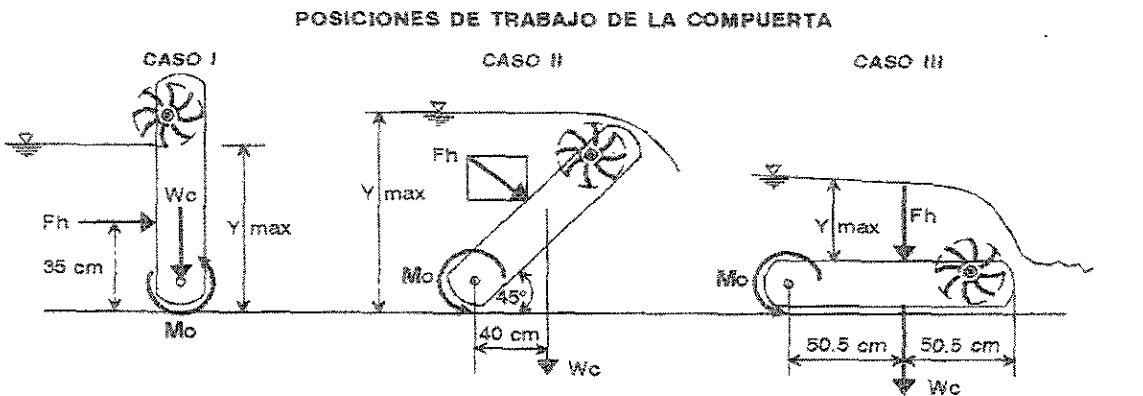
### 3.10 Fuerza hidrostática sobre la compuerta abatible.

Para tener el control de la compuerta es necesario conocer de la fuerza hidrostática que actúa sobre la compuerta y el peso de la misma, y así estimar la potencia necesaria de la unidad de potencia (motor, actuador, marcha, etc.) que gobierna los movimientos de dicha compuerta.

Sabemos que la fuerza sobre una cara de cualquier superficie plana sumergida en un fluido uniforme es igual a la presión que hay en el centro de gravedad de dicha cara por su área, independientemente de la forma de la placa o de su ángulo de inclinación  $\theta$ .

La fuerza resultante no debe actuar en el centroide, sino más abajo, hacia la zona de presiones más elevada. Su línea de acción pasará por el centro de presiones de la placa.

Suponiendo que la unidad de potencia aplica la fuerza directamente a la flecha de giro o pivote que soporta la compuerta, el torque máximo necesario se presenta cuando la compuerta se encuentra trabajando en la posición horizontal tal como se muestra en la lámina 3.14 que es la condición más desfavorable para el motor, porque la línea de acción tanto del peso del agua como el de la compuerta se encuentran desfasadas respecto al punto de aplicación o giro de la flecha (CASO II y III)



	CASO I	CASO II	CASO III
$Y_{max}$	70 cm.	80 cm.	50 cm.
$W_c$	30 Kg.	30 Kg.	30 Kg.
$F_h$	147 Kg.	168 Kg.	336 Kg.
$F_a$	147 Kg.	198 Kg.	366 Kg.
$M_o$	51.45 Kg-m	79.2 Kg-m	184.8 Kg-m

**NOMENCLATURA**  
 $F_h$  = Fuerza hidrostática  
 $W_c$  = Peso estimado de la compuerta  
 $F_a$  = Fuerza actuante total  
 $Y_{max}$  = Tirante máximo  
 $M_o$  = Momento en la flecha

Acotaciones no indicadas consultar láminas 4.4 y 4.5

Lámina 3.14 Estimación del torque para seleccionar la unidad de potencia (motor)

Se debe tener en cuenta que el movimiento de la compuerta debe ser muy lento para no producir oleaje aguas arriba, lo que significa tener una unidad de potencia de muy bajas revoluciones o en su defecto de algún juego de engranes para reducir las revoluciones de la unidad de potencia; sin perder de vista que este deberá operar a 12 volt de corriente continua.

---

# CAPÍTULO

# 4

## DISEÑO, ADAPTACIÓN, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DEL SISTEMA INTEGRAL PRELIMINAR.

El contenido de este capítulo describe el diseño de algunos de los elementos que integran el sistema como son el rodete, el tren de engranes y el cuerpo de la compuerta; también se describe el arreglo de los elementos en el interior de la compuerta y se muestra el seguimiento de construcción del sistema integral.

Una vez construido el sistema, se realizan las pruebas de funcionalidad para evaluarlo, con base en los resultados obtenidos se proponen los cambios pertinentes para mejorar su funcionamiento.

### 4.1 Descripción del canal de pruebas

Este canal se encuentra ubicado dentro de las instalaciones del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua en el Laboratorio Enzo Levi; el canal tiene las siguientes características:

- *Dimensiones:* Mide un metro de alto por 60 centímetros de ancho y 48 metros de largo
- *Materiales:* Sus paredes están constituidas por 32 pares de vidrios de 1.0 x 1.5 metros y un espesor de 1.4 centímetros, apoyados a una estructura de ángulo de 2" x 2" x ¼"; la plataforma que soporta al canal es de concreto de 1.0 metro de ancho por 0.1 metro de espesor.

En la siguiente lámina 4.1 se muestra un croquis del mismo.

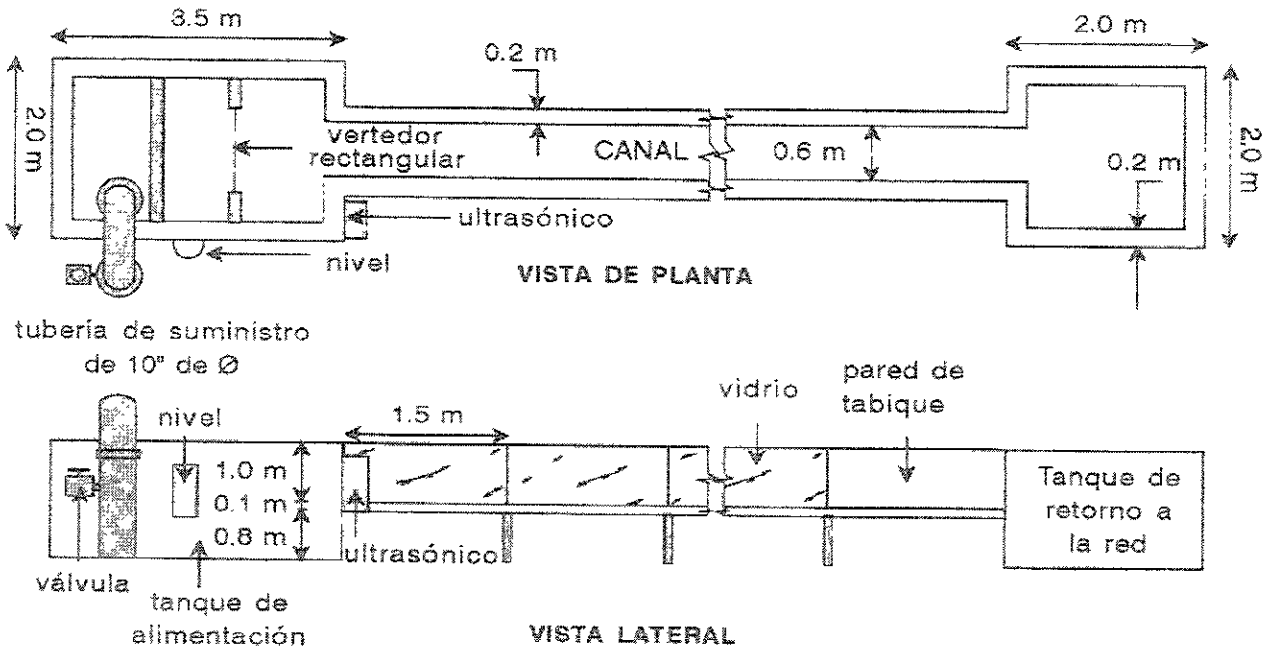


Lámina 4.1 Vistas del canal de laboratorio

- *Alimentación:* El suministro de agua se proporciona por medio de una tubería de 10" de diámetro conectada a la red de distribución del laboratorio.
- *Estructura de aforo:* El canal cuenta con un vertedor rectangular de contracciones laterales (ver lámina 4.2).

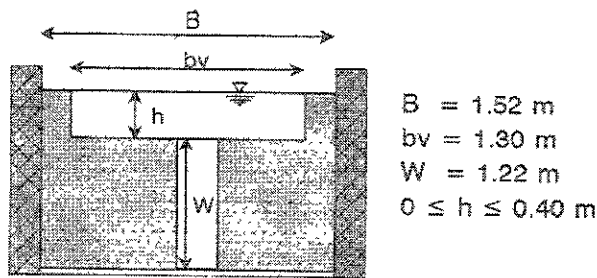


Lámina 4.2 Vertedor rectangular de contracciones laterales

- *Descarga del vertedor:* Se tienen disponibles los datos de la calibración del vertedor, con los rangos de gastos operables en el canal de pruebas, como se muestra en la siguiente tabla 4.1.

**Tabla 4.1 Datos existentes de la calibración del vertedor rectangular<sup>[25]</sup>**

DATOS DEL VERTEDOR					
h (m)	Q (USBR)	Q (REHBOCK)	Q (HEGLY)	Q (VÍDEO)	Q (SONICO)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.01	2.39	2.71	3.88	3.61	3.54
0.02	6.74	7.12	8.75	9.00	8.81
0.03	12.37	12.76	14.72	15.09	14.82
0.04	19.02	19.41	21.61	21.88	21.56
0.05	26.54	26.94	29.33	29.37	29.04
0.06	34.83	35.28	37.80	37.57	37.27
0.07	43.82	44.34	46.96	46.48	46.23
0.08	53.46	54.09	56.76	56.08	55.93
0.09	63.69	64.48	67.16	66.4	66.36
0.10	74.48	75.49	78.14	77.41	77.54
0.11	85.79	87.07	89.67	89.13	89.45
0.12	97.60	99.22	101.73	101.55	102.10
0.13	109.88	111.91	114.30	114.68	115.49
0.14	122.60	125.12	127.36	128.50	129.62
0.15	135.76	138.84	140.90	143.04	144.48
0.16	149.32	153.05	154.90	158.27	160.08
0.17	163.28	167.74	169.36	174.21	176.43
0.18	177.61	182.90	184.25	190.86	193.51
0.19	192.31	198.52	199.58	208.21	211.32
0.20	207.36	214.58	215.33	226.26	229.88
0.21	222.75	231.09	231.50	245.01	249.17
0.22	238.47	248.03	248.07	264.47	269.21
0.23	254.51	265.39	265.05	284.63	289.98
0.24	270.86	283.17	282.41	305.50	311.48
0.25	287.50	301.36	300.17	327.07	333.73
0.26	304.43	319.96	318.31	349.34	356.72
0.27	321.65	338.95	336.82	372.32	380.44
0.28	339.14	358.34	355.71	396.00	404.90
0.29	356.89	378.13	374.96	420.39	430.10
0.30	374.91	398.29	394.58	445.47	456.04
0.31	393.17	418.84	414.56	471.27	482.71

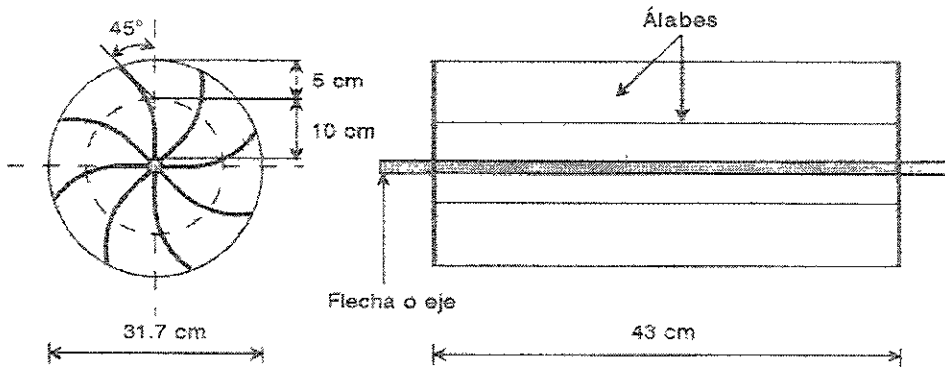
## 4.2 Diseño y adaptación de los elementos del sistema en su versión inicial.

Desde un principio se asumió el reto de desarrollar una compuerta que incluyera en su propio cuerpo tanto el sistema de elevación como el de generación de energía, con la idea de contar con un sistema compacto. Bajo este marco de referencia, se muestra a continuación el diseño y adaptación de los elementos que integran un sistema preliminar tomando en cuenta las ideas originales de inicio.

## RODETE

El rodete es el elemento principal de transferencia de energía, [6, pág.113] su dimensionamiento esta basado en el análisis resumido en la tabla 3.1; la fila 6 indica que para un tirante mínimo sobre la compuerta de 18 cm con una altura del álabe de 15 cm (30 cm de álaves encontrados más 1.7 cm del diámetro interior del rodamiento; tenemos un rodete de aproximadamente 32 cm) se obtienen: 31.83 r.p.m., una fuerza de incidencia sobre el álabe de 29.6 N. y una potencia mecánica de salida en la flecha del rodete de 14.8 W (despreciando las pérdidas por fricción de los rodamientos y la fuerza de inercia que opone el rodete).

Si se toma en consideración que las cargas (tirantes) sobre la compuerta podrían aumentarse gradualmente por arriba de los 18 cm se asegura un aumento de los valores obtenidos en la tabla 3.1. La lámina 4.3 muestra el dimensionamiento del rodete.



### MATERIAL.

- 8 Álaves de aluminio de 15x43 cm y 1.5 mm de espesor con separación de 45°.
- 2 Tapas circulares de aluminio con un diámetro de 31.7 cm y 3 mm de espesor.
- 1 Flecha de aluminio macizo de 1.7 cm de diámetro.

### Lámina 4.3 Dimensionamiento del rodete

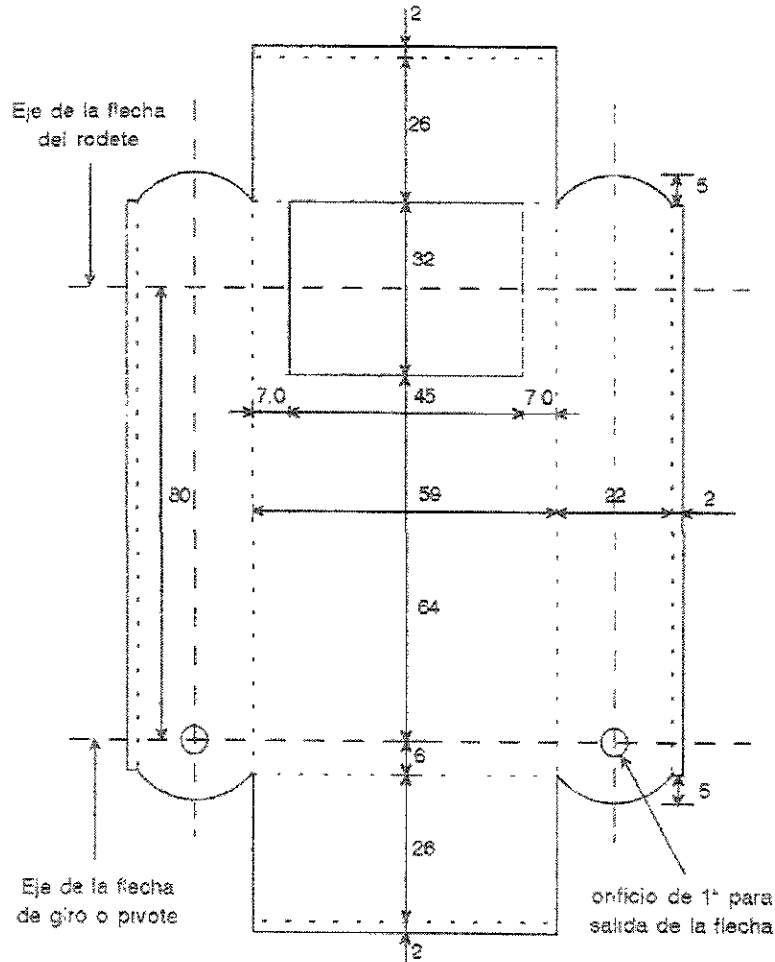
Para aprovechar al máximo la fuerza de incidencia sobre los álaves se propone una curvatura de los mismos de 45°, asegurando de esta forma, obtener mayores revoluciones en la flecha del rodete, no así, si utilizamos álaves rectos. [16, pág. 27]

## CUERPO DE LA COMPUERTA

Como ya se mencionó, la mayoría de los elementos deben alojarse en el interior de la compuerta, por esta razón, el dimensionamiento de la compuerta depende del arreglo de los

elementos en su interior, de las dimensiones de estos elementos y, finalmente, de las dimensiones del canal.

Tomando en cuenta el diámetro del rodete, se estima un espesor de la compuerta de aproximadamente 22 cm, espacio suficiente para instalar el alternador, que es otro de los elementos de mayores dimensiones. La lámina 4.4 muestra el trazo, dobleces y dimensiones de la parte frontal y lateral que forman una de las tres partes que integran el cuerpo de la compuerta.



**MATERIAL:**

1 Placa de aluminio de 2.30 x 1.20 mt y 3 mm de espesor

**SIMBOLOGÍA:**

- — — — — Eje simétrico
- - - - - Doblés según trazo

**Lámina 4.4 Cuerpo de la compuerta.**



La lámina 4.5 muestra varias vistas de la compuerta, se ilustra la pieza posterior que es otra de las partes del cuerpo de la compuerta, también se indica la posición que ocupa el rodete.

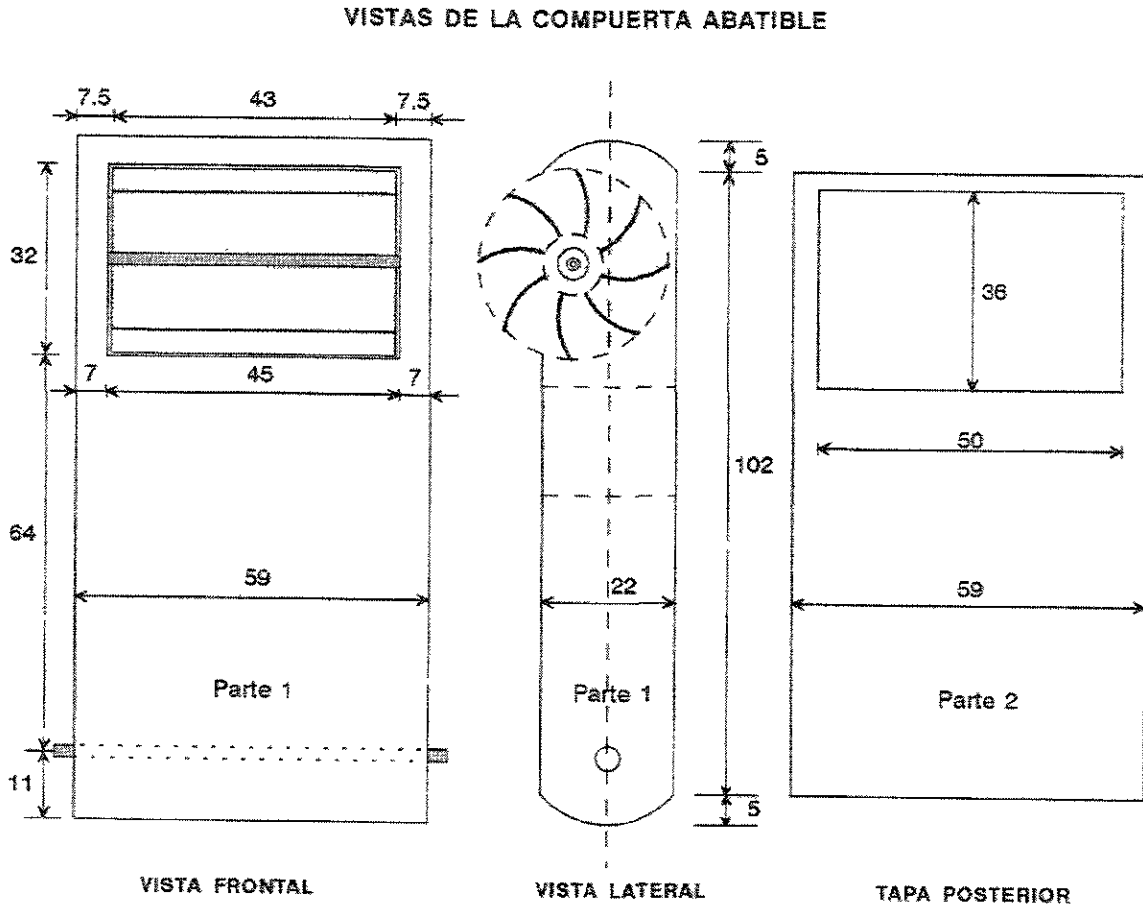


Lámina 4.5 Vistas de la compuerta y posición del rodete.

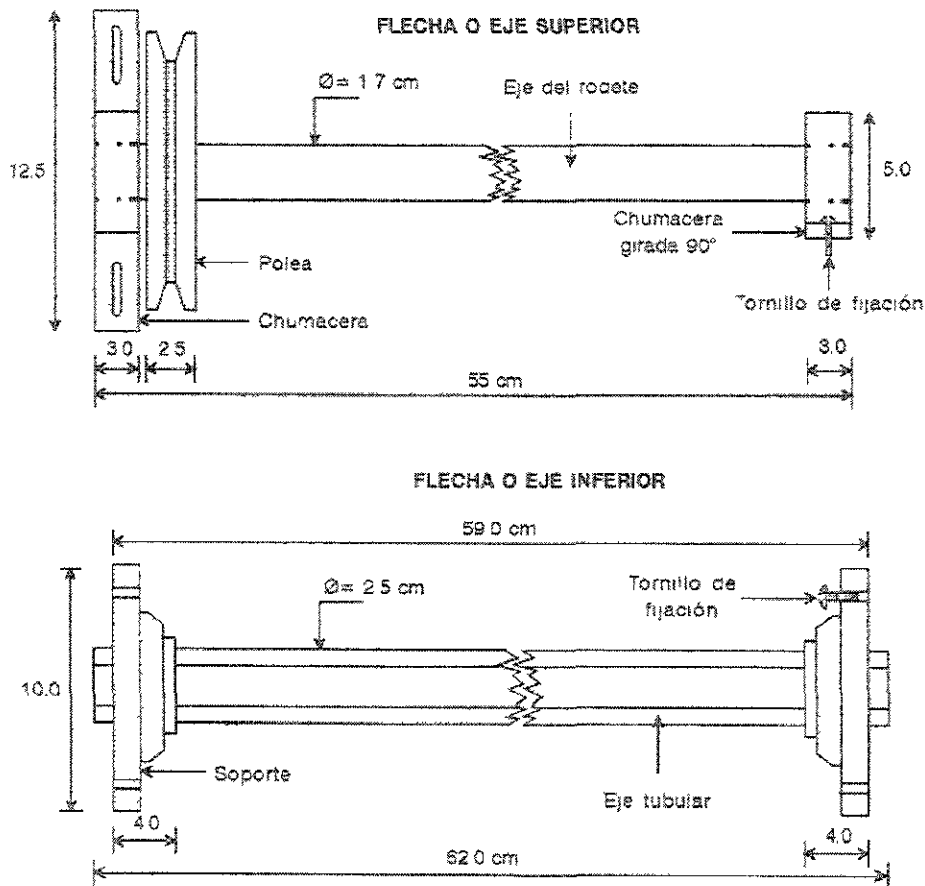
### FLECHAS O EJES

En el sistema se identifican dos ejes o flechas principales:

- *Flecha del rodete.* Esta flecha debe soportar las fuerzas que ejerce el agua sobre los álabes del rodete, la columna 11 de la tabla 3.1 indica el diámetro necesario de la flecha y la columna 12 el tipo de rodamiento que se ajusta al diámetro de la flecha, sobre ésta se encuentran montados el rodete, la polea de transmisión y las chumaceras con sus rodamientos.

- *Flecha de soporte.* Sobre esta flecha descansa el peso total de la compuerta y permite la libertad de movimiento para bajarla o subirla según se requiera, la libertad de movimiento se debe a los rodamientos alojados en sus respectivos soportes que se encuentran fijos a cada lado de la compuerta. La flecha sobresale de ambos lados de la compuerta para fijarse a un marco de soporte que la mantiene rígida, dentro de la flecha se aloja una manguera de  $\frac{1}{2}$ " que sirve como conducto del cableado entre el alternador y el acumulador.

La lámina 4.6 muestra el dimensionamiento de ambas flechas y los elementos que las integran.



**MATERIAL:**

- 1 Eje macizo de aluminio de  $\text{Ø} = 3/4"$
- 1 Eje tubular de fierro colado de  $\text{Ø} = 1"$
- 1 Polea de  $\text{Ø} = 4"$
- 2 Chumaceras con Rodamientos tipo 6203
- 2 Soportes con rodamiento tipo 6205

**Lámina 4.6 Dimensionamiento de flechas y elementos que las integran.**

## TREN DE ENGRANES Y ALTERNADOR

Las características del tren de engranes se encuentran resumidas en la tabla 3.6, la posición y dimensionamiento dentro de la compuerta se ilustra en la lámina 4.7; también se indica la posición que ocupa el alternador acoplado al tren de engranes.

El alternador está montado sobre una placa metálica con guías que le permiten desplazarse hacia arriba o hacia abajo, de tal manera que la banda que une al tren de engranes con el alternador se pueda tensar adecuadamente para lograr una transmisión lo más perfecta posible y disminuir el resbalmiento de la banda, evitando así pérdidas de potencia.

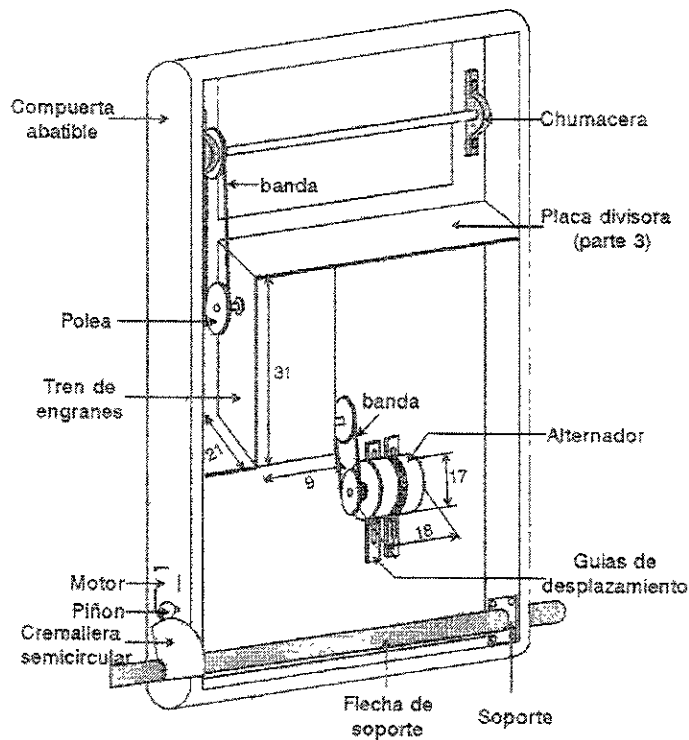


Lámina 4.7 Dimensionamiento del sistema de transmisión, alternador y motor de control

## UNIDAD DE POTENCIA (MOTOR REVERSIBLE)

La unidad de potencia es el elemento principal de control sobre la compuerta. La selección del mismo no solo depende del peso que controla sino también de la posición en que se coloque dentro de la compuerta, ya que influye el par que debe vencer, las revoluciones a las que debe operar (rapidez de respuesta sobre la compuerta) y la potencia. De la misma manera también se debe tomar en cuenta que el sistema trabajará con una tensión nominal de 12 volt de corriente continua.

En la lámina 3.14 se estimó el par necesario de la unidad de potencia para controlar la compuerta abatible, en base a este dato se decidió elegir la segunda opción de las alternativas de control propuestas en el capítulo anterior.

La lámina 4.7 ilustra la posición de un motor eléctrico de 8 amper y un torque de 1 kg-m colocado en el interior de la compuerta; con la ayuda de un piñón enclavado en la flecha del motor y una cremallera semicircular alojada en la flecha de soporte, se obtendrá el control de la compuerta.

### ACUMULADOR

Es la fuente de energía que suministra al motor de control sobre la compuerta, el acumulador que se seleccionó es del tipo vehicular –para garantizar su existencia en el mercado rural– por lo que es el único elemento que no puede alojarse en el interior de la compuerta, puesto que esta tiene un ángulo de giro de  $90^\circ$ , posición que no puede seguir el acumulador sin vaciarse, razón por la que se optó por alojarlo fuera de la compuerta.

El acumulador se encuentra sobre una placa montada en la parte superior del marco que sirve de base a la compuerta. La lámina 4.8 ilustra la posición que guarda el acumulador en el sistema preliminar.

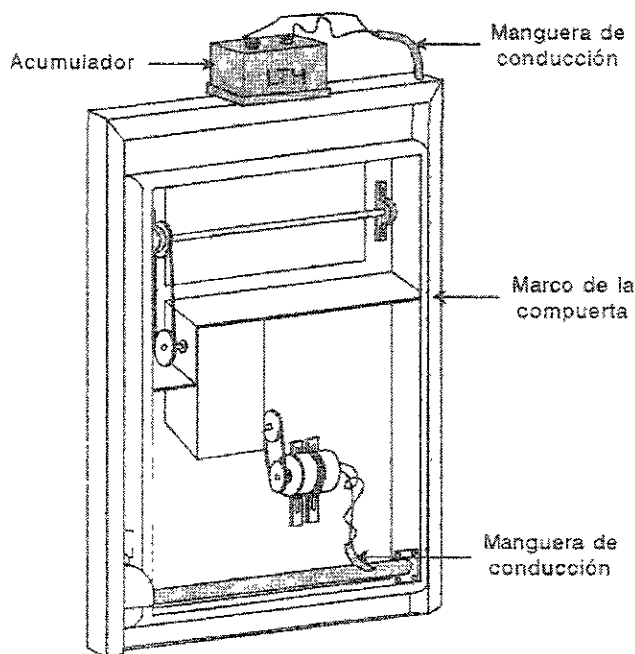
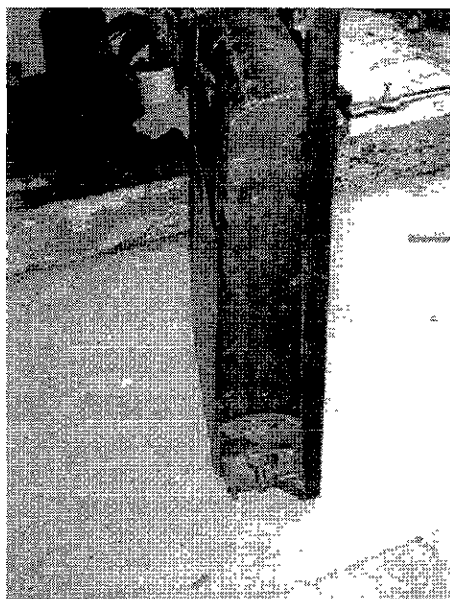


Lámina 4.8 Posición del acumulador

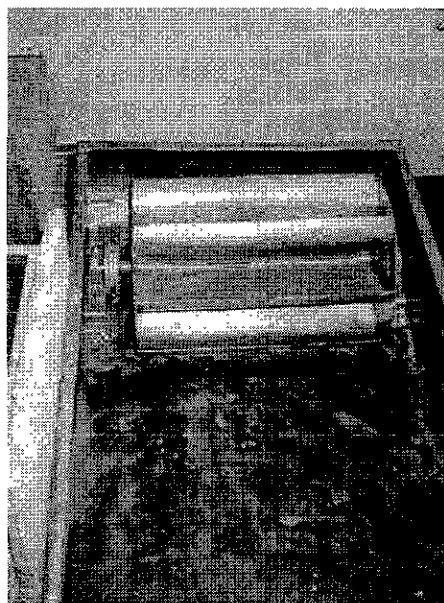
### 4.3 Construcción del sistema preliminar

La fotografía II ilustra el cuerpo de la compuerta hermanado con el marco que la sostiene, también se puede observar la flecha de soporte que sobresale de ambos lados de la compuerta y que tiene la finalidad de soportar la misma; enclavada en esta flecha y alojada a un costado de la compuerta se encuentra la cremallera semicircular que sirve de guía para subir o bajar la compuerta con la ayuda del motor y su respectivo piñón.

El espesor de la compuerta lo determinaron las dimensiones de los elementos que aloja en su interior y del diámetro seleccionado del rodete. En la parte superior de la compuerta se observa la ranura por donde saldrá parte de los álabes del rodete.

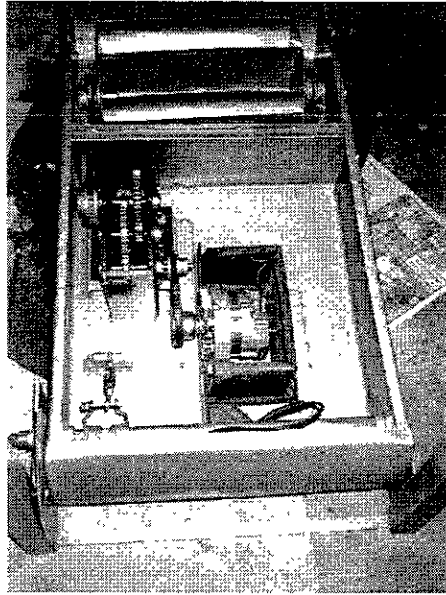


**Fotografía II. Cuerpo de la compuerta**



**Fotografía III. Rodete dentro de la compuerta**

En la fotografía III se ilustra la posición que guarda la flecha o eje superior donde se encuentran montados el rodete, la polea y las chumaceras que fijan dicha flecha en el interior de la compuerta; también se alcanza a apreciar sobre el contorno de la compuerta el doblés o ceja donde se alojan los tornillos de sujeción que sirven de unión con la tapa posterior de la compuerta, sobre éste doblés se aloja un sello de hule que une ambas partes, logrando así la hermeticidad en el interior de la compuerta.



**Fotografía IV Sistema integral preliminar**

En esta fotografía se ilustran los elementos que aloja la compuerta en su interior como son: el rodete, poleas, bandas, chumaceras, tren de engranes, rodamientos, alternador, flecha de soporte y el cableado eléctrico, también se alcanza a apreciar la cremallera semicircular y parte del marco de la compuerta que la sostiene.

#### **4.4 Evaluación del sistema integral preliminar**

Construido el sistema integral se procedió al anclaje en la parte final del canal, con lo que la compuerta quedó lista para realizar las pruebas de funcionalidad, en los siguientes subcapítulos se describe el protocolo de pruebas y algunos de los resultados obtenidos, así como su evaluación y los ajustes consecuentes que se realizaron para mejorar el sistema.

##### **4.4.1 Procedimiento para la realización de las pruebas**

1. Indicar al responsable del laboratorio que se hará uso del canal para que proporcione el equipo adecuado y el suministro de agua.
2. Verificar que el equipo de medición y control estén correctamente conectados e instalados.
3. Ajustar los sensores de nivel dentro del canal para elegir el rango de operación de la compuerta.
4. Realizar una inspección a la compuerta con el controlador de nivel en el modo manual para asegurarse de que este operando adecuadamente.

5. Ajustar la compuerta dentro del rango especificado y activar el controlador en el modo automático.
6. Verificar que los indicadores de nivel del tanque elevado se encuentren en verde, lo que indica que hay agua para suministrar el canal de pruebas.
7. Abrir la válvula electrónica que suministra el canal de pruebas hasta obtener la carga hidráulica (tirante) deseada en el canal.
8. Para obtener el gasto en el canal, anote la lectura del nivel colocado a un costado del tanque de alimentación, consulte la tabla 4.1 y obtenga directamente el gasto o también consulte directamente el medidor ultrasónico que detecta las variaciones de nivel sobre el vertedor.
9. Con el gasto y la carga sobre la compuerta se puede estimar la velocidad promedio del agua que incide sobre los álabes del rodete, también se puede utilizar un molinete para comprobar las velocidades promedio cercanas al rodete.
10. Verificar las siguientes lecturas cada 10 minutos: r.p.m. del rodete, voltaje y corriente del acumulador, gasto del ultrasónico, nivel del tanque alimentador, tirantes en el canal y sobre la compuerta.
11. Al terminar la prueba correspondiente, apague el equipo de medición y control, cierre la válvula electrónica de suministro de agua al canal.
12. Indicar al responsable del laboratorio que la prueba a terminado para que apague el equipo de bombeo.
13. Finalmente limpie el equipo de medición, resguárdelo y asegúrese de dejar limpia el área de trabajo.

#### ***4.4.2 Pruebas realizadas y resultados***

El objetivo de las pruebas es reflejar el grado de funcionalidad del sistema preliminar y de esta forma poder corregir las posibles fallas que se tengan del mismo.

Se realizaron las pruebas del rodete como elemento único (Prueba No.1) y del rodete acoplado con el tren de engranes (Prueba No. 2).

##### **PRUEBA No. 1**

El objetivo que persigue la prueba es evaluar el comportamiento del rodete con diferentes cargas en el canal de pruebas; siendo éste el elemento primordial para la transferencia de energía cinética a energía mecánica.

*Características de la prueba:* compuerta fija en posición horizontal, rodete desacoplado del tren de engranes, no se instaló el controlador de niveles ni la unidad de potencia (motor reversible).

Se inició el funcionamiento del canal de pruebas con parte del procedimiento de pruebas descrito anteriormente; se realizaron mediciones de gasto (ultrasónico), velocidades (molinete), tirantes (límnimetro) y r.p.m. del rodete (cronómetro).

La prueba duró aproximadamente 5 horas; cada media hora se incremento el gasto en el canal, después de alcanzar un equilibrio respecto a la carga hidráulica sobre la compuerta, se procedió a tomar una serie de lecturas correspondientes a velocidades sobre la compuerta y r.p.m. del rodete.

La siguiente tabla 4.2 muestra los valores promedio obtenidos de las mediciones realizadas de la prueba y también refleja el comportamiento del fluido sobre la compuerta y la reacción sobre el rodete. La lámina 4.9 ilustra los puntos donde se llevaron a cabo las mediciones sobre la compuerta.

Después de 48 horas terminada la prueba se revisó la hermeticidad de la compuerta, se procedió a quitar la tapa posterior y se observaron pequeñas cantidades de agua y humedad en el interior de la misma, lo que indica una deficiencia en el sellado que deberá ser corregida.



Tabla 4.2 Resultados preliminares de la prueba No. 1

Medida No.	DATOS OBTENIDOS											DATOS ESTIMADOS								
	$H_{\text{canal}}$ (cm)	$Y_0$ (cm)	$Y_1$ (cm)	$Y_2$ (cm)	$h_{\text{vertedor}}$ (cm)	$Q_{\text{canal}}$ (l/s)	$Q_{\text{ultras}}$ (l/s)	Velocidades en (m/s)			$V_{1\text{prom}}$ (m/s)	$n_{\text{rodete}}$ (rpm)	$Q_{\text{s/comp}}$ (l/s)	$V_0$ (m/s)	$V_2$ (m/s)	$U$ (m/s)	$F$ (N)	$P_{\text{obtenida}}$ (N-m/s)	$P_{\text{disponible}}$ (N-m/s)	$C_p$ (adim.)
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	Marg. izq.	Centro	Marg. der.	[12]	[13]	[14]	[15]	[16]	[17]	[18]	[19]	[20]	[21]
1	39.00	13.00	11.70	11.20	5.90	33.16	35.14	0.36	0.35	0.34	0.35	17.74	24.57	0.32	0.59	0.30	4.81	1.43	28.19	0.05
2	39.75	13.75	12.40	12.00	6.10	36.11	36.80	0.40	0.36	0.36	0.37	24.41	27.53	0.33	0.82	0.41	7.41	3.03	33.47	0.09
3	41.00	15.00	13.80	13.20	6.90	42.92	44.50	0.45	0.42	0.41	0.43	34.57	35.60	0.40	1.16	0.58	13.57	7.86	48.18	0.16
4	44.00	18.00	16.30	15.40	8.30	57.06	59.70	0.55	0.53	0.52	0.53	52.98	51.83	0.48	1.78	0.89	30.28	26.87	82.85	0.32
5	46.30	20.30	18.20	15.76	9.60	70.88	75.07	0.65	0.61	0.60	0.62	62.51	67.70	0.56	2.09	1.05	46.66	48.87	120.83	0.40
6	47.50	21.50	19.20	17.30	10.40	79.88	84.04	0.71	0.66	0.66	0.67	65.48	77.18	0.60	2.19	1.10	55.72	61.13	145.32	0.42
7	48.50	22.50	19.80	18.90	11.20	89.21	93.70	0.78	0.73	0.72	0.74	68.41	87.91	0.65	2.29	1.15	66.30	76.00	170.69	0.45
8	50.00	24.00	20.90	19.50	12.70	105.24	109.30	0.85	0.80	0.79	0.81	72.97	101.99	0.71	2.45	1.22	82.05	100.31	209.03	0.48

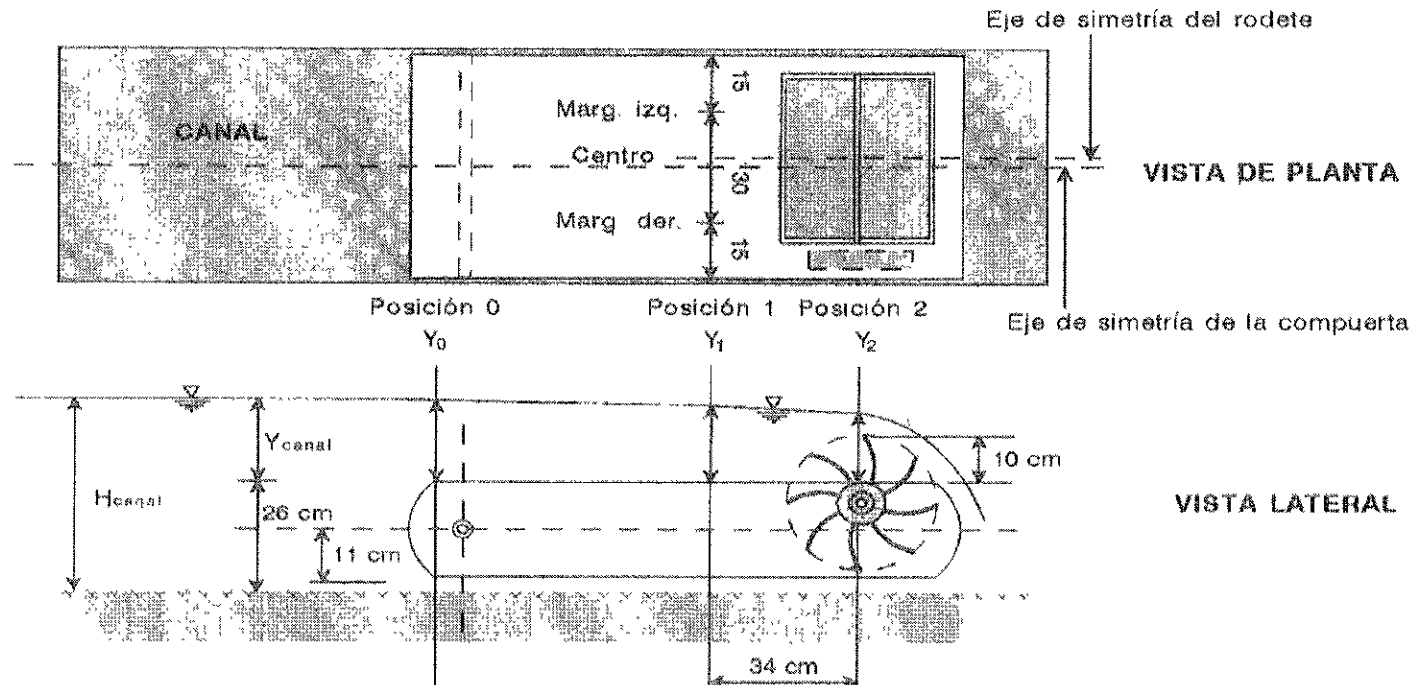
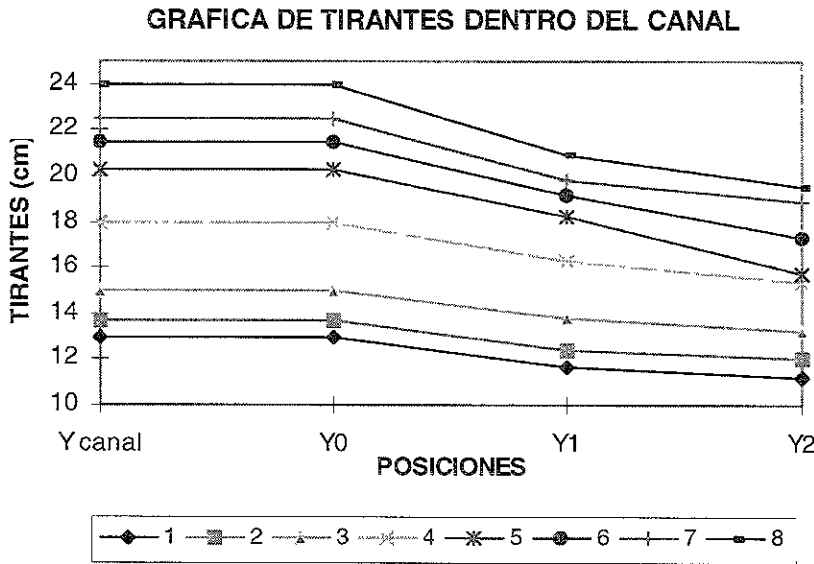


Lámina 4.9 Puntos de muestreo sobre la compuerta abatible

**Descripción de los resultados de la tabla 4.2** Con las columnas 2,3,4 y 5 de la tabla anterior se obtiene la siguiente gráfica de cargas hidráulicas (tirantes) sobre la compuerta (ver lámina 4.10)



**Lámina 4.10 Perfil de tirantes sobre la compuerta.**

La gráfica muestra los perfiles obtenidos para cada una de las variaciones realizadas en la carga; como era de esperarse conforme se aumento la carga en el canal se obtuvieron mayores revoluciones en el rodete que es el elemento de análisis; siendo este elemento el medio para capturar parte de la energía existente en el canal por lo que se espera llegar a un limite en la carga hidráulica donde el rodete cederá las máximas revoluciones y aunque se aumenten estas cargas, el rodete no será capaz de captar toda la energía hidráulica debido a que no todo el fluido pasa a través de los álabes para realizar la transferencia de energía hidráulica a energía mecánica.

El tirante obtenido sobre el rodete (posición  $Y_2$  ) no es fiable para realizar un análisis de velocidades debido a las variaciones (perturbaciones) del fluido en este punto y que se aprecian en el gráfico. Una alternativa para estimar la velocidad en este punto se realizó utilizando las r.p.m. obtenidas del rodete y tabuladas en la columna 13 para ser sustituidas en la siguiente ecuación, (deducida en la sección 3.1);

$$U = \pi D_r n/60 \tag{4.1}$$

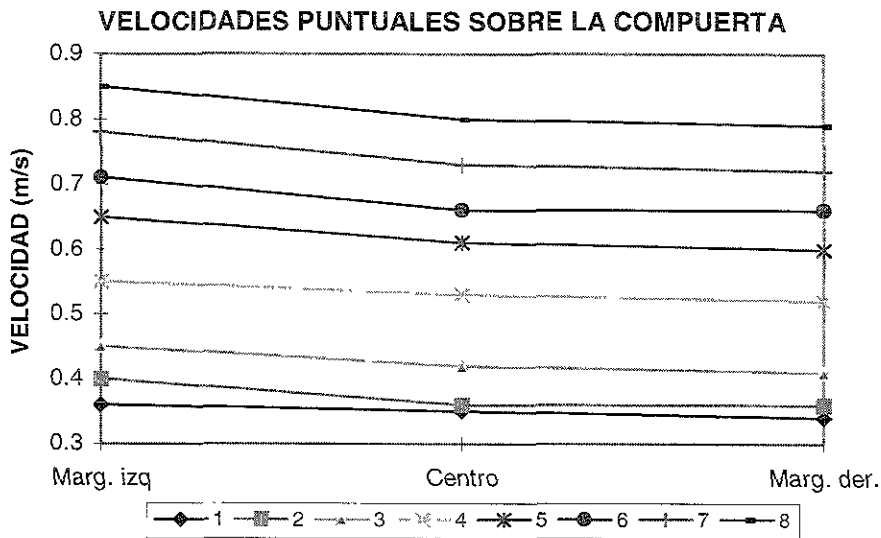
donde:

$U$  = velocidad lineal de los álabes [m/s]

$D_r$  = diámetro del rodete [m]

$n$  = r.p.m. del rodete [rev/min]

los valores estimados de  $U$  se muestra en la columna 17. De las columnas 9,10 y 11 de la tabla se obtiene el gráfico de velocidades sobre la compuerta mostrado en la siguiente lámina 4.11

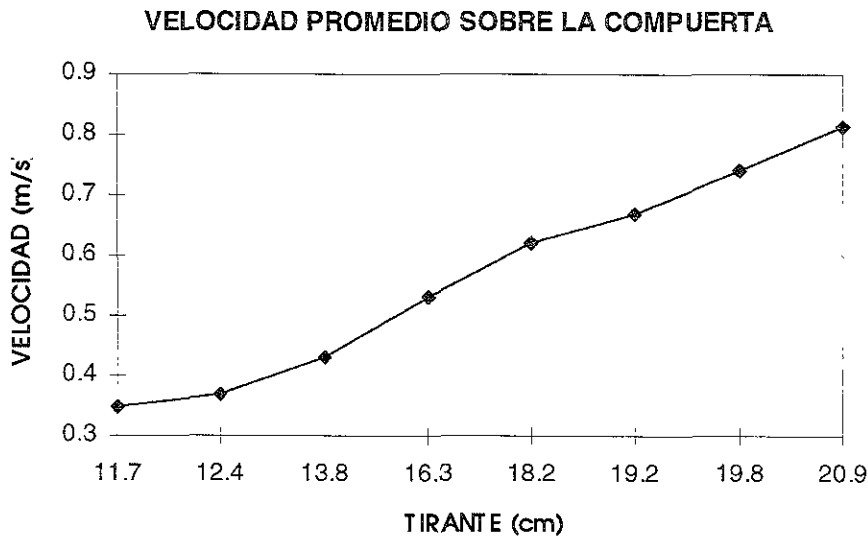


**Lámina 4.11 Perfil de velocidades sobre la compuerta.**

El gráfico muestra las velocidades puntuales obtenidas sobre la compuerta en la posición 1 ( $Y_1$ ) y en los puntos marcados como Marg. Der. = margen derecha, Marg. Izq. = margen izquierda y Centro; estos puntos de medición pueden observarse en la lámina de arriba.

Es de esperarse que la velocidad en el centro del canal debiera ser mayor que la existente cercana a las paredes del mismo, sin embargo, la presencia de la polea acoplada sobre la misma flecha del rodete, implica que el mismo rodete no este centrado con el eje simétrico de la compuerta razón por la cual se ve reflejado un aumento en la velocidad del fluido en la margen izquierda del canal, por la reducción de área (como se muestra en una vista de planta en la lámina 4.9), situación contraria se presenta en la margen derecha del canal.

La lámina 4.12 ilustra la velocidad promedio  $V_1$  obtenida para diferentes cargas del canal de pruebas y que se encuentran tabuladas en la columna 12.



**Lámina 4.12 Perfil de la velocidad promedio medida en la posición  $Y_1$**

Sustituyendo los valores de las columnas 4 y 12 en la ecuación de continuidad, se estima el gasto útil sobre la compuerta tabulada en la columna 14; que es un gasto inferior al gasto suministrado por el vertedor y también registrado por el medidor ultrasónico (columnas 7 y 8 respectivamente), esto debido a que la compuerta no cierra herméticamente con las paredes del canal.

La velocidad  $V_0$  en la posición 0 también se estima con la ecuación de continuidad y las columnas 3 y 14. De forma similar se estima la velocidad  $V_2$  con el valor obtenido en la columna 17 que es dos veces  $U$ .

La fuerza de incidencia del agua sobre el rodete se estima con la ecuación (3.2) y las columnas 14,16 y 17, los valores obtenidos se muestran en la columna 18.

La potencia desarrollada por la fuerza del fluido sobre el rodete se representa en las columnas 19 y 20, la primera corresponde a la potencia obtenida estimada con las columnas 17 y 18 según ecuación 3.5 y la segunda es la potencia disponible o ideal estimada con las columnas 4 y 14 que es la potencia existente sobre la compuerta (donde no se considera ningún tipo de pérdidas).

De la potencia se deduce que de toda la energía disponible en el canal solo una parte es aprovechada por el rodete, esto se ve reflejado si consideramos a  $C_p$  como el coeficiente de potencia o rendimiento hidrodinámico del rodete que se ve reflejado en la columna 21 aunque este va en aumento llegara un momento en que la potencia disponible será mucho

mayor que la potencia obtenida, y el coeficiente  $C_p$  empiece a descender, situación que no se alcanzó en particular para esta primera prueba de laboratorio.

Con los datos obtenidos de la prueba anterior podemos estimar con cierta exactitud los gastos y velocidades presentes en el canal con solo medir la carga ( $H_{\text{canal}}$ ), que es la variable dependiente de todo el sistema, tomando en cuenta que en ningún momento cambió la posición horizontal de la compuerta.

Por esta razón solamente se tomaron lecturas de la carga ( $H_{\text{canal}}$ ) y r.p.m. del rodete para la siguiente prueba.

## PRUEBA No. 2

El objetivo de la prueba es evaluar el comportamiento del rodete acoplado con el tren de engranes (sin incluir el alternador). Se inició el funcionamiento del canal de pruebas con la compuerta en posición horizontal no se instaló el controlador de niveles ni el motor que controla la compuerta.

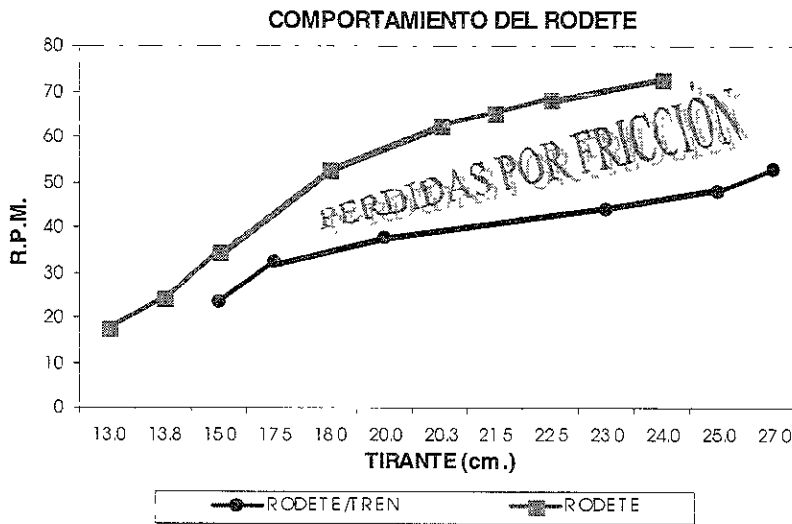
La siguiente tabla muestra los valores obtenidos de esta prueba.

*Tabla 4.3 Resultados obtenidos de la prueba No. 2*

Medida No.	$H_{\text{canal}}$ (cm)	$Y_0$ (cm)	Rodete (r.p.m. prom.)	Polea 3 (r.p.m. prom.)
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]
1	41.00	15.00	23.45	586.25
2	43.50	17.50	32.34	908.50
3	46.00	20.00	37.91	947.75
4	49.00	23.00	44.03	1050.75
5	51.00	25.00	48.12	1203.00
6	53.00	27.00	53.00	1325.00

Recordando que se tiene un valor del tren de engranes  $e = 25$ , que significa que por cada vuelta del rodete se tendrán 25 en la última flecha del tren de engranes, por lo tanto, la estimación de las revoluciones obtenidas de ésta última flecha de la cadena cinemática se muestra en la columna 5 de la tabla anterior que es un buen indicador de la mínima carga necesaria en el canal para proporcionar las r.p.m. requeridas por el alternador para generar energía eléctrica.

El siguiente gráfico muestra el comportamiento del rodete en ambas pruebas, es decir, el rodete funcionando como elemento único y del rodete acoplado con el tren de engranes.



**Lámina 4.13 Comportamiento del rodete.**

Como se puede observar el comportamiento del rodete es el teóricamente esperado (tabla 3.1) sin embargo, al acoplar el rodete con el tren de engranes por medio de la banda, las r.p.m. del rodete disminuyen notablemente lo que significa que existe mucha fricción en la transmisión que se traduce en un freno del rodete que aumentará de manera considerable al acoplar el alternador.

#### 4.4.3 Observaciones y modificaciones

Para poder aprovechar al máximo la energía hidráulica del canal es necesario reducir las pérdidas por fricción de los elementos que conforman el sistema de microgeneración de energía eléctrica (rodete, tren de engranes y alternador) teniendo mayor cuidado en el tren de engranes que es el elemento que representa mayores pérdidas por fricción, así lo muestran los resultados de las pruebas realizadas al sistema preliminar.

A continuación se muestran los elementos que sufrirán algunos cambios o modificaciones para mejorar el funcionamiento general del sistema.

**CUERPO DE LA COMPUERTA.** Después de abandonar el rodete, el fluido choca con la parte final de la compuerta produciendo una pérdida de energía manifiesta en turbulencia que provoca que el fluido se dirija en todas partes restando movimiento de giro al rodete; por esta razón es necesario eliminar esta parte de la compuerta para permitir el libre giro del rodete y disminuir pérdidas por direccionamiento del fluido, reflejándose esta acción en un aumento de las r.p.m. del rodete.

Al eliminar parte de la compuerta será necesario ajustar la tapa posterior de la misma a las dimensiones necesarias o preferentemente limitarse a cerrar la cámara de protección que aloja a los demás componentes (ver anexo B).

Es necesario perfeccionar la hermeticidad de la cámara de protección evitando las infiltraciones del fluido dentro de la misma. Esto se logra aumentando el espesor del sello y los puntos de presión (tornillos), superponiendo finalmente una capa de silicon transparente.

**MODIFICACIONES DEL RODETE.** En el giro del rodete se observó la desalineación que provoca que este no gire uniformemente concéntrico, esto se debe a que las chumaceras tienen la libertad de orientarse al momento de ser montadas, sin embargo, una vez definida su posición ya no es de gran ventaja esta característica, siendo más conveniente fijarla con otro tipo de soporte evitando la desalineación del rodete y consecuentemente pérdidas por fricción.

**TRANSMISIÓN.** El sistema cuenta con transmisión de engranes y poleas con bandas, en ambas transmisiones se observaron algunas deficiencias y otras se suponen por los resultados obtenidos de las pruebas anteriores.

Referente al tren de engranes se realizó un análisis de fuerzas <sup>[21, pág. 628]</sup> de los engranes rectos y se comparó con un análisis de engranes helicoidales llegándose a la conclusión de sustituir los engranes actuales por helicoidales con diámetros más pequeños, sin perder la relación de transmisión; con esto se pretende disminuir las masas de los engranes y consecuentemente su inercia, logrando menores pérdidas por fricción y mayor fuerza de transmisión.

En lo correspondiente a las poleas, las actuales presentan deficiencias de arrastre por lo que podrían ser remplazadas por otras de acabado especial (coronamiento) <sup>[20, pág. 277]</sup> y que se ajusten a las bandas o ligas (oring) de tal manera que el arrastre sea lo más preciso y se logre obtener el mínimo de pérdidas por resbalamiento entre la liga y la polea.

**SISTEMA DE CONTROL.** El peso de la compuerta fue mucho mayor que el estimado (ver lámina 3.14) debido a que en la construcción de la compuerta se utilizó lámina de mayor peso que el aluminio, por esta razón el motor es insuficiente para levantar la compuerta por debajo de los 30° respecto a la plantilla del canal, mucho menos en la condición más desfavorable (posición horizontal).

Otra de las razones por las que el motor no consiguió el control de la compuerta es el punto donde se instaló, esto debido a que no se pudo conseguir una cremallera más grande que

pudiera disminuir la distancia entre las fuerzas aplicadas y el punto de acción del motor (como lo indica la segunda alternativa de control en la sección 3.9.2).

Expuesto lo anterior se propone remplazar el sistema de control actual por el sistema electromecánico con actuador eléctrico y operador de engranes como se describe en la tercera alternativa de control en la sección 3.9.3).

**FLECHA O EJE DE SOPORTE.** De acuerdo con las modificaciones proyectadas es importante asegurar la resistencia del eje soporte que no solamente tendrá la función de soportar a la compuerta sino también la de girarla en uno u otro sentido según se requiera; por tanto se realizará el cambio del tubo que se tiene por uno de sección sólida; siendo necesario reinstalar el cableado del sistema eléctrico.



---

## CAPÍTULO

# 5

## SISTEMA INTEGRAL FINAL

En este capítulo se describen los cambios y modificaciones que sufrió el sistema a raíz de las propuestas de modificación señaladas en el capítulo 4, así como algunas transformaciones de fondo y forma derivadas de la experiencia adquirida.

Después de realizar los cambios planteados, el sistema siguió presentando deficiencias en su funcionamiento por lo que se propuso una nueva estrategia para lograr las metas fijadas en lo que respecta a la microgeneración y automatización de la compuerta abatible.

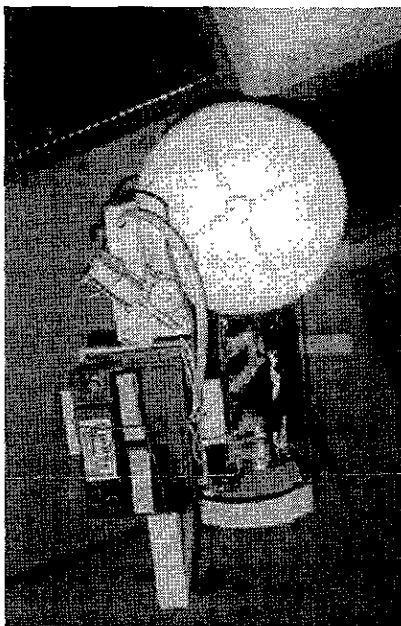
Al no lograr disminuir lo suficiente la fricción en el sistema mecánico de transmisión y no obtener el número de r.p.m. requeridas por el alternador, se decidió utilizar generadores más pequeños, esto con el fin de generar energía con menores r.p.m. y de disminuir las pérdidas derivadas del consumo de los elementos mecánicos. En este sentido se decidió sustituir el tren de engranes por pequeños engranes acoplados directamente a los generadores alojados en el interior del rodete. Dado que estos generadores tienen una pequeña capacidad de generación (3 volt), adicionalmente fue necesario desarrollar un amplificador de voltaje para poder almacenar la energía en el acumuladores de 12 volt.

## 5.1. Cambios finales del sistema integral

### 5.1.1 Sistema de control.

Se realizaron los cambios que se plantearon, se sustituyó el sistema existente (cremallera y piñón) por el sistema electromecánico mencionado en la sección 3.9.3 (tercera alternativa) para facilitar el control de la compuerta.

El sistema ya montado sobre el marco de la compuerta se muestra en las fotografías V y VI.



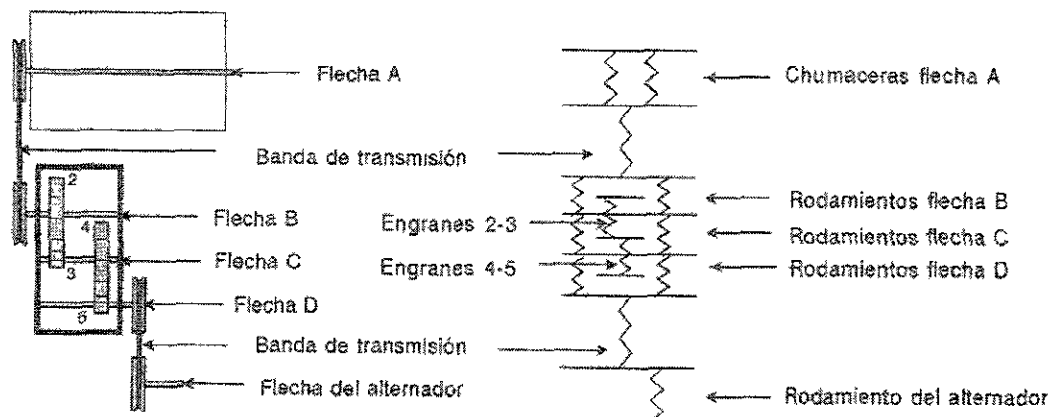
Fotografía V. Motor y rueda dentada      Fotografía VI. Extensión y operador de engranes.

En la fotografía V se muestra el motor (actuador eléctrico) y la rueda dentada que proporciona bajas velocidades a la extensión que acopla al operador de engranes donde se aumenta el torque para poder operar la compuerta según se desee. La rapidez de respuesta del motor respecto a la compuerta es de 2.2 r.p.m.; es decir, por cada vuelta de la rueda dentada que tarda 27 segundos aproximadamente la compuerta se desplaza un ángulo de  $10^\circ$  respecto a la plantilla del canal, evitando la generación de oleaje debido a las bajas r.p.m. de la rueda dentada (la rapidez esta ligada con el diámetro de la rueda dentada)

La fotografía VI ilustra el operador de engranes que se encuentra montado sobre el marco de la compuerta, por un costado de la misma, en este elemento se encuentra acoplado la flecha inferior que sirve de pivote y soporta la compuerta. De esta manera se concluye con el sistema de control y de los requerimientos de operación sobre la compuerta

### 5.1.2 Cambios en el rodete.

Existe demasiada fricción en el sistema de transmisión, debido a la excesiva presencia de elementos que se encuentran en contacto directo, como lo son: engranes, rodamientos, bandas y poleas, donde cada uno de ellos representa una resistencia (pérdidas por fricción) que consume la energía cedida por el rodete como se demuestra en la lámina 5.1.

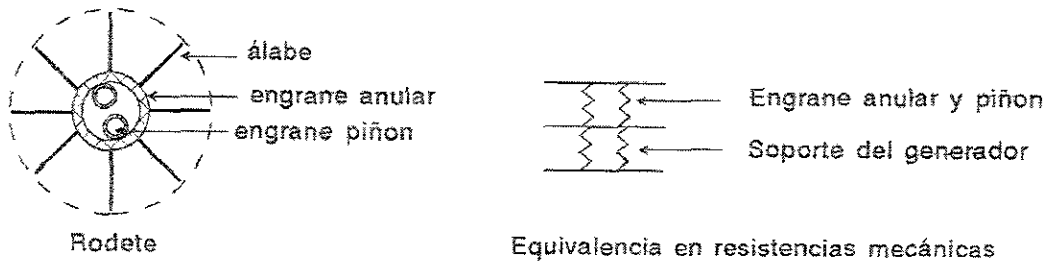


**Lámina 5.1 Resistencias mecánicas en el sistema de transmisión**

Entre menos elementos mecánicos de acoplamiento se tengan entre el impulsor y el generador, mayor será el aprovechamiento en la generación de energía eléctrica. Cuando la energía cedida por el impulsor es lo suficientemente grande (turbinas hidroeléctricas), las resistencias mecánicas se vuelven pequeñas, es decir, son fácilmente absorbidas, al contrario cuando la energía cedida por el impulsor es muy pequeña, las resistencias mecánicas ya no son tan fácilmente absorbidas; y si además existen un gran número de ellas se vuelve un inconveniente aún mayor por el consumo de energía de dichos elementos mecánicos (pérdidas por fricción).<sup>[21, pág. 546]</sup>

Para disminuir estos problemas, se decidió aprovechar lo más directamente posible la energía cedida por el rodete al generador. Esto se logró utilizando un engrane de dientes internos o anular dentro del rodete, el cual se volvió más robusto para poder alojar en su

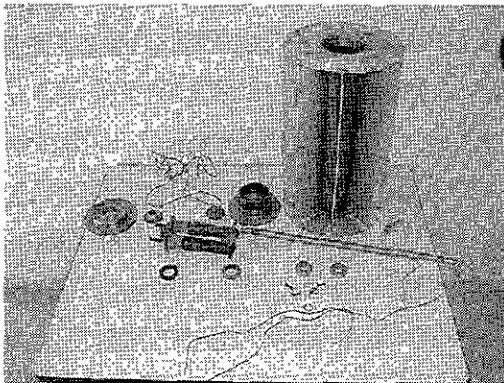
interior un par de generadores que están directamente acoplados a dicho engrane anular por un engrane piñón como el que se muestra en la lámina 5.2.



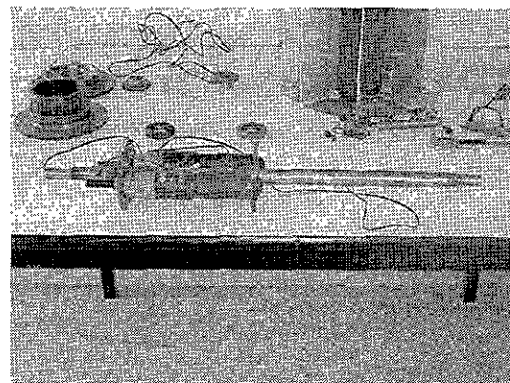
**Lámina 5.2 Elementos que integran el rodete y su equivalencia en resistencias**

De esta manera se eliminan resistencias mecánicas, y se baja el peso en la compuerta al transferir el generador y los engranes dentro del rodete. Con estas adecuaciones el cuerpo de la compuerta puede ser más compacto y ligero, lo que también simplifica su instalación.

El ensamble de los elementos que integran el rodete se muestran en las fotografías VII, VIII, IX y X.



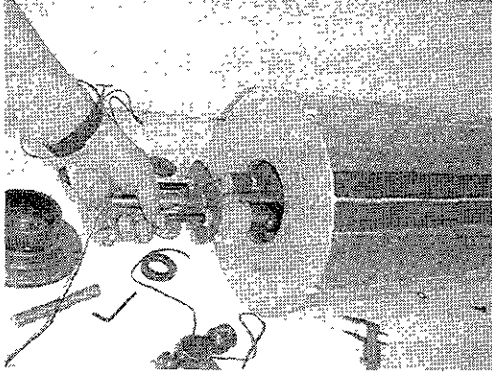
**Fotografía VII. Elementos que integran el rodete**



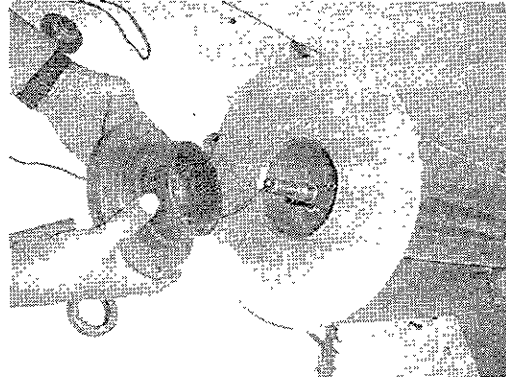
**Fotografía VIII Generadores de c.c.**

En la fotografía VII se aprecian los elementos que integran el rodete, como son: alabes rectos incrustados en un eje hueco, flecha sobre la cual se encuentran montados un par de generadores con sus respectivos ejes y engranes piñón, rodamientos, engrane anular, retenes, empaques o sellos, conductor eléctrico y las tapas laterales del rodete.

La fotografía VIII ilustra la flecha donde se encuentran instalados los generadores con sus respectivos engranes piñón, estos pequeños engranes reciben el impulso directo del engrane anular, produciendo la energía eléctrica con salida de 3 volts que posteriormente se amplifica y se almacena en el acumulador de 12 volts.



**Fotografía IX** Instalación de los generadores

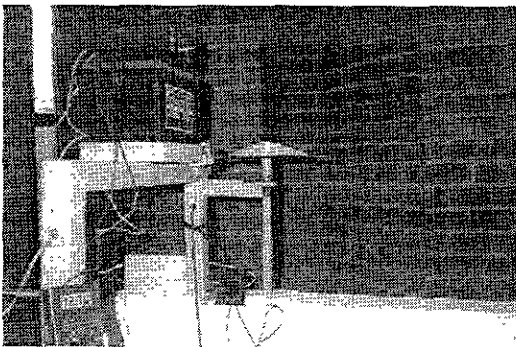


**Fotografía X** Engrane interior o anular

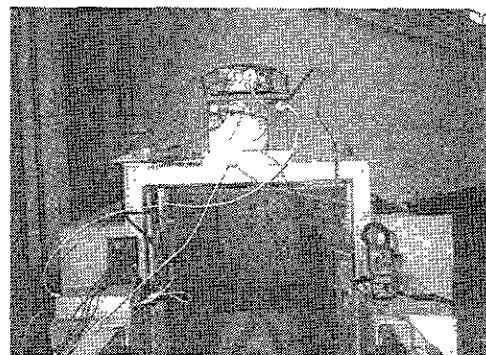
Las fotografías IX y X muestran la posición que guardan los generadores y el engrane anular dentro del rodete, de esta manera se reducen al mínimo las resistencias mecánicas que se tenían en el sistema de transmisión anterior.

### 5.1.3 Amplificador de voltaje .

Al utilizar generadores de poca capacidad de generación, fue necesario contar con un sistema de amplificación de voltaje (ver diagrama esquemático en el anexo C) para almacenar la energía cedida por los generadores al acumulador; la carga del acumulador es lenta pero continua, por lo que el amplificador asegura la recarga total requerida por el acumulador en condiciones normales de operación; las fotografías XI y XII ilustran el amplificador de voltaje y la ubicación que guarda respecto al acumulador y a la compuerta



**Fotografía XI** Amplificador de voltaje



**Fotografía XII** Ubicación del amplificador

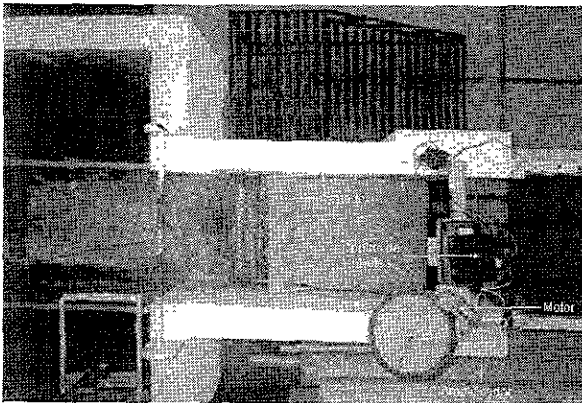
## 5.2 Evaluación del sistema final

Una vez que se remodelo y se reconstruyó el sistema de microgeneración y automatización, se procedió a instalar el sistema integral en el canal del laboratorio para su validación experimental.

Utilizando el procedimiento descrito en la sección 4.4.1, se puso en marcha la prueba de funcionalidad, en esta prueba se midieron las r.p.m. del rodete, la carga hidráulica sobre la compuerta, la corriente cedida por los generadores y el voltaje en el acumulador.

Las fotografías XIII y XIV muestran el sistema integral, en ellas se pueden observar los siguientes elementos: la compuerta en posición horizontal, el rodete, el amplificador de voltaje, el acumulador, el sistema electromecánico de apertura y cierre de la compuerta, el sistema de control de niveles y los dispositivos auxiliares de medición (cronómetro, voltímetro, amperímetro y límnmetro).

Los dispositivos de medición se utilizaron para medir algunas de las variables durante las pruebas de laboratorio como el voltaje generado, gasto, la velocidad de respuesta del sistema, carga en el canal y en el vertedor (deflector) entre otras variables.



**Fotografía XIII.** Ubicación de la compuerta dentro del canal de pruebas.



**Fotografía XIV.** Evaluación del sistema final puesto en operación.

### 5.3. Resultados del sistema final

*Características de la prueba:* Se inicio la prueba con el procedimiento descrito en la sección 4.4.1.; se eligieron cuatro posiciones de la compuerta respecto a la plantilla del canal ( $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$  y  $40^\circ$ ) y se realizaron las mediciones correspondientes de las siguientes variables: Cargas en el canal y sobre el vertedor, r.p.m. del rodete, voltaje de generación y gastos.

Es conveniente mencionar que el ataque del fluido sobre los alabes del rodete esta direccionado por la posición del vertedor (deflector) situado antes del rodete (ver fotografías XIII y XIV ).

Los generadores empiezan a almacenar energía en el acumulador cuando se tiene una carga de 2.3 cm sobre el vertedor con una posición de  $10^\circ$  de la compuerta respecto a la plantilla del canal, esta carga es la mínima necesaria de generación, obteniendo 46.2 r.p.m. en el rodete con una carga en el canal de 51.4 cm; conforme se cierra la compuerta se observa un aumento en la carga mínima de generación como se muestra en la siguiente tabla de resultados 5.1. donde se han resumido los resultados obtenidos.

*Tabla 5.1 Cargas mínimas de generación*

Compuerta Posición (grados)	Carga del canal ( cm )	Carga de operación ( cm )	Gasto estím. s/compuerta (l/s)	Revoluciones del rodete (r.p.m. prom.)	Voltaje generado (volt)
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]
$0^\circ$	40.0	hasta 4.1	hasta 22	hasta 18.18	menor a 1.2
$10^\circ$	51.4	2.3	7.9	46.1	3.0
$20^\circ$	65.2	3.0	12.0	48.0	3.0
$30^\circ$	78.1	4.0	15.5	51.0	3.0
$40^\circ$	86.7	3.3	18.0	20 s/c*	-1.2 s/c

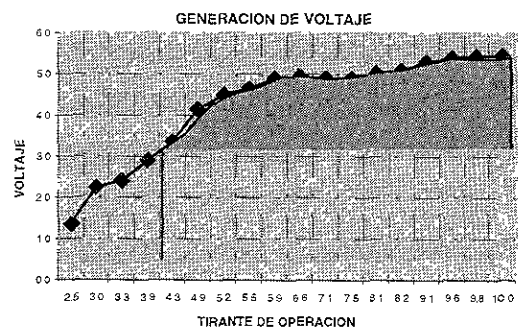
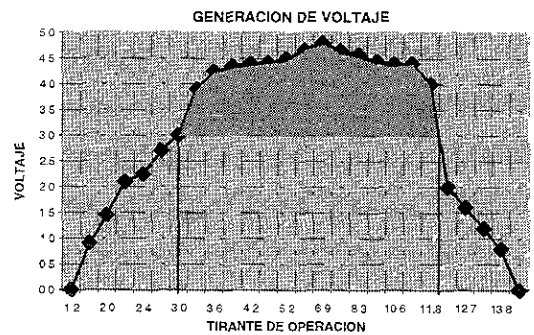
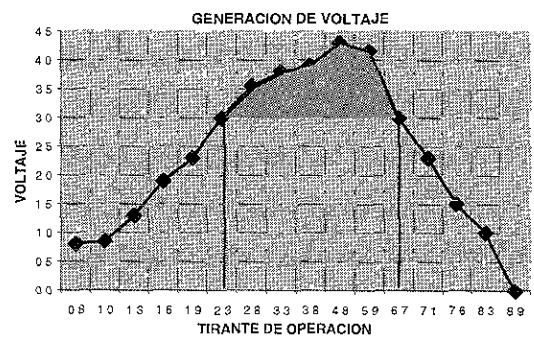
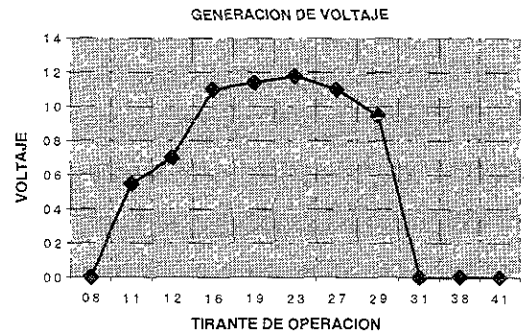
\* s/c indica un sentido contrario de giro del rodete

Los resultados de las pruebas para cada una de las posiciones de la compuerta se muestran en la siguiente lámina 5.3 y sus respectivos gráficos de generación de voltaje.

Como se puede apreciar, en la primera posición no se alcanzan los tres volt para almacenar en el acumulador, debido a que la vena liquida que se desprende del vertedor pasa por sobre los álabes del rodete conforme se aumenta la carga en el canal sin que se desarrolle ningún trabajo.

Lámina 5.3 Resultados obtenidos de las pruebas finales y sus gráficos respectivos

Compuerta Posición (grados)	Ultrasónico Gasto (l/s)	Revoluciones del rodete (r.p.m )	Carga del canal (cm)	Carga de operación (cm)	Voltaje de los generadores (volt)
0	11.23	0.00	37.00	0.8	0.00
	12.57	8.57	37.80	1.1	0.55
	13.77	12.00	38.10	1.2	0.70
	16.05	17.64	38.80	1.6	1.10
	18.50	18.00	39.20	1.9	1.14
	20.00	18.18	40.00	2.3	1.18
	22.60	15.78	41.00	2.7	1.10
	23.81	14.63	41.20	2.9	0.95
	25.04	0.00	41.50	3.1	0.00
	29.85	0.00	42.00	3.8	0.00
	32.75	0.00	42.55	4.1	0.00
	10	12.00	11.11	49.20	0.8
12.77		14.11	49.40	1.0	0.85
14.38		21.00	50.00	1.3	1.30
16.25		30.00	50.55	1.6	1.90
17.30		36.36	50.80	1.9	2.30
19.58		46.15	51.40	2.3	3.00
23.57		57.14	52.20	2.8	3.55
27.30		60.00	53.00	3.3	3.80
29.85		63.16	53.60	3.8	3.90
37.60		66.66	55.00	4.8	4.30
45.00		70.59	57.30	5.9	4.15
52.54		48.00	57.50	6.7	3.00
57.80		41.37	58.20	7.1	2.30
65.13		26.60	59.20	7.6	1.50
72.70		18.18	60.00	8.3	1.00
80.20		0.00	60.80	8.9	0.00
20	22.60	0.00	62.70	1.2	0.00
	23.00	14.20	63.00	1.4	0.90
	25.00	22.22	63.70	2.0	1.45
	27.00	33.33	64.20	2.2	2.10
	27.60	35.29	64.40	2.4	2.25
	28.50	42.85	65.00	2.8	2.70
	30.63	48.00	65.20	3.0	3.00
	33.00	63.00	65.80	3.4	3.90
	36.27	75.00	66.00	3.6	4.25
	38.00	77.34	66.50	3.8	4.35
	40.20	78.56	67.00	4.2	4.40
	42.50	80.10	67.20	4.5	4.42
	44.78	82.00	68.00	5.2	4.50
	50.11	84.30	69.00	5.9	4.67
	50.37	85.00	70.20	6.9	4.80
	66.00	84.00	71.50	7.8	4.65
	69.40	83.15	72.00	8.3	4.58
	80.20	80.20	73.00	9.0	4.45
	90.30	78.50	75.00	10.6	4.40
	100.00	78.56	76.00	11.3	4.40
105.00	66.00	77.00	11.8	4.00	
108.70	31.00	77.40	12.0	2.00	
115.30	25.00	77.70	12.7	1.60	
125.30	19.50	78.50	13.4	1.20	
129.00	11.10	79.50	13.8	0.80	
135.00	0.00	80.00	14.0	0.00	
30	32.80	24.00	76.50	2.5	1.35
	34.00	35.50	77.00	3.0	2.25
	36.30	37.50	77.20	3.3	2.40
	39.60	50.00	78.00	3.9	2.90
	42.50	54.55	78.40	4.3	3.35
	44.30	70.20	79.20	4.9	4.15
	46.60	75.00	79.55	5.2	4.50
	48.90	80.70	79.80	5.5	4.65
	52.50	85.00	80.50	5.9	4.90
	55.60	86.00	81.00	6.6	4.94
	59.00	85.50	81.50	7.1	4.90
	62.70	85.30	82.00	7.5	4.90
	65.00	87.00	83.00	8.1	5.03
	68.90	88.88	83.20	8.2	5.09
	76.70	92.30	84.00	9.1	5.30
	80.2	95.00	84.80	9.6	5.40
	82.50	95.50	85.00	9.8	5.44
	83.00	96.00	85.20	10.0	5.46
40	33.80	-11.00	85.50	2.2	-0.80
	38.20	-20.00	86.70	3.3	-1.26





Cuando la compuerta opere en cualquiera de las siguientes tres posiciones se observo un aceptable comportamiento del rodete, determinando así el rango donde se asegura la generación de voltaje y la operación autónoma del sistema .

En la última posición ( $40^\circ$ ) de la compuerta, el rodete gira en sentido contrario, esto debido a que la vena líquida que se desprende del deflector cae atrás del eje de simetría del rodete, provocando que el fluido golpee los álabes anteriores al eje simétrico, condición en la que no deberá operar el rodete (polaridad dispuesta del equipo de almacenamiento).

En la siguiente lámina 5.4, se resumen los resultados de las pruebas, mostrando los rangos donde la compuerta asegura la generación de energía eléctrica y su autosuficiencia.

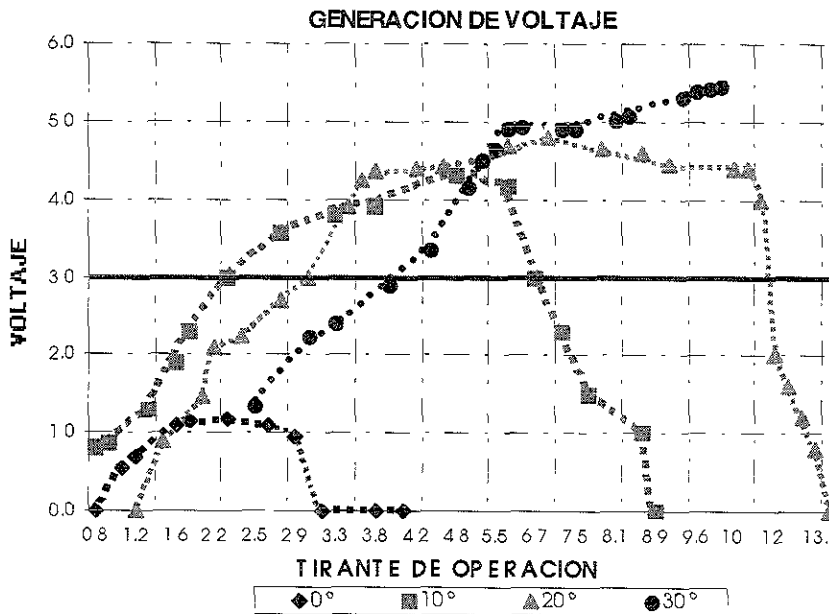


Lámina 5.4 Rangos de operación y generación

Se puede comprobar que a mayores cargas, mayores serán las r.p.m. del rodete (posición 4 de la compuerta) por lo que se concluye que dependiendo de la carga se puede seleccionar el tamaño del rodete y los generadores de c.c. para un canal determinado, asegurando los requerimientos de energía eléctrica que se desee. No obstante es importante señalar que el rodete también tiene un límite de funcionalidad asociado a un gasto máximo a partir del cual el perfil de la vena líquida que se desprende del vertedor deja de chocar con los álabes del rodete. En resumen, existe un rango de gastos, asociado al diámetro de la turbina, bajo el cual se garantiza la generación de energía básica requerida.

---

## CAPÍTULO

# 6

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1. Conclusiones

El proceso de modernización de las zonas de riego por la cual esta pasando México, con el fin de alcanzar la sustentabilidad del medio rural, plantea la necesidad de mejorar y aprovechar al máximo la infraestructura hidroagrícola existente.

Siendo parte importante de esta infraestructura los dispositivos de control de niveles y de caudales como lo son las compuertas, donde se necesita incrementar la eficiencia y la flexibilidad en la operación y distribución del recurso agua para riego.

Para lograr este fin se requiere la automatización de dichas compuertas, situación no muy común en las zonas de riego por falta de una fuente de energía eléctrica al pie de la compuerta; problema que se abordó en el presente trabajo de tesis con la propuesta de aprovechar la energía hidráulica disponible en dichos canales de riego, energía que esta allí y que raras veces le encontramos un uso adecuado, siendo este trabajo una proyección para proporcionar la fuente de energía requerida, presentándose una alternativa de microgeneración de energía eléctrica para la automatización de compuertas.

Logrando de manera exitosa los objetivos que se plantearon en un inicio, donde se confirma el potencial y viabilidad al aprovechar la energía hidráulica en canales de riego para generar energía eléctrica, quedando como antecedente el prototipo de un sistema integral que se utilizó en el laboratorio, como una aportación en el desarrollo de tecnología a la que va encaminada la modernidad en las zonas de riego.

De los resultados obtenidos y observaciones realizadas en las diferentes pruebas al sistema se concluye lo siguiente:

Para que la fuente de energía eléctrica se considere autónoma y segura es necesario que en cualquier posición de operación que adopte la compuerta se garantice la generación de energía eléctrica, para ello, se requiere que todo el fluido disponible en el canal pase a través de los álabes del rodete, de tal forma que se asegure el trabajo realizado del fluido sobre los álabes del mismo, esto se logra mediante la selección de algún dispositivo o mecanismo que dirija el fluido hacia los álabes del rodete.

Al realizar las pruebas del sistema preliminar con un rodete de álabes curvos se observó menos turbulencia a la salida del fluido por el rodete en comparación con el rodete de álabes rectos que se utilizó en el sistema final con lo que se concluye que existe una pérdida de energía manifiesta en turbulencia, por lo que existe una curvatura óptima que aproveche al máximo la energía del fluido en los álabes del rodete y no se pierda en la manifestación turbulenta.

La rapidez de respuesta (2.2 r.p.m.) de la compuerta respecto a la carga hidráulica aguas arriba de la misma estructura es la apropiada para recuperar el rango deseado de operación, sin embargo, si se desea disminuir aun más esta acción de respuesta solo basta aumentar el diámetro de la rueda dentada que es accionada por el motor reversible o bien cambiar el motor por otro de la misma potencia a menores r.p.m.

El costo total del sistema integral propuesto se resume en la siguiente tabla, donde se puede apreciar el costo de cada uno de los elementos que lo integran, además también se muestra por separado el costo de la fuente de generación de energía eléctrica si se quiere comparar con alguna otra.

*Costo del sistema integral final (Octubre 2001)*

<b>Descripción de los elementos que integran el sistema final de generación y automatización</b>	<b>Precio (pesos)</b>	<b>Fuente de generación</b>
Cuerpo de la compuerta	3,500.00	
Rueda hidráulica	5,000.00	5,000.00
Sistema de transmisión (engrane anular y piñón)	1,500.00	1,500.00
Generadores de corriente continua (3 Volt)	200.00	200.00
Unidad central (control de niveles)	1,500.00	
Amplificador de voltaje	1,000.00	1,000.00
Acumulador de 12 Volt	600.00	
Transmisión (actuador y operador de engranes)	1,500.00	
Instalación de la compuerta	500.00	
<b>TOTAL</b>	<b>15,300.00</b>	<b>7,700.00</b>

## 6.2. Recomendaciones

La energía en los canales de riego depende de los parámetros de Q y H donde se tiene disponible la siguiente potencia  $P = \eta\gamma QH$ .

Es importante aclarar que la potencia disponible en canales abiertos difícilmente se puede aprovechar en su totalidad en dispositivos como estos, debido a las conversiones que se deben realizar de un tipo de energía a otro, es decir, se tiene que pagar un precio al convertir la energía hidráulica en energía mecánica y más aún una segunda etapa de conversión de energía mecánica en energía eléctrica que es finalmente la que se requiere al pie de la compuerta para automatizar la operación de cierre y apertura.

Con los resultados que se han obtenido se puede realizar una selección de generadores de mayor capacidad en existencia en el mercado que se puedan instalar de forma estratégica lo más directamente posible a la flecha del rodete para aprovechar al máximo la energía de los canales abiertos y generar energía eléctrica y obtener una fuente alterna y competitiva.

Si se requiere dar mantenimiento al rodete se puede sacar de operación sin perder el control de automatización de la compuerta.

Por la forma independiente de operar del rodete, este se puede instalar en cualquier aprovechamiento hidráulico donde se garantice el libre giro para generar energía eléctrica y operar sin ningún problema cualquier circuito eléctrico dentro del rango de generación o bien se puede almacenar la energía en un banco de baterías y posteriormente hacer uso de ella utilizando un inversor de corriente que permite conectar dispositivos a voltajes standar (115V c.a. (~), 60 Hz ó 230V c.a. (~), 50 Hz) tales como: T.V. portátil, computadora portátil, fax, algunas impresoras, monitores, teléfonos celulares, luces de iluminación, equipos de audio y vídeo, equipos electrónicos para pruebas, ventiladores o cualquier dispositivo eléctrico que demande una corriente menor a la que se tiene disponible en el banco de baterías; situación que puede ser aprovechada en rancherías, cabañas de descanso ó en pruebas prolongadas de campo.

Como se puede comprobar el sistema es autosuficiente, de fácil instalación, económico comparándolo con otras fuentes de energía eléctrica y requieren de un mantenimiento mínimo y programado.

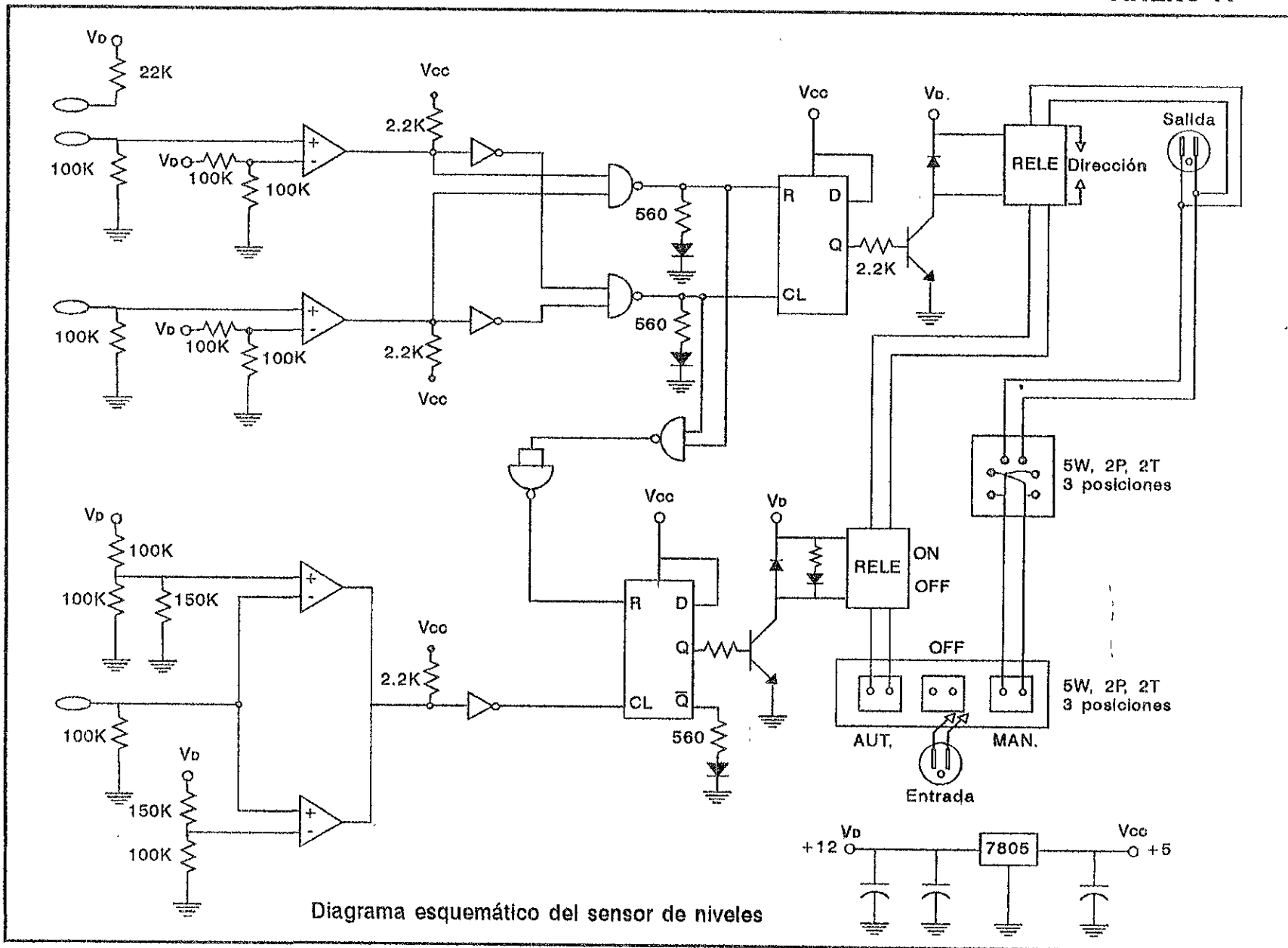
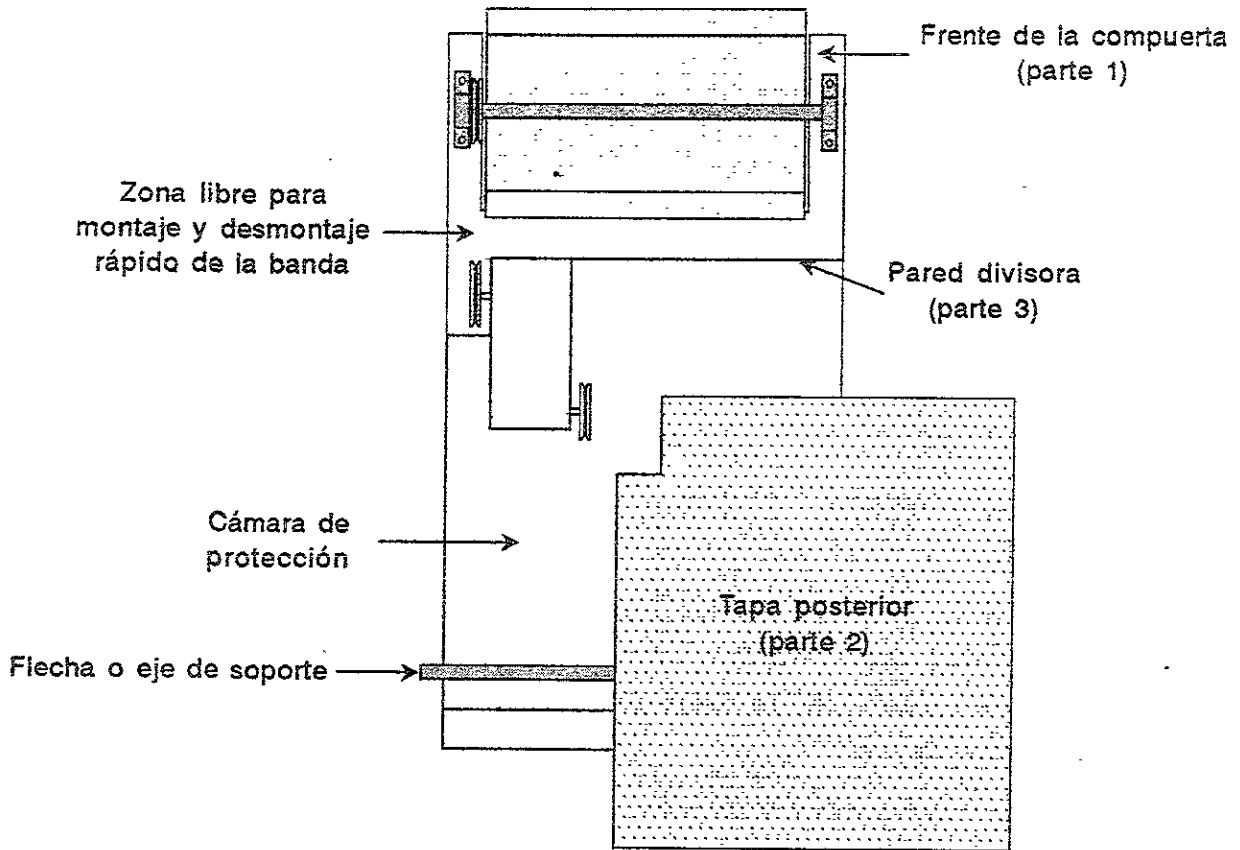


Diagrama esquemático del sensor de niveles

## ANEXO B

## MODIFICACIONES AL CUERPO DE LA COMPUERTA



## Amplificador de voltaje

El diseño de este sistema surge a partir de la necesidad de mantener con voltaje constante a una carga conectada a este dispositivo. El sistema genera un voltaje de salida de 20 V c.c. a partir de un voltaje de entrada de 3 V c.c., para lograr ese aumento en el voltaje es necesario en primer lugar generar un voltaje de corriente alterna (c.a.). Esta alternación de voltaje es necesaria para que pueda lograrse la inducción de voltaje entre el primario y el secundario de un transformador, el cual esta encargado de generar el aumento de voltaje.

Para hacer la conversión de c.c. a c.a. se emplea un arreglo llamado puente H formado con MOSFET de potencia. Este arreglo permite obtener voltajes negativos sin la necesidad de emplear una fuente dual. La frecuencia con la cual se alterna entre el pulso positivo y el negativo es aproximadamente de 260 Hz, frecuencia que esta definida por medio de un temporizador LM555.

Una vez que se ha obtenido la señal de c.a. esta es aplicada al primario del transformador. El transformador utilizado tiene un factor de amplificación de aproximadamente 6.7, el cual es suficiente para lograr el aumento de 3 V hasta 20 V. Una vez hecha la amplificación de voltaje, la siguiente etapa consiste en rectificar la señal obtenida en el secundario del transformador. La rectificación de la señal se hace por medio de un puente de onda completa. Por ultimo se emplea un capacitor con el fin de filtrar la señal, además de mantener un voltaje constante a la salida del sistema.

A fin de alimentar los circuitos utilizados para llevar a cabo la elevación de voltaje es necesario mantener un voltaje fijo de +5V c.c., este voltaje se obtiene por medio de un regulador IM7805 el cual se alimenta con parte del voltaje generado por el propio sistema y además también se auxilia del voltaje almacenado en la carga que se esta alimentando.

Dado lo anterior el sistema no puede empezar a elevar el voltaje si antes no se le ha colocado la batería que va a ser cargada, la cual debe tener un voltaje mínimo de 7.5 V, ya que esta será la encargada de disparar los dispositivos electrónicos. Sin embargo, una vez disparados estos dispositivos, el sistema seguirá generando el voltaje a la salida independiente si se tiene conectada o no la carga a la salida.

A continuación se muestra el diagrama esquemático del sistema diseñado.

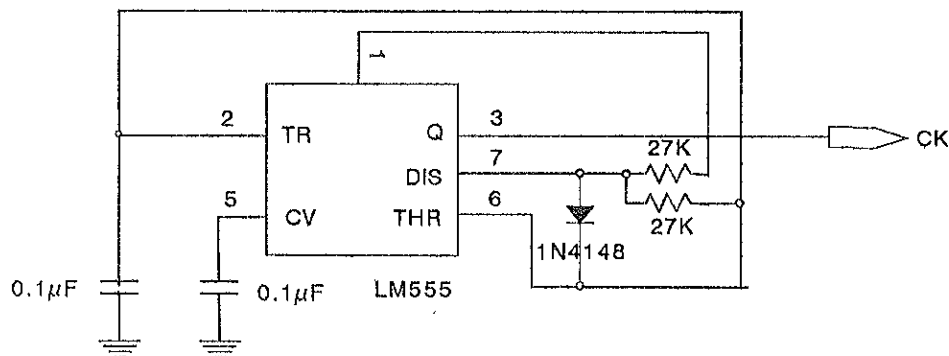
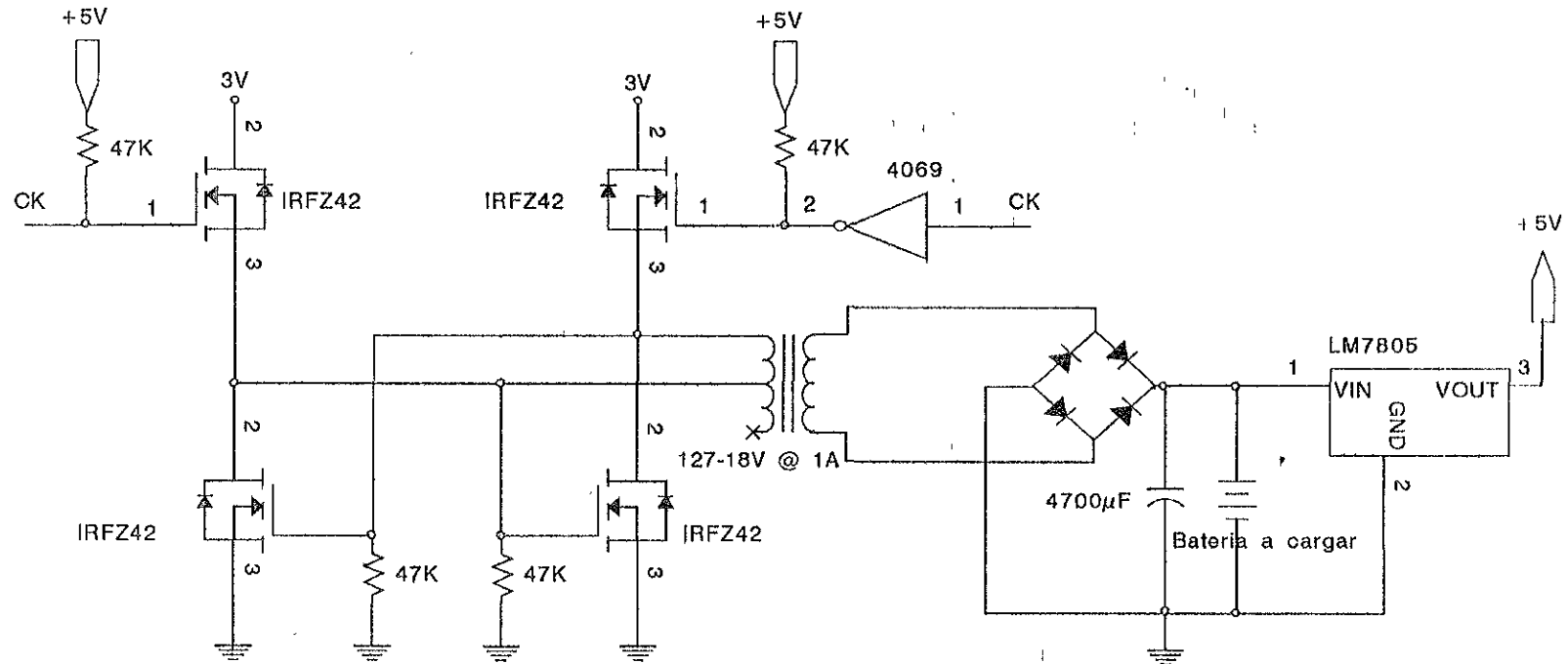


Diagrama esquemático del amplificador de voltaje



## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

---

- [1] Palacios V. E., *Métodos de distribución y eficiencias en el uso del agua en los sistemas de riego*, Apuntes del diplomado: Diagnóstico, planeación uso eficiente del agua y la energía eléctrica y mejoramiento de la productividad en las unidades de riego para el desarrollo rural, Colegio de Postgraduados, Montecillo México, 17 de Junio al 12 de Julio de 1996
- [2] Luján G. J., *Eficiencia del riego*, Ministerios de Obras Públicas y Transportes, Centro de Estudios de Experimentación y Obras Publicas, Centro de Estudios Hidrográficos, Series monografías, 108 pág., Madrid España, 1992
- [3] Vargas D. S., Pedroza G. E., *Estimación de pérdidas por operación en canales principales*, Congreso Internacional de Transferencia de Sistemas de Riego, Mesa 3: Desarrollo y Transferencia de Tecnología, Mazatlán Sinaloa, México 2-9 de Abril del 2000
- [4] Tamari S., Bucher R., Gómez Lugo L. *Simulación de las perdidas por infiltración en canales de tierra*. Informe Técnico. IMTA, Jiutepec (Mor.), 67 pág. México, 2000
- [5] Espinoza M. R., Ramírez L. J., *Operación y selección de estructuras Hidráulicas en canales*, C.N.A., I.M.T.A., pág. 33, 2000.
- [6] Polo Encinas M., *Turbomáquinas Hidráulicas*, Capitulo IV, Ed. C.E.C.S.A.
- [7] Claudio Mataix, *Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas*, Segunda edición, Ed. Harla.
- [8] Cuevas D. R., *Uso de bombas centrífugas como turbinas hidráulicas en pequeños aprovechamientos hidroeléctricos*, Trabajo presentado en XI CONIMERA, Montreal, Noviembre 1987,
- [9] Karassik I. J., Krutzsch W.C., Fraser W. H., *Pump Handbook*, Tema II, pág. 184-188, 1976, Ed. McGraw Hill.
- [10] Una realidad en los desiertos Mexicanos, *Bombas Solares*, Programa Solar Tonatiuh, Publicación de la Secretaria de Salubridad y Asistencia, pág. 11.
- [11] Salvat Universal, Diccionario Enciclopédico, Tomo 8, pág. 63.
- [12] Frederick C. Nash, *Fundamentos de Mecánica Automotriz*.
- [13] García V. N. H., Planificación, diseño, modernización y operación de la red principal de zonas de riego, Paquete tecnodidáctico, *Operación de la red principal*, Material Tecnológico, pág. 21.
- [14] Gilberto Sotelo A. *Hidráulica General*. Vol.1 Fundamentos, Ed. Limusa.
- [15] Espinoza M. R., Ramírez L. J., *Operación y selección de estructuras Hidráulicas en canales*, C.N.A., I.M.T.A.. pág. 33, Año 2000.
- [16] José L. de Parres, *Máquinas Hidráulicas*, Primera edición de la "Revista Ingeniería"
- [17] Roberto W. Fitzgerald, *Resistencia de materiales*, Ed. Fondo Educativo Interamericano
- [18] Manual del Ingeniero, *Construcción de Máquinas*, TOMO II, pág. 91, Ed. Gustavo Gili, S.A. Barcelona.
- [19] Donald R. Askeland, *La Ciencia e Ingeniería de los Materiales*, Ed. Grupo editorial Iberoamérica
- [20] Guillet, *Cinemática de las Máquinas*, Trenes de engranajes, Ed. C.E.C S.A.

continuación

---

- [21] Joseph E. Shigley y Charles R. Mischke, *Diseño en Ingeniería Mecánica*, Quinta edición Mc. Graw Hill
- [22] George W. Nichalec, *Engranaje*, Manual del ingeniero, 8-98
- [23] *Manual de rodamientos* SKF.
- [24] *Manual Técnico de Servicio de Acumuladores*, Ed. Acumuladores Mexicanos, S.A. Monterrey N.L.
- [25] Alvarez B. R., *Determinación de los coeficientes de descarga del vertedor del canal largo*, Informe final del proyecto del laboratorio de medición, certificación y uso eficiente del agua "IMTALAB", Tomo 2-3, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Octubre 1993.

OTRAS REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Dave Katz, *Guía para la selección e instalación de un sistema de energía solar Kyocera*, Kyocera America, Inc.

Ehler, David G. 1995, "*Gate Automation Upgrade, a solar Powered Operator*", Water Operation and Maintenance Bulletin No. 172, Bureau of Reclamation, June.

Hansen, Roger D.; Arlen Hilton, and Frank Woodward, *Automated Monitoring and Control Instrumentation for Improved Water Management: The Utah Experience*, Provo Area Office, Provo, Utah, 1996.

*Automation and Instrumentation*, AWWA manual M2, Second Edition, Denver, Colorado.

Frank M. White, *Mecánica de Fluidos*, Ed. Mc. Graw Hill

I. Rubio San Juan, *Elementos de Hidráulica General y Aplicada con Motores Hidráulicos*, Ed. Labor, S.A. Barcelona Madrid

Festo Pneumatic, *Manuales de Cilindros*