

**SOFTWARE PROTOTIPO PARA SIMULAR LA GENERACIÓN  
HIDRÁULICA DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

**LORENA MARTÍNEZ LUNA  
ÁLVARO FERNANDO ESPITIA BOLÍVAR  
MANUEL FIGUEROA BARÓN**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2.005**

**SOFTWARE PROTOTIPO PARA SIMULAR LA GENERACIÓN  
HIDRÁULICA DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

**LORENA MARTÍNEZ LUNA  
ÁLVARO FERNANDO ESPITIA BOLÍVAR  
MANUEL FIGUEROA BARÓN**

**Trabajo de Grado para optar al título de  
Ingeniero Electricista**

**Director  
ARNULFO GALÁN CADENA  
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2.005**

*“La imaginación es más importante que el conocimiento”*

*Albert Einstein*

*A Dios Todopoderoso por la vida. Por dejarme sentir su presencia en cada una de las experiencias y oportunidades que me ha regalado.*

*A mi madre Ofelia, a quien amo con todas las fuerzas de mi alma y mi corazón. Gracias por estar ahí siempre, amándome, cuidándome y protegiéndome. Nunca en la vida tendré como pagarle todo lo que ha dado y ha hecho por mí.*

*A Lulio y Miguel Ángel, mis amados hermanos, por su alegría, cariño y apoyo incondicional en todas las etapas de mi vida.*

*A César y Danna, por dibujarme una sonrisa todos los días con su maravillosa presencia, y por regalarme una historia mágica cada vez que llego a casa. Los amo.*

*Lorena*

*Con este trabajo finaliza una de las etapas más importantes de mi vida, iniciada el 28 de junio de 1999 cuando entré por vez primera a la UIS, y que a junio de 2005, además de conocimientos técnicos me ha dejado valiosos frutos como la amistad y el amor.*

*Desde lo más profundo de mi corazón dedico éste y todos los trabajos de mi vida a mi hermana Leidy Cristina, a mi madre Luz Fátima y a mi padre Álvaro por el infinito amor que me han proporcionado, el que día a día me ha llenado de fuerza para seguir adelante y apreciar lo bella que es la vida.*

*¡Cris, Mamí y Papí, los amaré hoy y siempre!*

*Álvaro Fernando*

Gracias...

A Dios por permitirme vivir este gran día.

A mis padres por todo lo que soy.

A mis hermanas y hermanos por su constante apoyo.

A mis lindas y queridas amigas... son muchos los motivos.

A mis amigos por esa camaradería que nos caracteriza.

A todos en Interconexión Eléctrica S.A., me abrieron las puertas cuando lo necesitaba.

Debo agradecerle de manera especial a mi hermano Bernardo por todo su respaldo. De igual manera a Lorena y Álvaro, amigos y compañeros de este proyecto.

Finalmente mis mejores afectos por Natalia Andrea, mi hermosa sobrina y ahijada. Imposible olvidarme de mi gran amiga María Virginia, sin palabras.

Son muchas las personas a quien les debo el estar hoy escribiendo esto, que sería muy difícil nombrarlas en este pequeño espacio, pero sabrán que les estoy muy agradecido. En verdad mil y mil gracias a todos por todo y que Dios les pague.

**Manuel.**

### **Huellas en la arena**

Una noche tuve un sueño... soñé que estaba caminando por la playa con el Señor y, a través del cielo, pasaban escenas de mi vida.

Por cada escena que pasaba, percibí que quedaban dos pares de pisadas en la arena: unas eran las mías y las otras del Señor.

Cuando la última escena pasó delante nuestro, miré hacia atrás, hacia las pisadas en la arena y noté que muchas veces en el camino de mi vida quedaban sólo un par de pisadas en la arena.

Noté también que eso sucedía en los momentos más difíciles de mi vida. Eso realmente me perturbó y pregunté entonces al Señor: "Señor, Tu me dijiste, cuando resolví seguirte, que andarías conmigo, a lo largo del camino, pero durante los peores momentos de mi vida, había en la arena sólo un par de pisadas. No comprendo porque Tu me dejaste en las horas en que yo más te necesitaba".

Entonces, El, clavando en mí su mirada infinita me contestó: "Mi querido hijo. Yo te he amado y jamás te abandonaré en los momentos más difíciles. Cuando viste en la arena sólo un par de pisadas fue justamente allí donde te cargué en mis brazos".

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores del presente trabajo expresan sus más sinceros agradecimientos a las siguientes personas y entidades:

Al Ing. Arnulfo Galán Cadena, por su siempre oportuna asesoría y dirección, además de su calidad humana.

Al personal de la Electrificadora de Santander S.A. E.S.P. y al Jefe de Plantas Ing. Wilman Morales Rey por la colaboración prestada.

A la Universidad Industrial de Santander y la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones por la formación recibida durante el pregrado.

Al Ing. John Burton por la orientación recibida.

Al Ing. Bernardo Figueroa por la asesoría prestada.

A todas las personas que de una u otra forma contribuyeron al desarrollo de éste trabajo.

## CONTENIDO

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| <b>INTRODUCCIÓN</b>                                    | <b>1</b>    |
| <br>   |             |
| <b>1. OBRAS CIVILES Y ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS</b>      | <b>4</b>    |
| 1.1. ESTRUCTURAS DE EMBALSE Y DERIVACIÓN               | 5           |
| 1.1.1. Azudes o diques de derivación                   | 6           |
| 1.1.2. Presas de embalse                               | 8           |
| 1.1.3. Obras de excedencias o aliviaderos              | 12          |
| 1.1.4. Desagües de fondo                               | 13          |
| 1.1.5. Bocatoma  | 14          |
| 1.1.5.1. Bocatomas convencionales                      | 17          |
| 1.2. CONDUCCIONES HIDRÁULICAS                          | 20          |
| 1.2.1. Canal de aducción                               | 20          |
| 1.2.2. Desarenadores                                   | 23          |
| 1.2.3. Cámara de carga                                 | 24          |
| 1.2.4. Tuberías forzadas                               | 26          |
| 1.3. CANALES DE DESCARGA                               | 28          |
| <br>   |             |
| <b>2. HIDROLOGÍA GENERAL</b>                           | <b>30</b>   |
| 2.1. ALTURA DEL SALTO APROVECHABLE EN UN TRAMO DEL RÍO | 30          |
| 2.2. AFOROS DE CAUDAL                                  | 32          |
| 2.2.1. Método de flotadores                            | 33          |
| 2.2.2. Método del molinete o correntómetro             | 37          |
| 2.2.3. Curva de caudales clasificados                  | 39          |
| 2.2.4. Caudal reservado                                | 40          |
| 2.3. EMBALSES  | 41          |

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| 2.3.1.    | Capacidad  | 41        |
| 2.3.2.    | Volúmenes y alturas características de un embalse      | 43        |
| 2.3.3.    | Cálculo del volumen muerto                             | 46        |
| 2.3.4.    | Cálculo del volumen útil                               | 47        |
| 2.3.5.    | Evaporación de embalses                                | 49        |
| 2.3.6.    | Escorrentía  | 52        |
| <b>3.</b> | <b>GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN COLOMBIA</b>     | <b>53</b> |
| 3.1.      | GENERACIÓN HIDRÁULICA DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN COLOMBIA | 54        |
| 3.2.      | GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN SANTANDER           | 54        |
| 3.3.      | PRINCIPIOS DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA       | 55        |
| 3.3.1.    | Generador  | 56        |
| 3.3.1.1.  | Velocidad de rotación de un generador síncrono         | 58        |
| 3.3.1.2.  | Tensión inducida en la armadura                        | 60        |
| 3.3.1.3.  | Pérdidas   | 61        |
| 3.3.1.4.  | Disposición del generador con respecto a la turbina    | 63        |
| 3.3.1.5.  | Excitación   | 64        |
| 3.3.1.6.  | Equipos de regulación de tensión y sincronización      | 66        |
| <b>4.</b> | <b>TURBINAS HIDRÁULICAS</b>                            | <b>67</b> |
| 4.1.      | ECUACIONES FUNDAMENTALES                               | 67        |
| 4.1.1.    | Turbinas semejantes                                    | 74        |
| 4.1.2.    | Velocidad específica                                   | 76        |
| 4.2.      | TURBINA PELTON   | 76        |
| 4.2.1.    | Generalidades  | 76        |
| 4.2.2.    | Funcionamiento   | 77        |
| 4.2.3.    | Clasificación  | 77        |
| 4.2.4.    | Componentes  | 79        |
| 4.2.5.    | Diagrama de velocidades                                | 81        |

|   |            |
|---|------------|
| 4.2.6. Dimensionamiento de la turbina Pelton    | 85         |
| 4.3. TURBINA FRANCIS                            | 91         |
| 4.3.1. Dimensionamiento de la turbina Francis   | 97         |
| 4.3.1.1. Método de dimensionamiento de Streeter | 97         |
| 4.3.1.2. Método de dimensionamiento de Voorduin | 104        |
| 4.4. TURBINAS KAPLAN                            | 109        |
| 4.4.1. Generalidades                            | 109        |
| 4.4.2. Componentes                              | 109        |
| 4.4.3. Mecanismo de regulación                  | 110        |
| 4.4.4. Ecuaciones generales                     | 111        |
| 4.4.4.1. Energía transferida                    | 111        |
| 4.4.4.2. Grado de reacción                      | 112        |
| 4.4.4.3. Factor de utilización                  | 112        |
| 4.4.4.4. Diagrama de velocidades                | 112        |
| 4.4.5. Dimensionamiento de la turbina           | 114        |
| 4.4.5.1. Método de dimensionamiento de Streeter | 115        |
| 4.4.5.2. Método de dimensionamiento de Voorduin | 117        |
| 4.4.6. Rendimientos                             | 120        |
| <b>CONCLUSIONES</b>                             | <b>122</b> |
| <b>RECOMENDACIONES</b>                          | <b>124</b> |
| <b>BIBLIOGRAFÍA</b>                             | <b>125</b> |

## LISTA DE TABLAS

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| Tabla 1: Ancho del río y separación entre puntos de medida   | 35          |
| Tabla 2: Valor de la constante K según la naturaleza del tramo del río   | 36          |
| Tabla 3: Corrección de la profundidad según el ángulo de inclinación de la cuerda al molinete.                 | 38          |
| Tabla 4: Datos para clasificación de caudales  | 40          |
| Tabla 5: Cálculo para elaborar una curva de área y volumen.  | 43          |
| Tabla 6: Dimensionamiento de embalse del Río Lebrija, zona Café Madrid.  | 49          |
| Tabla 7: Presión de saturación del vapor de agua según la temperatura  | 51          |
| Tabla 8: Velocidades de sincronismo para 50 y 60 Hz  | 60          |
| Tabla 9: Número de álabes en la turbina Kaplan   | 120         |
| Tabla 10: Datos del formulario de edición para ingresar preguntas de selección múltiple con única respuesta    | 170         |
| Tabla 11: Datos del formulario de edición para ingresar preguntas de selección múltiple con múltiple respuesta | 171         |
| Tabla 12: Datos del formulario de edición para ingresar preguntas de análisis de relación                      | 171         |
| Tabla 13: Datos de salida a Machuca  | 176         |
| Tabla 14: Datos salida a Zaragoza (Antioquia)  | 180         |
| Tabla 15: Datos de salida a Zaragoza (Santander)   | 186         |
| Tabla 16: Datos salida a Palmas  | 192         |
| Tabla 17: Caso comparativo 1   | 194         |
| Tabla 18: Caso comparativo 2   | 195         |
| Tabla 19: Caso comparativo 3   | 195         |
| Tabla 20: Caso comparativo 4   | 196         |



## LISTA DE FIGURAS

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| Figura 1: Sistema de derivación  | 5           |
| Figura 2: Sistema de embalse   | 6           |
| Figura 3: Estructura elemental de un azud  | 7           |
| Figura 4: Azud construido con gaviones   | 8           |
| Figura 5: Pequeñas presas de tierra homogénea y zonificada                         | 12          |
| Figura 6: Vertedero simple   | 13          |
| Figura 7: Bocatoma típica  | 18          |
| Figura 8: Bocatoma lateral típica  | 19          |
| Figura 9: Tipo de secciones de canal   | 21          |
| Figura 10: Esquema del concepto de un desarenador                                  | 23          |
| Figura 11: Desarenador típico  | 24          |
| Figura 12: Esquema del montaje de una tubería de presión                           | 28          |
| Figura 13: Pérdidas de nivel en un salto, (la curva del remanso no esta a escala). | 32          |
| Figura 14: Flotador sumergido.   | 34          |
| Figura 15: Perfil medio del río para un aforo por flotadores.                      | 34          |
| Figura 16: Tramo del río para aforo por flotadores.                                | 34          |
| Figura 17: Molinete típico.  | 37          |
| Figura 18: Efecto de desplazamiento del molinete debido a la corriente de agua.    | 39          |
| Figura 19: Curva de caudales clasificados.   | 40          |
| Figura 20: Curva de área y volumen.  | 43          |
| Figura 21: Volúmenes y alturas características de un embalse.                      | 46          |
| Figura 22: Algunos niveles de evaporación y precipitación                          | 50          |

|   |    |
|---|----|
| Figura 23: Presión de saturación del vapor de agua en función de la temperatura.                              | 52 |
| Figura 24: Tipos de generacion en Colombia  | 53 |
| Figura 25: Distribución de las Principales hidroeléctricas  | 54 |
| Figura 26: Transferencia de energía   | 56 |
| Figura 27: Generador sincrónico. a) Estructura general. b) Estator laminado. c) Detalle de la flecha          | 58 |
| Figura 28: Diagrama de flujo de potencia de un generador  | 63 |
| Figura 29: Ejemplo de disposición de un generador con respecto a una turbina Kaplan                           | 64 |
| Figura 30: Principio de reacción de las turbinas.   | 68 |
| Figura 31: Esquema básico de la turbina de reacción y diagrama de velocidades.                                | 69 |
| Figura 32: Esquema básico de la turbina de acción y diagrama de velocidades.                                  | 70 |
| Figura 33: Componentes de velocidad   | 72 |
| Figura 34: Turbina Pelton de un chorro y eje horizontal   | 78 |
| Figura 35: Turbina Pelton de seis chorros y eje vertical  | 78 |
| Figura 36: Álabes de la turbina Pelton  | 79 |
| Figura 37: Inyector de una turbina Pelton   | 80 |
| Figura 38: Esquema de regulación en una turbina Pelton  | 80 |
| Figura 39: Diagrama de velocidades de la turbina Pelton   | 81 |
| Figura 40: Diagrama de Cordier  | 89 |
| Figura 41: Dimensiones de los álabes  | 90 |
| Figura 42: Rendimientos de una turbina Pelton   | 90 |
| Figura 43: Instalación típica de una turbina Francis  | 92 |
| Figura 44: Distribuidor   | 93 |
| Figura 45: La turbina hidráulica a reacción trabaja en un ducto cerrado.                                      | 93 |
| Figura 46: Diagrama de velocidades y efecto de la regulación a la entrada y a la salida de la turbina Francis | 94 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 47: Rendimiento de la turbina Francis según su velocidad específica                | 96  |
| Figura 48: Velocidad específica según el salto  | 98  |
| Figura 49: Red de flujo en un ducto rectilíneo con eje de rotación.                       | 99  |
| Figura 50: Valores de $B/D_1$ según $N_s$   | 100 |
| Figura 51: Valores de $\phi_1$ según $N_s$  | 100 |
| Figura 52: Valores de $\phi_2$ según $N_s$  | 102 |
| Figura 53: Caracol de la turbina Francis  | 103 |
| Figura 54: Características constructivas para la turbina Francis y la planta.             | 103 |
| Figura 55: Valores de $\phi$ y $D_2/D_1$ según $N_s$                                      | 105 |
| Figura 56: Valores de $a/D_2$ y $b/D_2$ según $N_s$                                       | 105 |
| Figura 57: Valores $U/D_2$ , $L/D_2$ y $A/D_2$ según $N_s$                                | 106 |
| Figura 58: Altura barométrica según la altura sobre el nivel del mar                      | 107 |
| Figura 59: Coeficiente de cavitación según $N_s$  | 107 |
| Figura 60: Características constructivas para la turbina Francis y la planta              | 108 |
| Figura 61: Rotor de una turbina Kaplan  | 110 |
| Figura 62: Disposición del cubo y del álabe en la turbina Kaplan                          | 111 |
| Figura 63: Diagrama de velocidades a la entrada y salida del álabe en una turbina Kaplan. | 113 |
| Figura 64: Velocidad específica en la turbina Kaplan                                      | 114 |
| Figura 65: Coeficiente de velocidad   | 115 |
| Figura 66: Valores de $B/D$   | 116 |
| Figura 67: Relación $D_c/D$   | 116 |
| Figura 68: Coeficiente de velocidad periférica  | 118 |
| Figura 69: Dimensiones de parte de la central   | 119 |
| Figura 70: Coeficiente de cavitación  | 120 |
| Figura 71: Rendimientos en la turbina Kaplan  | 121 |
| Figura 72: Instalación de una central con turbina Kaplan                                  | 121 |
| Figura 73: Moldes de los álabes   | 129 |
| Figura 74: Modelo final de la turbina Pelton  | 130 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 75: Distribución de los álabes                    | 130 |
| Figura 76: Modelo final de la turbina Francis            | 131 |
| Figura 77: Casquete y cuerpo con su eje                  | 131 |
| Figura 78: Modelo final de la turbina Kaplan (Hélice)    | 132 |
| Figura 79: Vista general de los modelos                  | 133 |
| Figura 80: Cuadro de inicio                              | 141 |
| Figura 81: Inicio según el tipo de usuario               | 141 |
| Figura 82: Menú principal                                | 143 |
| Figura 83: Menú Test                                     | 144 |
| Figura 84: Ventana típica del módulo de preguntas        | 144 |
| Figura 85: Menú Estadística                              | 145 |
| Figura 86: Presentación plana del seguimiento al usuario | 145 |
| Figura 87: Presentación 3D del seguimiento al usuario    | 146 |
| Figura 88: Menú Reportes                                 | 147 |
| Figura 89: Reporte individual del usuario                | 147 |
| Figura 90: Menú Archivo                                  | 148 |
| Figura 91: Icono de Mantenimiento para la base de datos  | 148 |
| Figura 92: Ventana de Mantenimiento                      | 148 |
| Figura 93: Reporte Consolidado                           | 149 |
| Figura 94: Ingreso por menú.                             | 149 |
| Figura 95: Ingreso por icono.                            | 150 |
| Figura 96: Datos de entrada.                             | 150 |
| Figura 97: Turbinas que pueden ser seleccionadas.        | 150 |
| Figura 98: Escogencia de la turbina.                     | 151 |
| Figura 99: Ingreso de rendimiento y frecuencia.          | 151 |
| Figura 100: Datos de la turbina Pelton.                  | 152 |
| Figura 101: Ajuste de la velocidad de sincronismo.       | 152 |
| Figura 102: Resultados turbina Pelton.                   | 153 |
| Figura 103: Datos de la turbina Francis por dos métodos. | 154 |
| Figura 104: Datos consolidados de la turbina Francis.    | 155 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 105: Datos de la turbina Kaplan por dos métodos.                     | 156 |
| Figura 106: Datos consolidados de la turbina Kaplan.                        | 156 |
| Figura 107: Opciones para recalcular y guardar.                             | 157 |
| Figura 108: Opción de guardar resultados.                                   | 157 |
| Figura 109: Confirmación de copiado de los resultados.                      | 157 |
| Figura 110: Menú Animaciones  | 158 |
| Figura 111: Iconos del Menú Animaciones                                     | 158 |
| Figura 112: Ventana de animación de la turbina Pelton                       | 159 |
| Figura 113: Ventana de regulación vectorial para la turbina Pelton          | 160 |
| Figura 114: Ventana de animación de la turbina Francis                      | 161 |
| Figura 115: Ventana de variación de salto y caudal para la turbina Francis  | 162 |
| Figura 116: Ventana de regulación vectorial para la turbina Francis         | 163 |
| Figura 117: Ventana de animación de la turbina Kaplan                       | 164 |
| Figura 118: Ventana de variación de salto y caudal para la turbina Kaplan   | 165 |
| Figura 119: Ventana de regulación vectorial para la turbina Kaplan          | 166 |
| Figura 120: Ventana de variación de perfil del álabe para la turbina Kaplan | 167 |
| Figura 121: Entrando a modificar el banco de preguntas                      | 168 |
| Figura 122: Banco de preguntas  | 168 |
| Figura 123: Formulario de edición   | 169 |
| Figura 124: Informes consolidados   | 172 |
| Figura 125: Visualización del reporte consolidado                           | 173 |
| Figura 126: Confirmación de la creación del reporte consolidado             | 173 |
| Figura 127: Interior del tanque desarenador                                 | 176 |
| Figura 128: Interior del canal de conducción                                | 177 |
| Figura 129: Entrada de la bocatoma y presa parcialmente construidas         | 177 |
| Figura 130: Turbina Francis de eje horizontal                               | 180 |
| Figura 131: Grupo turbogenerador  | 180 |
| Figura 132: Casa de máquinas y presa  | 181 |
| Figura 133: Coronación de la presa y vertedero                              | 181 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 134: Vista parcial del embalse                    | 182 |
| Figura 135: Casa de máquinas de Calichal                 | 184 |
| Figura 136: Casa de máquinas de Servitá                  | 184 |
| Figura 137: Cámara de presión de la central de Zaragoza  | 186 |
| Figura 138: Tubería de presión de la central de Zaragoza | 187 |
| Figura 139: Bocatoma de la central de La Cascada         | 189 |
| Figura 140: Casa de máquinas de la central La Cascada    | 189 |
| Figura 141: Panorámica de la represa Bocas               | 192 |
| Figura 142: Casa de máquinas de la central de Palmas     | 193 |

## LISTA DE ANEXOS

|  |     |
|--|-----|
| ANEXO A. Modelos didácticos de las turbinas      | 128 |
| ANEXO B. Algunas propiedades de MS Visual Basic™ | 134 |
| ANEXO C. Tutorial de SiDiGeHi                    | 138 |
| ANEXO D. Salidas de campo                        | 174 |

## **TITULO: SOFTWARE PROTOTIPO PARA SIMULAR LA GENERACIÓN HIDRÁULICA DE ENERGÍA ELÉCTRICA\***

**Autores:** Lorena Martínez Luna  
Álvaro Fernando Espitia Bolívar  
Manuel Figueroa Barón\*\*

**Palabras clave:** Simulación, Prototipo, Software didáctico, Turbinas hidráulicas.

### **Descripción**

Se desarrolló una herramienta como respuesta a la necesidad de adaptar una alternativa de aprendizaje complementaria al aula de clases, de interfaz amigable y de fácil uso, con posibilidades de expansión y mejoramiento, para los estudiantes de la asignatura de Energía y Medio Ambiente. Este trabajo tiene tres componentes definidos: el texto de referencia donde se compila la información básica sobre generación hidráulica de energía eléctrica; los modelos didácticos de las turbinas Pelton, Francis y Kaplan (Hélice) con las que se ofrece al estudiante una primera perspectiva de las turbinas reales; y por último la herramienta computacional Simulador Didáctico de Generación Hidráulica "SiDiGeHi" que le permite al usuario: autoevaluar cuantitativamente sus conocimientos adquiridos en el desarrollo del curso Energía y Medio Ambiente por medio del módulo de preguntas; apreciar la dinámica de las turbinas y su constitución mecánica a través del módulo de animaciones y realizar estimaciones preliminares de las características constructivas más importantes de las turbinas para un salto y caudal dados, estableciendo una gran variedad de escenarios de aplicación reales para los resultados obtenidos en el módulo de dimensionamiento.

Las conclusiones y recomendaciones más importantes de este trabajo son las siguientes:

- El aprendizaje se apoya fuertemente en la presentación gráfica de los conceptos y mecanismos de funcionamiento de las turbinas. Este trabajo demuestra que es posible romper el paradigma del aprendizaje exclusivo al libro.
- Se establece una motivación al estudiante para el estudio y profundización en el tema de las turbinas hidráulicas al ser presentadas primero en los modelos didácticos agradables a la vista y segundo en el simulador, que le ofrece una interacción con la dinámica de las turbinas hidráulicas.
- Para la continuidad y difusión de este tipo de herramientas, sería idóneo que la Escuela incluyera en el programa académico un curso de programación basada en objetos bajo lenguaje MS Visual Basic™, y/o aplicaciones de desarrollo gráfico como Corel Draw™, AutoCAD™ entre otros.
- En beneficio del aprendizaje y la pedagogía para los estudiantes de la Escuela y la Universidad, se recomienda extender el desarrollo de herramientas gráficas como elementos de valor agregado al proceso educativo en otras asignaturas.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Ing. Arnulfo Galán Cadena.

## **TITLE: Prototype Software to Simulate the Hydraulic Generation of Electrical Energy\***

**Authors:** Lorena Martínez Luna  
Álvaro Fernando Espitia Bolívar  
Manuel Figueroa Barón\*\*

**Key Words:** Simulation, prototype, didactic software, hydraulic turbines.

### **Description:**

As an answer to the necessity of adapting a complementary learning alternative in the classroom, a tool was developed. It is a tool with an affable interface, easy to use, and with improvement and expansion possibilities for the students of the Energía y Medio Ambiente subject. This work has three defined components: the reference text where the basic information about hydraulic generation and electrical energy are compiled; the didactic models of the Pelton, Francis, and Kaplan (Helix) turbines which are given to the students as a first perspective of the real turbines; and finally the computational tool, Simulador Didáctico de Generación Hidráulica, "SiDiGeHi", which allows the user to: autoevaluate quantitatively his acquired knowledge throughout the Energía y Medio Ambiente course by means of a module of questions; appreciate the dynamics of the turbines and their mechanical constitution through a module of animations and accomplish preliminary estimations of the most important constructive features of the turbines for a head and flow rate given, establishing a great variety of real application stages for the results obtained in the dimensioning module.

The main conclusions and recommendations of this work are the following:

- ◆ The learning is strongly supported on the graphical presentation of the concepts and mechanisms of the turbines. This work demonstrates it is possible to break the paradigm of the exclusive book learning.
- ◆ Some motivation from the student is set towards the study and deepening of the topic concerning the hydraulic turbines when being presented firstly in the didactic models, pleasant at sight, and secondly in the simulator, which offers interaction with the dynamics of the hydraulic turbines.
- ◆ For the continuity and diffusion of this kind of tools, it would be suitable that the School included in its academic curriculum a programming course based on objects under MS Visual Basic™ language, and/or applications of graphic development such as Corel Draw™, Auto CAD™, among others.
- ◆ In benefit of the learning and the pedagogy for the students of the university school, it is recommended to extend the development of graphical tools as elements of value added to the educational process in other subjects.

---

\* Degree Project

\*\* Physical-mechanical Engineering Faculty. Electrical, Electronic, and Telecommunications School. Director: Engineer Arnulfo Galán Cadena.

## INTRODUCCIÓN

El mundo moderno exige al ser humano un ritmo de vida acorde al suyo por su naturaleza dinámica, es así como los avances en la ciencia reducen las dificultades técnicas de diferentes procesos, o los progresos de la medicina ofrecen salud y bienestar a la comunidad. Ante cada situación adversa el ser humano ha razonado en busca de una solución, actitud que le permitió subsistir a través del proceso evolutivo hasta conseguir grandes logros como la conquista del espacio.

La vida real nos lleva a buscar soluciones en todos los núcleos de la sociedad, tales como la familia, el trabajo, y la escuela por mencionar algunos. La enseñanza por ser parte fundamental en la formación integral del individuo no escapa de esta realidad. La pedagogía debe de mantener una dinámica lo más similar posible a la de su entorno para evitar desventajas cognitivas a la hora de la recepción y entendimiento de conceptos por parte del estudiante, mediante el uso de las herramientas disponibles para ello.

El presente trabajo ofrece al estudiante de Energía y Medio Ambiente una herramienta pedagógica que le permite comprender y tener una visión más amplia de los conceptos y temas referentes a la generación hidráulica de energía eléctrica. No debe entenderse que este trabajo fue hecho únicamente para el estudiante de la mencionada asignatura, al contrario, la facilidad de su manejo y amena interfaz gráfica hacen posible el uso de la herramienta computacional por parte de prácticamente cualquier usuario.

Desde su idea, el desarrollo de este trabajo se ha enfocado a la pedagogía sin pretender ocupar temas de mayor complejidad y técnica que requieren de

estudios mucho más especializados que de momento distorsionan la finalidad con la que se concibió éste.

Tres elementos conforman este trabajo: un texto de referencia, tres modelos didácticos de las turbinas Pelton, Francis y Kaplan (Hélice), y un software.

El texto de referencia contiene información obtenida de diferentes fuentes sobre obras civiles para pequeñas centrales hidráulicas, hidrología general, turbinas hidráulicas, y conceptos de generación hidráulica como contenido técnico; se le da al trabajo un soporte práctico por medio de una serie de salidas de campo que aportan material gráfico y dan un diagnóstico para el software en cuanto a los resultados obtenidos de él al compararlos con los datos de las máquinas instaladas; finalmente, el texto ofrece un tutorial donde se explica el funcionamiento y uso de la herramienta computacional, y una descripción cualitativa de los elementos de programación que se utilizaron en su desarrollo.

Los modelos didácticos permiten al estudiante relacionar las imágenes de los otros elementos con un objeto representativo de las mismas.

El software contiene tres módulos cuya funcionalidad está claramente definida: un banco de preguntas que realiza una evaluación cuantitativa de los conocimientos adquiridos por el estudiante o usuario; un módulo de dimensionamiento que permite conocer de manera preliminar las dimensiones más notables de las turbinas y la planta; y un módulo de animaciones en el cual se pueden apreciar algunas características dinámicas como son el movimiento rotacional de los rodets, y el efecto de regulación de potencia en la turbina.

Este trabajo como conjunto, constituye una herramienta de buenas prestaciones, que fortalece el proceso de aprendizaje del estudiante interesado en la asignatura Energía y Medio Ambiente, y en especial, en la temática de la generación hidráulica de energía eléctrica.

## **1. OBRAS CIVILES Y ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS**

Las obras civiles vinculadas a un proyecto hidroeléctrico comprenden todos los elementos que deben construirse y las estructuras hidráulicas que deben montarse, así como las diferentes adecuaciones que debe sufrir el entorno para lograr un aprovechamiento óptimo del caudal y obtener la fuerza hidráulica suficiente que nos permita generar la mayor potencia eléctrica posible a partir del recurso hídrico disponible.

Colombia posee una gran cantidad de recursos hídricos que en su mayoría no han sido explotados y que podrían generar cerca de 83 GW, según dijo la Comisión Federal de Energía en E.E.U.U. en 1979, utilizando plantas con capacidad menor de 5MW; es evidente entonces que la tendencia de los proyectos hidroeléctricos del país se dirige hacia las centrales hidroeléctricas a pequeña escala y por ésta razón éste capítulo se centra en mostrar los principales componentes que requiere la infraestructura de éste tipo de proyectos, para garantizar el abastecimiento de agua a las turbinas encargadas de convertir esa fuerza hidráulica en fuerza mecánica.

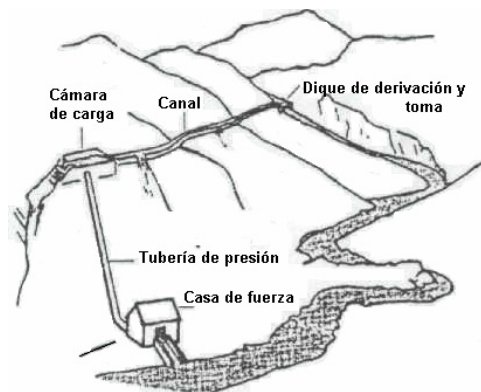
Las obras a considerar se pueden clasificar según la ruta que sigue el agua, desde su captación hasta su liberación, en:

- Estructuras de embalse y derivación
- Conducciones hidráulicas
- Canales de descarga

## 1.1. ESTRUCTURAS DE EMBALSE Y DERIVACIÓN

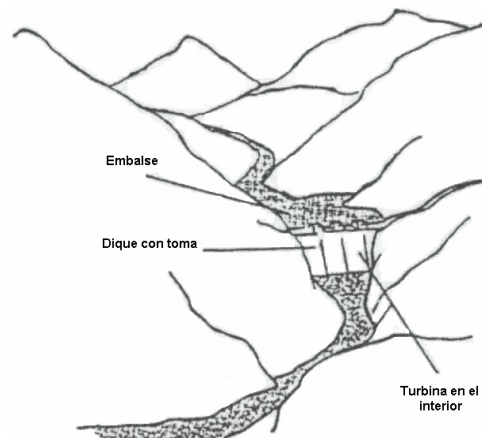
Estas estructuras corresponden a la etapa de sustracción del agua que va a alimentar la central. De acuerdo a la forma en que se realice la captación se pueden catalogar en sistemas de derivación o sistemas de embalse y están constituidas por tres estructuras básicas: la presa o dique, la obra de excedencias o aliviadero y la obra de toma.

En los sistemas de derivación (Figura 1) no se detiene el caudal del río sino que desvía una parte a un canal que luego se lleva por una tubería hacia la turbina. Generalmente se establece un obstáculo en el cauce del río capaz de remansar el agua para poder derivar el caudal deseado y sobre el cual continúa pasando agua. Este sistema es muy utilizado en la microhidrogeneración; sus ventajas principales son su bajo costo y alta confiabilidad a largo plazo, ambas debido a la simplicidad en su construcción; además tiene un bajo impacto ambiental ya que no se alteran las características del flujo aguas abajo ni se inundan los valles localizados aguas arriba de la instalación. La desventaja de éste sistema se presenta en la imposibilidad de almacenar el agua de una estación lluviosa a una estación seca.



**Figura 1: Sistema de derivación**

En un sistema de embalse (Figura 2) se detiene el caudal del río a través de un azud, dique o presa para formar una reserva de agua desde donde se conduce hasta las turbinas. Con éste sistema se puede acumular el agua durante la estación de lluvias para garantizar una generación permanente, incluso en estaciones secas; así mismo tienen la desventaja de ser más costoso debido a la complejidad de su construcción y de tener mayor impacto ambiental ya que se inundan los valles ubicados aguas arriba y se altera el régimen natural del río o arroyo; también requieren de mantenimiento constante porque tienden a llenarse de sedimentos. Las centrales de agua embalsada son muy utilizadas en ríos que presentan dentro de su cauce sitios angostos y márgenes rocosas.



**Figura 2: Sistema de embalse**

### **1.1.1. Azudes o diques de derivación**

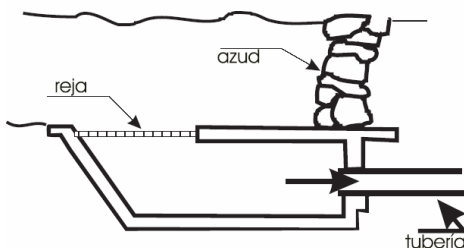
Muchos de los pequeños aprovechamientos hidráulicos operan sin detener el flujo del agua por el cauce y son llamados de agua fluente. Cuando el caudal es inferior al mínimo requerido por las turbinas instaladas, la central deja de generar. En estos aprovechamientos, se instala en el cauce del río una estructura capaz de remansar el agua para desviar cierta cantidad de caudal

y conducirlo a la central y sin detener el flujo de agua a través de él; se les conoce como centrales de derivación, tal y como lo mencionábamos anteriormente.

El obstáculo en mención suele ser una presa, generalmente de poca altura, conocida como azud o dique, cuya misión, como en el caso de la presa, no es almacenar agua sino remansar, levantar y orientar su flujo hacia la entrada de la bocatoma para que pueda ser derivada en condiciones favorables.

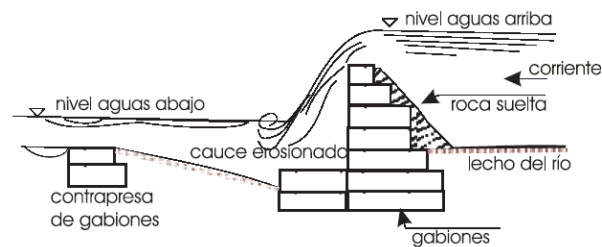
En general, el dimensionamiento de este elemento es función del nivel o profundidad del agua en el canal de conducción. Definido éste valor, se procede a estimar la altura del dique de derivación en relación con el fondo del cauce. Cuando el caudal es inferior a  $10 \text{ m}^3/\text{seg}$ , la elevación del dique sobre el fondo del cauce se puede establecer entre dos a tres veces del nivel de profundidad del agua en el canal.

Los azudes o diques deben construirse sobre sitios que sean permisibles desde el punto de vista geológico y topográfico, preferentemente sobre suelo rocoso y estable, que corresponda a un sector de tramo recto y un poco encañonado; en su versión más simple consisten en un muro de poco más de un metro de altura, construido con rocas sueltas (Figura 3).



**Figura 3: Estructura elemental de un azud**

Para evitar costes de fundación elevados cuando el terreno rocoso está situado a demasiada profundidad, se pueden utilizar, apoyados sobre la tierra, unos gaviones recubiertos con roca suelta (Figura 4). Los gaviones son cajones paralelepípicos, contruidos con malla de acero inoxidable y rellenos de roca.



**Figura 4: Azud construido con gaviones**

Con el fin de evacuar los sedimentos gruesos que se van acumulando en el lecho del río, conviene establecer un canal de limpieza o, en su defecto, una compuerta en el mismo dique de tal forma que se facilite el control y mantenimiento de la obra.

### **1.1.2. Presas de embalse**

La presa es la estructura principal de un almacenamiento de agua a través de una embalse. Cuando se tienen terrenos muy llanos, la construcción de una presa podría resultar adecuada para elevar el nivel de la lámina de agua y así obtener el salto necesario para generar la energía demandada.

La presa también puede ser muy útil para almacenar el agua en períodos de lluvias y poder mantener la generación en períodos de sequía, pero su elevado costo hacen que su viabilidad sea limitada en proyectos pequeños; mas sin embargo, la construcción de un embalse, mediante una presa de poca altura, puede justificarse cuando la topografía es conveniente, ya que

permitiría almacenar suficiente agua en las horas de baja demanda para luego operar en los picos de la demanda cuando la electricidad generada tiene precios más elevados.

Algunas veces se puede suprimir la utilización de un embalse sobredimensionando la cámara de presión, de tal forma que realice la función de éste. Entre mayor sea el salto, menor tendrá que ser el volumen de agua almacenada.

Según la Convención Internacional de Grandes Presas, una presa se considera pequeña si su altura, medida desde la base a la coronación, es inferior a 15 m, la longitud en la coronación no supera los 500 m y el agua embalsada está por debajo del millón de metros cúbicos. Esta diferenciación es importante a la hora de cumplir con las exigencias administrativas, ya que no solo no son las mismas sino mucho más complejas cuando se trata de grandes presas. La mayoría de presas en centrales hidroeléctricas de pequeña escala son cimentadas generalmente sobre roca, y en las que su peso garantiza su estabilidad. Si la altura de la presa es inferior a los 10 metros podrá cimentarse sobre tierra, comprobando que en ningún punto se sobrepasa su carga a la compresión y que las pérdidas por infiltración son mínimas.

La presa debe poder garantizar su estabilidad ante cualquier combinación de cargas posibles: cargas hidrostáticas sobre el paramento de aguas arriba y de aguas abajo; subpresión hidrostática bajo la base de la presa; empuje de los sedimentos en contacto con la presa (cuyo peso específico a estos efectos se evalúa en  $1300 \text{ kg/m}^3$ ); fuerzas sísmicas (si está ubicada en un territorio sísmicamente activo) que se presume actúan en sentido horizontal y vertical sobre el centro de gravedad de la presa; esfuerzos dinámicos

inducidos por el movimiento relativo de la presa y el embalse durante un terremoto, etc.

Para ser estable, la presa no podrá estar sometida en ningún punto a esfuerzos negativos, para lo que es necesario que la resultante de todas las fuerzas horizontales y verticales pase por el tercio medio de la base. Para que el centro de gravedad de la presa se sitúe lo más cerca posible del borde de aguas arriba, el paramento aguas arriba suele ser vertical, mientras que el paramento aguas abajo suele ser inclinado. Es necesario garantizar también que la presa no deslice, para lo que el coeficiente estático de fricción (resultado de dividir la suma de todas las cargas horizontales por todas las verticales que actúan sobre la presa) deberá situarse entre 0,6 y 0,7.

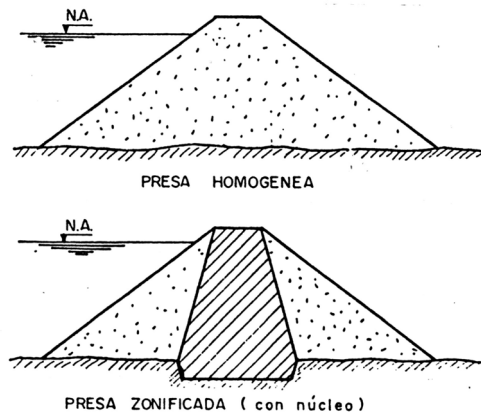
Las presas para almacenar agua en pequeños aprovechamientos hidráulicos se suelen construir con materiales terrosos- desde arcillas finas hasta rocas alteradas fácilmente compactables: lateritas, esquistos, ect. - con un sistema de drenaje en el paramento de aguas abajo, y una protección mecánica en el paramento de aguas arriba. Cuando no se cuenta de materiales arcillosos y existen, en cambio, arenas y gravas en abundancia, puede ser recomendable la construcción de una presa de hormigón. En ríos con grandes avenidas, en los cuales se debe construir aliviaderos significativos, los cuales tienen costos de construcción muy elevados en presas de tierra, puede considerarse la construcción de presas de hormigón, en las que el aliviadero resulta fácil de integrar. Por el contrario, si la localización del proyecto se encuentra en un territorio que presente tendencia a fenómenos sísmicos, se recomienda evitar las estructuras rígidas, por lo que las presas de hormigón no son convenientes.

## Pequeñas presas de tierra

La construcción de una presa de tierra se considera cuando se dispone de tierra de buena calidad y a bajo precio de adquisición y de transporte. Teniendo en cuenta que el transporte de a tierra es costoso, se debe procurar excavarla de puntos más elevados que la cresta para que el transporte del material se haga a favor de la pendiente. La sustracción de material del lecho del futuro embalse sólo es factible cuando con ello no quede amenazada la impermeabilidad de la presa.

El material óptimo para la construcción de presas de tierra debe estar libre de materia orgánico que pueda llegar a podrirse en un futuro y provocar la falla de la presa. Las tierras que tienen un alto contenido de arcilla tienden al agrietamiento por contracción en el estado seco y cuando se humedecen provocan deslizamientos. Las gravas y arenas naturales, cuando se encuentran en su sitio natural, poseen un volumen de poros de 0.35 0.40, el cual reducido por apisonamiento (cilindrado, repisado), y debe llenarse de arcilla para impermeabilizarse; para lo cual se requiere de un 15% a un 30% de arcilla.

Las presas de tierra pueden ser *homogéneas* y *zonificadas*. En las primeras no hay impermeabilización especial y están formadas por un mismo material impermeable (fino y grueso), es decir de muy baja permeabilidad. Las zonificadas están formadas por material permeable de diferente granulometría y permeabilidad; requieren de una impermeabilización y aislamiento especial para detener el paso del agua, la cual se puede lograr revistiendo el talud de aguas arriba (sistema francés) o colocando un núcleo o pantalla vertical en la masa de tierra (sistema inglés o americano). Un esquema de las presas de tierra homogéneas y zonificadas se aprecia en la Figura 5.



**Figura 5: Pequeñas presas de tierra homogénea y zonificada**

### 1.1.3. Obras de excedencias o aliviaderos

Las obras de excedencia corresponden a estructuras necesarias incorporadas a la presa, azud o dique, para permitir la salida de volúmenes de agua que en determinado momento puedan llegar a superar el nivel de las aguas normales en el embalse, y así evitar que se produzca daño alguno en la corona. Estas estructuras, conocidas como aliviaderos, deben entregar las aguas de exceso a un caudal aguas abajo de la presa.

Los aliviaderos pueden ser de diferentes formas; su selección obedece a condiciones topográficas de la zona, magnitud del caudal de diseño, costo y condiciones de la cimentación de la estructura, y suelen disponer en su base de algún medio para disipar la energía de la corriente.

El aliviadero de uso más frecuente en pequeñas obras de excedencias se caracteriza porque adopta, a partir de la sección de control, la forma del flujo del agua. Básicamente es un canal abierto, redondeado en la cresta, y con una fuerte pendiente, que permite evacuar el agua a velocidades super

críticas. Es un vertedero de planta recta y perfil tipo Una aplicación real de este tipo de vertedero es la que se aprecia en la Figura 6.



**Figura 6: Vertedero simple**

Su perfil se diseña para minimizar la presión sobre su superficie, pero sin que la lámina de agua llegue a separarse de la superficie, lo que daría lugar a la aparición de presiones negativas.

La curva resultante es la de la trayectoria que seguiría la cara inferior de una lámina de agua al caer libremente después de verter sobre un muro vertical. Su cálculo es crítico en los aliviaderos de las grandes presas, que tienen que evacuar cientos de metros cúbicos por segundo, pero no en las presas de poca altura utilizadas en los pequeños aprovechamientos.

#### **1.1.4. Desagües de fondo**

Los desagües de fondo son conductos ubicados a un nivel bajo en la estructura del embalse, con una válvula de compuerta a la entrada o una válvula cónica a la salida, que nos permiten reducir la cantidad de agua almacenada, o desocupar el embalse, según el propósito que se tenga, ya

sea en caso de emergencia o para facilitar la reparación y mantenimiento de la presa, por ejemplo, para eliminar los sedimentos que hayan podido producirse o para examinar el origen de filtraciones a través del fondo o de las laderas del embalse. En caso de que se tenga un caudal de desagüe supercrítico, habrá que prever un dissipador de energía.

#### **1.1.5. Bocatoma**

La bocatoma constituye en sí la obra de captación de la central hidráulica a pequeña escala, y se puede definir como una estructura destinada a captar o extraer una determinada cantidad de agua de una corriente para luego conducirla hacia un canal aprovechando la fuerza de gravedad. Su construcción y puesta en marcha debe cumplir las siguientes condiciones:

- Garantizar el abastecimiento de una cantidad constante de agua, sea cual sea la altura de la lámina de agua en el río.
- Evitar en lo posible el ingreso de materiales sólidos y flotantes, haciendo que estos sigan el curso del río; de lo contrario debe contar con elementos que faciliten su limpieza.
- Proteger el resto del sistema de obras hidráulicas del ingreso de crecientes o inundaciones que pudieran producirse en las épocas lluviosas.
- Reducir al mínimo la pérdida de carga posible.
- No ocasionar daño al medio ambiente que la alberga.

La bocatoma desempeña un papel de transición entre un curso de agua, que puede ser un río tranquilo o un arroyo turbulento, y el canal de derivación que transportará el caudal captado hasta la cámara de carga y que debe estar controlado, tanto en calidad como en cantidad.

La proyección de ésta obra depende de diverso factores, tales como particularidades geomorfológicas, estructurales, económicas, el tipo de uso, que en nuestro caso es un aprovechamiento hidroeléctrico, y las características hidrológicas e hidráulicas de la corriente de agua que se quiere aprovechar; entre las cuales podemos encontrar corrientes de montaña y corrientes de valles aluviales, así como dos clases de corrientes superficiales: sin regulación y con regulación de caudal. La consideración de todos estos factores a la hora de realizar su diseño debe hacerse de manera cuidadosa con el fin de evitar problemas de funcionamiento y conservación a lo largo de la vida útil de la central.

En el caso de corrientes de agua sin regulación de caudal, el diseño de la obra se realiza bajo la consideración de que el caudal de la corriente supera el caudal máximo diario (QMD) en cualquier período y por lo tanto se debe asegurar que la altura del agua en la obra de captación, que corresponde al caudal requerido, sea inferior a los niveles hidrométricos asociados a los caudales mínimos presentados en la corriente natural.

En el caso contrario, cuando se tienen corrientes con regulación de caudal compensando las variaciones de éste durante las épocas de creciente y las épocas de estiaje, la obra de captación va de la mano de la construcción del dique de derivación o presa de embalse; para seleccionar la bocatoma adecuada se debe prever los problemas de sedimentación y tener en cuenta la magnitud del caudal a captar.

El diseño de bocatomas es muy dinámico y está evolucionando constantemente gracias a las múltiples ideas que se aportan y a los avances en modelización numérica, materiales y técnicas de construcción. Aún así, los conceptos fundamentales han variado poco a lo largo de la historia y no es previsible que lo hagan en el futuro; por el diseño de esta estructura, que juega un papel tan importante en el éxito o fracaso de un aprovechamiento hidráulico, se basa en los conocimientos producidos por acumulación de la experiencia y en los perpetuos principios de la hidráulica.

Para la selección del sitio de la obra, se recomienda ubicar la estructura en los tramos rectos y estables del río; si no es posible, entonces es mejor hacerlo al final de las curvas y en la orilla exterior, ya que la zona cóncava es probable que pueda colmarse fácilmente; y en ambos casos establecerse a una altura conveniente sobre el fondo y en lugares protegido de la erosión y socavación, dependiendo de la topografía, la geología, el comportamiento de los suelos y, principalmente, de las variaciones hidrológicas del lugar que nos servirá de emplazamiento.

La presa nos debe garantizar un nivel mínimo de aguas y se debe proyectar muros laterales para proteger y acondicionar la entrada del agua al conducto, para colocar los dispositivos necesarios que nos permitan regular el flujo o impedir la entrada de materiales gruesos.

Para un buen diseño, es indispensable estudiar el comportamiento hidrológico de la corriente, determinar los caudales máximos y mínimos y la curva de duración de caudales naturales; toda ésta información nos servirá para asegurar una debida protección de la estructura contra las crecientes, seleccionar el caudal a extraer adecuado a los niveles mínimos de la corriente y suministrar los caudales deseados de acuerdo con las limitaciones y alcances de la corriente proporcionadas por la curva.

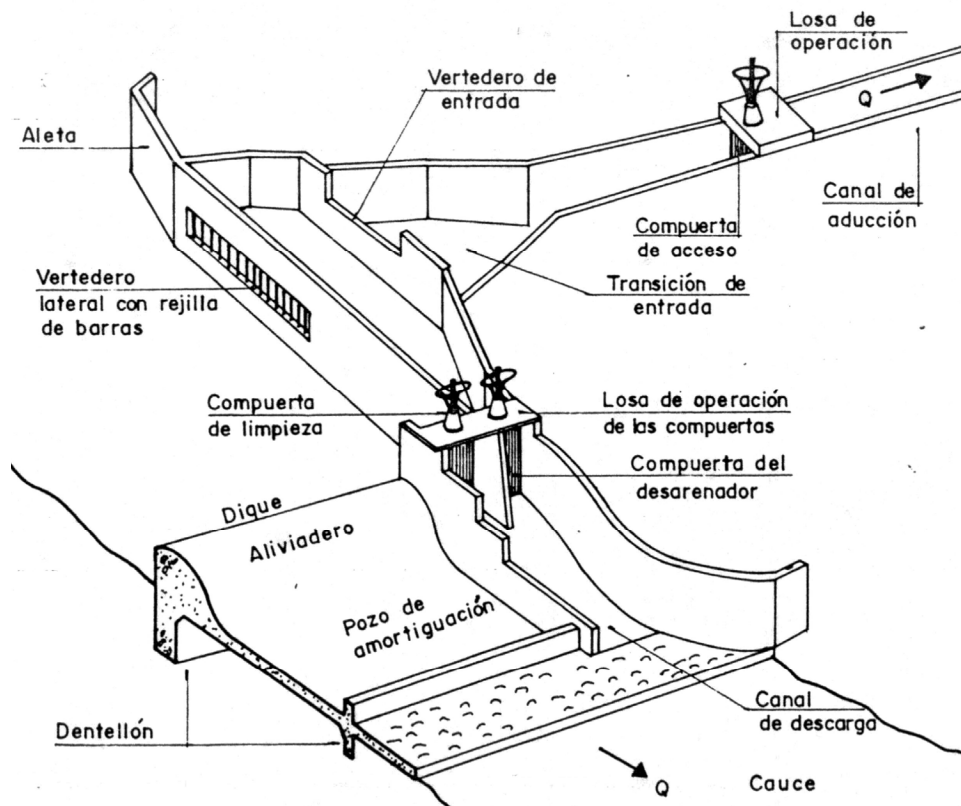
### **1.1.5.1. Bocatomas convencionales**

Es muy común encontrar éstas bocatomas en nuestro medio, generalmente son laterales con dique de derivación, ubicadas en la planicie aluvial zona de piedemonte; en muchos casos éstas obras han estado operando por más de medio siglo.

Los elementos básicos de las bocatomas convencionales son: el dique o azud de derivación; una compuerta de fondo para realizar la limpieza de los sedimentos gruesos; un vertedero lateral con rejilla de barras paralelas, cuya función es permitir el ingreso del agua impidiendo la entrada de material grueso; un desarenador con compuerta de limpieza proyectado en dirección hacia el río; un vertedero sumergido que permite la captación del caudal a derivar y el canal de aducción.

La construcción de este tipo de bocatomas se debe llevar a cabo durante la época de sequía ya que es necesario desviar o contraer lateralmente el río, ya sea con pantallas de sedimentos o utilizando sacos de prolopropileno rellenos con grava; de lo contrario podría ocurrir un evento torrencial que pusiera en peligro la vida humana y ocasionara la pérdida total o parcial de la obra.

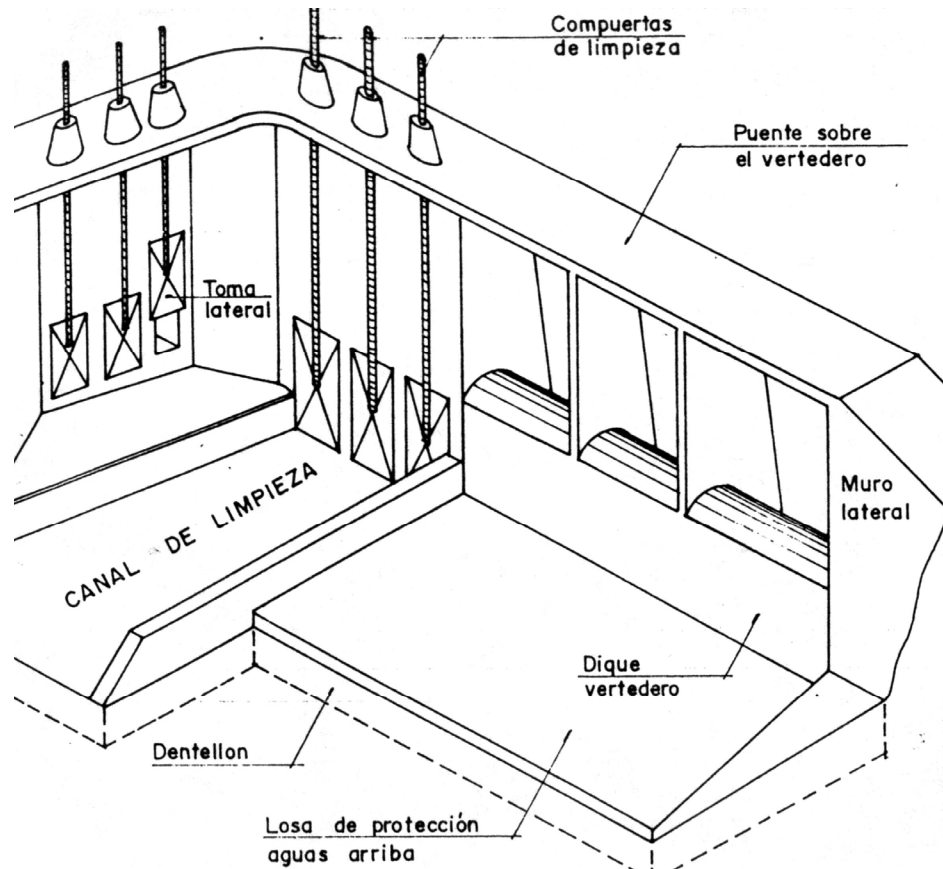
En la Figura 7 se puede apreciar los elementos anteriormente mencionados. Este modelo presenta ventajas comparativas en cuanto al control de los sedimentos gruesos y finos.



**Figura 7: Bocatoma típica**

En la

Figura 8 se puede distinguir otro modelo de bocatoma lateral, dotada de un dique con varios cuerpos que trabajan como rebosaderos equipados con compuertas de limpieza para sedimentos gruesos, compuertas laterales de captación y una pasarela para maniobrar las compuertas. Este modelo presenta costos relativamente altos en el mantenimiento y dimensión de sus componentes, comparada con otras bocatomas que realizan las mismas funciones.



**Figura 8: Bocatoma lateral típica**

La selección de estas obras está caracterizada por las condiciones geomorfológicas e hidrológicas de la corriente que se desea aprovechar y los costos ligados a las mismas, por tal razón es posible hacer variantes de los modelos convencionales en pro de la economía y la eficiencia requerida; generalmente, estas bocatomas se proyectan en cauces geomorfológicamente estables, preferiblemente con fondo rocoso y caudal suficientes.

## 1.2. CONDUCCIONES HIDRÁULICAS

Las conducciones hidráulicas corresponden a las obras construidas en la etapa de conducción del fluido, en donde se transporta el caudal extraído del río a través de la bocatoma hasta la casa de máquinas en donde accionará la turbina. El objetivo de cada una de las obras ejecutadas en esta etapa es facilitar el movimiento del agua desde la toma hasta la central. Los elementos ubicados entre estos dos sitios pueden variar la velocidad y/o la presión del agua para lograr una mayor o menor acción del fluido sobre la turbina.

### 1.2.1. Canal de aducción

Es un conducto abierto que se construye para que, en razón a su pendiente, sea capaz de transportar el caudal extraído del río desde la bocatoma hasta la cámara de carga. El caudal que transita por un canal es función de su sección transversal, su pendiente y su rugosidad; y son éstas características las que finalmente van a determinar su construcción.

Su sección transversal puede adoptar formas tanto regulares como irregulares (Figura 9), dependiendo de las propiedades que se deseen obtener.



**Figura 9: Tipo de secciones de canal**

Los materiales que se pueden utilizar en su construcción, en los cuales encontramos una gran diversidad, establecen diferentes tipos de canal:

- Canal de tierra sin revestimiento.
- Canal de tierra con sello o revestimiento. El “sellado” o revestido corresponde a la aplicación de una capa delgada de material que no agrega resistencia estructural, pero sirve para reducir la fricción y la filtración.
- Canal de mampostería o concreto.

El agua pierde energía en el proceso de deslizarse por las paredes y el lecho del canal a causa de la fricción, por ello, entre más rugoso sea el material del canal, mayor será la pendiente o desnivel que se requiera entre la entrada y la salida del mismo para lograr el rendimiento deseado.

La capacidad de transporte de un canal aumenta con la disminución del perímetro mojado, por lo que desde el punto de vista hidráulico, existe una forma óptima para cada perfil de canal. Desde el punto de vista teórico, la sección más eficiente es la semicircular, que es la que tiene el menor perímetro mojado pero un canal semicircular, a no ser que se empleen secciones prefabricadas; este modelo es costoso de construir y difícil de conservar. Dentro de los canales trapezoidales, es el semihexágono el que puede transportar un mayor caudal por unidad de sección.

Se debe tener mucho cuidado a la hora de escoger la sección y el material del canal; por ejemplo, en un canal de material suelto – como suelo arenoso – el flujo del agua provocará un desmoronamiento de las paredes hacia adentro, a menos que los lados estén ligeramente inclinados y el ancho del canal esté en relación con la profundidad. El revestimiento de los canales

puede ser una gran ventaja a la hora de ahorrar trabajo en su construcción, ya que se obtienen canales más angostos para el mismo caudal y por consiguiente no se necesita una gran excavación horizontal en una ladera angosta.

También se debe tener muy presente la velocidad del agua que fluye por el canal; velocidades muy bajas permitirán la acumulación de sedimento en el lecho del canal provocando una posible obstrucción; por otro lado, un flujo de agua excesivamente rápido erosionará las paredes del canal.

Cabe aclarar que la sección más eficiente desde el punto de vista hidráulico, no tiene que ser necesariamente la más económica. La sección hidráulica óptima podría minimizar el área requerida para transportar el caudal requerido, pero a su vez podría precisar un área de excavación mucho mayor. Por otra parte, sobre todo en canales de tierra no revestidos, la construcción de un canal de sección óptima puede no ser factible, a la vista de los materiales disponibles.

Para evitar que el agua se desborde, es conveniente prever un margen de seguridad en la altura del canal. Ese margen será de 10 cm en canales revestidos, y como mínimo de 30 cm (o un tercio de la altura), en canales sin revestir; además, para no poner en peligro la estabilidad del canal, conviene instalar uno o más aliviaderos que devuelva el agua sobrante al río o a un barranco. Cuando el proyecto está ubicado en zona de montaña los canales deben ser revestidos o, preferiblemente, de hormigón armado. Para evitar fugas de agua a través de las fisuras del hormigón, se recomienda utilizar geotextiles que garanticen su estanqueidad.

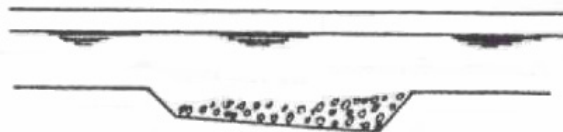
En general, la proyección de canales de aducción o derivación, obedece un cuidadoso estudio de los factores que influyen en la determinación de sus

parámetros básicos – pendiente, dimensiones y rugosidad – y de la geomorfología de los terrenos que atraviesan; el canal es una estructura rígida, pero a su vez sensible, que no puede resistir las subpresiones y que son propensas a presentar fugas de agua que generalmente son difíciles de drenar.

### **1.2.2. Desarenadores**

Los desarenadores son los elementos encargados de eliminar las pequeñas partículas de materia sólida que se encuentran suspendidas en el agua que es captada del río y conducida a la turbina. Esta materia en suspensión generalmente está compuesta de materiales abrasivos que ocasionan el rápido desgaste de los álabes de la turbina; las partículas de diámetro superior a 0.2 mm ocasionan daños en la turbina y por lo tanto deben ser retenidas y eliminadas.

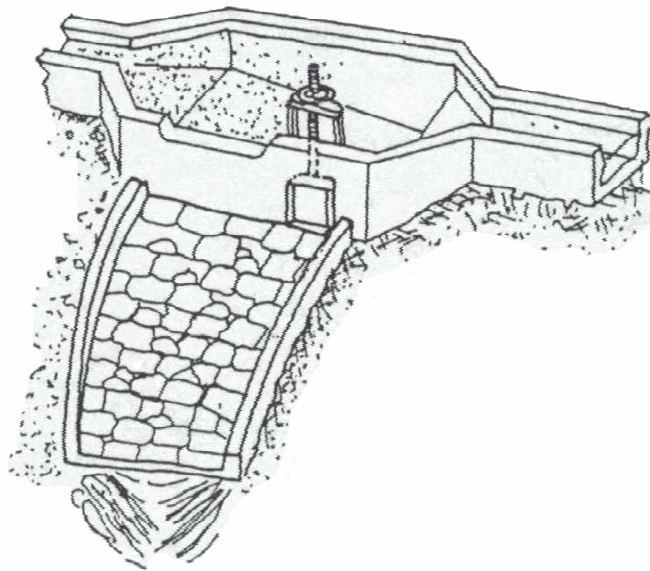
Los desarenadores cumplen su objetivo reduciendo la velocidad del agua para que las partículas de arena o piedras se asienten en el fondo, de donde podrán ser removidas adecuadamente. Es necesario ubicar desarenadores, tanto a la entrada como a la salida del canal de derivación, para asegurar una buena protección a las turbinas. Un esquema básico de la función de un desarenador se muestra en la Figura 10.



**Figura 10: Esquema del concepto de un desarenador**

Un desarenador eficiente debe garantizar las siguientes características en su estructura y operación:

- Longitud y ancho adecuados para que los sedimentos se depositen; manteniendo a su vez un volumen no muy grande y un costo no muy elevado.
- Fácil eliminación de los depósitos.
- Eliminación cuidadosa de los sedimentos a través de la compuerta, evitando la erosión del suelo adyacente que soporta la base de la tubería y del depósito. Se recomienda una superficie empedrada similar a la mostrada en la Figura 11.
- Impedir la turbulencia del agua causada por cambios de área o recodos que harían que los sedimentos pasen hacia la tubería de presión.
- Capacidad suficiente para permitir la acumulación de sedimentos.



**Figura 11: Desarenador típico**

### **1.2.3. Cámara de carga**

La cámara de carga es una estructura civil de las centrales hidroeléctricas pequeñas, análoga a una represa en las grandes centrales hidráulicas; y no

es más que una variante de la toma de agua convencional. Generalmente esta ubicada al final del canal de derivación y alimenta directamente la tubería de presión, aunque en algunos casos puede coincidir con la toma de agua que se realiza en el cauce del río.

En los pequeños aprovechamientos, la tubería forzada sale de la cámara de carga en dirección horizontal y luego sigue la pendiente mediante un codo de transición. En los aprovechamientos de baja caída se debe tener mayor cuidado con el diseño hidráulico ya que la pérdida de carga relativa es mucho más elevada que en los aprovechamientos con un salto grande. En estos últimos podría no estar justificado el aumento de costo necesario para disminuir las pérdidas de carga, que en relación con la altura total del salto serán de poca importancia.

Los principales factores que determinan el diseño de la cámara de carga son:

- El perfil aguas arriba de la compuerta, tanto en lo que se refiere a las paredes laterales, como a la solera y al techo.
- La transición de una sección rectangular, en la rejilla, a otra circular en la tubería forzada.
- Los equipos mecánicos: rejillas y compuertas.
- El conducto de ventilación

Un buen perfil es el que acelera uniformemente la corriente. Una aceleración o desaceleración brusca da lugar a pérdidas de carga adicionales y a la separación de la vena de agua. Para reducir al mínimo las pérdidas de carga hay que modificar la sección de manera gradual, lo que generaría cámaras largas y costosas. Por eso se recomienda hacer un análisis beneficio/costo para determinar si la disminución de las pérdidas de carga justifica el aumento de los costos ligados a una mayor sofisticación.

Mas sin embargo, una pérdida de carga baja no es condición suficiente para lograr un buen diseño; hay que tener presente que el cambio de una sección prismática, en la rejilla, a otra circular, en la tubería forzada, puede producir vórtices, que afectan al funcionamiento de las turbinas, particularmente a las de hélice y a las de configuración en pozo.

Los vórtices efectivamente dan lugar a:

- Desigualdades en la distribución de la corriente.
- Introducción de aire en el circuito, creando condiciones desfavorables para la turbina: vibraciones, cavitación, desequilibrio de esfuerzos, etc.
- Aumento de las pérdidas de carga
- Arrastre de broza hacia la tubería

Los criterios para evitar la vorticidad no están bien definidos. Su formación está generalmente asociada con la orientación y la profundidad de la toma bajo el agua. Mientras más profunda esté la entrada a la tubería y cuanto mayor sea la simetría del flujo en la toma, menor será la posibilidad de que se formen.

#### **1.2.4. Tuberías forzadas**

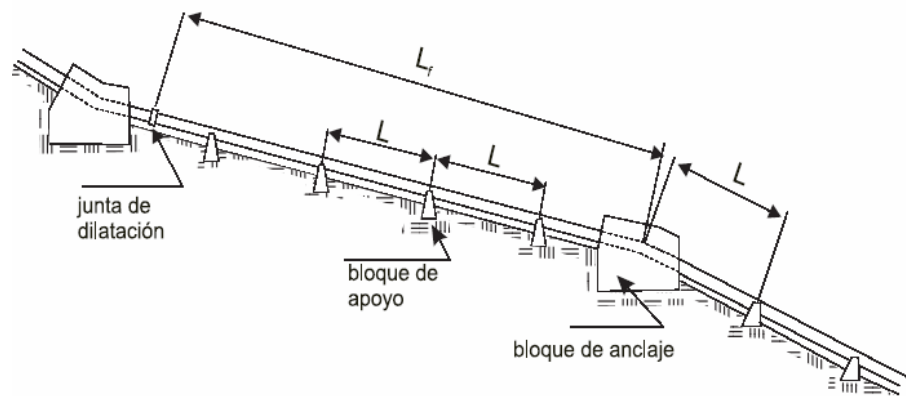
Las tuberías forzadas o tuberías de presión, son las encargadas de transportar el agua, bajo una presión determinada, desde la cámara de carga hasta la turbina. Su diseño no es tarea fácil y se ve influenciado por las características del terreno, la temperatura ambiente y las exigencias medioambientales de la zona de influencia del proyecto. Se debe ser muy cuidadoso en el diseño ya que no es conveniente incurrir en costos innecesarios y por el contrario, se debe procurar reducir no sólo los costos de

mantenimiento, sino la inversión inicial, ya que ésta podría significar gran parte del presupuesto de todo el proyecto.

Las tuberías forzadas pueden instalarse sobre o bajo el terreno, según sea la naturaleza de éste, el material utilizado para la tubería, la temperatura ambiente y las exigencias medioambientales del entorno. Por ejemplo, una tubería de pequeño diámetro en PVC se puede instalar, extendiéndola simplemente sobre el terreno y siguiendo su pendiente, con un mínimo movimiento de tierras. En cambio, las grandes tuberías en acero deberán enterrarse siempre que el terreno no sea muy rocoso, y en ocasiones, aun cuando lo sea, si los requisitos medio-ambientales del entorno lo exigen. La arena y la grava que rodean una tubería enterrada, constituyen un buen aislante, lo que permitirá eliminar un buen número de juntas de dilatación y de bloques de anclaje.

Para enterrar una tubería, previamente hay que pintarla y protegerla exteriormente mediante, por ejemplo, una cinta enrollada que garantice su resistencia a la corrosión. Si se hace así y la cinta no sufre daños durante el montaje, la tubería no necesitará ningún mantenimiento ulterior. Desde el punto de vista medioambiental esta solución es óptima ya que el terreno puede ser restituido a su condición inicial y la tubería, invisible al ojo humano, no constituirá barrera alguna al desplazamiento de los animales.

Instalada sobre el terreno, la tubería estará expuesta a variaciones de temperatura importantes, y además, estará sometida a movimientos de contracción y dilatación, en modo alguno despreciables. En general las tuberías forzadas en acero, se conciben como una serie de tramos rectos, simplemente apoyados en unos pilares, y anclados sólidamente en cada una de sus extremidades, que en general coinciden con cambios de dirección. Un esquema de ello se aprecia en la Figura 12.



**Figura 12: Esquema del montaje de una tubería de presión**

Entre los materiales utilizables para tuberías forzadas y que, en ocasiones, pueden sustituir ventajosamente al acero, cabe destacar los siguientes:

- Polietileno
- Cloruro de Polivinilo (uPVC o PVC-U)
- Tuberías de aleaciones de plástico
- Tuberías reforzadas con fibra de vidrio (GRP)
- Tuberías de polietileno de alta densidad (PE)

También pueden utilizarse tuberías de hormigón con revestimiento interior de chapa de acero, armadas si es necesario con redondos de acero, o incluso pretensadas con alambres de alta resistencia (tipo tubería Bona), y provistas de uniones de enchufe y cordón. Dado su elevado peso, resultan difíciles de transportar y manejar en obra, pero en cambio no exigen ningún tratamiento de protección contra la corrosión.

### **1.3. CANALES DE DESCARGA**

Los canales de descarga son canales, generalmente cortos, que permiten la salida del agua que ha pasado por la turbina, en la planta de generación, y la

devuelven al cauce del río, aguas abajo de la central. Las turbinas de acción pueden llegar a tener velocidades de salida muy elevadas, por lo que habrá que proteger el canal para que la erosión no ponga en peligro la casa de máquinas; para este fin, normalmente se colocan, entre la turbina y el canal, unos escudos de hormigón. Hay que prever también que, incluso en los períodos de grandes crecidas, el nivel del agua en el canal nunca llegue al rodete de la turbina. En casas de máquinas equipadas con turbinas de reacción, el nivel del agua en el canal de descarga influencia el comportamiento de la turbina ya que si no es el correcto, puede dar lugar a cavitación. Ese nivel también afecta al valor de la altura de salto, y en saltos de pequeña altura puede llegar hacer que el proyecto sea económicamente inviable.

## **2. HIDROLOGÍA GENERAL**

Las consideraciones hidrológicas en el planteamiento de proyectos de generación hidráulica resultan de vital importancia puesto que a través de ellas se puede establecer la disponibilidad hídrica de la cuenca para obtener un aprovechamiento idóneo del salto y el caudal que ésta puede ofrecer.

### **2.1. ALTURA DEL SALTO APROVECHABLE EN UN TRAMO DEL RÍO**

Una vez hecho el reconocimiento del tramo que se aprovechará y determinada la ubicación de la presa, es necesario tener en cuenta las reducciones de salto debidas a la situación de las obras que se construyan.

La superficie de aguas remansadas (curva del remanso o embalse) no es horizontal, sino que tiene de directriz una cierta curva, cuyo coeficiente angular o curvatura va disminuyendo a medida que nos acercamos a la presa. De modo que desde la superficie del agua de la lámina vertiente sobre la presa hasta el punto en el que se unen el remanso y la corriente primitiva que lo alimenta hay un desnivel que se pierde en el total del tramo que se considera, a esto se le llama pérdida debida al remanso  $h_1$ .

Si la presa es fija, o sea, que no tiene compuertas de desagüe que al abrirlas puedan afectar el nivel del remanso junto a ellas, luego toda el agua que exceda la presa volcará sobre su coronación, y el espesor de esta lamina de agua dependerá del caudal y de la longitud de la coronación, sin embargo este efecto se puede controlar con una presa móvil. A esto se le llama pérdida debida a la consideración de presa fija  $h_2$ .

El agua que de la presa, entra al canal sufre pérdidas de nivel según características de pendiente, sección mojada, rugosidad de las paredes entre otras, lo que recibe el nombre de pérdida debida al canal hasta la cámara de presión  $h_3$ .

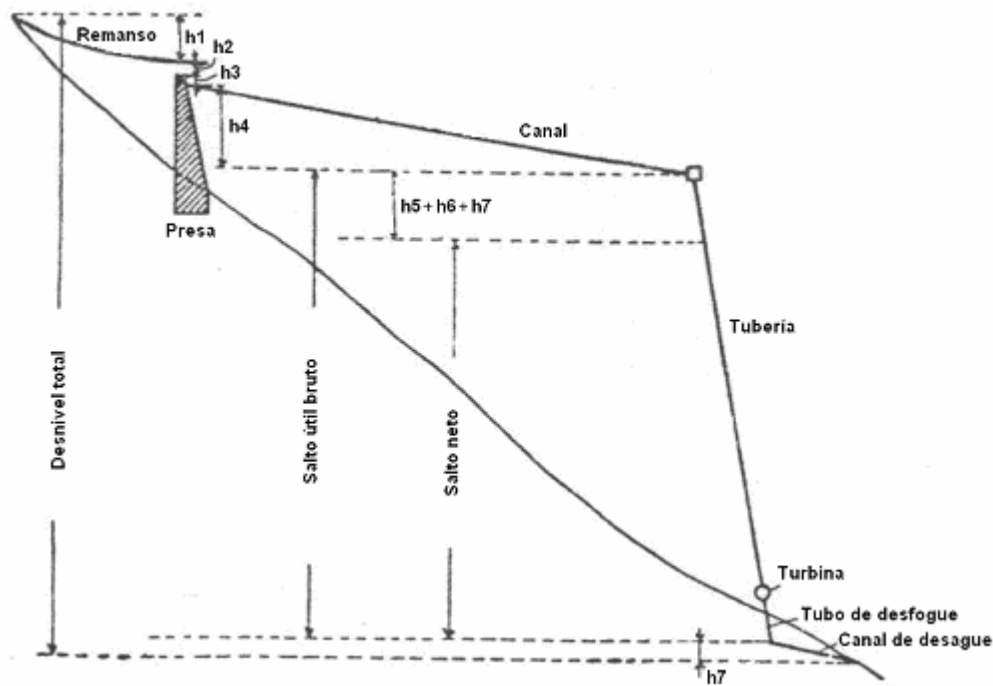
En la cámara de presión se dispone de rejillas para filtrar algunos sólidos e impedir su entrada en la tubería, lo que resulta en una pérdida de nivel conocida como pérdida debida a las rejillas y compuertas  $h_4$ .

Al pasar las aguas por la tubería de conducción se origina una pérdida de nivel debido a la fricción, a cambios de sección entre otros, lo que se llama pérdida debida a la tubería  $h_5$ .

Al pasar las aguas por la turbina y el tubo de aspiración se dan pérdidas debido al rendimiento de la turbina y a la fricción en el tubo lo que se conoce como pérdida debida a la turbina y al tubo de aspiración  $h_6$ , considerando estos dos elementos como un conjunto.

Y por último, la pérdida provocada por el canal de desagüe al reingresar las aguas en el cauce natural, esto es, pérdida debida al canal de desagüe  $h_7$ .

Estas pérdidas de nivel se aprecian en la Figura 13



**Figura 13: Pérdidas de nivel en un salto, (la curva del remanso no está a escala).**

Luego el salto bruto es la diferencia de niveles de agua entre la cámara de presión y el desagüe en la desembocadura del tubo de aspiración; y salto neto el que efectivamente usan las turbinas, o sea, el salto bruto menos la pérdida debida a la tubería. Puesto que las pérdidas de carga son función del cuadrado de la velocidad, el salto neto varía según el caudal que se considere. El menor salto neto se dará a máximo caudal o plena carga. Cuando la turbina no consta de tubo de aspiración, es el caso de la Pelton, no se consideran entonces la altura del tubo y la velocidad de las aguas al llegar al drenaje.

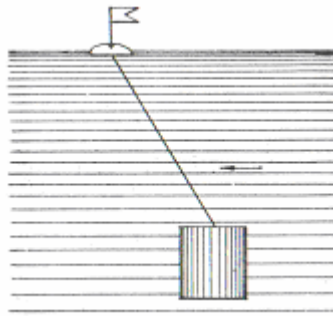
## 2.2. AFOROS DE CAUDAL

Existen gran cantidad de métodos de aforo, y la utilización de uno u otro método depende del caso particular en el que se esté trabajando, de la

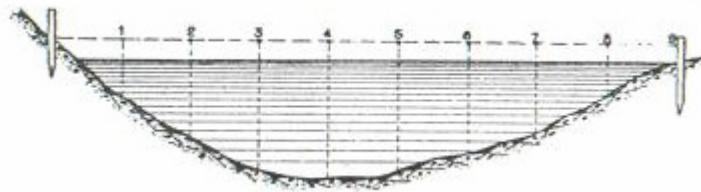
exactitud requerida, de la magnitud e importancia del proyecto a realizar, de los recursos y equipos disponibles, entre otros factores; para aprovechamientos hidráulicos de energía es necesario conocer los caudales que afectan a las turbinas y de esta manera, determinar su rendimiento, si es que ya están instaladas, y en el caso del diseño, el aforo se convierte en un parámetro importante para la proyección de la turbina y por tanto de la central hidroeléctrica. Se tratarán en este texto dos métodos considerados como los más exactos y prácticos, el aforo por molinetes o correntómetros y el aforo por flotadores, el uso de molinetes es posible cuando la corriente a medir no tiene una gran velocidad y no posea cuerpos extraños en su cauce, que afecten la integridad del personal y de los equipos, caso contrario, se opta por usar el método de los flotadores; en la práctica, estos métodos son los utilizados en el aforo para proyectos hídricos, puesto que no representan mayor complicación y por ello permiten tomar gran número de muestras.

### **2.2.1. Método de flotadores**

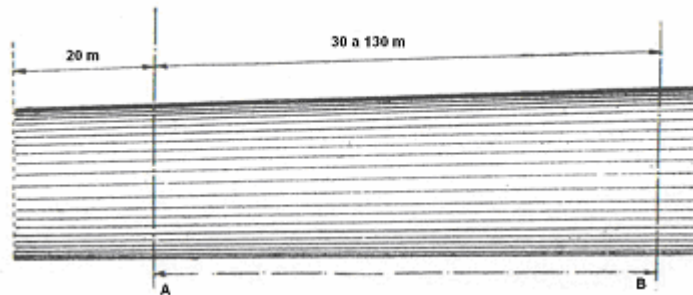
Los flotadores utilizados en un aforo deben ser lo más económicos y homogéneos posible, debe evitarse la pérdida de flotadores tendiendo una o dos cuerdas de recuperación después del tramo en medición, estos flotarán de manera total o parcial si están lastrados, de tal manera que el flotador de superficie sostiene a otro que se encuentra sumergido a una distancia ajustable, Figura 14.



**Figura 14: Flotador sumergido.**



**Figura 15: Perfil medio del río para un aforo por flotadores.**



**Figura 16: Tramo del río para aforo por flotadores.**

Este método ha de realizarse en tramos del río cuya trayectoria sea lo más recta posible, se ha de conocer su distancia y su profundidad, también es recomendable hacer el aforo en un día con vientos muy tranquilos para que éste no afecte el movimiento del flotador superficial y por tanto la medida. Se realiza entonces un perfil aproximado del cauce del río en el tramo seleccionado para hacer el aforo, como se aprecia en la Figura 18, mientras que la separación entre los puntos de medición se obtiene de la Tabla 1; lo

recomendable es hacer el aforo, liberando el flotador unos 20 m antes del punto inicial y a partir de éste tomar como punto de llegada uno ubicado 30 o 130 m aguas abajo, como lo indica la Figura 16.

| Ancho superficial [m] | Distancia entre puntos de medición [m] |
|-----------------------|--|
| Menos de 10           | Entre 10% y 15% del ancho superficial  |
| 10 – 20               | 1                                      |
| 20 – 40               | 2                                      |
| 40 – 60               | 3                                      |
| 60 – 80               | 4                                      |
| 80 – 100              | 5                                      |
| 100 – 150             | 6                                      |
| 150 – 200             | 10                                     |
| Más de 200            | 15                                     |

**Tabla 1: Ancho del río y separación entre puntos de medida**

Cuando es posible que el aforador transite por el perfil del río a pie, se conoce como aforo por vadeo, caso contrario, es necesario construir una estructura que atraviese el perfil del río a manera de cable de suspensión, el cual sostiene una cabina llamada carro huaro, desde el cual el aforador realiza las mediciones, procurando ubicar el flotador sumergido a la altura media de la sección que este midiendo. El procedimiento es sencillo, puesto que se asume que la trayectoria de los flotadores es casi rectilínea y paralela a la corriente, se obtendrán ciertos tiempos  $t_i$  para una misma distancia  $d$ , luego la velocidad parcial  $V_i$  para cada uno de los flotadores, con  $i=1,2,3\dots n$  es:

$$V_i = \frac{d}{t_i} \quad \text{Ec. 1}$$

La velocidad media superficial esta dada por:

$$V_{ms} = \frac{V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n}{n} \quad \text{Ec. 2}$$

Ya calculada la velocidad media superficial, se calcula entonces la velocidad media de la sección V, con la siguiente relación:

$$K = \frac{V}{V_{ms}} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde K es una constante y que depende de factores como la rugosidad y, morfología del tramo del río, así:

| Naturaleza del tramo o cauce  | K    |
|---|------|
| Cauce cubierto con vegetación   | 0,81 |
| Cauce con piedras   | 0,89 |
| Cauce de grava ordinaria  | 0,92 |
| Cauce con arcilla o arena   | 0,95 |
| Cauce revestido con madera, hormigón o mampostería (Canal artificial) | 0,96 |

**Tabla 2: Valor de la constante K según la naturaleza del tramo del río**

Una vez calculada la velocidad media de cada una de las secciones, se calculan entonces los caudales parciales de cada sección, así:

$$q_{1-2} = \frac{V_1 + V_2}{2} \cdot \frac{h_1 + h_2}{2} \cdot b \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

$q_{1-2}$  : caudal parcial de la sección 1-2 en  $m^3/s$ ,

$V_1, V_2$  : velocidad media de las secciones 1 y 2 respectivamente en  $m/s$ ,

$h_1, h_2$  : profundidades de las líneas de medición 1 y 2 respectivamente en  $m$ ,

$b$  : distancia entre las líneas de medición en  $m$ .

Una vez obtenidos los caudales parciales de las secciones, se halla el caudal total del tramo del río como la suma de los caudales parciales:

$$Q_{Total} = q_{0-1} + q_{1-2} + q_{2-3} + \dots + q_{(n-1)-n} \quad \text{Ec. 5}$$

### 2.2.2. Método del molinete o correntómetro

Los molinetes son dispositivos electromecánicos que miden la velocidad de una corriente de agua que contornea sus hélices, en la Figura 17 se muestra un molinete típico. El método de aforo no difiere mucho del de flotadores puesto que lo que se busca es cuantificar la velocidad de la corriente de agua en ambos casos para una sección del perfil del río en particular.



Figura 17: Molinete típico.

Cuando la corriente es fuerte, el aforo ha de realizarse por medio del carro huaro o si es posible por medio de una embarcación pequeña; una vez establecido el perfil del río en el tramo a medir, se determinan las posiciones que ocupará el molinete y se miden las distancias desde el punto de descenso del molinete hasta la superficie del río  $h_1$ , la corriente tiende a arrastrar el molinete como lo muestra la Figura 18, a raíz de esto, es necesario corregir la profundidad según el ángulo  $\beta$  con el factor  $k$  como sigue:

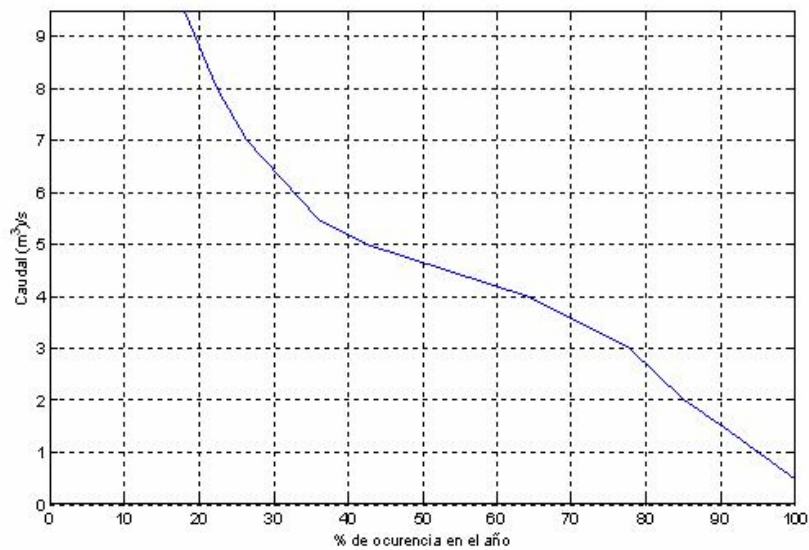
| $\beta^\circ$ | $k$    | $\beta^\circ$ | $k$   |
|---------------|--------|---------------|-------|
| 4             | 0,0006 | 18            | 0,164 |
| 6             | 0,0016 | 20            | 0,204 |
| 8             | 0,0032 | 22            | 0,248 |
| 10            | 0,005  | 24            | 0,296 |
| 12            | 0,0072 | 26            | 0,35  |
| 14            | 0,098  | 28            | 0,408 |
| 16            | 0,128  | 30            | 0,472 |

**Tabla 3: Corrección de la profundidad según el ángulo de inclinación de la cuerda al molinete.**



| Caudal superado (m <sup>3</sup> /s) | Días de ocurrencia | % del año |
|-------------------------------------|--------------------|-----------|
| 9.5                                 | 66                 | 18.08     |
| 8                                   | 82                 | 22.46     |
| 7                                   | 97                 | 26.57     |
| 5.5                                 | 132                | 36.16     |
| 5                                   | 155                | 42.46     |
| 4                                   | 235                | 64.38     |
| 3                                   | 284                | 77.8      |
| 2                                   | 310                | 84.9      |
| 1.5                                 | 330                | 90.4      |
| 0.5                                 | 365                | 100       |

**Tabla 4: Datos para clasificación de caudales**



**Figura 19: Curva de caudales clasificados.**

#### 2.2.4. Caudal reservado

En todo aprovechamiento hidráulico es necesario garantizar una porción de caudal desde la obra de toma hasta el desagüe, de tal manera que la fauna y flora de la zona no se vea afectada por la disminución del volumen de aguas tributado al tramo; este caudal mínimo se conoce como caudal ecológico o caudal reservado, y depende de las características de la zona a proteger, por ejemplo, si la zona es pesquera o no, si la cuenca es afluyente a una reserva natural, o por legislación ambiental, entre otros factores; por lo general, se asume un caudal reservado del 10% del caudal medio anual. Una vez determinado el caudal medio anual y el caudal reservado, se dispone entonces de un caudal aprovechable, cuyo valor dependerá de factores del proyecto como la potencia requerida o costos del mismo entre otros.

### **2.3. EMBALSES**

Son depósitos artificiales que permiten almacenar agua de origen superficial o subterráneo para necesidades tales como acueductos, distritos de riego o reservorios, control de crecientes o erosión, generación de energía eléctrica, entre otros.

#### **2.3.1. Capacidad**

La capacidad del embalse esta dada por el volumen de agua contenido en el vaso de almacenamiento para cierta altura de la presa y aliviadero.

Las relaciones entre niveles que puede tomar el agua en una presa de embalse, en relación con el área de inundación y el volumen de almacenamiento originan las curvas de área y volumen, las cuales tienen mucha importancia en el diseño hidráulico de la presa porque ayudan a:

- a). Encontrar una altura de presa de embalse necesaria para almacenar cierto volumen de agua.
- b). Determinar la cantidad de embalse muerto y el volumen para control de crecientes.
- c). Obtener un conocimiento de la dependencia entre el nivel de agua del embalse y el volumen almacenado, como también del área de inundación.

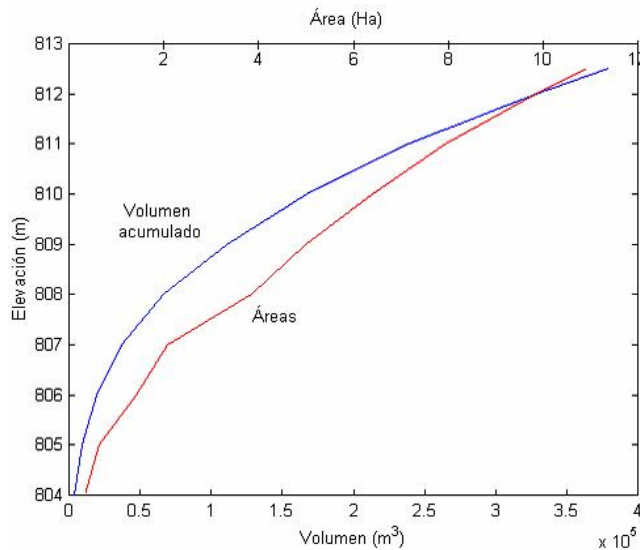
Para explicar la elaboración de las curvas de área y volumen, se tomará un ejemplo a partir de la Tabla 5, para esto es necesario obtener una altimetría del vaso de almacenamiento (columna 1), con curvas de nivel máximo cada 5 m de desnivel constante entre curvas consecutivas, la selección del desnivel o intervalo de altura depende de la topografía del vaso de almacenamiento, siendo menor la magnitud del intervalo si el vaso tiende a ser llano. Levantados los planos del vaso, se procede a calcular las áreas cubiertas por cada curva de nivel (columna 2), luego se obtiene la semisuma de las áreas (columna 3) de las curvas de nivel y se multiplican por el intervalo de nivel entre ellas (columna 4); con esto se determina el volumen parcial almacenado entre curvas (columna 5), y la suma de estos volúmenes parciales representa el volumen almacenado hasta la última curva de nivel tomada (columna 6).

| <b>Elevación (m)</b> | <b>Área (m<sup>2</sup>)</b> | <b>Suma de áreas (m<sup>2</sup>)</b> | <b>Intervalo de altura (m)</b> | <b>Volumen parcial (m<sup>3</sup>)</b> | <b>Volumen acumulado (m<sup>3</sup>)</b> |
|----------------------|-----------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|--|--|
| 800                  | 0                           | 0                                    | 0                              | 0                                      | 0  |
| 801                  | 120                         | 120                                  | 0.5                            | 60                                     | 60                                       |
| 802                  | 540                         | 660                                  | 0.5                            | 330                                    | 390                                      |
| 803                  | 1730                        | 2270                                 | 0.5                            | 1135                                   | 1525                                     |
| 804                  | 3210                        | 4940                                 | 0.5                            | 2470                                   | 3995                                     |
| 805                  | 6415                        | 9625                                 | 0.5                            | 4812.5                                 | 8807.5                                   |

|       |        |        |      |         |          |
|-------|--------|--------|------|---------|----------|
| 806   | 14124  | 20539  | 0.5  | 10269.5 | 19077    |
| 807   | 20846  | 34970  | 0.5  | 17485   | 36562    |
| 808   | 38479  | 59325  | 0.5  | 29662.5 | 66224.5  |
| 809   | 49965  | 88444  | 0.5  | 44222   | 110446.5 |
| 810   | 64130  | 114095 | 0.5  | 57047.5 | 167494   |
| 811   | 79463  | 143593 | 0.5  | 71796.5 | 239290.5 |
| 812   | 98432  | 177895 | 0.5  | 88947.5 | 328238   |
| 812.5 | 109148 | 207580 | 0.25 | 51895   | 380133   |

**Tabla 5: Cálculo para elaborar una curva de área y volumen.**

Tomando ahora las elevaciones en m como referencia en un eje vertical y los datos obtenidos en las columnas de área y volumen acumulado se construye la respectiva curva de área y volumen, mostrada en la Figura 20, del embalse en cuestión.



**Figura 20: Curva de área y volumen.**

### 2.3.2. Volúmenes y alturas características de un embalse

Un embalse consta de las siguientes características, mostradas en la Figura 21:

a). Volumen muerto ( $V_m$ ): o capacidad de azolves, corresponde al volumen del embalse disponible para la acumulación de sedimentos durante un período de tiempo, y este tiempo que tarde en llenar la capacidad de azolves se conoce como la vida útil del embalse.

b). Volumen útil ( $V_u$ ): corresponde al volumen disponible para satisfacer las necesidades de agua para las cuales fue concebido el embalse.

c). Volumen total ( $V_t$ ): es la suma del volumen muerto y el volumen útil.

d). Borde libre (BL): corresponde al volumen del embalse disponible para:

- Almacenar un volumen de agua ocasionado por el tránsito de una creciente de cierto período de tiempo.
- Contener el volumen asociado al oleaje en el embalse por acción del viento.
- Almacenar volúmenes provenientes de crecientes superiores a la del diseño.
- Por posibles grietas en la corona que puedan originar su posterior destrucción y por asentamientos de la presa.

e). Altura o nivel de aguas muertas ( $H_m$ ): corresponde al nivel que alcanzarán los sedimentos durante la vida útil del embalse. El nivel de aguas muertas determinada la cota más baja de las compuertas en la obra de toma.

f). Altura útil ( $H_u$ ): altura medida a partir del nivel de aguas muertas hasta alcanzar la altura necesaria para garantizar el abastecimiento de las demandas y las pérdidas durante el período de utilización del embalse, el

nivel alcanzado se denomina nivel de aguas normales y determina la cota a la cual se ubica el vertedero de excesos del aliviadero.

g). Altura de carga sobre el vertedero ( $H_d$ ): corresponde a la altura asociada a la creciente de cierto período de retorno que transita a través del embalse lleno y descarga sobre el vertedero.

h). Altura de olas ( $H_o$ ): corresponde a la altura que pueden alcanzar las aguas del embalse por acción del viento.

i). Altura libre ( $H_L$ ): corresponde a la altura asociada a los siguientes conceptos:

- Adición por el golpeteo de las olas contra el talud.
- Adición por el tránsito de crecientes superiores a la de diseño.
- Adición para evitar niveles que puedan afectar zonas de la cresta con grietas por efecto del secamiento del material que la conforma.
- Por asentamientos de la presa causada por defectos de construcción o por mala calidad de los materiales usados.

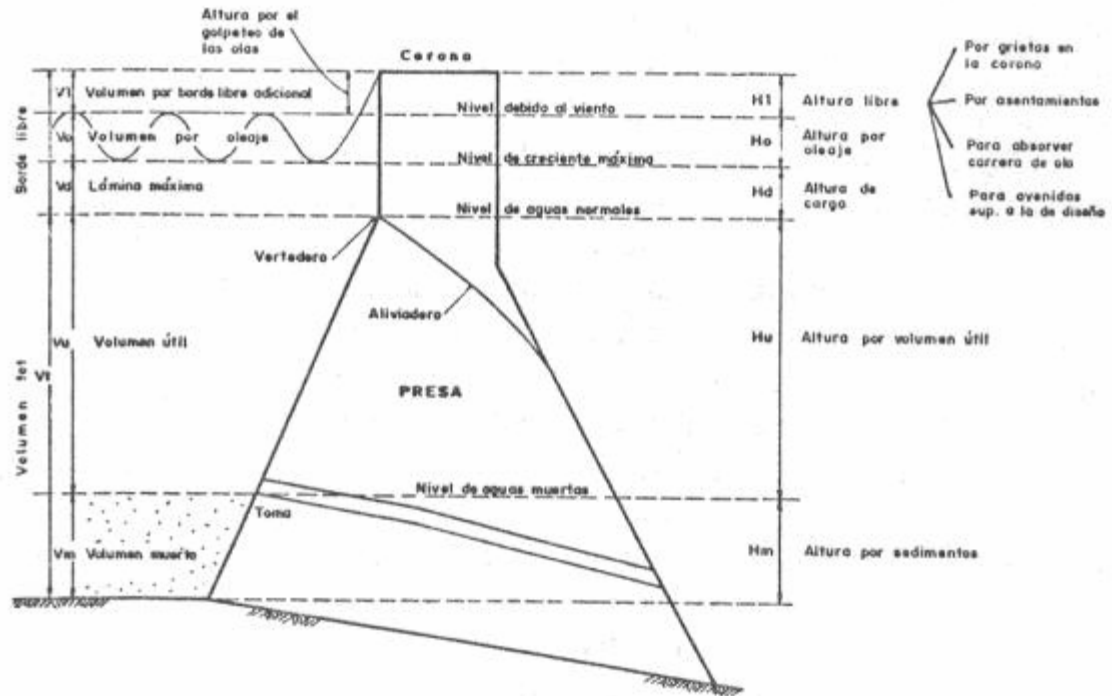


Figura 21: Volúmenes y alturas características de un embalse.

### 2.3.3. Cálculo del volumen muerto

La deposición de los sedimentos en un embalse se realiza de tal forma que los sedimentos gruesos se depositan en el inicio del embalse por medio de desarenadores y los materiales finos son arrastrados hacia las proximidades de la presa donde se depositan. La sedimentación es un factor importante en el diseño de cualquier obra hidráulica puesto que la magnitud y vida útil de la misma están ligadas a ella.

Para calcular el volumen muerto de un embalse pequeño o medio, se puede utilizar la siguiente relación:

$$V_m = V_s \cdot V_{\text{útil}} \quad \text{Ec. 6}$$

Donde,  $V_m$  es el volumen muerto en  $m^3$ ,  $V_s$  es el volumen de sedimentos medios anuales en  $m^3/año$ , y  $V_{útil}$  es la vida útil del embalse en años. Con esto, se puede estimar el valor del volumen muerto, y con la curva de área y volumen se encuentra el valor correspondiente al nivel de aguas muertas  $H_m$ . Para embalses grandes, no se puede aplicar esta expresión puesto que la cuenca embalsada por su gran extensión y volumen se ve más expuesta a efectos tales como contaminación de sus aguas, erosión y otros factores que de no controlarse, pueden reducir la vida útil del embalse significativamente, requiriéndose un estudio detallado de sedimentación en la cuenca para estimar su volumen de sedimentos medios y garantizar el adecuado diseño del embalse.

En el caso de embalses pequeños y medios, al no poseer información sobre la medición de sedimentos, en la práctica se asume un volumen muerto de 10% del volumen útil.

#### **2.3.4. Cálculo del volumen útil**

En el diseño de embalses se utiliza la curva de masas que consiste en un diagrama donde se muestra la variación del volumen acumulado en  $m^3$  o los caudales medios acumulados en  $m^3/s$  como función del tiempo en el que se acumulan los caudales. La curva de masas se puede elaborar con los hietogramas de excesos de caudales medios mensuales; esto es, a los escurrimientos que se deben acumular se les restan, mes a mes, las pérdidas por concepto de infiltración y evaporación y las cantidades de consumo de los usuarios a que haya lugar.

Para satisfacer una cierta cantidad de agua se utilizan las curvas de demanda que pueden ser constantes o variables. Cuando la demanda es constante se convierte en una línea recta con pendiente igual al caudal

requerido, así, cuando se trata de estudiar el posible aprovechamiento de una corriente para varios valores de demanda constantes, surge lo que se llama el abanico de demandas, donde, nuevamente la pendiente de la línea representa el caudal necesario para el consumo seleccionado.

La máxima diferencia entre la curva de demanda y la curva de masas representa el volumen útil del embalse que se requiere para satisfacer cierta demanda.

Por medio de un ejemplo se ilustrará un método analítico de cálculo para el volumen útil de un embalse. En la Tabla 6 se muestran los cálculos para el dimensionamiento de un embalse hipotético en el Río Lebrija con datos recopilados al año 2003 de la estación hidrométrica de Café Madrid, municipio de Girón; los datos de la columna 1 son los meses del año, la columna 2 son los valores de los caudales medios en  $m^3/s$  registrados en el año, la columna 3 es el volumen en  $Mm^3$  que se obtiene multiplicando el valor del caudal medio de la columna 2 por la cantidad de segundos que tenga el mes, 2 592 000 s para un mes de 30 días, la columna 4 es el acumulado de la columna 3. La columna 5 equivale a los valores de la demanda en  $m^3/s$  por la cantidad de segundos del mes en  $Mm^3$ . La columna 6 es el valor del déficit en cada mes y se obtiene restando la columna 5 de la columna 3. La columna 7 contiene las sumatorias de los déficits con valor positivo, y se obtiene sumando los valores positivos de la columna 6, y cuyo valor máximo indicará el volumen útil del embalse, en este ejemplo es de 50  $Mm^3$ .

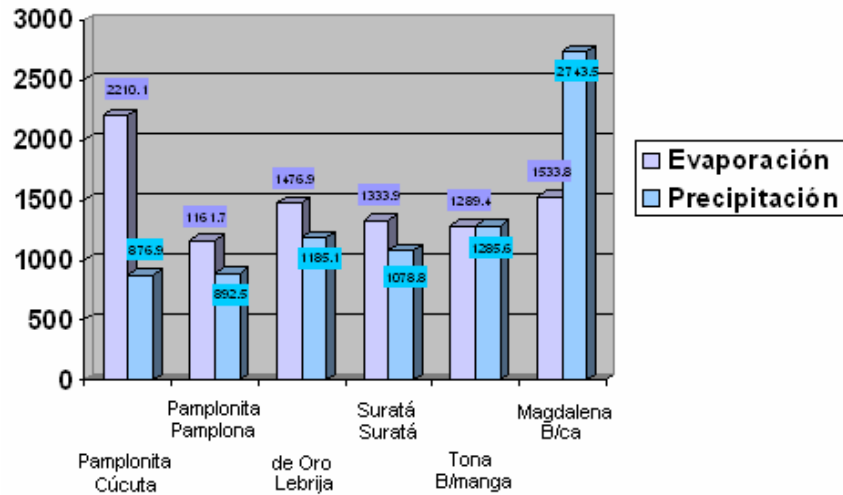
| Mes     | Caudal medio ( $m^3/s$ ) | Volumen de Aportación ( $Mm^3$ ) | Volumen acumulado ( $Mm^3$ ) | Demanda ( $Mm^3$ ) | Déficit D – A ( $Mm^3$ ) | Déficit acumulado ( $Mm^3$ ) |
|---------|--------------------------|----------------------------------|------------------------------|--------------------|--------------------------|------------------------------|
| Enero   | 9.35                     | 24.2352                          | 24.2352                      | 32.2               | 7.9648                   | 7.9648                       |
| Febrero | 10.39                    | 26.93088                         | 51.16608                     | 32.2               | 5.26912                  | 13.23392                     |

|            |       |          |           |      |           |          |
|------------|-------|----------|-----------|------|-----------|----------|
| Marzo      | 9.98  | 25.86816 | 77.03424  | 32.2 | 6.33184   | 19.56576 |
| Abril      | 20.03 | 51.91776 | 128.952   | 32.2 | -19.71776 |          |
| Mayo       | 9.28  | 24.05376 | 153.00576 | 32.2 | 8.14624   | 8.14624  |
| Junio      | 9.11  | 23.61312 | 176.61888 | 32.2 | 8.58688   | 16.73312 |
| Julio      | 7.51  | 19.46592 | 196.0848  | 32.2 | 12.73408  | 29.4672  |
| Agosto     | 4.5   | 11.664   | 207.7488  | 32.2 | 20.536    | 50.0032  |
| Septiembre | 12.6  | 32.6592  | 240.408   | 32.2 | -0.4592   |          |
| Octubre    | 26.49 | 68.66208 | 309.07008 | 32.2 | -36.46208 |          |
| Noviembre  | 27.79 | 72.03168 | 381.10176 | 32.2 | -39.83168 |          |
| Diciembre  | 19.96 | 51.73632 | 432.83808 | 32.2 | -19.53632 |          |

**Tabla 6: Dimensionamiento de embalse del Río Lebrija, zona Café Madrid.**

### **2.3.5. Evaporación de embalses**

La evaporación del agua embalsada constituye un factor importante de pérdidas que ha de tenerse en cuenta para el correcto aprovechamiento del embalse. Este parámetro se puede medir a partir de evaporímetros dispuestos en varios puntos del embalse o se pueden tomar los datos de estaciones meteorológicas cercanas al embalse. En la región, los niveles medios anuales de evaporación y precipitación van desde 1289,4 mm y 1285,6 mm respectivamente para la cuenca del río Tona en el municipio de Bucaramanga, hasta 2210,1 mm y 876,9 mm respectivamente para la cuenca del río Pamplonita en el municipio de Cúcuta. La Figura 22 muestra los niveles de evaporación y precipitación de algunas cuencas de la región. Es de notar el contraste entre las cuencas de los ríos Pamplonita y Magdalena.



**Figura 22: Algunos niveles de evaporación y precipitación**

La evaporación mensual de un embalse se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$Em = 0.398 \cdot D \cdot (es - ed) \cdot \left( \frac{273 - T}{273} \right) \cdot \left( \frac{760}{Pa - es} \right) \quad \text{Ec. 7}$$

Donde:

Em : evaporación mensual en mm,

D : días por mes,

es : presión de saturación media mensual del vapor de agua en mmHg,

ed : presión media mensual del vapor de agua en mmHg,

T : media mensual de temperaturas máximas diarias del agua en °C,

Pa : presión atmosférica en mmHg,

La presión de saturación media mensual se obtiene así:

$$es = ew - 0.00066 \cdot Pa \cdot (Ta - Tw) \cdot (1 + 0.00115 \cdot Tw) \quad \text{Ec. 8}$$

Donde:

$e_w$  : presión del vapor correspondiente a la temperatura media mensual en mmHg,

$T_a$  : temperatura media mensual del aire circundante al embalse en °C,

$T_w$  : temperatura media mensual del agua superficial en °C,

La presión media mensual del vapor se obtiene así:

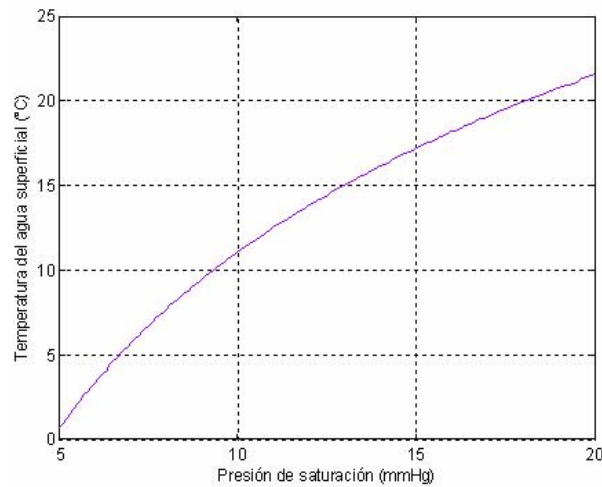
$$e_d = \frac{HR \cdot e_s}{100} \quad \text{Ec. 9}$$

Donde, HR es la humedad relativa de la zona en por ciento.

La Tabla 7 muestra valores experimentales de la presión de saturación del vapor de agua superficial para algunas temperaturas de la misma. Para valores normales de temperatura ambiente, la Figura 23 indica la presión de saturación del vapor de agua en función de la temperatura.

| Temperatura (°C)             | 0    | 20    | 40    | 60     | 80     | 100 |
|------------------------------|------|-------|-------|--------|--------|-----|
| Presión de saturación (mmHg) | 4,56 | 18,08 | 54,72 | 148,96 | 351,12 | 760 |

**Tabla 7: Presión de saturación del vapor de agua según la temperatura**



**Figura 23: Presión de saturación del vapor de agua en función de la temperatura.**

### 2.3.6. Escorrentía

En una cuenca hidrográfica, suponiendo que la cantidad de agua que alcanza los mares u otras cuencas por filtración es muy pequeña y por tanto despreciable, se puede establecer la siguiente relación:

$$P = A + E + R \quad \text{Ec. 10}$$

Donde, P es la precipitación sobre toda la cuenca en mm, E son las pérdidas por evaporación, R es la cantidad de agua retenida o evacuada por el terreno en el período considerado, la última componente de las precipitaciones A alcanza los ríos ya sea superficialmente o filtrándose por el terreno, a esta componente se le llama escorrentía y es la parte aprovechable en la generación de energía eléctrica.

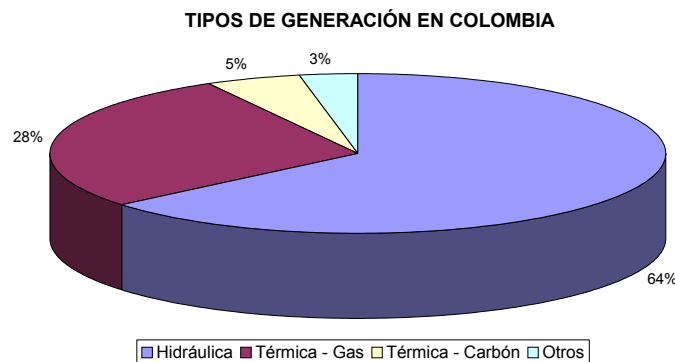
### 3. GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN COLOMBIA

La estructura actual del sector eléctrico en Colombia se inició en 1991, a partir de la expedición de la nueva Constitución, la cual introdujo la competencia, donde fuera posible para el logro de la eficiencia en la prestación de los servicios públicos domiciliarios.

En Colombia existe un único sistema interconectado con redes que enlazan las plantas de generación con los centros de carga de la región andina, litorales Atlántico y Pacífico y parte de los Llanos Orientales. La demanda del resto del país es atendida con generación local y es apenas superior al 1% de la demanda total.

Para el establecimiento del nuevo marco ordenado por la Constitución, se expidió la Ley de Servicios Públicos Domiciliarios (Ley 142 de 1994) y la Ley Eléctrica (Ley 143 de 1994). La Ley Eléctrica define claramente las funciones de dirección, planeación, regulación, operación y control y vigilancia.

En Colombia hay diferentes tipos de generación distribuidos como se muestran en la siguiente figura.



**Figura 24: Tipos de generación en Colombia**

### 3.1. GENERACIÓN HIDRÁULICA DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN COLOMBIA

Las centrales de mayor generación en Colombia son Guavio seguida de las plantas San Carlos y Chivor. A continuación se presenta la distribución de la generación por las principales hidroeléctricas del país, estos porcentajes no son fijos mes a mes debido a diferentes factores, pero las tendencias se mantienen.

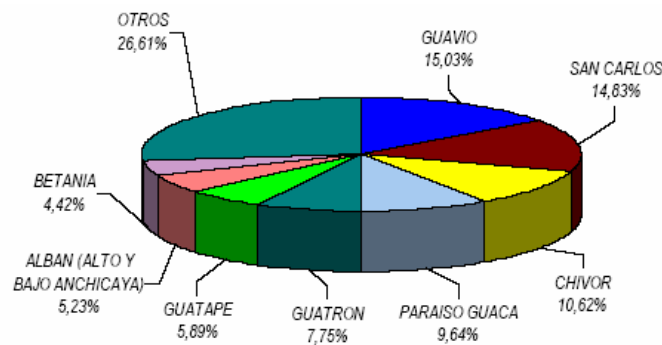


Figura 25: Distribución de las Principales hidroeléctricas

### 3.2. GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN SANTANDER

En cuanto la generación, Santander tiene a través de su electrificadora cinco térmicas a gas con una capacidad efectiva neta total de 139 MW, también tiene cuatro centrales hidroeléctricas con una capacidad total instalada de aproximadamente 24 MW.

El proyecto mas ambicioso de Santander es Hidrosogamoso, una hidroeléctrica que estaría ubicada entre Bucaramanga y Barrancabermeja. Actualmente este proyecto se encuentra inscrito ante la UPME, con una capacidad proyectada de 1035 MW.

### 3.3. PRINCIPIOS DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

La generación es el proceso de convertir energía de alguna forma alterna (mecánica, química, radiante, nuclear, etc.) en energía eléctrica mediante un proceso que se conoce como *conversión de energía electromagnética*. El caso particular que concierne a este proyecto es la conversión de energía mecánica, obtenida a partir de la fuerza hidráulica, en energía eléctrica; este proceso, al igual que los demás, se rige por las leyes del electromagnetismo.

El primer registro de la posibilidad de intercambio entre energía mecánica y eléctrica se debe a Michael Faraday en 1831. Este descubrimiento ha dado lugar al generador y al motor eléctrico, así como a una serie de dispositivos cuyo funcionamiento, principios y características obedecen a las leyes electromagnéticas presentes en la naturaleza.

La conversión de energía electromagnética relaciona las fuerzas eléctricas y magnéticas del átomo con la fuerza mecánica que se aplica a la materia y al movimiento. La energía mecánica se puede convertir en energía eléctrica mediante generadores. Aunque esta conversión puede producir también otras formas de energía, como calor y luz, para la mayor parte de los fines prácticos se mantienen al mínimo esas pérdidas de energía, y se logra una conversión relativamente directa.

Un sistema electromecánico de conversión tiene tres partes esenciales: un sistema eléctrico, un sistema mecánico y un campo que los une, que está representado en el generador. Esta estructura se ilustra en la Figura 26.



**Figura 26: Transferencia de energía**

### **3.3.1. Generador**

Una vez que se ha diseñado la obra civil, de acuerdo a las características del proyecto y procurando obtener el mejor aprovechamiento del recurso hídrico disponible, se procede a determinar las máquinas hidráulicas más convenientes que conviertan, de la manera más óptima, la mayor cantidad de energía hidráulica en energía mecánica, la cual será la encargada de generar la energía eléctrica requerida por medio de un generador.

El generador tiene como misión transformar en energía eléctrica la energía mecánica suministrada por la turbina. En un principio se utilizaban generadores de corriente continua; actualmente, salvo rarísimas excepciones, sólo se utilizan generadores síncronos trifásicos.

Los *generadores síncronos* o *alternadores* son máquinas síncronas utilizadas para convertir potencia mecánica en potencia eléctrica. La característica principal que define su nombre es que sólo puede producir torque promedio diferente de cero cuando la velocidad mecánica coincide con la velocidad angular de las corrientes inyectadas en el estator. En otras palabras la máquina debe girar en sincronismo con las corrientes estáticas.

Éstos generadores están equipados con un sistema de excitación asociado a un regulador de tensión para que, antes de ser conectados a la red, generen energía eléctrica con la misma tensión, frecuencia y ángulo de fase que ésta,

así como la energía reactiva requerida por el sistema una vez conectados. Los generadores síncronos pueden funcionar aislados de la red, y se caracterizan porque la velocidad de giro de la máquina procura mantenerse invariable y puede originar corriente alterna a las frecuencias sincrónicas normalizadas: 50 y 60 Hz.

La estructura de ésta máquina eléctrica tiene dos componentes principales: estator y rotor, separados por un entrehierro.

### **Estator**

Es la parte de la máquina que no se mueve y es la carcasa de la máquina. Aquí se encuentran los *devanados de armadura* o *devanados estáticos* en donde se induce la tensión principal. Está construido con material ferromagnético y en la mayor parte de los casos, ranuras son cortadas en la parte interna y externa del estator en las cuales se colocan conductores.

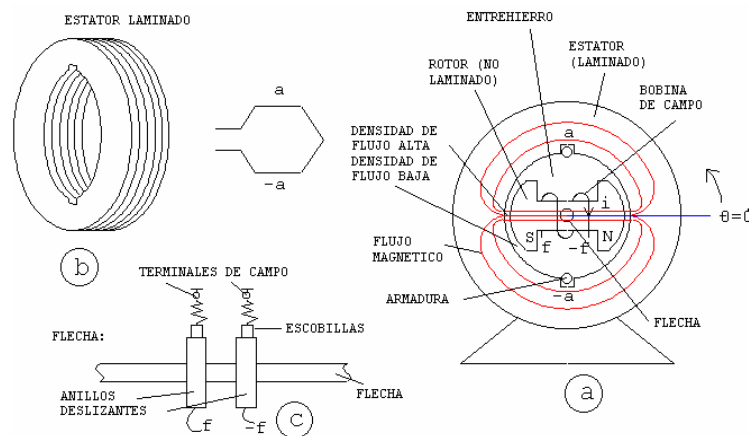
### **Rotor**

Esta parte de la máquina está libre para moverse y generalmente es la parte interna de la máquina. En el rotor se albergan los *devanados de campo* o *devanados del rotor* que producen el campo magnético principal de la máquina.

En esencia, el rotor de un generador sincrónico es un gran electroimán. Los polos magnéticos del rotor pueden ser construidos salientes o no salientes. El *polo saliente* hace referencia a un polo prominente o protuberancia proyectada hacia fuera de la superficie del rotor. Por otro lado, el *polo no saliente* es un polo magnético construido al mismo nivel de la superficie del rotor. Los rotores de polos no salientes se utilizan en rotores de dos y cuatro

polos, mientras que los rotores de polos salientes se utilizan en rotores de cuatro y más polos. Puesto que el rotor está sujeto a campos magnéticos variables, se construye con láminas delgadas agrupadas para reducir las pérdidas de corrientes parásitas.

El funcionamiento básico consiste en aplicar una corriente dc al devanado del rotor para producir un campo magnético, luego se hace girar el rotor mediante un motor primario para generar un campo magnético rotacional dentro de la máquina. Este campo magnético rotacional induce un grupo trifásico de tensiones en los devanados del estator del generador. Un núcleo de hierro se usa para maximizar el acoplamiento entre las bobinas el estator y del rotor, para incrementar el flujo magnético y disminuir el tamaño de la máquina. La Figura 27 ilustra la estructura de una de estas máquinas.



**Figura 27: Generador síncrono. a) Estructura general. b) Estator laminado. c) Detalle de la flecha**

### 3.3.1.1. Velocidad de rotación de un generador síncrono

Las máquinas síncronas son por definición "síncronas", lo cual significa que la frecuencia eléctrica producida está relacionada con la velocidad

angular mecánica del rotor. El campo magnético del rotor apunta en cualquier dirección según gire el rotor. La relación entre la tasa de giro de los campos magnéticos de la máquina y la frecuencia eléctrica del estator se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$f_e = \frac{n_m P}{120} \quad \text{Ec. 11}$$

donde:

$f_e$  = frecuencia eléctrica, en Hertz.

$n_m$  = velocidad mecánica del campo magnético en rpm (igual a la velocidad del rotor para las máquinas sincrónicas)

P = número de polos.

La velocidad de sincronismo se puede deducir de la frecuencia de la red  $f_e$  y el número de polos del generador  $p$  dados por la ecuación 11 de la siguiente forma:

$$n_s = \frac{120 f_e}{p} \quad \text{Ec. 12}$$

| Frecuencia (Hz) | Nº de polos | Velocidad síncrona (rpm) |
|-----------------|-------------|--------------------------|
| 50              | 2           | 3000                     |
|                 | 4           | 1500                     |
|                 | 6           | 1000                     |
|                 | 8           | 750                      |
|                 | 10          | 600                      |
|                 | 12          | 300                      |
| 60              | 2           | 3600                     |

|  |    |      |
|--|----|------|
|  | 4  | 1800 |
|  | 6  | 1200 |
|  | 8  | 900  |
|  | 10 | 720  |
|  | 12 | 600  |

**Tabla 8: Velocidades de sincronismo para 50 y 60 Hz**

Como el rotor gira a la misma velocidad del campo magnético, la ecuación anterior relaciona la velocidad del rotor con la frecuencia eléctrica del estator. Como la potencia eléctrica suele generarse a 50 o 60 Hz, esto significa que el generador debe girar a velocidad constante, dependiente del número de polos de la máquina. Para 60 Hz y 2 polos, el rotor debe girar a 3600 rpm. Algunos valores tabulados se muestran en la Tabla 8.

### 3.3.1.2. Tensión inducida en la armadura

Como ya se dijo anteriormente, el principio de funcionamiento del generador síncrono consiste en aplicar corriente continua al devanado de campo, y un par externo que haga girar el rotor a la velocidad síncrona para producir un flujo total ( $\phi$ ) concatenado por las bobinas del estator. Este flujo es una función periódica del ángulo que forman el eje de las bobinas con el eje polar del rotor. Como consecuencia de esta variación del flujo se induce en la bobina una tensión cuyo valor eficaz para sistemas trifásicos viene dado por:

$$E_A = 4.44 f N \Phi_p K_w \quad \text{Ec. 13}$$

En donde:

$f$  = Frecuencia eléctrica, en Hertz

$\Phi$  = Flujo por polo

$N$  = Número de espiras en serie por fase

$K_w$  = Factor de bobinados

Esta tensión depende del flujo  $\Phi$  en la máquina, de la frecuencia o velocidad de rotación y de la construcción de la máquina, es decir, es directamente proporcional al flujo y a la velocidad, pero el flujo en sí depende de la corriente que fluye en el circuito de campo del rotor.

### 3.3.1.3. Pérdidas

Las pérdidas presentadas en la operación de un generador se pueden clasificar dentro de las siguientes categorías:

- Pérdidas en el cobre de los devanados (rotor y estator)
- Pérdidas en el núcleo
- Pérdidas mecánicas
- Pérdidas adicionales

Las pérdidas en el cobre de una máquina son las pérdidas por calentamiento resistivo en los devanados del estator (armadura) y del rotor (campo) de la máquina y están dadas por la expresión

$$P_{CU} = 3I^2 R \quad \text{Ec. 14}$$

En donde  $I$  puede ser la corriente que fluye en cada fase de la armadura (para las pérdidas en el estator) o en el devanado de campo (para las pérdidas en el rotor), y  $R$  hace referencia a la resistencia de cada fase de la armadura (pérdidas en el estator) o a la resistencia del devanado de campo (pérdidas en el rotor).

Las pérdidas en el núcleo son las pérdidas que ocurren por histéresis y pérdidas por corrientes parásitas en la parte metálica de la máquina.

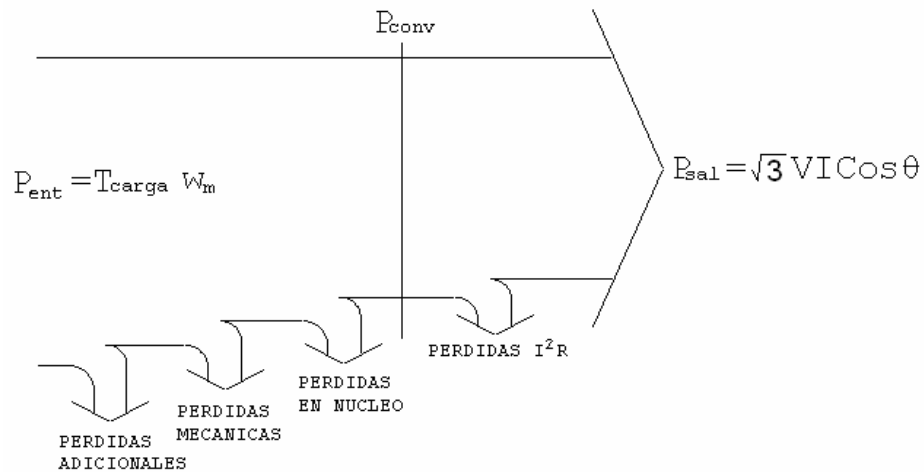
Las pérdidas mecánicas se deben a la fricción de los rodamientos y con el aire. Las pérdidas del núcleo se deben a la histéresis y a las corrientes parásitas. Con frecuencia a estas pérdidas se les conoce como pérdidas de vacío o pérdidas rotacionales de una máquina. En vacío, toda la potencia que entra a la máquina se convierte en estas pérdidas.

Las pérdidas adicionales son todas aquellas pérdidas que no se pueden clasificar en ninguna de las categorías descritas arriba. Por convención, se asume que son iguales al 1% de salida de la máquina.

La eficiencia de una máquina es una relación entre su potencia útil de salida y su potencia total de entrada:

$$\eta = \frac{P_{sal}}{P_{ent}} * 100 \quad \text{Ec. 15}$$

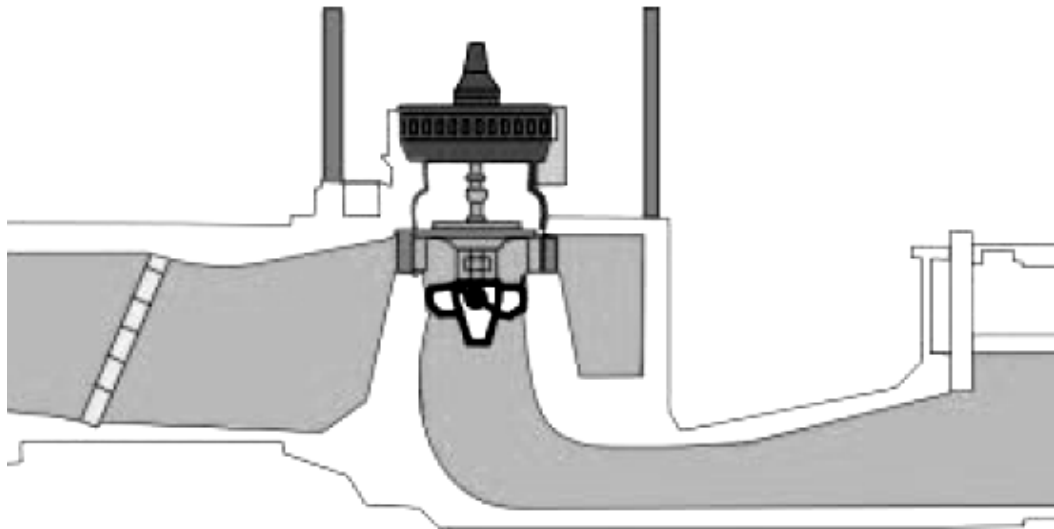
En la Figura 28 se ilustra claramente el proceso de pérdidas.



**Figura 28: Diagrama de flujo de potencia de un generador**

#### 3.3.1.4. Disposición del generador con respecto a la turbina

Los generadores pueden ser de eje horizontal o de eje vertical, independientemente de cual sea el tipo o configuración de turbina utilizada, pero por regla general los generadores adoptan la misma configuración que la turbina. En las turbinas Kaplan o Hélice dispuestas en ángulo se utiliza a veces, para aprovechar mejor el espacio disponible, un reductor con reenvío a  $90^\circ$ . La Figura 29 muestra una configuración de turbina Kaplan de eje vertical, de 214 rpm, directamente acoplada a un generador de 28 polos.



**Figura 29: Ejemplo de disposición de un generador con respecto a una turbina Kaplan**

Otro criterio que caracteriza a los generadores es la disposición de sus cojinetes. Con turbinas Francis de eje horizontal es bastante frecuente utilizar un generador horizontal con dos cojinetes y montar en voladizo el rotor de la turbina para evitar que el eje atravesase el tubo de aspiración, lo que aumentaría la pérdida de carga y complicaría su fabricación. En las turbinas Pelton de eje horizontal suele emplearse la misma configuración, disponiendo también en voladizo el rodete. Estos generadores, si son pequeños, se refrigeran con aire en circuito abierto, y cuando son mayores, se refrigeran por agua en circuito cerrado, empleando intercambiadores agua-aire.

### **3.3.1.5. Excitación**

Para dar excitación a un generador sincrónico se hace circular una corriente continua por el circuito de los polos inductores, lo que representa entre el

0,5% al 1% de la potencia útil del generador. Aunque la tendencia es a utilizar excitatrices estáticas, aún existen excitatrices rotativas.

### **Excitatrices rotativas de corriente continua**

Los inducidos de la excitatriz principal y auxiliar van montados sobre el eje del generador principal utilizando dos excitatrices en cascada se amplifica la potencia y se regula la tensión, actuando sobre un circuito de poca potencia.

### **Excitatrices de corriente alterna sin escobillas**

Se utiliza un pequeño generador de corriente alterna cuyo inducido va montado en el rotor del generador principal. La corriente se rectifica mediante un rectificador, eliminándose el problema de mantenimiento de las escobillas. La tensión se regula mediante un equipo electrónico que actúa sobre la excitación de la excitatriz.

### **Excitatrices estáticas**

La corriente de excitación se extrae de los terminales del generador principal, mediante un transformador. Esta corriente se rectifica mediante un equipo electrónico y se inyecta en el bobinado de excitación rotórica del generador, gracias a un sistema de escobillas y anillos rozantes. Cuando el generador arranca no hay tensión en bornes y por lo tanto no se dispone de corriente de excitación. Los magnetismos remanentes, ayudados si es necesario por una batería, permiten iniciar el funcionamiento, que se normaliza inmediatamente en cuanto la tensión en bornes alcanza un valor modesto. Estos equipos exigen menos mantenimientos, tienen buen rendimiento y la velocidad de respuesta del generador, ante las oscilaciones de tensión, es muy buena.

### **3.3.1.6. Equipos de regulación de tensión y sincronización**

El generador sincrónico se arranca en vacío, actuando sobre la admisión de la turbina para aumentar gradualmente la velocidad. El generador se sincroniza con la red igualando previamente, en la máquina y en la red, las tensiones eficaces, las frecuencias, las fases y el sentido de rotación. Cuando el generador alcanza una velocidad próxima al sincronismo, se arranca la excitación y se regula para que la tensión entre bornes sea igual a la tensión entre barras. En generadores acoplados a una red aislada, el regulador debe mantener un valor predeterminado de la tensión, sea cual sea la carga. Si está acoplado a una red importante, el regulador mantendrá el valor preajustado de la potencia reactiva.

## 4. TURBINAS HIDRÁULICAS

El concepto de generación hidráulica de energía eléctrica da a la turbina un papel muy importante, dentro del proceso de transformación de energía. Su diseño es clave para la obtención de parámetros de funcionamiento aceptables tales como el rendimiento hidráulico, y la vida útil, determinada por los efectos de cavitación en la turbina. En este documento, tomaremos algunos de los conceptos básicos de la mecánica de fluidos aplicadas a las turbinas hidráulicas.

### 4.1. ECUACIONES FUNDAMENTALES

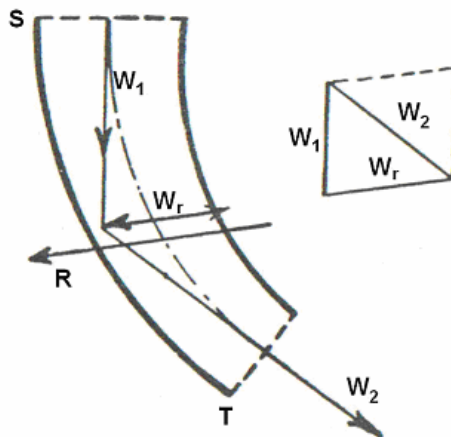
La potencia en caballos de vapor de una turbina hidráulica viene dada por la expresión:

$$P = \frac{1000 \cdot Q \cdot H}{75} \cdot \rho \quad \text{Ec. 16}$$

Donde, Q es el caudal en m<sup>3</sup>/s que surte a la turbina, y H el salto neto en m que actúa sobre ella, y  $\rho$  es el rendimiento de la turbina.

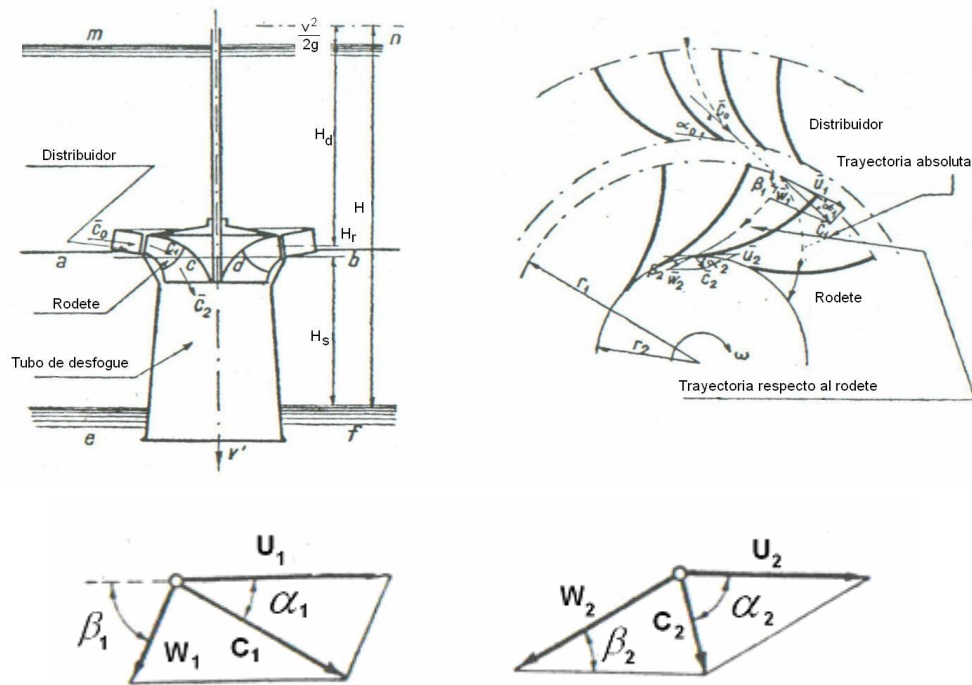
Considerando ahora, la Figura 30, el agua llena a presión el tubo S-T, con una velocidad absoluta  $w_1$  a la entrada y con una velocidad  $w_2$  a la salida, aquí las velocidades absolutas serán de diferente dirección puesto que el tubo es curvo, caso contrario tendrían la misma dirección, y como las secciones de entrada y salida son diferentes, la magnitud de las velocidades absolutas serán distintas si hay continuidad en el caudal. Esta transformación de  $w_1$  en  $w_2$  es provocada por la acción de las superficies curvas y por la

presión del agua, acelerándola si el tubo es convergente y desacelerando si es divergente. La velocidad resultante  $w_r$  es la que actúa sobre las paredes del tubo. Esto también se aplica para el caso en el que el agua entra sin presión en el tubo, a presión atmosférica, donde las velocidades de entrada y salida conservarán la misma magnitud, pero su dirección será distinta, apoyándose sobre la superficie cóncava del mismo la velocidad  $w_r$ . Según el agua circule en los conductos de la turbina sometida a una presión variable o a la presión atmosférica, la turbina se llama de reacción y de acción respectivamente.



**Figura 30: Principio de reacción de las turbinas.**

La Figura 31 muestra el esquema básico de una turbina de reacción. Se consideran las alturas  $H$ ,  $H_d$ ,  $H_r$ , y  $H_s$  constantes, compensándose los caudales gastados en la turbina con el caudal suministrado por el río, y la velocidad de acercamiento  $v$  del nivel del agua es pequeña.



**Figura 31: Esquema básico de la turbina de reacción y diagrama de velocidades.**

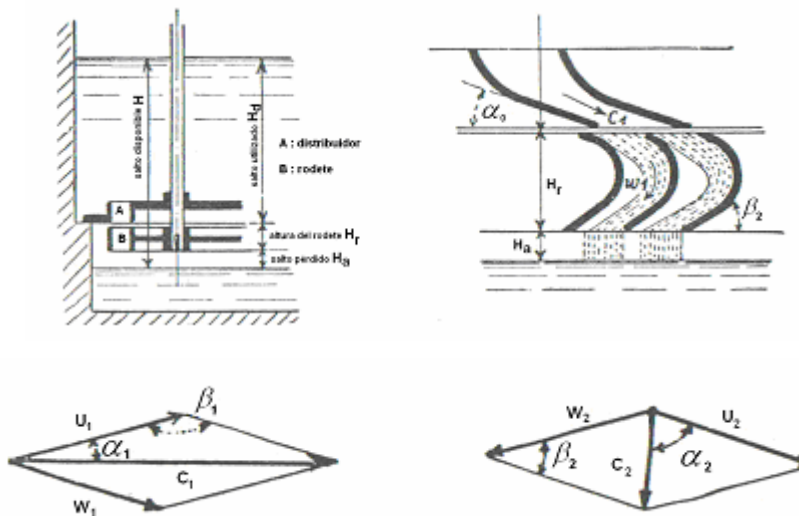
Parte de la altura  $H_d$  formará a la salida del distribuidor la velocidad  $\vec{C}_0$  que tendrá la misma dirección que los álabes del distribuidor, formando un ángulo  $\alpha_0$  con la velocidad tangencial del rodete  $\vec{U}_1$ . La velocidad de entrada del agua en el rodete  $\vec{C}_1$  se descompone en una velocidad perimetral de arrastre del rodete o tangencial  $\vec{U}_1$  y una velocidad relativa del agua respecto del rodete  $\vec{W}_1$ , es decir:

$$\vec{C}_1 = \vec{U}_1 + \vec{W}_1 \quad \text{Ec. 17}$$

A la salida del rodete, se tiene la velocidad  $\vec{C}_2$ , que se descompone en la velocidad perimetral o tangencial  $\vec{U}_2$  y la velocidad relativa del agua respecto del rodete  $\vec{W}_2$ , o sea:

$$\vec{C}_2 = \vec{U}_2 + \vec{W}_2 \quad \text{Ec. 18}$$

La Figura 32 muestra el esquema básico para una turbina de acción, donde se cumplen las mismas expresiones vectoriales anteriores.



**Figura 32: Esquema básico de la turbina de acción y diagrama de velocidades.**

Considerando la siguiente notación:

$p_1$  : presión en el plano horizontal a-b de la Figura 32, a la entrada del rodete,

$p_2$  : presión en el plano horizontal c-d de la Figura 32, a la salida del rodete,

$p_a$  : presión atmosférica,

$r_1$  : radio de entrada del rodete,

$r_2$  : radio de salida del rodete,

$C_0$  : velocidad absoluta del agua a la salida del distribuidor,

$C_1$  : velocidad absoluta del agua a la entrada del rodete,

$C_2$  : velocidad absoluta del agua a la salida del rodete,

$v$  : velocidad del agua en la cámara de la turbina, superficie m-n,

$v'$  : velocidad del agua en el canal de desagüe,

$U_1$  : velocidad tangencial del rodete a la entrada del agua en él,

$U_2$  : velocidad tangencial del rodete a la salida del agua en él,

$W_1$  : velocidad relativa del agua a la entrada del rodete,

$W_2$  : velocidad relativa del agua a la salida del rodete,

$\alpha_1$  : ángulo formado por  $\vec{C}_1$  y  $\vec{U}_1$ ,

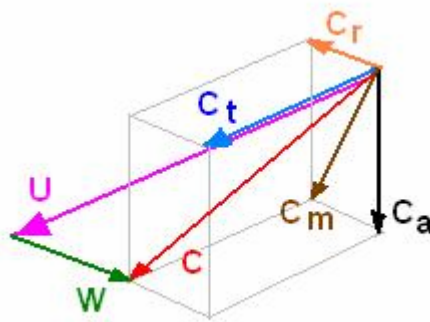
$\alpha_2$  : ángulo formado por  $\vec{C}_2$  y  $\vec{U}_2$ ,

$\gamma$  : peso de un metro cúbico de agua en  $\text{N/m}^3$ .

Los subíndices a, t y r de las velocidades corresponden a las componentes axial, tangencial y radial al eje del rodete, respectivamente. La velocidad absoluta del agua  $C$  tiene tres componentes, los antes mencionados; la inclinación del plano que contiene la velocidad absoluta y la velocidad tangencial esta determinado por las componentes radial y axial, cuya suma vectorial resulta en la velocidad meridiana  $C_m$ , la cual al desplazarse provoca un cambio en la inclinación del plano que contiene el triángulo de velocidades como lo muestra la Figura 33.

La componente axial produce un empuje que no es útil en la transferencia de energía del fluido a una turbomáquina, esta componente se puede atenuar con la instalación de unidades gemelas, que reduciría los esfuerzos mecánicos a los que esta sometida la sección transversal de la misma, sin embargo, para las turbinas este efecto se desprecia porque se considera que el plano con el triángulo de velocidades esta contenido en la sección transversal de la turbina, es decir, el agua ingresa paralelamente al plano y la componente axial para efectos de cálculo es cero.

Mientras que la componente radial produce esfuerzos mecánicos sobre el eje y sus cojinetes, que se pueden atenuar con la casi perfecta simetría del rodete para ubicar el centro de masa sobre el eje de rotación; así, en este orden de ideas, la componente meridiana ocasiona problemas que con atención se pueden reducir o corregir mientras que la componente tangencial es la única que produce par mecánico útil ya que es perpendicular al radio de la máquina.



**Figura 33: Componentes de velocidad**

El par que actúa sobre el eje de la turbina debe ser igual a la diferencia entre los momentos respecto a dicho eje de las velocidades que entran y salen de la turbina en la unidad de tiempo. Puesto que las velocidades que producen par respecto al eje son las componentes tangenciales  $\vec{C}_{1t}$  y  $\vec{C}_{2t}$ , y si Q es el gasto o caudal de la turbina, se tiene:

$$M = \frac{\gamma \cdot Q}{g} \cdot C_{1t} \cdot r_1 - \frac{\gamma \cdot Q}{g} \cdot C_{2t} \cdot r_2 = \frac{\gamma \cdot Q}{g} (C_{1t} \cdot r_1 - C_{2t} \cdot r_2) \quad \text{Ec. 19}$$

La potencia proporcionada entonces por la turbina será:

$$P = M \cdot \omega = \rho \cdot \gamma \cdot H \cdot Q = \frac{\gamma \cdot Q}{g} \cdot \omega (C_{1t} \cdot r_1 - C_{2t} \cdot r_2) = \frac{\gamma \cdot Q}{g} (C_1 \cdot U_1 \cdot \cos \alpha_1 - C_2 \cdot U_2 \cdot \cos \alpha_2)$$

$$\rho \cdot g \cdot H = C_1 \cdot U_1 \cdot \cos \alpha_1 - C_2 \cdot U_2 \cdot \cos \alpha_2 \quad \text{Ec. 20}$$

Donde,  $\rho$  es el rendimiento de la turbina, a esta última expresión se le llama ecuación fundamental de las turbinas, o ecuación de Euler.

Conviene que  $v'$  sea muy pequeña, pero no se puede anular porque el agua necesita velocidad para alejarse de la turbina y así hacer circular caudal a través de ella. El número de álabes debe ser diferente al del distribuidor para evitar vibraciones por la coincidencia de ambos grupos de álabes. Por razones constructivas el ángulo  $\beta_2$  no puede hacerse muy pequeño. El entrehierro presente entre la turbina y el distribuidor debe ser muy pequeño, para que el movimiento se dé sin roces y para que la cantidad de agua que pasa a través de él sea pequeña. Es conveniente para un máximo rendimiento, que el segundo término de la ecuación de Euler sea el menor posible, para ello,  $\alpha_2 = 90^\circ$ , así se tiene entonces:

$$\rho' \cdot g \cdot H = U_1 \cdot C_1 \cdot \cos \alpha_1 \quad \text{Ec. 21}$$

Es de anotar también que esta condición se cumple para una velocidad determinada, ya que al variar las condiciones de salto o caudal, puede aumentar o disminuir la velocidad angular, con lo que el diagrama vectorial de velocidades cambiaría al surgir componentes tangenciales de la velocidad  $\vec{C}_2$ .

En las turbinas de reacción, solo una parte de la energía total se transforma en energía cinética a la entrada del rodete, la restante actúa bajo la forma de presión. Se define entonces el grado de reacción  $r$  de la turbina como la

relación entre la energía utilizada como presión y la energía total del salto, así:

$$r = \frac{\frac{p_1}{\gamma}}{H} = \frac{H - \frac{C_1^2}{2 \cdot g}}{H} \quad \text{Ec. 22}$$

El grado de reacción es nulo en las turbinas de acción.

#### 4.1.1. Turbinas semejantes

En diseño y experimentación, se deben conocer los efectos que producen las variaciones de diámetro del rodete y la altura del salto, conservando semejantes eso sí, la forma del rodete y el caudal dentro de él, con el fin de poder aplicar a otra escala de datos obtenidos con un modelo reducido o determinar en qué condiciones una turbina puede emplear cierto salto diferente al que estaba destinada. La velocidad  $N$  en revoluciones por minuto de una turbina es:

$$N = 60 \cdot \frac{\omega}{2 \cdot \pi} = 60 \cdot \frac{U_1}{\pi \cdot D_1} = N' \cdot \frac{\sqrt{H}}{D_1} \quad \text{Ec. 23}$$

Donde,  $D_1$  es el diámetro de entrada del rodete, y se define el número de revoluciones característico  $N'$ , que es equivalente para  $D_2$ , como:

$$N' = \frac{60 \cdot U_1}{\pi \sqrt{H}} = \frac{60 \cdot U_2}{\pi \sqrt{H}} \quad \text{Ec. 24}$$

Que es el número de revoluciones a las que tendría que girar un rodete de diámetro de entrada unitario bajo un salto unitario, para que el régimen de

circulación del agua sea semejante al de la turbina en estudio. El gasto será igual a la superficie de salida del rodete por la velocidad axial media  $C_{2a}$  en esta superficie, o sea:

$$Q = C_{2a} \cdot \frac{\pi \cdot D_2^2}{4} \quad \text{Ec. 25}$$

Donde,  $D_2$  es el diámetro de salida del rodete, y se define el gasto característico como:

$$Q' = \frac{C_{2a} \cdot \pi}{4\sqrt{H}} \quad \text{Ec. 26}$$

Que es caudal que pasaría por un rodete con diámetro de salida unitario bajo un salto unitario. Luego la potencia expresada en caballos vapor está dada por:

$$P = \frac{1000 \cdot \rho \cdot H \cdot Q}{75} = P' \cdot D_2^2 \cdot H \sqrt{H} \quad \text{Ec. 27}$$

Donde  $\rho$  es el rendimiento de la turbina, y  $P'$  es la potencia característica de la turbina, definida como:

$$P' = \frac{1000 \cdot \rho}{75} \cdot Q' \quad \text{Ec. 28}$$

Que es la potencia que desarrollaría un rodete con diámetro de entrada unitario bajo un salto unitario. Para efecto del régimen de circulación del agua en las turbinas, y por tanto de rendimientos, un aumento del salto es equivalente a una disminución de la velocidad, conservando la condición:

$$\frac{n}{\sqrt{H}} = cte \quad \text{Ec. 29}$$

#### 4.1.2. Velocidad específica

Al sustituir  $D_2$  obtenido de la ecuación 27, en la ecuación 23, se tiene:

$$N = \frac{N' \sqrt{P'} \sqrt{H} \sqrt{H^4 \sqrt{H}}}{\sqrt{P}} = N_s \cdot \frac{H^4 \sqrt{H}}{\sqrt{P}} \quad \text{Ec. 30}$$

Donde  $N_s$  se define como la velocidad específica así:

$$N_s = N' \sqrt{P'} \quad \text{Ec. 31}$$

Que corresponde al número de revoluciones de un rodete semejante, que bajo un salto unitario produce una potencia unitaria, es decir, de un caballo vapor. Este parámetro es importante a la hora de seleccionar la turbina pues al ser independiente del diámetro, puede definir una serie de turbinas semejantes en función del salto y el caudal, que son datos conocidos.

## 4.2. TURBINA PELTON

### 4.2.1. Generalidades

La turbina Pelton debe su nombre a Lester Allan Pelton (1829-1908), nacido en Vermillion, estado de Ohio (EUA). Después de varios ensayos logro la patente de la rueda hacia el año de 1880. Desde entonces ha tenido gran desarrollo como los materiales de construcción, modificación de la forma de

los álabes todo esto con el fin de mejorar su rendimiento y conseguir mejores aplicaciones.

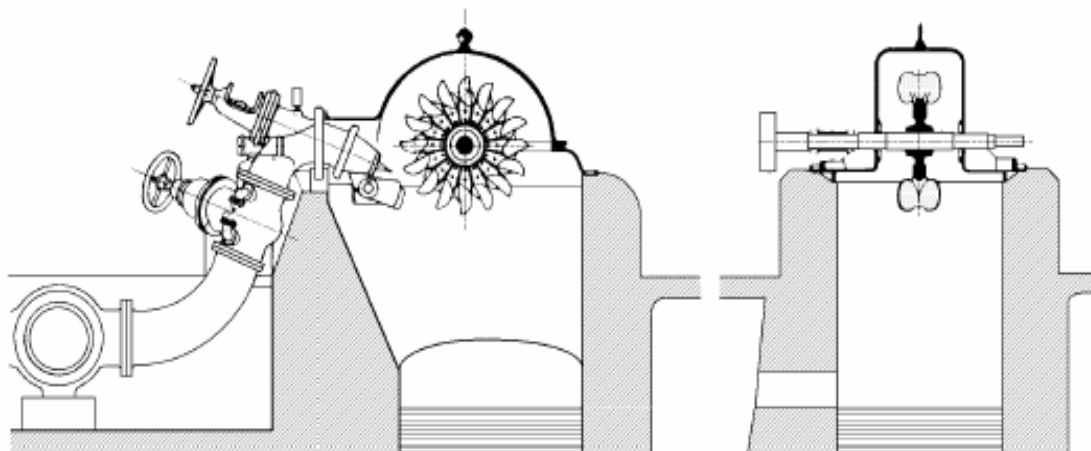
#### **4.2.2. Funcionamiento**

El funcionamiento básico consiste en conducir desde un depósito a gran altura a través de un canal o una conducción forzada hasta una boquilla inyectora que convierte la energía cinética del agua en un chorro a presión. Estas turbinas tienen la peculiaridad de aprovechar solamente la energía cinética del fluido; no existe, pues, gradiente de presión entre la entrada y la salida de la máquina, siendo entonces el grado de reacción igual a cero.

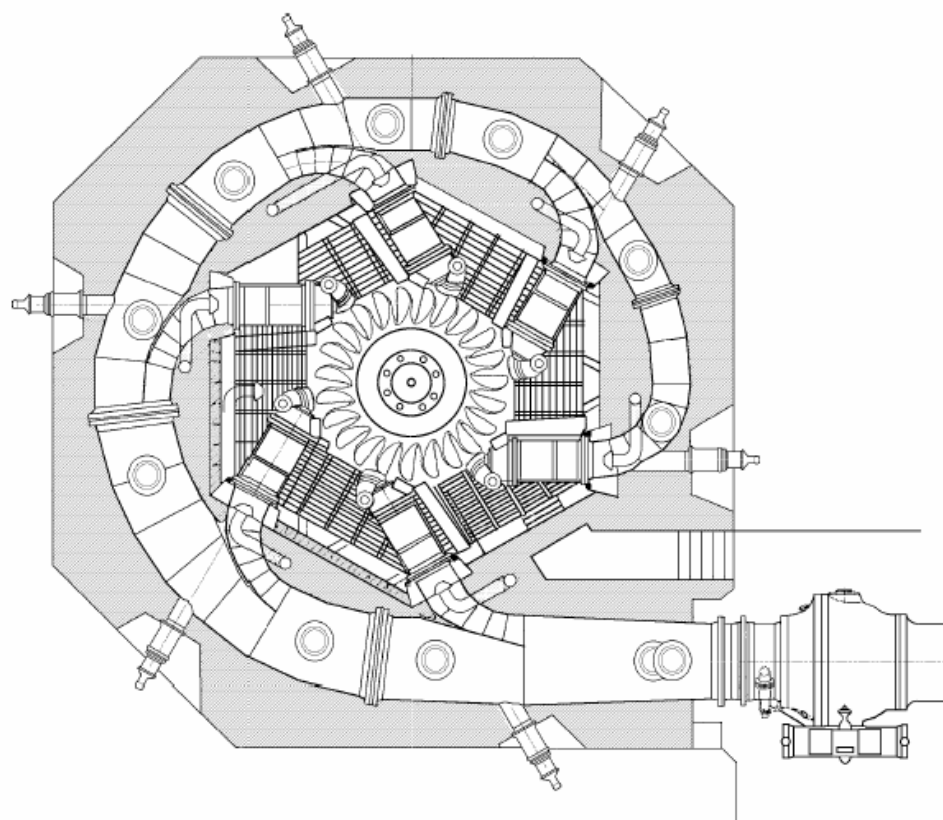
#### **4.2.3. Clasificación**

La clasificación más general que puede hacerse de las turbinas Pelton es en tipos de eje horizontal y tipos de eje vertical. También se puede clasificar de acuerdo al número de chorros.

En general la definición del número de chorros se ve influenciada en gran medida por la disposición del eje de la rueda; en turbinas Pelton con eje horizontal, aunque la inspección de la máquina es más accesible, resulta complicado disponer en un plano vertical tanto las tuberías de abastecimiento como los inyectores, por ello es común colocar uno o dos chorros. Para el caso de turbinas Pelton de eje vertical, la disposición de tuberías e inyectores resulta más cómoda ya que se encuentra en un plano horizontal, lo que permite colocar un mayor número de chorros por rueda. No obstante la inspección de la máquina es más compleja.



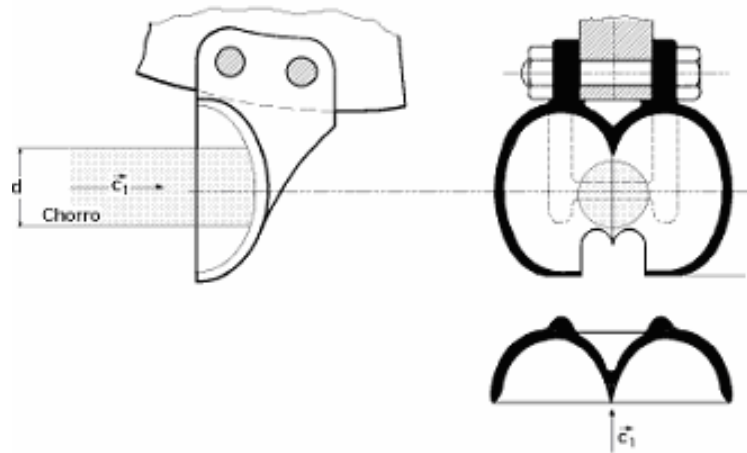
**Figura 34: Turbina Pelton de un chorro y eje horizontal**



**Figura 35: Turbina Pelton de seis chorros y eje vertical**

#### 4.2.4. Componentes

a). Los álabes: La turbina Pelton está formada por los álabes, que es una especie de doble cucharas que, sometidas al impacto del agua, giran produciendo el giro continuo del eje.

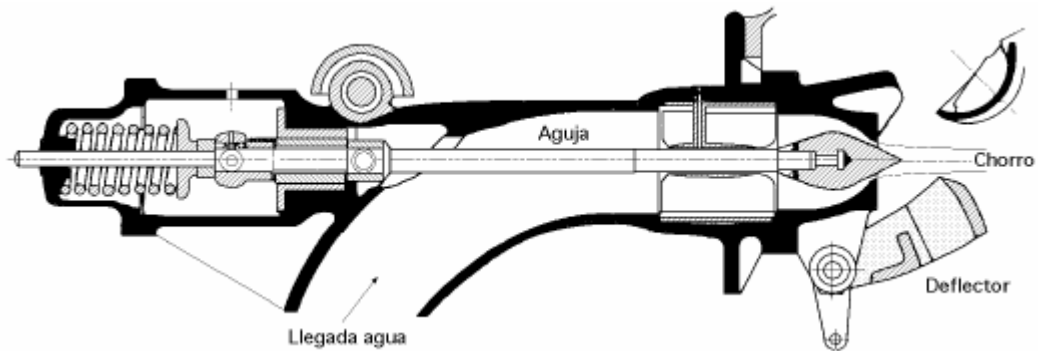


**Figura 36: Álabes de la turbina Pelton**

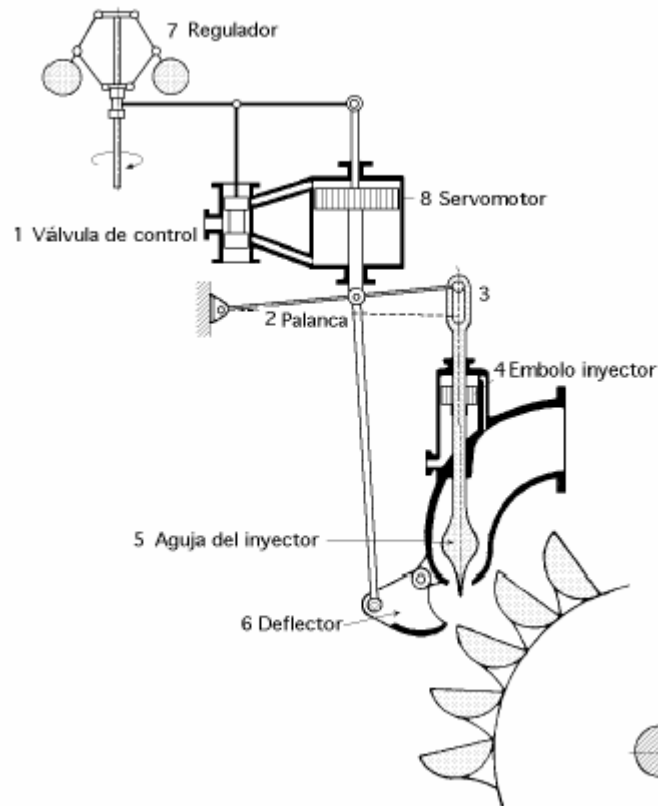
b). El inyector: este es el órgano regulador del caudal del chorro. En las instalaciones de ruedas Pelton, el flujo del agua se controla abriendo y cerrando las boquillas inyectoras. Estos inyectoros constan de una válvula de aguja cuya carrera determina el grado de apertura del mismo.

La variación del caudal del chorro para regular la potencia se consigue mediante una aguja de forma especial, con cuyo accionamiento se puede estrangular la sección de salida de la boquilla; su regulación puede ser manual o automática mediante un servomotor. Tiene además otro sistema de regulación por desviación del chorro, que consiste en una superficie metálica llamada deflector, que se introduce en medio del chorro, dividiéndolo y

desviando una parte del mismo, de forma que en vez de dirigirse contra los álabes, sale lateralmente sin producir ningún efecto útil.



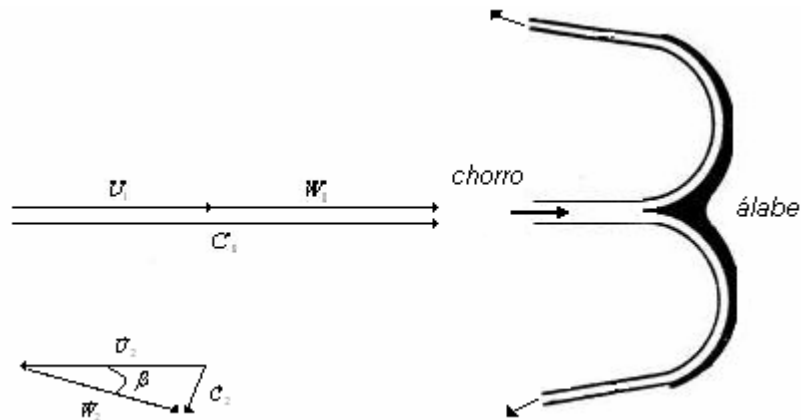
**Figura 37: Inyector de una turbina Pelton**



**Figura 38: Esquema de regulación en una turbina Pelton**

#### 4.2.5. Diagrama de velocidades

En la Figura 39 se presenta el esquema de un corte del álabe de una turbina Pelton producido por un plano perpendicular al radio de la rueda (paralelo al eje de la turbina). El chorro con velocidad  $C_1$  ataca el álabe en la arista media de la doble cuchara, la cual lo divide en dos porciones iguales de agua que recorren el álabe en dirección axial y escapan por el borde de fuga hacia el socaz.



**Figura 39: Diagrama de velocidades de la turbina Pelton**

La ecuación vectorial de la entrada del agua al álabe es:

$$\vec{C}_1 = \vec{U}_1 + \vec{W}_1 \quad \text{Ec. 17}$$

Que se convierte en forma escalar:

$$C_1 = U_1 + W_1 \quad \text{Ec. 32}$$

Como se trata de una maquina axial, a la salida la velocidad base conserva su valor en magnitud y sentido. Por tanto la ecuación vectorial a la salida es:

$$\vec{V}_2 = \vec{U}_2 + \vec{W}_2 \quad \text{Ec. 33}$$

El ángulo a la salida del álabe, para este caso  $\beta$ , debe ser muy pequeño debido a que la dirección del flujo del agua no debe incidir sobre la cuchara siguiente. Por tanto la magnitud de las velocidades relativas es la misma, esto es:

$$W_2 = W_1 = W \quad \text{Ec. 34}$$

En efecto de la ecuación de la transferencia bajo la forma de componentes energéticas:

$$E = \frac{C_1^2 - C_2^2}{2 \cdot g} + \frac{U_1^2 - U_2^2}{2 \cdot g} + \frac{W_2^2 - W_1^2}{2 \cdot g} \quad \text{Ec. 35}$$

En este caso como se trata de una turbina Pelton, que es una turbina de acción, un valor cero para la carga estática, representada por los dos términos:

$$\frac{U_1^2 - U_2^2}{2 \cdot g} + \frac{W_2^2 - W_1^2}{2 \cdot g} = 0 \quad \text{Ec. 36}$$

Y como  $U_1 = U_2$  el primer término es cero, por tanto también lo será el segundo, con lo que:

$$W_2 = W_1 = W \quad \text{Ec. 37}$$

La ecuación de la transferencia se reduce en la turbina Pelton a:

$$E = \frac{C_1^2 + C_2^2}{2 \cdot g} \quad \text{Ec. 38}$$

Y bajo la forma de Euler a:

$$E = \frac{U}{g} \cdot (C_{1t} - C_{2t}) \quad \text{Ec. 39}$$

Generalmente se expresa la energía transferida en función del ángulo  $\beta$ . Para ello es suficiente con sustituir los valores de  $C_1$  y  $C_2$  en la ecuación 38 y combinarla con la ecuación del triángulo de velocidades a la entrada:

$$C_1^2 = (U_1 + W_1)^2 = U_1^2 + 2 \cdot U_1 \cdot W_1 + W_1^2 \quad \text{Ec. 40}$$

Del triángulo de velocidades a la salida obtenemos:

$$C_2^2 = U_2^2 + W_2^2 - 2 \cdot U_2 \cdot W_2 \cdot \cos \beta \quad \text{Ec. 41}$$

Y como  $U_1 = U_2 = U$  y  $W_1 = W_2 = W$  queda:

$$C_1^2 - C_2^2 = 2 \cdot U \cdot W \cdot (1 + \cos \beta) \quad \text{Ec. 42}$$

Luego sustituyendo en la ecuación 36:

$$E = \frac{U \cdot W}{g} \cdot (1 + \cos \beta) \quad \text{Ec. 43}$$

Que es la expresión de la energía transferida en una turbina Pelton en función del ángulo del álabe a la salida.

Como el agua no puede ceder toda su energía al rotor a su paso entre los Álaves; necesita conservar una energía cinética residual para que pueda correr hasta la descarga, manteniendo unas condiciones de flujo estable.

Se define entonces un factor de utilización, que se designa por la letra griega  $\varepsilon$  y que viene dado por la relación siguiente:

$$\varepsilon = \frac{\text{Energía utilizada}}{\text{Energía utilizable}} = \frac{E}{E + \frac{C_2^2}{2 \cdot g}} = \frac{U \cdot W \cdot (1 + \cos \beta)}{\frac{C_1^2}{2}} \quad \text{Ec. 44}$$

Y como  $W = C_1 - U$ , sustituyendo queda:

$$\varepsilon = \frac{2 \cdot U \cdot (C_1 - U) \cdot (1 + \cos \beta)}{C_1^2} = 2 \cdot \left[ \frac{U}{C_1} - \left( \frac{U}{C_1} \right)^2 \right] \cdot (1 + \cos \beta) \quad \text{Ec. 45}$$

Derivando respecto a  $\frac{U}{C_1}$  como variable independiente e igualando a cero, se puede calcular el valor de esta variable que hace máximo el coeficiente de utilización  $\varepsilon$ , es decir:

$$\frac{d\varepsilon}{d\left(\frac{U}{C_1}\right)} = 0 = 2 \cdot \left( 1 - 2 \cdot \frac{U}{C_1} \right) \cdot (1 + \cos \beta) \quad \text{Ec. 46}$$

La segunda derivada es negativa, lo que prueba que la primera es un máximo. Como se está calculando  $U/C_1$  para una turbina determinada, con un ángulo del álabe a la salida fijo, se tiene que la expresión anterior solo puede anularse el primer término, es decir:

$$1 - 2 \cdot \frac{U}{C_1} = 0 \quad \text{Ec. 47}$$

De donde:

$$\frac{U}{C_1} = \frac{1}{2} \quad \text{Ec. 48}$$

Esta ecuación representa la condición para obtener una máxima utilización de la energía del agua con una turbina Pelton.

#### 4.2.6. Dimensionamiento de la turbina Pelton

Partiendo de la ecuación 48 que representa la condición de máxima utilización de la turbina, podemos establecer la siguiente relación:

$$\frac{1}{2} = \frac{U}{C} = \frac{\pi \cdot n \cdot D}{\sqrt{2 \cdot g \cdot H}} \quad \text{Ec. 49}$$

Lo cual es proporcional a:

$$\frac{n \cdot D}{\sqrt{g \cdot H}} = \frac{\sqrt{2}}{2 \cdot \pi} \approx 0,225 \quad \text{Ec. 50}$$

Donde:

$U$  esta dada en función del diámetro del rodete y la velocidad de giro.

$C$  esta dada en función de la gravedad y el salto.

La velocidad específica para la turbina Pelton viene dada por:

$$N_s = \frac{n \cdot D}{\sqrt{g \cdot H}} \cdot \sqrt{\frac{Q}{D^2 \cdot \sqrt{g \cdot H}}} = \frac{n \cdot \sqrt{Q}}{(g \cdot H)^{3/4}} \quad \text{Ec. 51}$$

El cual es el mismo resultado obtenido en la ecuación 30, solo que en función de otras de otras variables.

Si al recíproco del segundo término de la ecuación anterior lo denominamos  $\Delta$  obtenemos la siguiente expresión adimensional:

$$\Delta = \sqrt{\frac{D^2 \cdot \sqrt{g \cdot H}}{Q}} = \frac{D \cdot (g \cdot H)^{1/4}}{\sqrt{Q}} \quad \text{Ec. 52}$$

Multiplicando la ecuación  $N_s$  con  $\Delta$  obtenemos:

$$N_s \cdot \Delta = \frac{n \cdot D}{\sqrt{g \cdot H}} \quad \text{Ec. 53}$$

Con la cual obtendríamos la grafica de una hipérbola, ya que el resultado es igual al obtenido en la ecuación 50, que para nuestro caso es una constante de un valor aproximado a 0,225.

Ahora si hacemos el siguiente artificio matemático:

$$\text{Log}(Ns) + \text{Log}(\Delta) = \text{Log}\left(\frac{n \cdot D}{\sqrt{g \cdot H}}\right) \quad \text{Ec. 54}$$

Obtendremos una línea recta que se ajusta bastante al diagrama de Cordier. Este diagrama, mostrado en la Figura 40 y que viene dado en escala logarítmica, presenta una correlación empírica entre estos dos parámetros que nos permite hacer un mejor cálculo de la construcción de la turbina Pelton.

El caudal que llega a una turbina Pelton considerando el número de chorros  $J$  es:

$$Q = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \cdot J \quad \text{Ec. 55}$$

Multiplicando ambos lados de la ecuación por  $1/D^2$  obtenemos:

$$\frac{Q}{D^2 \cdot \sqrt{g \cdot H}} = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2 \cdot \sqrt{2} \cdot J \quad \text{Ec. 56}$$

Reemplazando en la ecuación 51 por las ecuaciones 50 y 56 nos queda:

$$ns = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot \sqrt{2}}} \cdot \left(\frac{d}{D}\right) \cdot \sqrt{J} \quad \text{Ec. 57}$$

Donde  $D/d$  es la relación de diámetros de la rueda y de la boquilla del chorro. La experiencia conduce a deducir que los valores para los cuales se obtienen buenos rendimientos es la siguiente relación:

$$12 \geq \frac{D}{d} \geq 8$$

Y comúnmente para lograr una eficiencia máxima, se adopta la relación

$$D/d = 12.$$

Para obtener los límites de trabajo de la rueda Pelton, calcularemos la rueda Pelton más pequeña y la más grande.

La Pelton más pequeña es obtenida cuando hacemos

$$D/d = 12 \text{ y } J = 1,$$

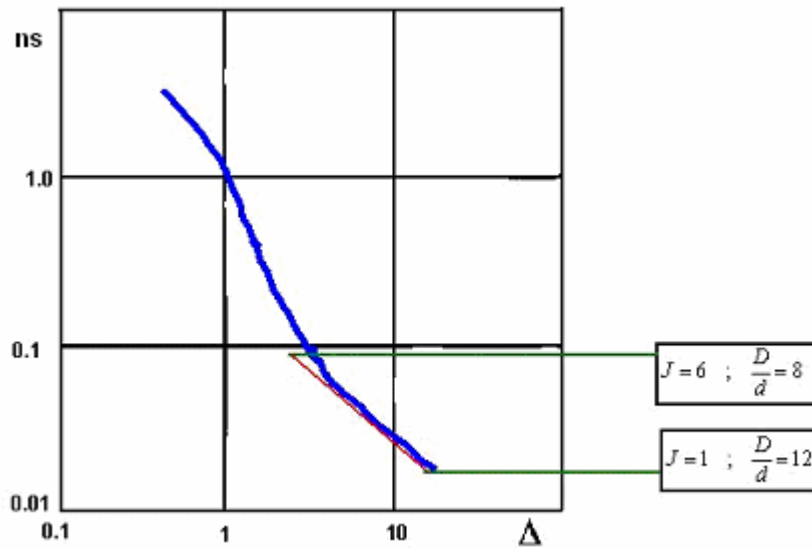
Reemplazando en la ecuación 57 obtenemos un  $n_s$  igual a 0,01976

La Pelton más grande es obtenida cuando hacemos

$$D/d = 8 \text{ y } J = 6,$$

Reemplazando en la ecuación 57 obtenemos un  $n_s$  igual a: 0,0726

Estos valores límites están mostrados en el diagrama de Cordier:



**Figura 40: Diagrama de Cordier**

Para el cálculo del número de álabes nos basaremos en la ecuación empírica:

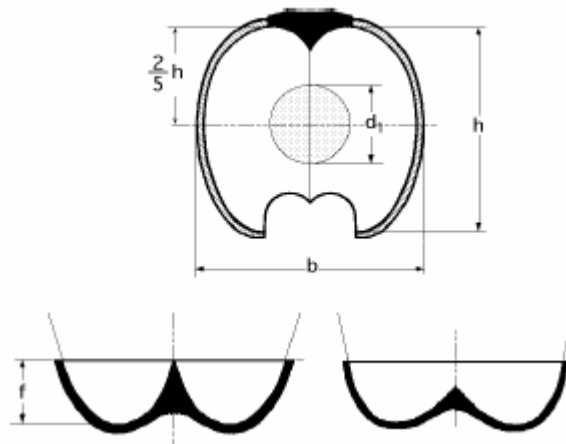
$$Z \approx \frac{\pi}{2} \cdot \frac{D}{d} \quad \text{Ec. 58}$$

Los álabes, en las versiones más modernas, tienen forma de elipsoide; la arista que las divide en dos puede quedar al ras de los bordes de las mismas, o a veces se queda algo adentro, como se observa en la Figura 41. Las medidas se adoptan en función del diámetro del chorro, siendo los valores más favorables:

Anchura del álabe:  $b = 3,75 d$

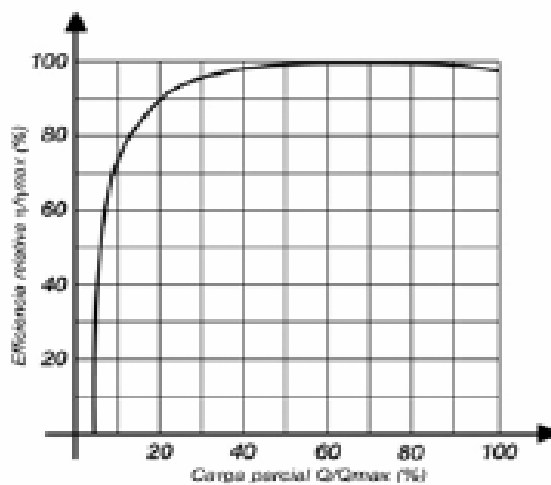
Altura del álabe:  $h = 3,50 d$

Profundidad del álabe:  $f = 1,50 d$



**Figura 41: Dimensiones de los álabes**

Los álabes no se colocan exactamente en sentido radial, sino en forma tal que el chorro al alcanzar de lleno uno de ellos, se halle perpendicularmente a la arista del mismo, quedando separado el álabe del inyector el mínimo que permita la construcción, atacándolo el chorro lo mas cerca posible de la corona del rodete, para que las perdidas a la salida resulten mas pequeñas, haciendo que la circunferencia tangente al chorro, corte a los álabes a  $2h/5$  medido desde el interior.



**Figura 42: Rendimientos de una turbina Pelton**

### 4.3. TURBINA FRANCIS

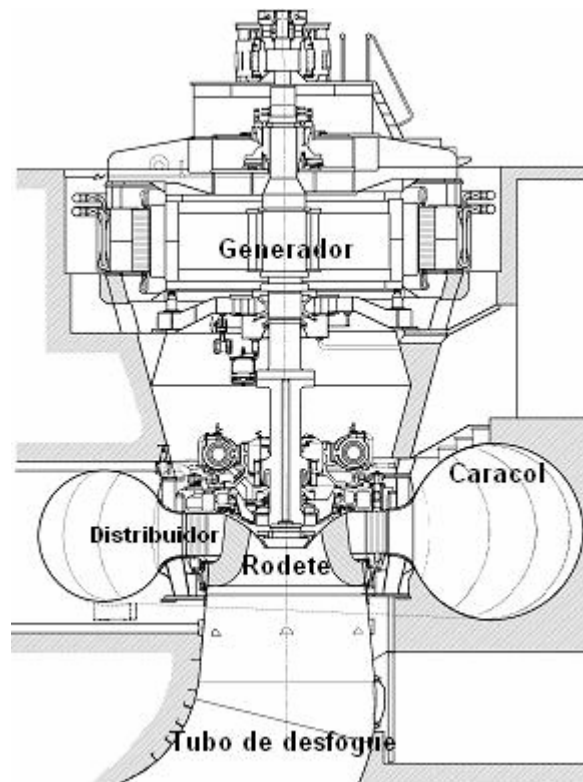
James Bichano Francis, en 1849 ideó la turbina de reacción que lleva su nombre; desde su aparición, esta turbina ha sido perfeccionada en algunos detalles, y hoy día, junto con la turbina Kaplan, son las únicas turbinas de reacción empleadas.

Los elementos que acompañan a la turbina Francis, ilustrados en la Figura 43 son los siguientes:

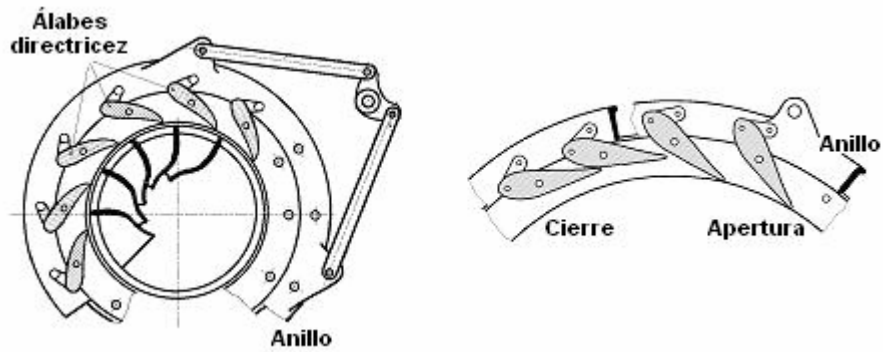
- a). Caracol: es un ducto alimentador, de sección circular y diámetro decreciente que circunda al rodete; generalmente se construye en lámina de acero.
  
- b). Distribuidor: consiste en un grupo de álabes directrices dispuestos en forma de persiana circular alrededor del rodete. La posición de estos álabes se puede modificar por medio de un anillo cuyo desplazamiento es controlado por un servomotor (distribuidor Fick, mostrado en la Figura 44 ), según lo exija el rodete para cambiar el ángulo de ataque del fluido sobre éste y según la potencia demandada por la turbina para lo cual se controla el gasto o caudal de entrada, proceso que se conoce como regulación en las turbinas de reacción.
  
- c). Rodete: es el elemento que realiza la transformación de la energía, o sea, la turbina. Esta formado por un grupo de álabes fijados a dos platos perpendiculares al eje de rotación, y progresivamente van tomando una curvatura o alabeo.

d). Tubo de desfogue: provee la salida al agua y también produce una ganancia en el gradiente de presión, mejorando el rendimiento de la turbina.

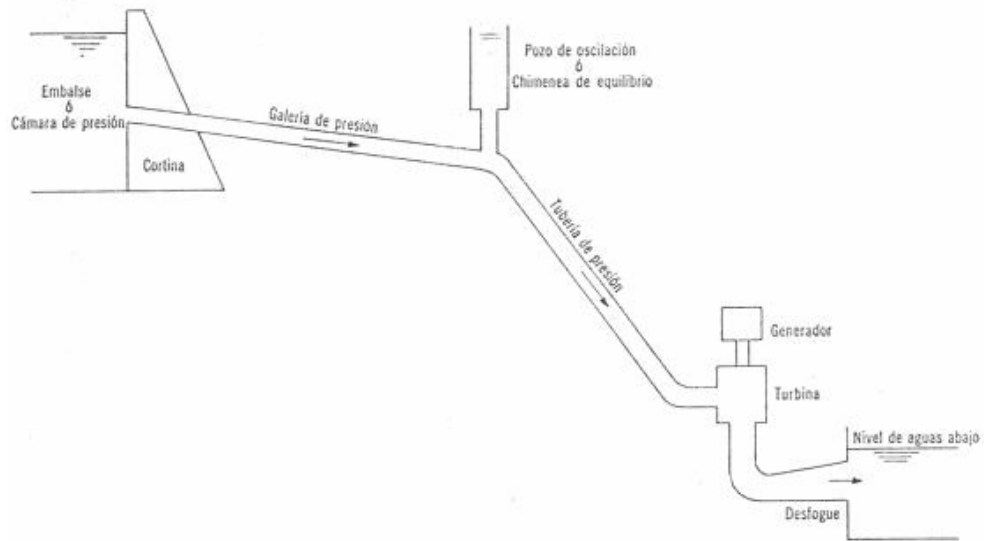
La transferencia energética del fluido a la turbina esta representada por la ecuación de Euler y se acostumbra a expresarla en metros. La Figura 45, nos muestra un esquema de la planta para una turbina a reacción, que trabaja en un ducto completamente cerrado y sometida a una presión determinada.



**Figura 43: Instalación típica de una turbina Francis**



**Figura 44: Distribuidor**



**Figura 45: La turbina hidráulica a reacción trabaja en un ducto cerrado.**

La Figura 46 muestra el diagrama de velocidades para la turbina Francis y el efecto de la regulación, similar al de la Figura 31, de la cual tomamos las expresiones vectoriales 20 y 21, esto es:

$$\vec{C}_1 = \vec{U}_1 + \vec{W}_1 \quad \text{Ec. 17}$$

$$\vec{C}_2 = \vec{U}_2 + \vec{W}_2 \quad \text{Ec. 18}$$

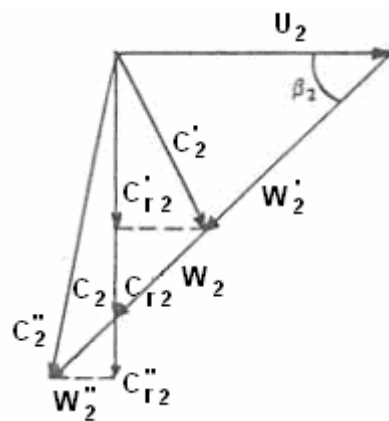
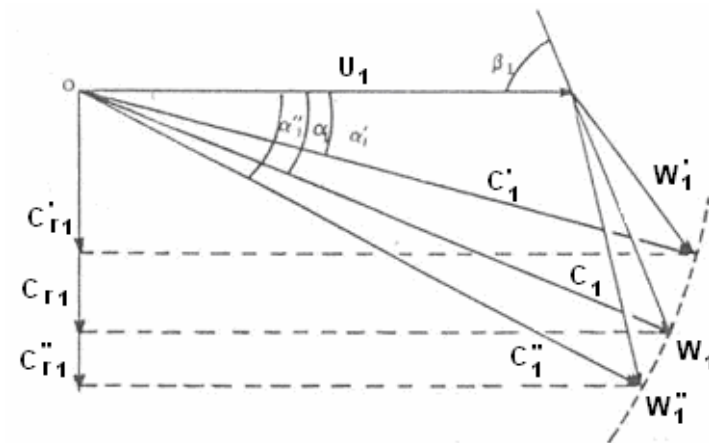
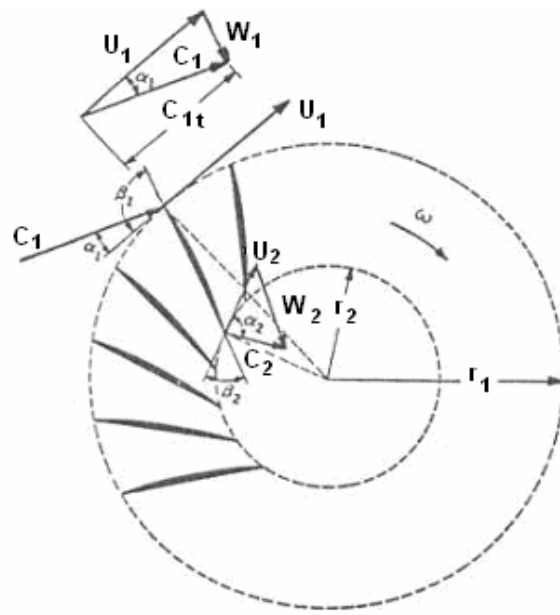


Figura 46: Diagrama de velocidades y efecto de la regulación a la entrada y a la salida de la turbina Francis

El agua ataca los álabes de la turbina con una velocidad absoluta  $\vec{C}_1$  a la entrada del rodete, el ángulo  $\alpha_1$  dependerá de la posición de los álabes del distribuidor, afectándose pues la dirección más no su magnitud, de la velocidad  $\vec{C}_1$  respecto de la velocidad tangencial del rodete  $\vec{U}_1$ , de forma que se de una componente tangencial de la velocidad absoluta  $\vec{C}_1$ , o sea  $\vec{C}_{1t}$  positiva, es decir, en el sentido de  $\vec{U}_1$  o de giro del rodete; así, el producto  $C_{1t} \cdot U_1$  es positivo como conviene para una turbina, sin pérdidas  $\rho'=1$ , se tiene la ecuación de Euler:

$$H = E = \frac{1}{g}(U_1 \cdot C_{1t} - U_2 \cdot C_{2t}) = \frac{1}{g}(U_1 \cdot C_1 \cdot \cos \alpha_1 - U_2 \cdot C_2 \cdot \cos \alpha_2) \quad \text{Ec. 59}$$

Si el ángulo  $\alpha_2 = 90^\circ$ ,  $\vec{C}_2$  es radial, y se obtiene la ecuación 21, con lo que la ecuación 59 resulta en:

$$H = E = \frac{U_1 \cdot C_{1t}}{g} \quad \text{Ec. 60}$$

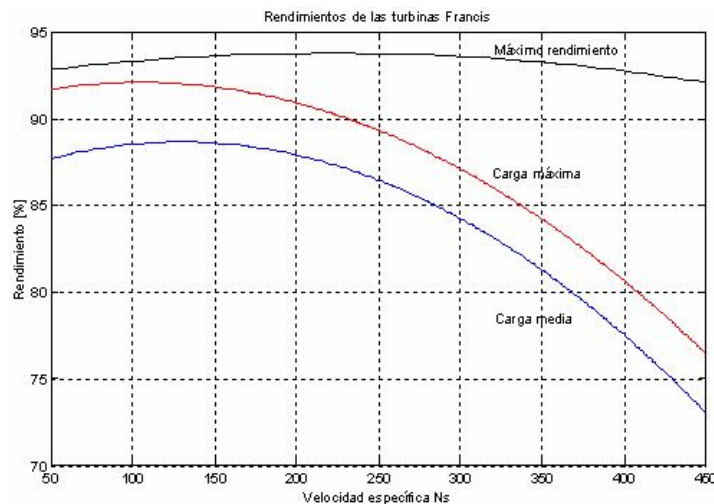
También debe procurarse que  $\vec{C}_2$  sea pequeña para reducir la energía residual y de esta manera aumentar el coeficiente de utilización  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{E}{E + \frac{C_2^2}{2 \cdot g}} \quad \text{Ec. 47}$$

La velocidad relativa a la salida del rodete  $\vec{W}_2$  aumenta o disminuye en magnitud, según la potencia exigida por el generador crezca o decrezca, y como  $\vec{U}_2$  permanece constante para no alterar el sincronismo del generador,

la velocidad  $\bar{C}_2$  termina desviándose de la dirección radial. El valor de  $C_{2t}$  aumenta en el sentido de giro o al contrario, según se trate de funcionamiento a carga parcial o sobrecarga, lo que causa un giro o turbulencia del agua a la salida del rodete disminuyendo el rendimiento de la turbina, sin contar que  $C_2$  aumenta, disminuyendo el coeficiente de utilización  $\varepsilon$ . En la práctica se admite una  $C_{2t}$  pequeña, como lo muestra la Figura 46, con lo que la velocidad absoluta  $C_2$  se mantiene pequeña, sin afectar notablemente el coeficiente de utilización de la turbina.

El rendimiento de una turbina Francis, de acuerdo a la velocidad específica y el caudal o carga, se ilustra en la Figura 47. El máximo rendimiento se da en  $\frac{3}{4}$  de carga generalmente.



**Figura 47: Rendimiento de la turbina Francis según su velocidad específica**

### 4.3.1. Dimensionamiento de la turbina Francis

#### 4.3.1.1. Método de dimensionamiento de Streeter<sup>1</sup>

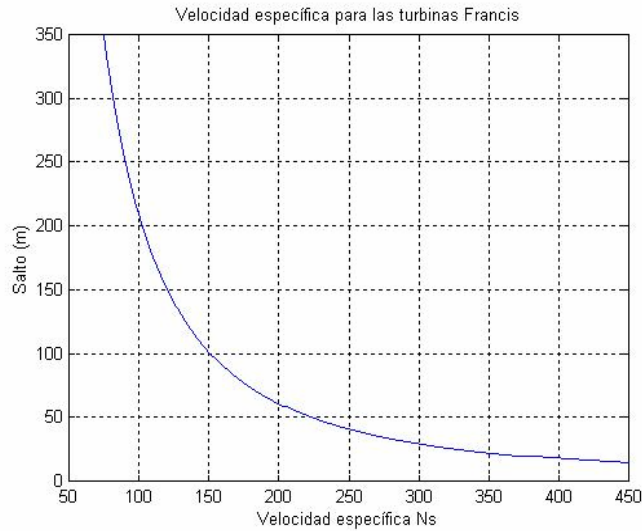
De la ecuación 30 se obtiene que la velocidad específica es:

$$N_s = \frac{N \cdot \sqrt{P}}{H^{\frac{5}{4}}} \quad \text{Ec. 61}$$

Para la turbina Francis corresponden velocidades específicas aproximadamente desde 50 hasta 450, llamándose específicamente lenta para  $N_s < 200$ , y específicamente rápida para  $N_s > 200$ . Es de anotar, que debido a que la turbina esta acoplada a un generador cuya frecuencia depende del número de polos, la velocidad  $N$  en revoluciones por minuto de la turbina ha de ajustarse según este requerimiento, por eso, al resultado de la ecuación 61 se le ajusta, según la Tabla 8 para una frecuencia de 50 Hz o 60 Hz, un valor por encima o por debajo del obtenido en la Figura 48 que muestra la velocidad específica  $N_s$  como función del salto para la turbina Francis, a partir de resultados experimentales. Las áreas de paso dentro de la turbina deben permitir la circulación del agua dentro de unos límites de velocidad aceptables; así, la componente radial de la velocidad absoluta del agua esta entre 4,5 m/s y 15,25 m/s, mientras que la velocidad absoluta del fluido a la entrada del rodete esta entre 9 m/s y 60 m/s; y el número de álabes del rotor es de 8 a 18 por lo general.

---

<sup>1</sup> Handbook of fluid mechanics. V. L. Streeter. Ed. McGraw-Hill. 1961.



**Figura 48: Velocidad específica según el salto**

El trazado del contorno de los álabes, tema que escapa a los alcances de este proyecto, se efectúa mediante una representación conforme a la condición:

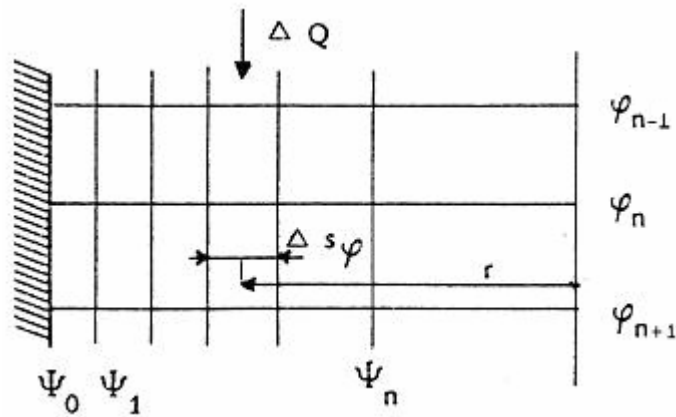
$$r \cdot \frac{\Delta s_{\varphi}}{\Delta s_{\psi}} = cte \quad \text{Ec. 62}$$

Donde  $r$  es un punto sobre la superficie del álabe a una distancia  $r$  del eje,  $\Delta s_{\varphi}$  corresponde al espacio comprendido entre dos líneas meridianas  $\psi_n$  y  $\psi_{n+1}$  consecutivas,  $\Delta s_{\psi}$  corresponde al espacio comprendido entre dos líneas equipotenciales de velocidad  $\varphi_n$  y  $\varphi_{n+1}$ , como lo muestra la Figura 49, en las cuales, las líneas de flujo del agua producen tubos de corriente con la siguiente condición:

$$\Delta s_{\psi} = cte \quad \text{Ec. 63}$$

Con lo cual se tiene que la nueva condición para el trazado es:

$$r \cdot \Delta s_\varphi = cte \quad \text{Ec. 64}$$



**Figura 49: Red de flujo en un ducto rectilíneo con eje de rotación.**

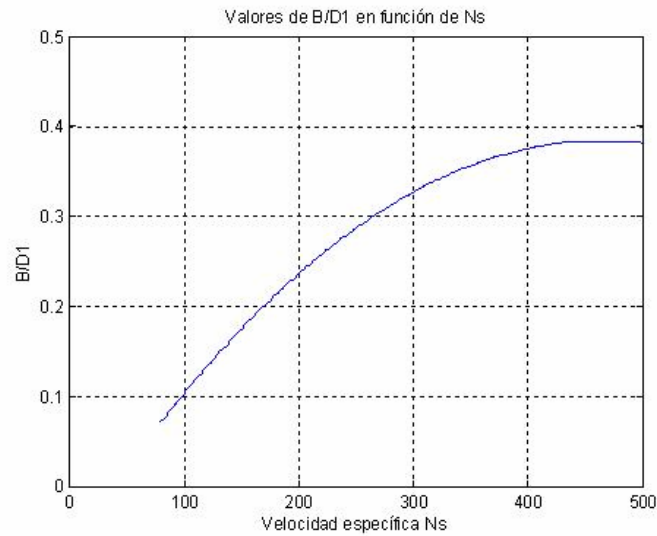
Ahora, dado que las condiciones conocidas para el diseño preliminar de la turbina son salto y caudal, de la Figura 48 se obtiene  $N_s$ , con ella, a partir de las figuras 49, 50 y 51 se obtienen la relación entre la altura del distribuidor y el diámetro de entrada del rodete  $B/D_1$ , los coeficientes de velocidades tangenciales a la entrada  $\varphi_1$  y a la salida  $\varphi_2$  respectivamente. Las ecuaciones que relacionan los coeficientes de velocidad tangencial con sus respectivos diámetros son:

$$\varphi_1 = \frac{\pi \cdot N \cdot D_1}{\sqrt{2 \cdot g \cdot H}} \quad \text{Ec. 65}$$

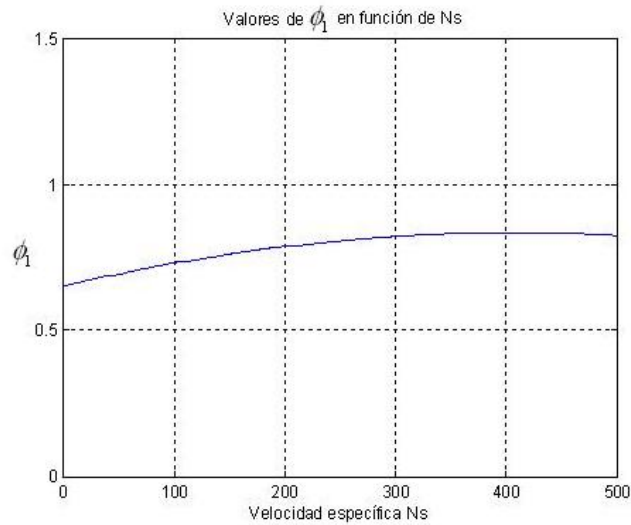
$$\varphi_2 = \frac{\pi \cdot N \cdot D_2}{\sqrt{2 \cdot g \cdot H}} \quad \text{Ec. 66}$$

Una vez obtenidos los coeficientes  $\varphi_1$  y  $\varphi_2$  de las figuras 50 y 51 respectivamente, se calculan los diámetros de entrada y salida  $D_1$  y  $D_2$  a

partir de las ecuaciones 68 y 69 respectivamente. La altura del distribuidor se obtiene de la Figura 50 al determinar la relación  $B/D_1$ .



**Figura 50: Valores de  $B/D_1$  según  $N_s$**



**Figura 51: Valores de  $\phi_1$  según  $N_s$**

En cuanto al tubo de desfogue, la anchura máxima del ducto  $A_{md}$  esta dada por la ecuación 71, la altura vertical  $V$  desde la base del tubo de desfogue

hasta el plano medio del distribuidor esta dada por la ecuación 72, y la longitud horizontal L desde el eje de la turbina hasta la compuerta de salida esta dada por la ecuación 73.

Como se dijo antes, el caracol alimenta al distribuidor y debe procurarse que a lo largo de su trayectoria, el agua conserve una misma velocidad  $c_e$ , para evitar pérdidas por cambios bruscos en ésta, que viene representada como:

$$c_e = 0,18 + 0,28\sqrt{2 \cdot g \cdot H} \quad \text{Ec. 67}$$

Si el caracol se divide en ocho secciones circulares, equidistantes  $45^\circ$  una de otra como se indica en la Figura 53 , el caudal de entrada es Q, la sección de entrada  $s_1$  será:

$$s_1 = \frac{Q}{c_e} = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \quad \text{Ec. 68}$$

Con lo que el diámetro de entrada del caracol  $d_1$  es:

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot c_e}} = 1,128\sqrt{\frac{Q}{c_e}} \quad \text{Ec. 69}$$

Debido a que el distribuidor a lo largo de su periferia consume un mismo caudal, entonces a medida que se pasa de una sección a otra dentro del caracol, el caudal va disminuyendo a razón de la octava parte del caudal de entrada Q, es decir,  $7/8$  de Q para la segunda,  $6/8$  de Q para la tercera y así sucesivamente hasta  $1/8$  de Q en la última sección, como lo muestra la Figura 53, lo que resulta en los diferentes diámetros de sección así:

$$d_2 = 1,055 \sqrt{\frac{Q}{c_e}}$$

$$d_3 = 0,977 \sqrt{\frac{Q}{c_e}}$$

$$d_4 = 0,892 \sqrt{\frac{Q}{c_e}}$$

$$d_5 = 0,797 \sqrt{\frac{Q}{c_e}}$$

$$d_6 = 0,691 \sqrt{\frac{Q}{c_e}}$$

$$d_7 = 0,564 \sqrt{\frac{Q}{c_e}}$$

$$d_8 = 0,398 \sqrt{\frac{Q}{c_e}}$$

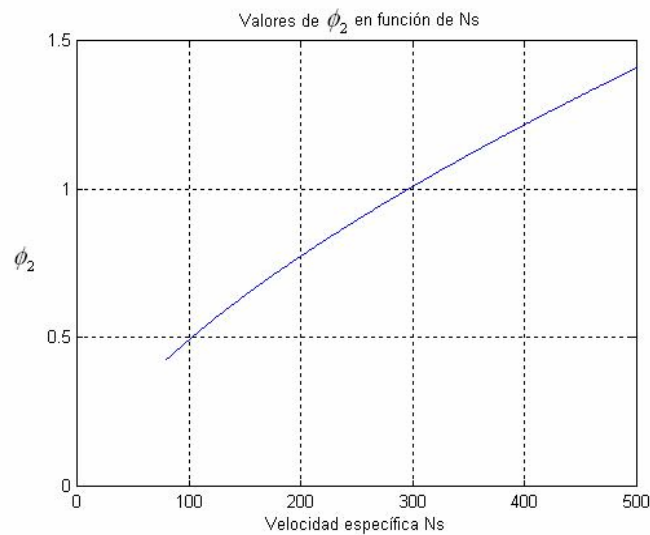
**Ec. 70**

La Figura 54 representa las características constructivas de la turbina Francis y la planta para este primer método expuesto.

$$Amd = 3 \cdot D_2 \quad \text{Ec. 71}$$

$$V = 2,7 \cdot D_2 \quad \text{Ec. 72}$$

$$L = 3,8 \cdot D_2 \quad \text{Ec. 73}$$



**Figura 52: Valores de  $\phi_2$  según Ns**

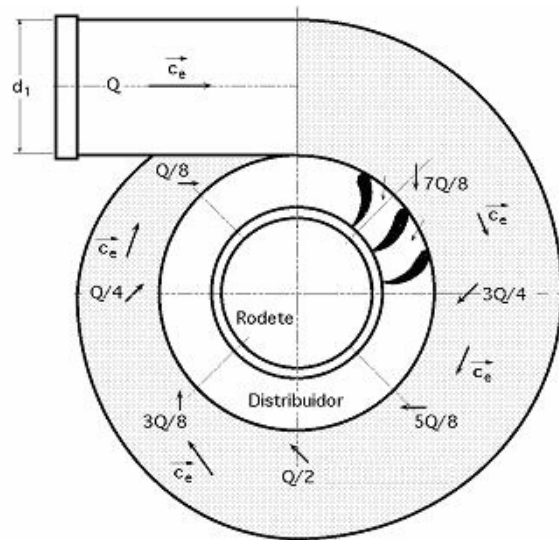


Figura 53: Caracol de la turbina Francis

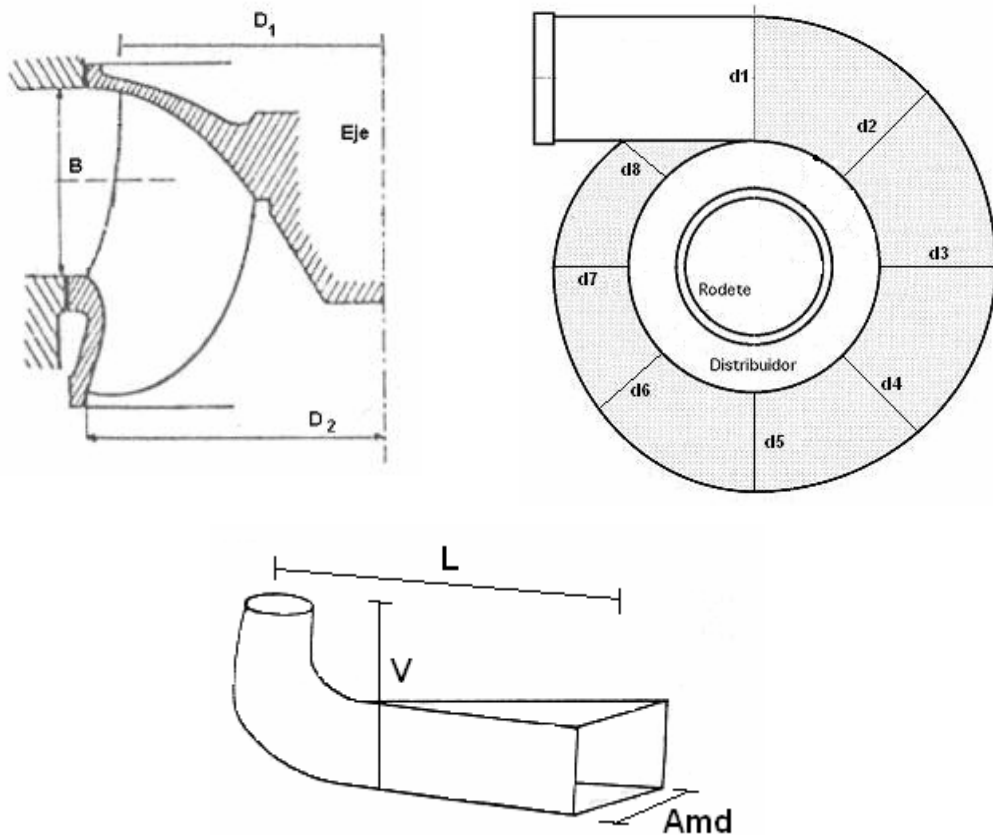


Figura 54: Características constructivas para la turbina Francis y la planta.

#### 4.3.1.2. Método de dimensionamiento de Voorduin<sup>2</sup>

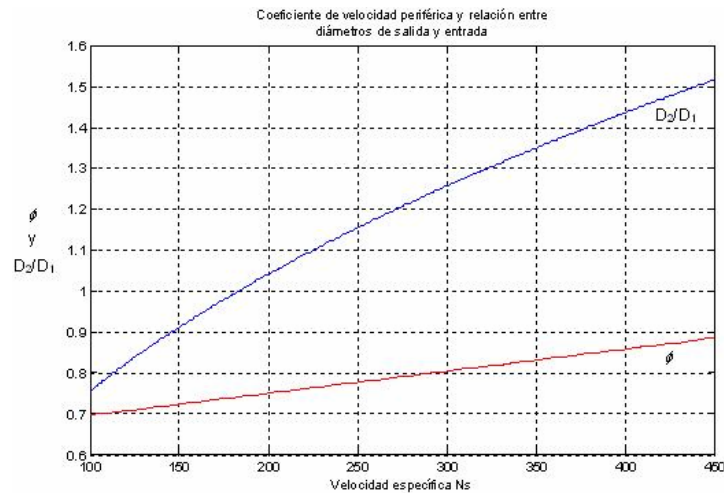
Difiere del anterior por la utilización de otras curvas experimentales y en la definición de un nuevo parámetro constructivo que es la altura media del distribuidor al fondo del rodete llamado  $a$ ; se parte entonces de las condiciones conocidas de salto y caudal para hallar  $N_s$  a partir de la Figura 48; se define acá el coeficiente de velocidad periférica  $\phi$  mediante la ecuación 74, que se relaciona con  $N_s$  como lo muestra la Figura 55, de ésta expresión se puede calcular el diámetro de entrada del rodete  $D_1$  una vez determinado  $\phi$  con la Figura 55.

$$\phi = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot N}{60 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}} \quad \text{Ec. 74}$$

De la Figura 55 se obtiene la relación  $D_2/D_1$  y con ella, el diámetro de salida del rodete  $D_2$ .

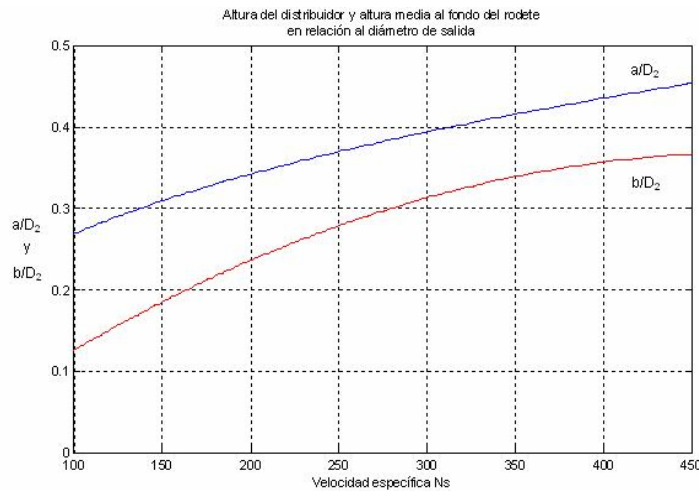
---

<sup>2</sup> Preliminary Selection of hydraulic turbines and powerhouse dimensionating. W. L. Voorduin. Tennessee Valley Authority.



**Figura 55: Valores de  $\phi$  y  $D_2/D_1$  según  $N_s$**

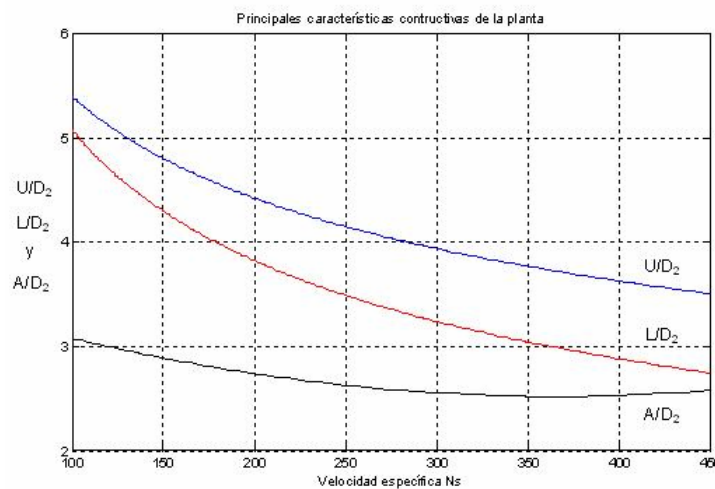
En la Figura 56 se muestran las relaciones entre la altura del distribuidor  $b$  y la altura media del distribuidor al fondo del rodete  $a$  con el diámetro de salida  $D_2$  que ya está determinado, lo cual nos permite conocer estos dos parámetros.



**Figura 56: Valores de  $a/D_2$  y  $b/D_2$  según  $N_s$**

Con el valor de  $D_2$  y la Figura 57, se determinan las dimensiones fundamentales de la planta como son: separación entre grupos  $U$  (si son dos

o más grupos turbogeneradores los que se requieren), longitud del tubo de desfogue L y su profundidad A.



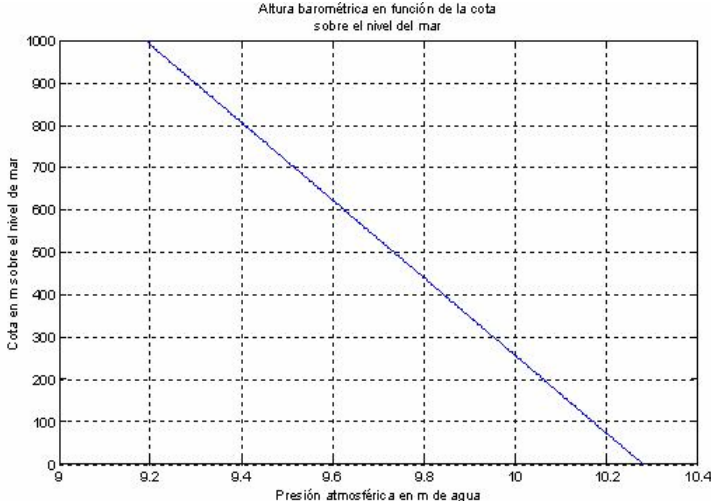
**Figura 57: Valores U/D<sub>2</sub>, L/D<sub>2</sub> y A/D<sub>2</sub> según Ns**

Finalmente, la instalación del rodete sobre el nivel de aguas abajo del canal de desfogue  $h_s$  en m, se deduce de la siguiente expresión:

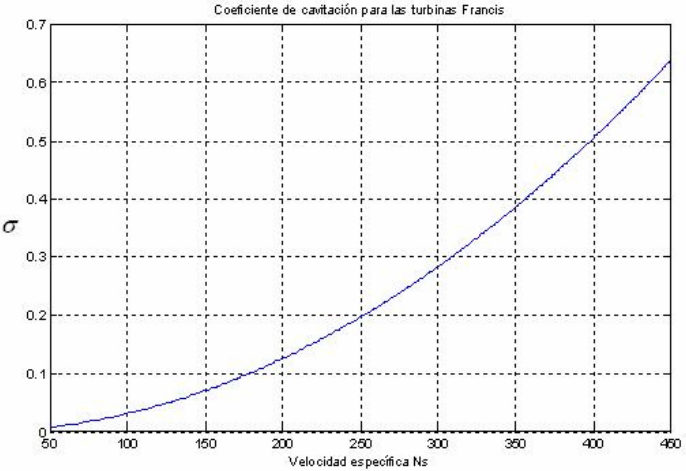
$$h_s = h_a - h_t - \sigma \cdot H \quad \text{Ec. 75}$$

Donde,  $h_a$  es la pérdida de presión en metros de agua debida a la elevación sobre el nivel del mar del sitio de instalación representado en la Figura 58;  $h_t$  es la pérdida de presión en metros de agua debida a la temperatura media del agua que circula por la turbina y el tubo de desfogue, representada en la Figura 23 con unidades de presión en mm de mercurio, el cual acostumbra a tomarse para una temperatura media de 20°C una presión de 18,084 mmHg que equivale a una presión de 0,246 m de agua ; y  $\sigma$  se define como el coeficiente de cavitación y se representa en la Figura 59 en función de Ns.

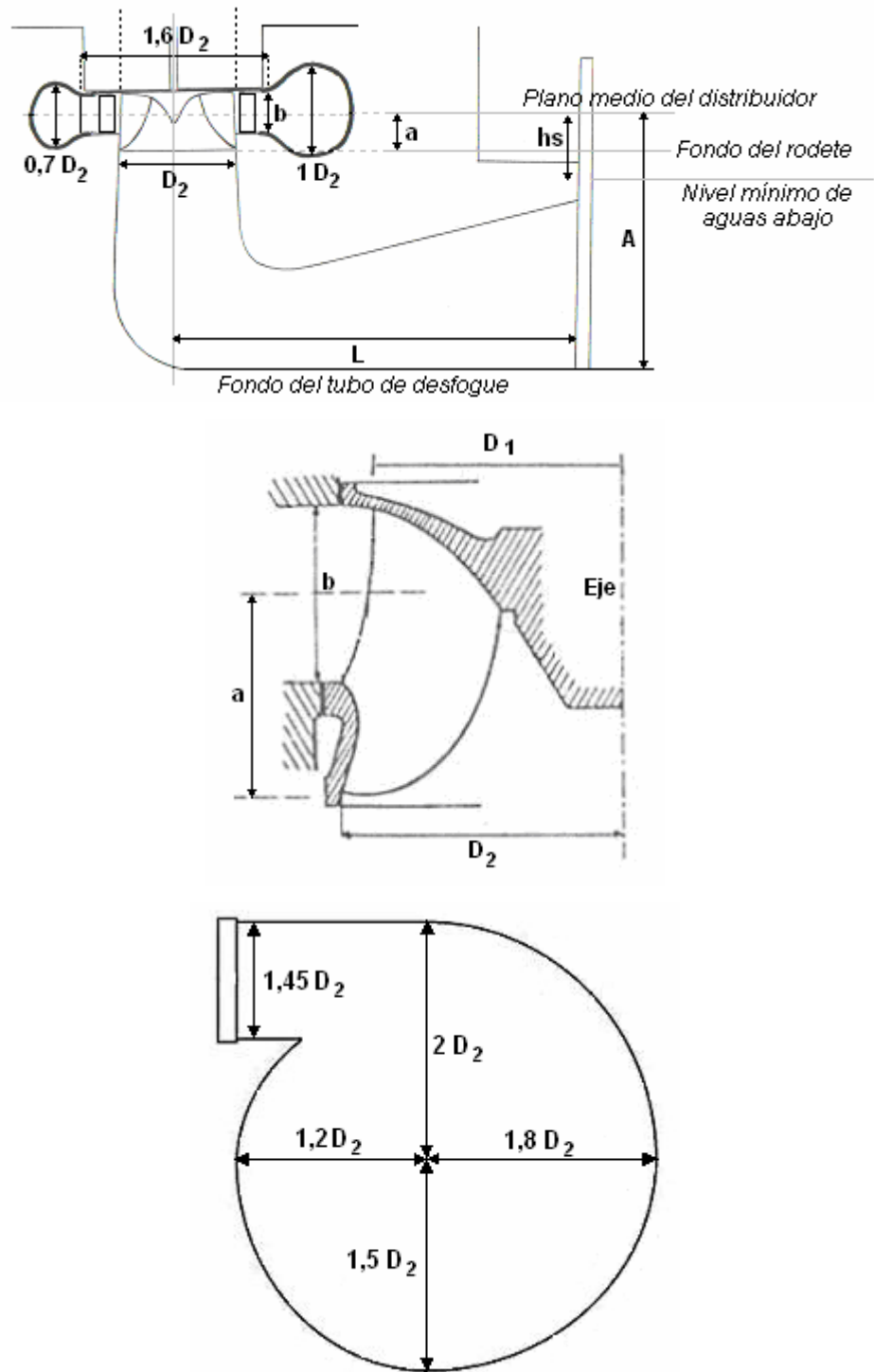
De esta manera, quedan determinadas las características constructivas de la turbina Francis y la planta para el segundo método tratado, como lo muestra la Figura 60.



**Figura 58: Altura barométrica según la altura sobre el nivel del mar**



**Figura 59: Coeficiente de cavitación según  $N_s$**



**Figura 60: Características constructivas para la turbina Francis y la planta**

## **4.4. TURBINAS KAPLAN**

### **4.4.1. Generalidades**

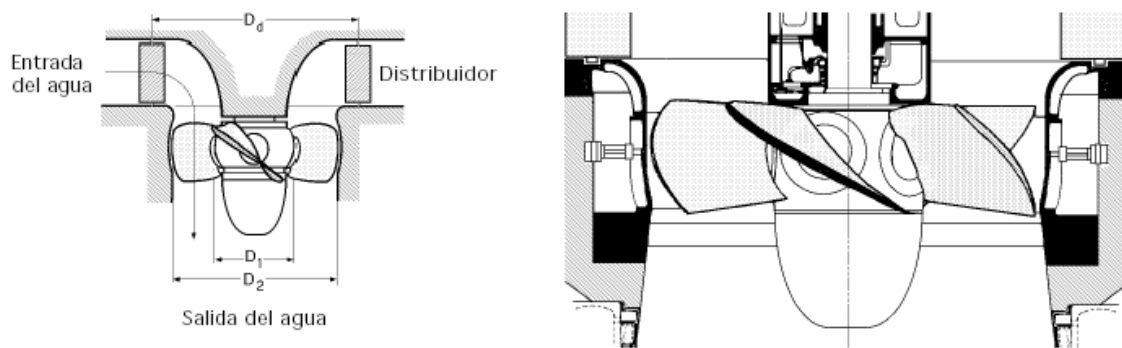
La turbina Kaplan fue desarrollada por el Ingeniero austriaco Víctor Kaplan. Esta turbina es de reacción ya que sus álabes giran por la presión del agua que circula a su alrededor. Los distintos ángulos de los álabes aumentan el rendimiento ajustando el ángulo al volumen de la caída de agua.

### **4.4.2. Componentes**

Las partes principales de la turbina Kaplan son las siguientes:

1. La cámara de alimentación: suele ser de concreto en muchos casos, debido a la gran capacidad de caudal que admite la turbina Kaplan. La sección toroidal puede ser circular o rectangular.
2. El distribuidor: es la parte que sigue a la cámara de alimentación, regula el caudal y además imprime al agua el giro necesario, en una zona de vortices libres, que precede al rotor, propiciando el ataque adecuado del agua a los álabes, que se ajustan a las necesidades de potencia a través de un servomotor, para una transferencia de energía eficiente.
3. El rotor de la turbina: tiene forma de hélice, esta constituido por un cubo muy robusto debido no solo a razones mecánicas sino también porque debe alojar en su interior el mecanismo de reglaje del paso de los álabes del rotor. También en este cubo van empotrados los álabes encargados de efectuar la transferencia de energía del agua al eje de la unidad.

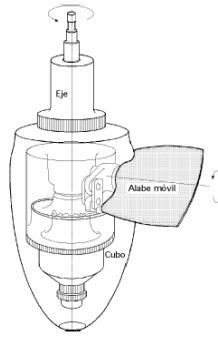
4. Los álabes del rotor: estos tienen perfil de ala de avión y desarrollo helicoidal. El perfil del ala permitir obtener una acción útil del agua sobre el álabe en el movimiento que aquella tiene respecto a este. La forma helicoidal o alabeo se justifica, en virtud de que la velocidad relativa del flujo varia en dirección y magnitud con la distancia al eje de giro, debido a que la velocidad de arrastre se modifica en magnitud con el radio, suponiendo una velocidad de giro constante, y considerando la velocidad absoluta constante en magnitud y dirección.
  
5. El tubo de desfogue: su forma es casi siempre acodado y semejante al de la turbina Francis.



**Figura 61: Rotor de una turbina Kaplan**

#### 4.4.3. Mecanismo de regulación

Para mantener una frecuencia constante en la tensión de salida en una instalación hidroeléctrica la velocidad de la turbina debe mantenerse constante, independientemente de las variaciones de la presión del agua que las mueve. Esto requiere gran número de controles que en la turbina Kaplan se logra con la doble regulación, consistente en los álabes móviles del rodete y con los álabes directrices del distribuidor.



**Figura 62: Disposición del cubo y del álabe en la turbina Kaplan**

#### 4.4.4. Ecuaciones generales

##### 4.4.4.1. Energía transferida

La energía transferida de fluido a rotor en una turbina, como se dedujo en la ecuación 39, cuya expresión ajustada a la turbina Kaplan ya que en esta la velocidad tangencial del rodete a la entrada del agua es diferente a la velocidad de salida, es:

$$E = \frac{1}{g} \cdot (U_1 \cdot C_{1t} - U_2 \cdot C_{2t}) \quad \text{Ec. 76}$$

Expresándola bajo la forma de componentes energéticas obtenemos:

$$E = \frac{C_1^2 - C_2^2}{2 \cdot g} + \frac{W_2^2 - W_1^2}{2 \cdot g} \quad \text{Ec. 77}$$

Donde desaparece el término de acción centrípeta ya que la velocidad de arrastre conserva el mismo valor a la salida que la entrada, pues no hay traslación radial del agua durante el paso de esta por el rotor, sino solamente axial, lo que justifica el nombre de turbina de reacción de flujo axial.

#### 4.4.4.2. Grado de reacción

En la turbina Kaplan el grado de reacción, recordando que es el grado de la fracción de cambio de energía a través del rotor asociada con cambios de presión, quedara expresado por:

$$Gr = \frac{W_2^2 - W_1^2}{C_1^2 - C_2^2 + W_2^2 - W_1^2} = \frac{1}{\frac{C_1^2 - C_2^2}{W_2^2 - W_1^2} + 1} \quad \text{Ec. 78}$$

Como  $C_1 > C_2$  y  $W_2 > W_1$ , el grado de reacción será positivo y menor que la unidad.

#### 4.4.4.3. Factor de utilización

El factor de utilización lo podemos expresar en función del grado de reacción donde obtenemos:

$$\varepsilon = \frac{C_1^2 - C_2^2 + W_2^2 - W_1^2}{C_1^2 + W_2^2 - W_1^2} = \frac{C_1^2 - C_2^2}{V_1^2 - Gr \cdot C_2^2} \quad \text{Ec. 79}$$

#### 4.4.4.4. Diagrama de velocidades

El diagrama de velocidades esta concentrado en la entrada y salida de los álabes del rotor. El agua ataca el álabe con una velocidad absoluta  $C_1$ , que es variable en magnitud y dirección por cada punto del borde de ataque del álabe. Si la velocidad tangencial en ese punto es  $U$ , la velocidad relativa del

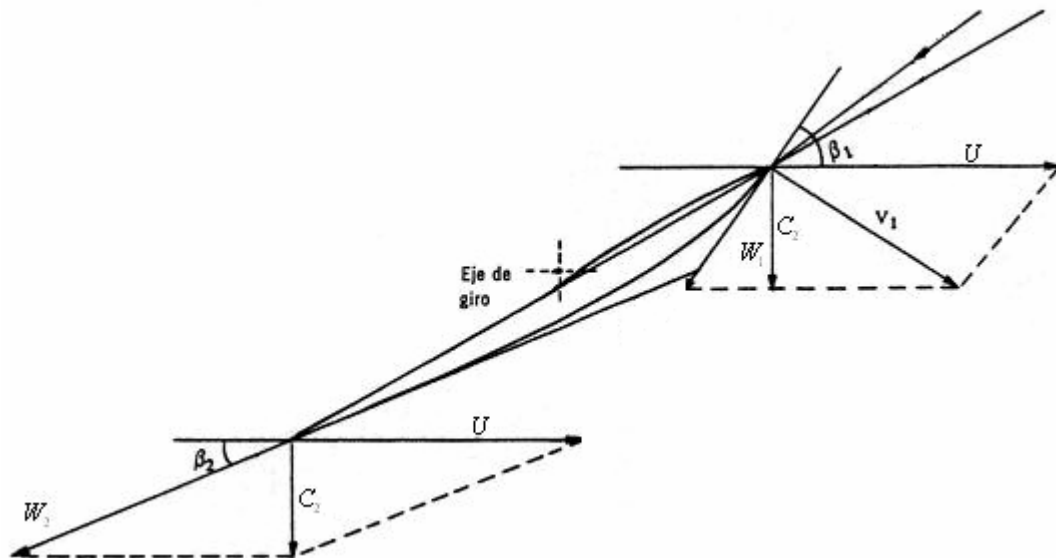
fluido respecto al álabe será  $W_1$  cerrando el triángulo vectorial correspondiente a la ecuación vectorial:

$$\vec{C}_1 = \vec{U}_1 + \vec{W}_1 \quad \text{Ec. 17}$$

Similarmente como la velocidad tangencial del álabe  $U$  es la misma tanto en los puntos de entrada y salida, pues los dos puntos están a la misma distancia del eje, se tendrá que diseñar el borde de fuga de forma que la componente relativa del agua  $W_2$  cierre el triángulo vectorial correspondiente a la ecuación:

$$\vec{C}_2 = \vec{U}_2 + \vec{W}_2 \quad \text{Ec. 18}$$

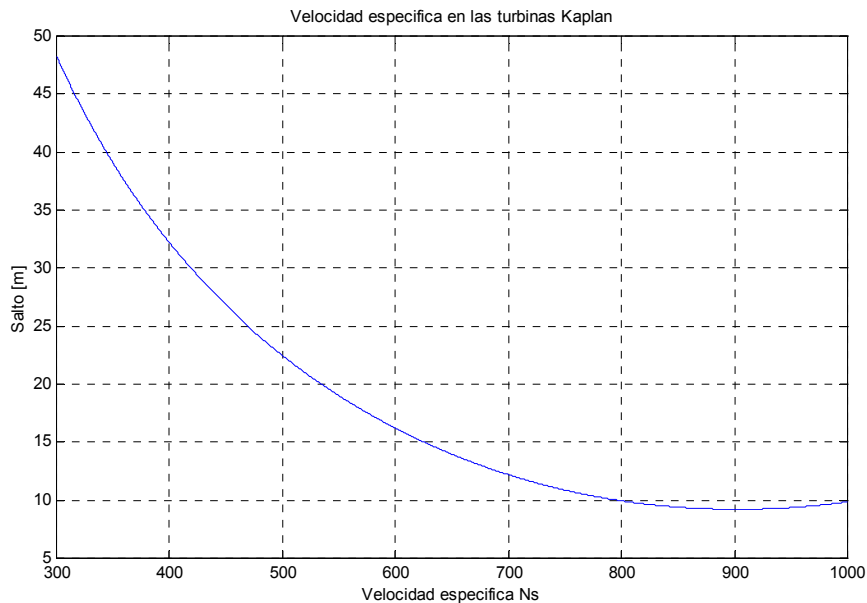
Ya que en el caso de velocidades subsónicas, como lo es este, el álabe manda al fluido en la salida y la  $W_2$  saldrá tangente al álabe.



**Figura 63: Diagrama de velocidades a la entrada y salida del álabe en una turbina Kaplan.**

#### 4.4.5. Dimensionamiento de la turbina

El dimensionamiento de la turbina esta basado en la experiencia acumulada de proyectos y experimentos. Los parámetros básicos que debemos conocer para iniciar su dimensionamiento son el salto y el caudal. Otro parámetro importante es la velocidad específica  $N_s$ , que lo podemos hallar de la siguiente gráfica en función del salto:



**Figura 64: Velocidad específica en la turbina Kaplan**

Para hallar la potencia de la turbina nos basamos en la ecuación 27.

Una vez obtenido el valor de  $N_s$  y la potencia procedemos a calcular las revoluciones por minuto a las cuales girara la turbina como se analizo en la sección 4.1.2

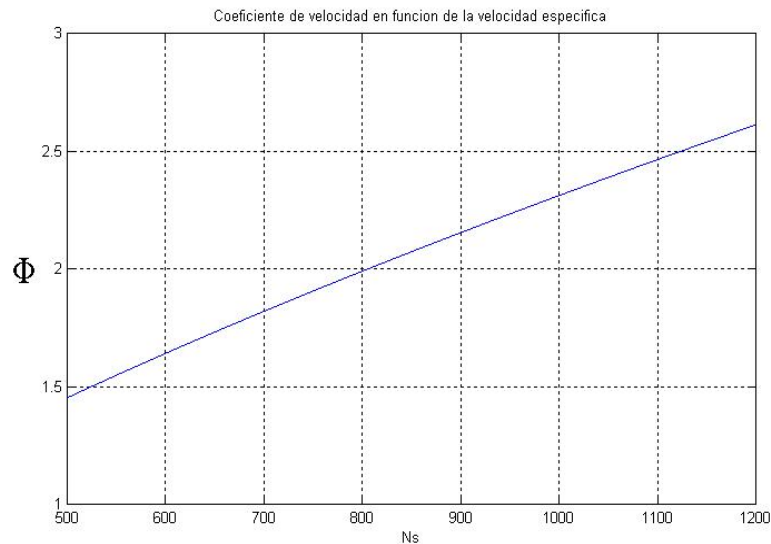
Teniendo estos datos, sus dimensiones se encontraran por dos métodos diferentes.

#### 4.4.5.1. Método de dimensionamiento de Streeter

Para hallar el diámetro del rodete, partimos del coeficiente de la velocidad de arrastre el cual viene expresado por:

$$\Phi = \frac{\pi \cdot N \cdot D}{\sqrt{2 \cdot g \cdot H \cdot 60}} \quad \text{Ec. 80}$$

Este valor se puede hallar de forma experimental de la siguiente grafica:

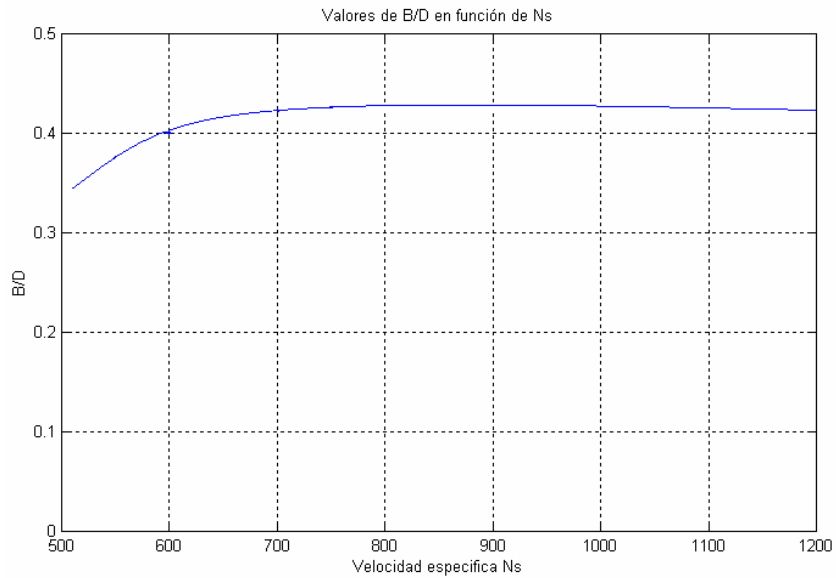


**Figura 65: Coeficiente de velocidad**

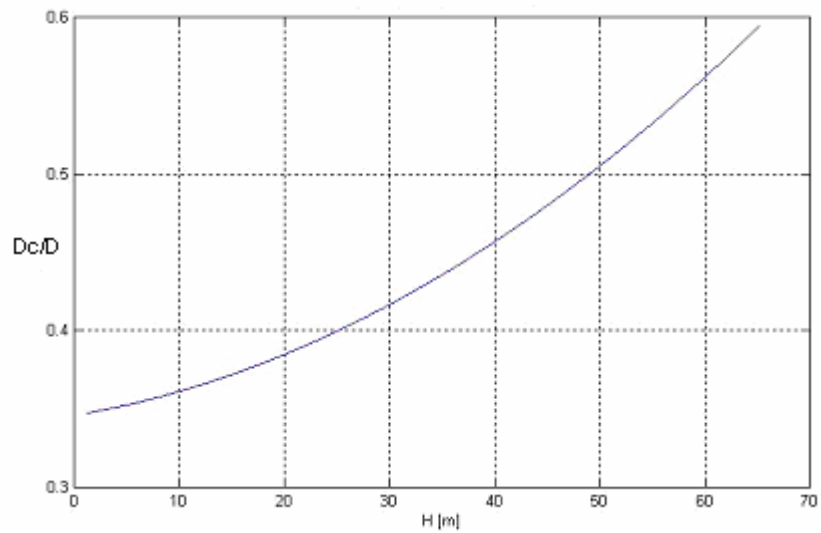
Una vez hallado este valor podemos encontrar el diámetro del rodete.

Seguidamente y en base a la experiencia y observación de maquinas que han dado buenos resultados se puede hallar la relación con el diámetro del

rodete del diámetro del cubo de la turbina Kaplan y la altura del distribuidor en función de la altura y la velocidad específica respectivamente.



**Figura 66: Valores de B/D**



**Figura 67: Relación Dc/D**

Donde D corresponde al diámetro del rodete, b a la altura del distribuidor y Dc al diámetro del cubo.

La distancia  $a$  entre el plano Ecuatorial del distribuidor y el rodete móvil se encuentra aproximadamente entre 40 y 50% del valor del diámetro de este último, siendo menor para valores altos de velocidad específica.

El diámetro ecuatorial del distribuidor  $D_0$ , medido entre los puntos de pivoteo de los álabes, es del orden de 1.2 a 1.3 veces el valor del diámetro del rodete, correspondiendo valores menores para mayor velocidad específica.

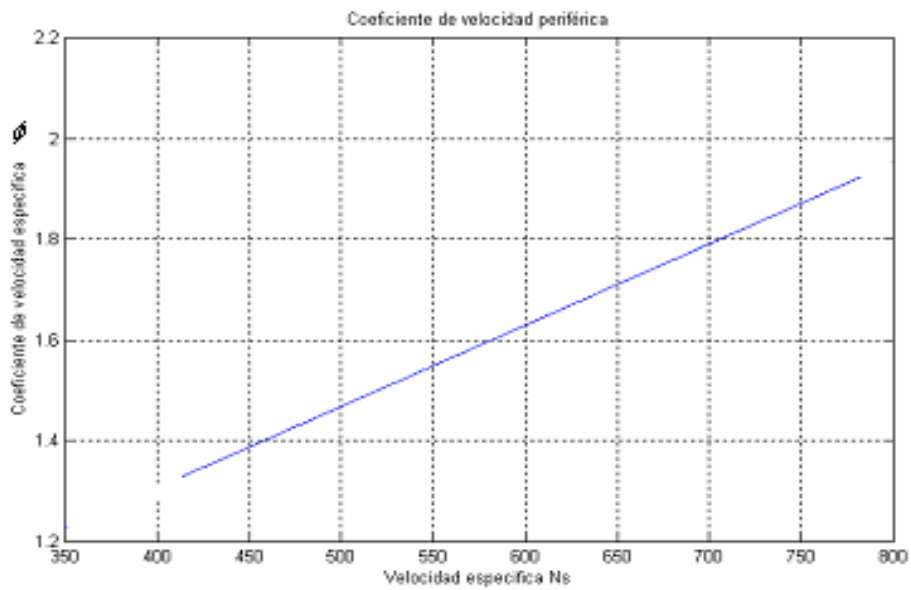
#### **4.4.5.2. Método de dimensionamiento de Voorduin**

Para este método se utilizan otras curvas experimentales.

Para hallar el diámetro del rodete nos basamos en la ecuación empírica, donde el diámetro depende de un coeficiente de velocidad específica:

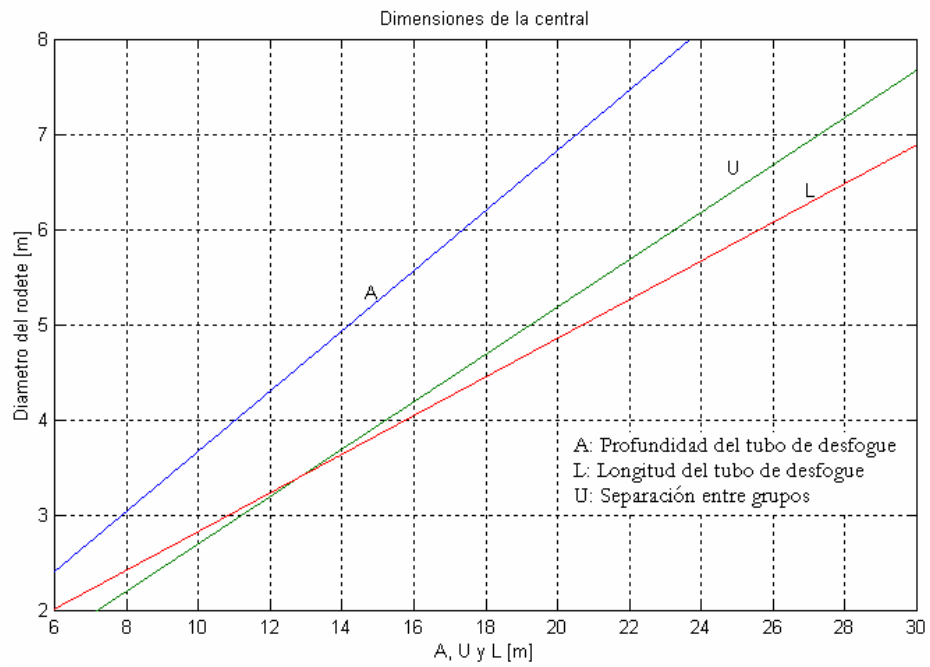
$$D = \frac{84.6 \cdot \phi \cdot \sqrt{H}}{N} \quad \text{Ec. 81}$$

El valor  $\phi$  es hallado de la siguiente figura en función de la velocidad específica



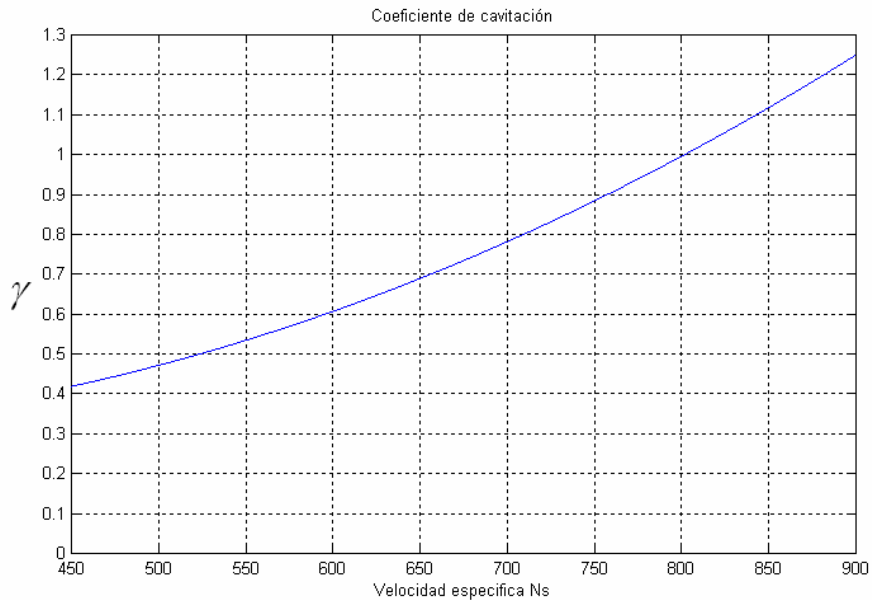
**Figura 68: Coeficiente de velocidad periférica**

Seguidamente se calcula la separación entre grupos, la longitud y profundidad del tubo de desfogue, todas estas magnitudes en función del diámetro del rodete.



**Figura 69: Dimensiones de parte de la central**

Después se halla la altura del rodete sobre el nivel de aguas abajo del canal de desfogue  $h_s$ , de la misma forma como se halló en la turbina Francis, solo que el coeficiente de cavitación  $\sigma$  es diferente para la turbina Kaplan, el cual se representara en la Figura 70: Coeficiente de en función de  $N_s$ .



**Figura 70: Coeficiente de cavitación**

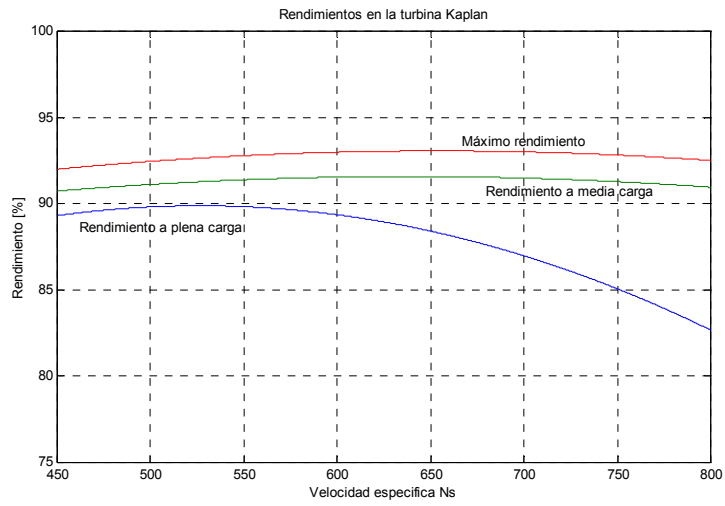
El número de álabes depende básicamente de la velocidad específica  $N_s$ , estos álabes tienen muy poco espesor en relación a su gran tamaño.

| <b>Velocidad específica <math>N_s</math></b> | <b>Número de álabes aprox.</b> |
|--|--------------------------------|
| Menor de 500                                 | 7 a 8                          |
| Entre 500 y 600                              | 6                              |
| Entre 600 y 750                              | 5                              |
| Entre 750 y 900                              | 4                              |
| Mayor de 900                                 | 3                              |

**Tabla 9: Número de álabes en la turbina Kaplan**

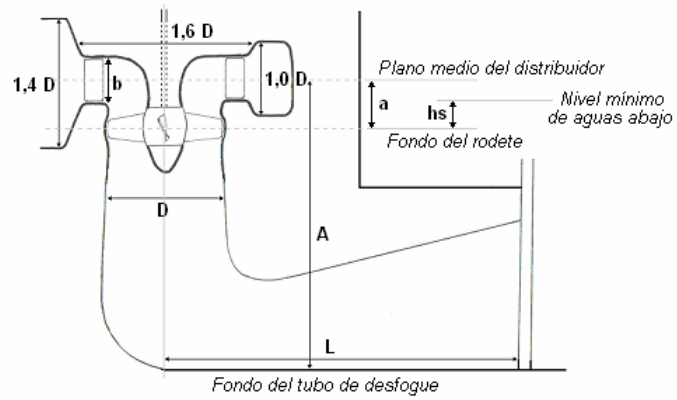
#### 4.4.6. Rendimientos

Luego de obtener el dimensionamiento de la turbina, esta presenta unos rendimientos los cuales se pueden obtener en función de su velocidad específica.



**Figura 71: Rendimientos en la turbina Kaplan**

Finalmente se puede observar la instalación típica de una central con una turbina Kaplan.



**Figura 72: Instalación de una central con turbina Kaplan**

## CONCLUSIONES

- El aprendizaje se apoya fuertemente en la presentación gráfica de los conceptos y mecanismos de funcionamiento de las turbinas. Este trabajo demuestra que es posible romper el paradigma del aprendizaje exclusivo al libro.
- Se establece una motivación al estudiante para el estudio y profundización en el tema de las turbinas hidráulicas al ser presentadas primero en los modelos didácticos agradables a la vista y segundo en el simulador, que le ofrece una interacción con la dinámica de las turbinas hidráulicas.
- Las salidas de campo constituyen un medio que permite confrontar lo abstracto de un libro con lo que existe en la realidad, ofreciendo una visión más clara de cómo se relacionan los conceptos teóricos con la práctica.
- La cooperación entre la Universidad y la Industria es de vital importancia para el desarrollo de proyectos educativos en beneficio de las partes.
- La herramienta ofrece resultados confiables en el dimensionamiento preliminar de las principales características constructivas de una turbina hidráulica y sus instalaciones, que después de experimentación y cálculos más específicos podrán cambiar en gran medida dependiendo de las particularidades de cada caso que sea considerado.

- La integración de diferentes elementos de programación ofrece resultados de muy buenas características, tales como presentación, modularidad, facilidad de uso, compatibilidad entre otras, las cuales incidirán en beneficio de los usuarios de la herramienta.

## RECOMENDACIONES

- Dado el carácter modular de la herramienta, se recomienda la expansión de la misma para otras alternativas de generación de energía eléctrica con el fin de incluir los demás temas del curso Energía y Medio Ambiente.
- Para la continuidad y difusión de este tipo de herramientas, sería idóneo que la Escuela incluyera en el programa académico un curso de programación basada en objetos bajo lenguaje MS Visual Basic™, y/o aplicaciones de desarrollo gráfico como Corel Draw™, AutoCAD™ entre otros.
- Habilitar el funcionamiento en red de la herramienta, para permitir la interacción entre usuarios y el profesor de la asignatura.
- En beneficio del aprendizaje y la pedagogía para los estudiantes de la Escuela y la Universidad, se propone extender el desarrollo de herramientas gráficas como elementos de valor agregado al proceso educativo en otras asignaturas.

## **BIBLIOGRAFÍA**

AMOROCHO CORTÉS, Enrique. Apuntes sobre energía y recursos energéticos. UNAB, 2000. Bucaramanga.

AVALLONE, Eugene A. "Manual del ingeniero mecánico". Novena edición. Editorial McGraw-Hill, 1995.

CEBALLOS, Francisco. "Curso de programación visual Basic 6". Editorial Alfa Omega. 1999.

CEBALLOS, Francisco. "Enciclopedia de MS Visual Basic". Editorial Alfa Omega. 2001.

D'CROZ, Nestor. "Ensayo de un modelo de turbina Pelton". Departamento de Ingeniería Mecánica UIS, 1983.

DUARTE AGUDELO, Carlos Arturo. Bombas centrífugas y turbinas hidráulicas. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá 2002.

EMPRESA DE ENERGÍA DE BOGOTÁ S.A. E.S.P. Energía, su perspectiva, su conversión y utilidades en Colombia. PUI-ENERGÍA, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

GÓMEZ NAVARRO, José. Saltos de agua y presas de embalse Volumen 1. Escuela de Ingenieros de caminos, canales y puertos, 1952. Madrid.

KOSOW, Irving. Máquinas eléctricas y transformadores. Prentice-Hall, 1993. México.

LUCA, Carlos. Plantas eléctricas, Teoría y Proyecto. Alfaomega, 1995. México.

MATERÓN, Hernán. "Obras hidráulicas rurales". Editorial Univalle, 1997.

MEIER, Heli. Experiencias locales con micro hidrotecnología. Publicaciones SKAT, 1985.

MITSUBISHI POWER, "Mitsubishi water turbines". 1982.

NIÑO VICENTE, José Roberto. Hidráulica de tuberías y máquinas hidráulicas. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá 2002.

POLO, Manuel. "Turbomáquinas hidráulicas". Tercera edición. Editorial Limusa, 1988.

RODRÍGUEZ, Andrés. Hydrologic study for Mar Chiquita system. Laboratorio de Hidráulica, Universidad de Córdoba, Argentina. 2000. rodrig@com.uncor.edu

RUSSELL, George. "Hidráulica". Editorial continental, 1971.

SANÍN VILLA, Gabriel. Manual de instalación de ruedas Pelton. Imp. Oficial, Medellín, 1925.

TORRES, Francisco. "Obras hidráulicas". Editorial Limusa, 1994.

VINING, Kevin. Estimation of monthly evaporation from Lake Ashtabula in North Dakota, Orwell Lake in Minnesota, and Lake Traverse in Minnesota and South Dakota. USGS, 2003.

ZURITA RUÍZ, José. Obras Hidráulicas. Monografías CEAC de la construcción.

## **ANEXO A- Modelos didácticos de las turbinas**

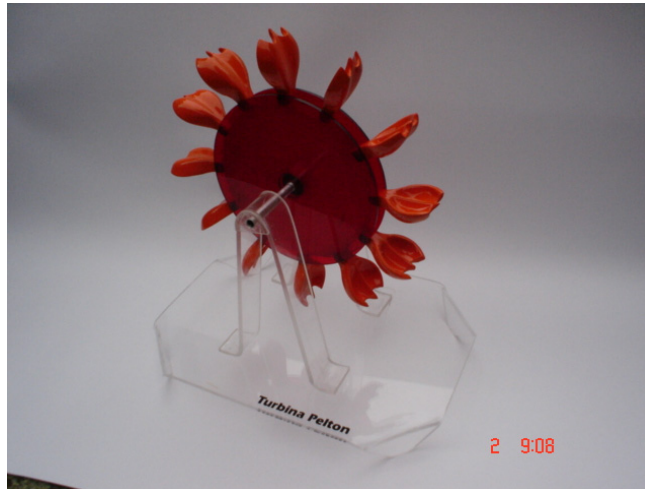
Por medio de los modelos didácticos presentados se busca que el estudiante del curso de Energía y Medio Ambiente obtenga una primera perspectiva de las turbinas reales y familiarizarse con ellas.

Para la construcción del modelo de la turbina Pelton se fabricaron cuatro moldes en yeso, que después de un tiempo de curado se colaron con resina poliéster para obtener piezas preliminares de sus álabes que luego con un ligero pulimento se alisaron y pintaron con aerógrafo logrando un acabado de muy buena presentación.



**Figura 73: Moldes de los álabes**

Para el cuerpo del rodete se utilizó acrílico, así como para los soportes, el eje consiste en un tubo de aluminio ajustado al rodamiento instalado en el rodete. Los álabes están adheridos al rodete con adhesivo instantáneo.

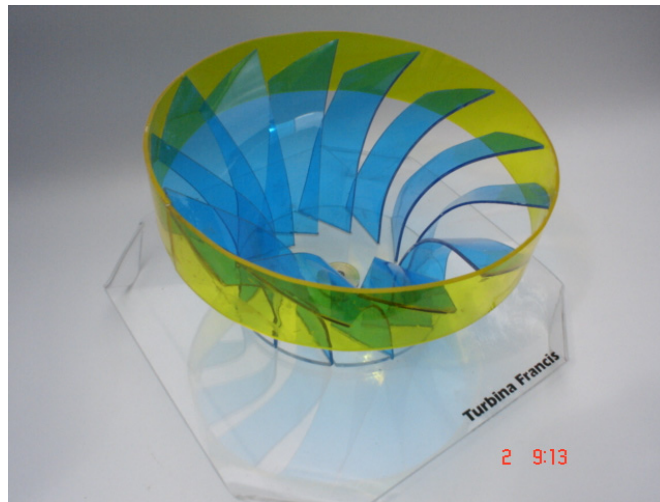


**Figura 74: Modelo final de la turbina Pelton**

El modelo de la turbina Francis esta elaborado en acrílico, este fue el modelo que más problemas causó para su construcción debido a la complejidad estructural del mismo. Para lograr las curvaturas en sus diferentes piezas se sometieron a un calentamiento con una pistola de calor, y puesto que cada álabe se trabajó por separado, fue necesario conseguir una formaleta que se adaptará a la curvatura de la pieza con el fin de lograr la mayor homogeneidad posible en los doce elementos.



**Figura 75: Distribución de los álaves**

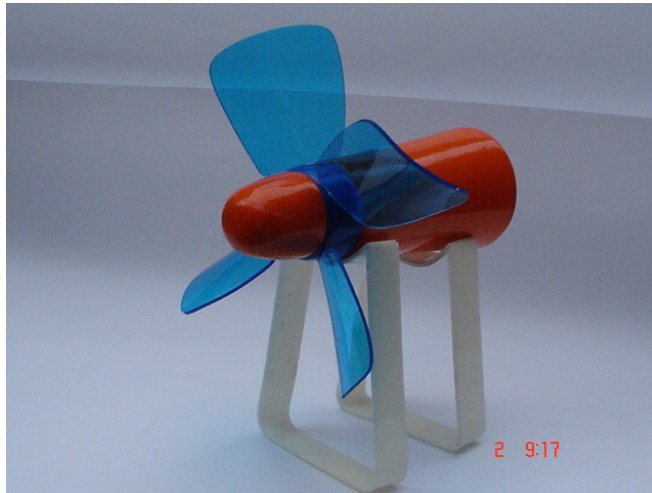


**Figura 76: Modelo final de la turbina Francis**

El modelo de la turbina Kaplan (Hélice) se construyó en madera, acrílico y plástico, además de las piezas metálicas auxiliares. A un cuerpo de madera torneado se le introdujo un eje en aluminio, éste soporta un pequeño casquete en madera y un anillo de plástico obtenido de un aspa de ventilador al que se le eliminaron sus palas para instalarle los respectivos álabes en acrílico.



**Figura 77: Casquete y cuerpo con su eje**



**Figura 78: Modelo final de la turbina Kaplan (Hélice)**

Los materiales utilizados respondieron a las necesidades particulares de cada modelo, por ejemplo, para los álabes de la turbina Pelton fue más fácil trabajar con resina que con aluminio además que la resina nos ofrece un mejor acabado comparado con el aluminio que eventualmente debido a las aleaciones empleadas y a un deficiente proceso de moldeo tiende a ganar porosidades en la superficie, lo cual afecta el acabado final; los álabes de la turbina Francis se elaboraron en acrílico porque es un material que se deja transformar suavemente con calor y toma una forma definitiva al enfriarse y que pensar en un metal para estas piezas además de descabellado habría resultado en un proceso muy lento y costoso. En resumen, los modelos se desarrollaron pensando siempre en unos costos razonables, que nos permitieran obtener una buena presentación y durabilidad.

Para lograr una vida útil moderada de los modelos recomendamos:

- No someter los modelos a velocidades de giro manuales que puedan provocar desajustes en sus rodamientos, así como el eventual despegue de las diferentes piezas que los conforman.

- Mantener los modelos en un recinto cerrado donde no sean atacados por el polvo, humedad y luz solar que deterioran paulatinamente la presentación traslúcida del acrílico.
- No girar las turbinas ejerciendo empuje sobre los álabes directamente porque se puede debilitar la juntura de pegamento que los une a los cuerpos adyacentes.
- No golpear los modelos, y limpiarlos ocasionalmente con un paño seco, o preferentemente con una pistola de aire (Pistola de pintura) sin ninguna carga de color, y a una presión de 10-20 lb.
- Al hacer señalamientos para efectos didácticos sobre los modelos, evitar el uso de elementos que puedan deteriorar el acabado.
- Procurar un lugar de descanso de los modelos, sobre una superficie plana y horizontal y de fácil acceso para evitar accidentes cuando se requiera su movilización



**Figura 79: Vista general de los modelos**

**ANEXO B. Algunas propiedades de MS Visual Basic™ y otros programas utilizados en el desarrollo de esta herramienta**

Esta herramienta fue desarrollada con el lenguaje MS Visual Basic™ y se acudió a otros lenguajes para completar la aplicación final. A continuación se exponen algunas de las propiedades de estos.

Existen varios tipos de programas. Los hay secuenciales, que reciben unos datos, los procesan y expone los resultados de las operaciones pertinentes que le fueron programadas y que por lo general, mientras el programa esta corriendo éste no requiere la intervención del usuario. Los hay interactivos, que exigen al usuario su intervención ya sea para suministrar datos o definir acciones a seguir por medio de comandos. Los hay orientados a objetos, donde los objetos son paquetes o entidades especiales cuyo comportamiento esta definido por atributos particulares, por ejemplo, una ventana de MS Windows™ es un objeto, al que se le pueden cambiar sus dimensiones y su color. Y los hay orientados a eventos, que una vez cargados, esperan las acciones a tomar por el usuario, y donde el comportamiento del programa viene definido por las múltiples acciones del usuario que son los eventos, por ejemplo, MS Excel™.

MS Visual Basic™ esta diseñado para la construcción de programas bajo la plataforma operativa de MS Windows™, con todas las herramientas que ello supone, como son los cuadros de diálogo, los iconos, las ventanas, comandos de selección entre otros.

MS Visual Basic™ funciona en dos modos; el primero de ellos, modo de diseño, donde el usuario construye la aplicación en forma interactiva definiendo controles y propiedades en el formulario, y desarrollando funciones que respondan a los eventos definidos por la aplicación particular. El segundo, modo de ejecución, el usuario introduce eventos que producen respuestas del programa para cada evento en particular.

Los controles son elementos gráficos tales como botones, iconos, barras de desplazamiento, cuadros de diálogo, listas de selección entre otros. Los formularios son las diferentes ventanas sobre las cuales el usuario realiza los eventos, y a su vez, un formulario puede contener varios controles.

Cada formulario y control tienen unas propiedades que determinan su aspecto, color, longitud, tipo de letra entre otros, y su respuesta a los eventos introducidos por el usuario.

MS Visual Basic™ posee una muy amplia gama de posibilidades en aplicaciones prácticas. En lo que concierne a este trabajo, el fuerte de MS Visual Basic™ junto a Delphi™ y OpenGL™ es el robusto soporte gráfico que brindan para la representación de movimientos mecánicos, lo que ofrece al usuario un ambiente bastante ameno, didáctico y fácil de usar.

La base de datos necesaria fue desarrollada en MS Access™, que se concibe como un sistema de gestión de bases de datos relacional, porque permite relacionar diferentes tablas dentro de una o varias bases de datos a través de valores específicos, por ejemplo, en un almacén se pueden identificar los productos con sus referencias y características completas por un inventario, y al momento de una venta sólo es necesario ingresar su código para inmediatamente obtener su precio y deducirlo del inventario inicial.

La herramienta es completamente modular, esto le permite ser actualizada o extendida en cualquier momento por el administrador, en busca de mejorar y ampliar la aplicación. Además, es posible adecuar la herramienta para ser utilizada en red, y modificar las bases de datos para ampliar o redefinir los temas a evaluar al usuario, y otras posibilidades, abriendo una variedad de escenarios para el refuerzo de las actividades pedagógicas de la asignatura

Energía y Medio Ambiente, en beneficio del proceso de aprendizaje y de la calidad de la educación. Estas ventajas se desprenden de la gran versatilidad que ofrece el lenguaje en el que fue desarrollada, es decir, MS Visual Basic™.

## **ANEXO C. Tutorial de SiDiGeHi**

## **INTRODUCCIÓN**

El Simulador Didáctico de Generación Hidráulica fue concebido como un apoyo pedagógico para la asignatura de Energía y Medio Ambiente de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones adscrita a la Universidad Industrial de Santander, en busca de facilitar el aprendizaje del estudiante con una interfaz gráfica amena y de fácil uso que le permita autoevaluar sus conocimientos en los temas de la asignatura, realizar un dimensionamiento preliminar de una turbina para un caso de salto y caudal particulares, y apreciar por medio de animaciones algunas cualidades dinámicas de las turbinas hidráulicas más utilizadas en la generación convencional de energía eléctrica, es decir, las turbinas Pelton, Francis y Kaplan.

## **C. 1. REQUERIMIENTOS**

Los requerimientos mínimos para la instalación de la herramienta son:

- Sistema operativo MS Windows XP™
- Memoria RAM de 256 Mb
- Espacio disponible en disco duro de 20 Mb

Se recomienda para una presentación óptima una resolución en pantalla de 1024 por 768 píxeles.

No se requiere para el correcto funcionamiento de la herramienta la instalación de MS Visual Basic™. El setup de la herramienta genera los componentes necesarios para la instalación de la misma.

## **C.2. INSTALACIÓN DE LA HERRAMIENTA**

Introduzca el disco compacto (CD) con la etiqueta “Simulador Didáctico de Generación Hidráulica” (SiDiGeHi) en la unidad de CD del equipo. Revise el contenido del CD, y al encontrar el icono del “Setup”, haga doble click sobre él e iniciará el proceso de Instalación. Una vez terminada la instalación correctamente, diríjase nuevamente al contenido del CD instalador y copie la carpeta “Iconos” en el directorio de destino generado por el instalador (por defecto, C:\Archivos de programa\SiDiGeHi).

## **C.3. INICIO DE LA HERRAMIENTA**

Haga click en el icono de acceso directo “SiDiGeHi” que son las siglas de la herramienta. Seguidamente aparece la imagen de la Figura 80 como cuadro de inicio mientras se carga la aplicación. Se puede ingresar a la herramienta

como dos usuarios, bien sea como estudiante o como administrador tal como lo muestra la Figura 81. En el primer caso, se solicita el código del estudiante con el fin de generar el respectivo campo en la base de datos y poder hacer un seguimiento al usuario para la evaluación del módulo de preguntas. En el segundo caso se solicita al administrador el login “root” y el password, que le permitirá ingresar a la base de datos del módulo de preguntas y modificarla, además podrá obtener informes generalizados del desempeño de los estudiantes evaluados en el equipo donde se encuentra instalada la aplicación.



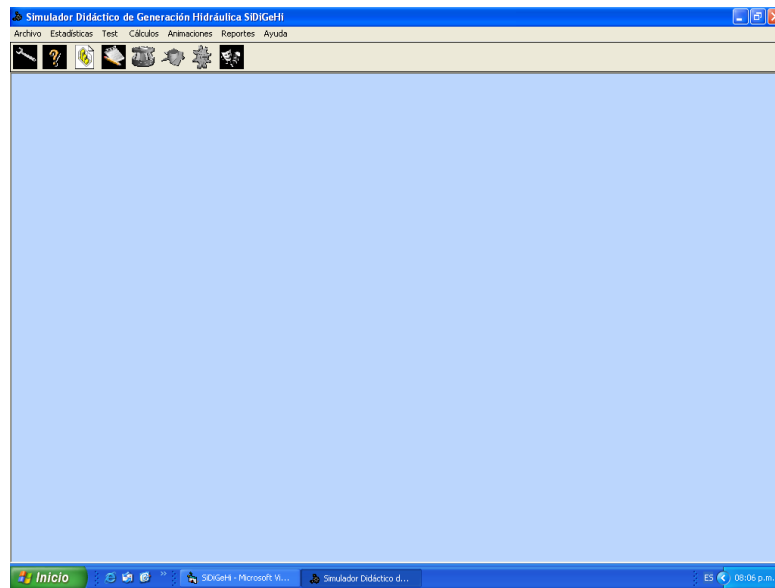
**Figura 80: Cuadro de inicio**



**Figura 81: Inicio según el tipo de usuario**

Al dar clic en “Aceptar” se produce el menú principal de la herramienta, ver Figura 82, donde aparecen las siguientes herramientas:

- Menú Archivo: permite acceder a “Mantenimiento de la base de datos” y a “Usuarios” si el usuario es el Administrador y al botón de “Salida”.
- Menú Estadística: mediante el cual se puede observar el seguimiento en la evaluación de los usuarios registrados en el equipo.
- Menú Test: que despliega el botón de inicio para el cuestionario.
- Menú Cálculos: que despliega el botón de inicio para el módulo de dimensionamiento.
- Menú Animaciones: que despliega las turbinas a observar en la animación (Pelton, Francis y Kaplan).
- Menú Reportes: que despliega las opciones de informe consolidado e informe detallado.
- Menú Ayuda: por medio del cual se accede a la ayuda en HTML de la herramienta dando click en el campo “Contenido”, y se accede al cuadro de información “Acerca de” en el respectivo campo.



**Figura 82: Menú principal**

#### **C.4. MÓDULO DE PREGUNTAS**

En el menú principal se despliega el menú “Test” que despliega el botón que activa el cuestionario para el usuario previamente registrado (Figura 83), al dar click sobre el botón “Cuestionario” o su icono, aparece una ventana con una pregunta seleccionada aleatoriamente de la base de datos interna. El usuario selecciona la respuesta correcta para cada pregunta y después de dar click en el botón “Evaluar” aparecerá un mensaje con el número de aciertos y el tiempo de la sesión (Figura 84). En el menú “Estadísticas” o su icono (Figura 85), la herramienta genera un seguimiento de los resultados obtenidos por el usuario guardando las cuatro sesiones más recientes cuantificadas en una escala porcentual en la cual el 100% corresponde a la totalidad de las preguntas de la sesión, y presenta la información con dos estilos: 2D (Figura 86) y 3D (Figura 87), esta última cambia la vista del histograma presionando la tecla Ctrl y posando el puntero sobre él.

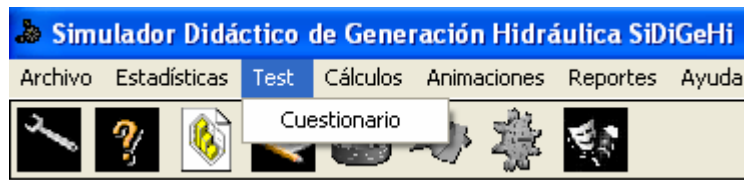


Figura 83: Menú Test

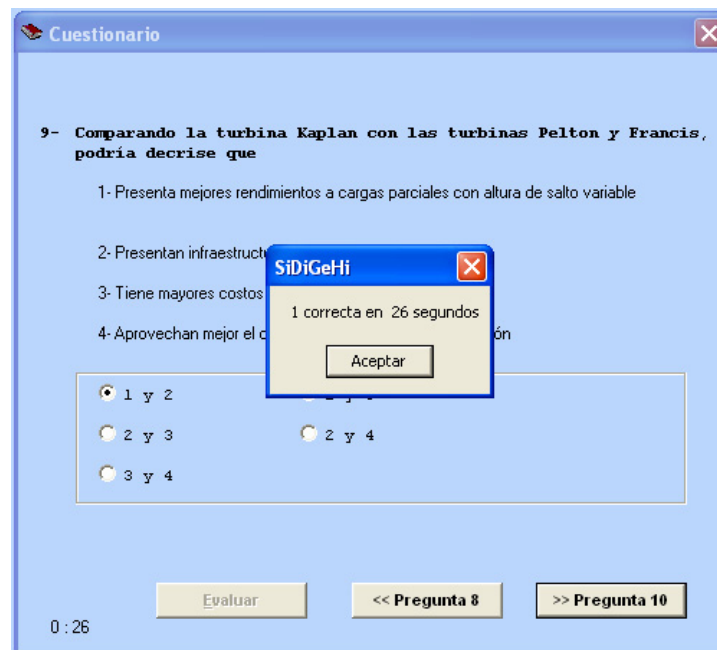


Figura 84: Ventana típica del módulo de preguntas



**Figura 85: Menú Estadística**



**Figura 86: Presentación plana del seguimiento al usuario**

Adicionalmente, el usuario a través del Menú “Reportes” o su icono (Figura 88) puede desplegar una presentación (Figura 89) de sus cuatro sesiones

más recientes con la posibilidad de generar un archivo de extensión .txt cuyo nombre es el código del usuario que se guardará en la ruta C:\SiDiGeHilnformes.

Como Administrador, el usuario esta habilitado para realizar modificaciones sobre la base de datos de las preguntas por medio del Menú “Archivo” que despliega las opciones mostradas en la Figura 90. Con el botón “Mantenimiento BD” o su icono (Figura 91), se ingresa a la ventana de mantenimiento mostrada en la Figura 92, y posando el puntero sobre la pregunta y dando click derecho se activa la ventana de edición, con las opciones: Editar (Realizar cambios sobre la pregunta actual), Borrar (Eliminar la pregunta actual de la base de datos) y agregar (Crear una nueva pregunta).



**Figura 87: Presentación 3D del seguimiento al usuario**



Figura 88: Menú Reportes

Reporte Detallado

Universidad Industrial de Santander  
Simulador Didáctico de Generación Hidráulica  
SiDiGeHi

Código: 1996254      Fecha: 01/06/2005

|          | % Respuestas Bien | % Respuestas Mal | Tiempo |
|----------|-------------------|------------------|--------|
| Sesión 1 | 10                | 90               | 26     |
| Sesión 2 | 20                | 80               | 123    |
| Sesión 3 | 0                 | 100              | 0      |
| Sesión 4 | 0                 | 100              | 0      |

< << >> >

Salir Guardar

Figura 89: Reporte individual del usuario

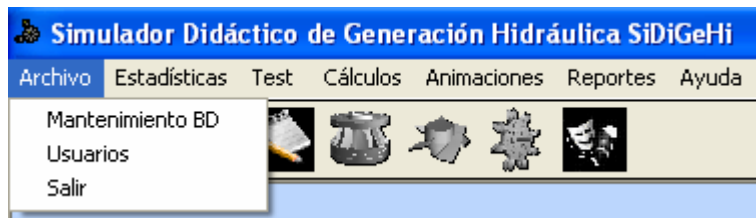


Figura 90: Menú Archivo



Figura 91: Icono de Mantenimiento para la base de datos

El Administrador también está habilitado para observar los Reportes Consolidados como el de la Figura 93, seleccionando esta opción en el respectivo Menú “Reportes”, la cual le permite conocer el seguimiento de los usuarios registrados en el equipo y enviarlos en un archivo de extensión .txt a la ruta C:\SiDiGeHi\Informes con la opción “Guardar”.

Actualización BD

**Mantenimiento de la base de datos**

| Número | Pregunta          | Complemento        | Complemento      | Complemento       | Complemento       | Complemento      | Tipo |
|--------|-------------------|--------------------|------------------|-------------------|-------------------|------------------|------|
| 1      | Son fuentes de e  | Gas                | Carbón           | Petróleo          | Agua              | Uranio           | 1    |
| 2      | Son procesos inv  | Fotosíntesis       | Descomposición   | Litificación      | Metamorfismo      |                  | 3    |
| 3      | La cantidad de c  | Los combustibles   |                  |                   |                   |                  | 2    |
| 4      | Son causas del e  | Clorofluorocarb    | Ácido sulfúrico  | Dióxido de carb   | Ácido nítrico     |                  | 3    |
| 5      | Son causales de   | Clorofluorocarb    | Ácido sulfúrico  | Dióxido de carb   | Ácido nítrico     |                  | 2    |
| 6      | No se deriva en e | Gasolina           | Diesel           | Naftas            | Alquitrán         | Kerosene         | 1    |
| 7      | No hace parte de  | Energía solar      | Biomasa          | Gas Natural       | Fusión fría       | Energía eólica   | 1    |
| 8      | Los combustible f | Su formación, qu   |                  |                   |                   |                  | 2    |
| 9      | El combustible fó | Gas natural        | Petróleo         | Carbón            | Leña              | Hulla            | 1    |
| 10     | El carbón domina  | El carbón es un c  |                  |                   |                   |                  | 2    |
| 11     | Poseen reservas   | Atlántico y Guajir | Guajira y Huila  | Cesar y Córdoba   | Huila y Meta      | Meta y Guajira   | 1    |
| 12     | Son producidos p  | Arenas movediza    | Arenas bituminos | Asfaltos          | Hulla             |                  | 3    |
| 13     | Son métodos de    | Lacho fijo y lech  | Lecho muerto y k | Lecho abierto y k | Lecho de arrastre | Lecho fluidizado | 1    |
| 14     | La combustión de  | En los sistemas d  |                  |                   |                   |                  | 2    |
| 15     | Son medidas que   | Pulverización del  | Combustión en le | Combustión en le  | Implementación d  |                  | 3    |
| 16     | Puede obtenerse   | Petróleo           | Uranio           | Gas               | Leña              | Carbón           | 1    |
| 17     | El combustible de | Gasolina           | Leña             | Diesel            | Gas natural       | Carbón           | 1    |
| 18     | El calor es       | Energía proced     | Energía liberada | Energía liberada  | Energía cinética  | Aumento de la t  | 1    |

Número de preguntas en el sistema

61

Figura 92: Ventana de Mantenimiento

**Reporte Consolidado**

Universidad Industrial de Santander  
 Simulador Didáctico de Generación Hidráulica  
 SiDiGeHi

|   | Código  | Fecha      | Total Aciertos | Tiempo Total |
|---|---------|------------|----------------|--------------|
| ▶ | 1995637 | 01/06/2005 | 0              | 29           |
|   | 4545    | 01/06/2005 | 0              | 12           |
|   | 1996254 | 01/06/2005 | 0              | 26           |

Guardar      Salir

**Figura 93: Reporte Consolidado**

### C.5. MÓDULO DE DIMENSIONAMIENTO

Para ingresar al módulo de dimensionamiento se puede hacer a través del menú o del icono creado para tal fin.

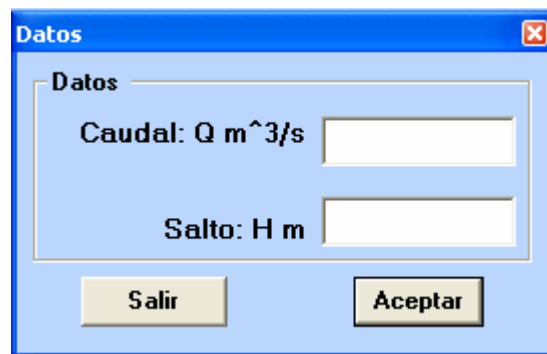


**Figura 94: Ingreso por menú.**



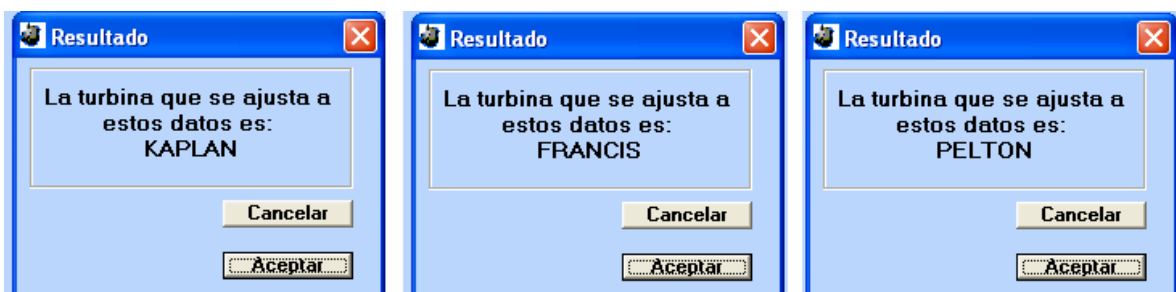
**Figura 95: Ingreso por icono.**

Seguidamente se digitan los datos de entrada necesarios para escoger el tipo de turbina.



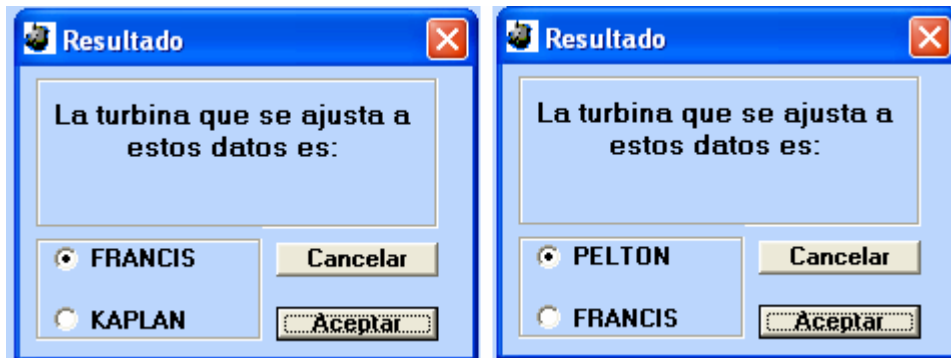
**Figura 96: Datos de entrada.**

La turbina seleccionada puede ser Pelton, Francis o Kaplan.



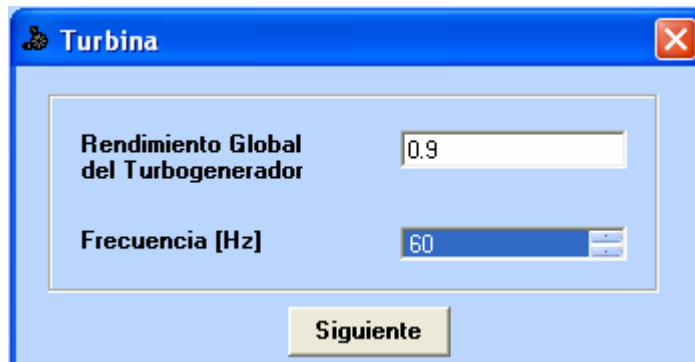
**Figura 97: Turbinas que pueden ser seleccionadas.**

Se puede presentar el caso que para unas mismas condiciones de entrada se adapten dos turbinas. Dada esta eventualidad el usuario de acuerdo a su criterio decide con cual desea trabajar.



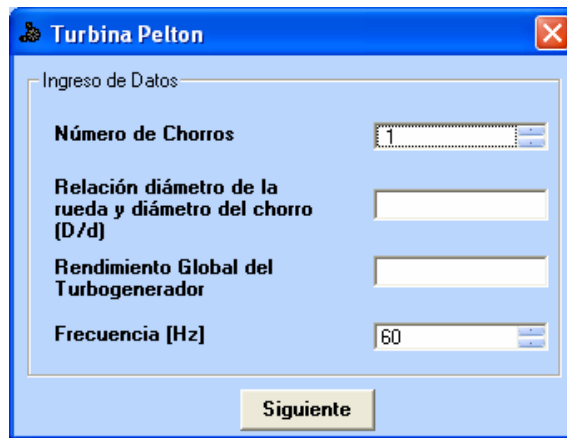
**Figura 98: Escogencia de la turbina.**

Si la turbina seleccionada finalmente es una Kaplan o una Francis, se debe llenar los campos correspondientes al rendimiento global del turbogenerador, el cual varía entre 0.8 y 1, también el de la frecuencia eléctrica que puede ser 50 ó 60 Hz.



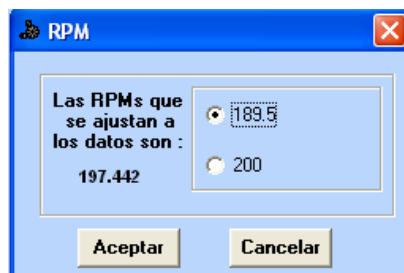
**Figura 99: Ingreso de rendimiento y frecuencia.**

En caso que la turbina seleccionada sea la Pelton, además de los requisitos anteriores se anexaran datos propios de esta turbina que son el número de chorros el cual varía entre 1 y 6, igualmente la relación del diámetro del rodete y el diámetro del chorro ( $D/d$ ) que oscila entre 8 y 12.



**Figura 100: Datos de la turbina Pelton.**

El ajuste de la velocidad de sincronismo se hace de acuerdo con la frecuencia eléctrica que se selecciono anteriormente. Se presentan dos opciones, que son la superior y la inferior de la velocidad a la cual giraría la turbina, de las cuales el usuario escoge una de acuerdo al criterio que considere mejor.



**Figura 101: Ajuste de la velocidad de sincronismo.**

## **C.5.1 Resultados Finales**

### **C.5.1.1. Turbina Pelton**

Los resultados se mostraran en el siguiente formato. En la opción de graficas, puede dar click en la lupa de cada uno de los cuadros para observar con mejor detalle los datos finales.

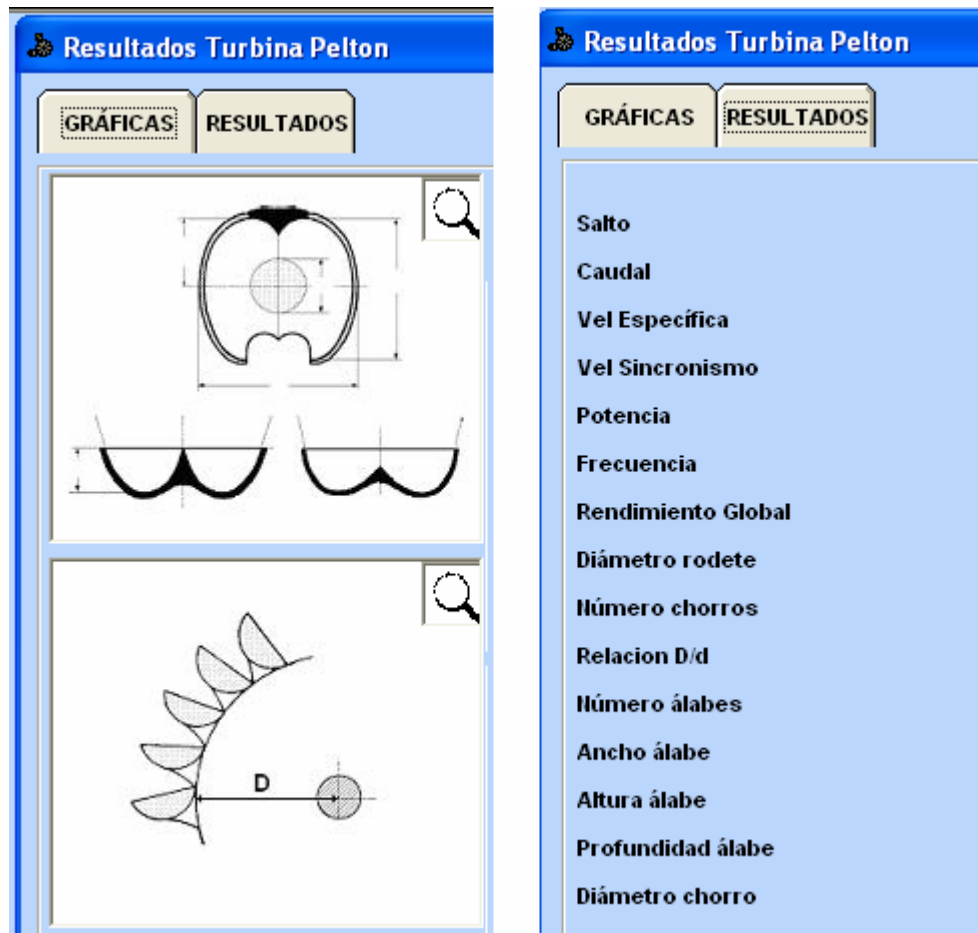


Figura 102: Resultados turbina Pelton.

### C.5.1.2 Turbina Francis

Los resultados de la turbina Francis presenta unos generales y dos particulares que corresponden a métodos diferentes. Para observar más detalladamente los resultados finales se debe dar click sobre la lupa correspondiente.

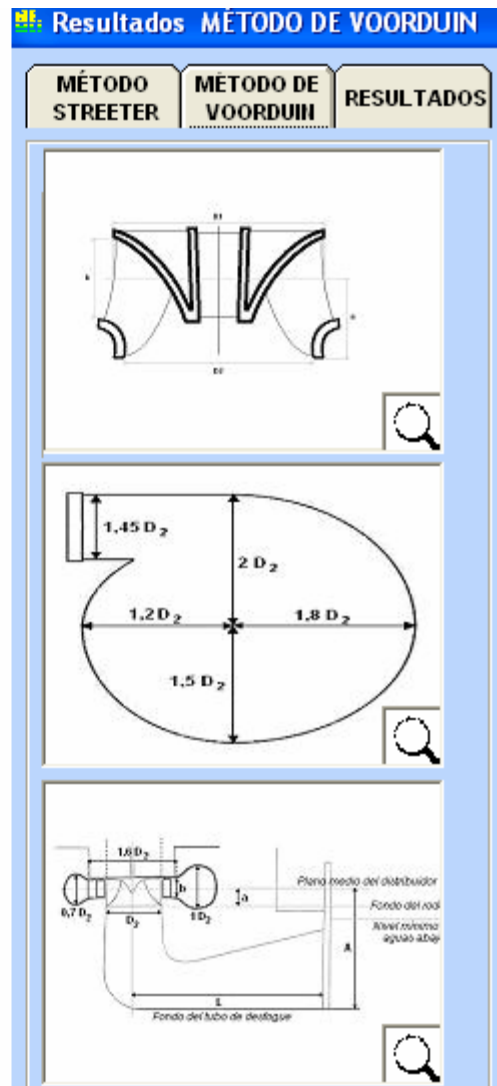
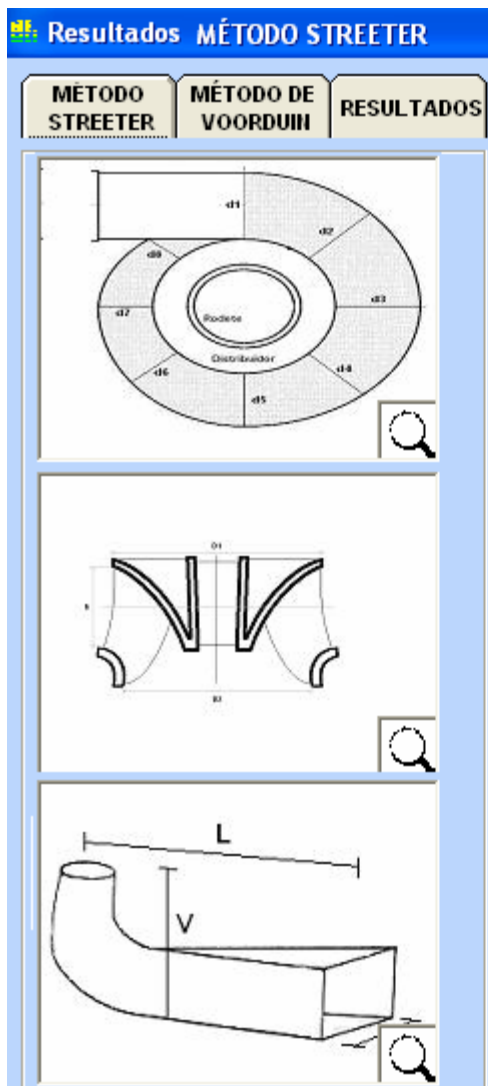


Figura 103: Datos de la turbina Francis por dos métodos.



**Figura 104: Datos consolidados de la turbina Francis.**

### **C.5.1.3. Turbina Kaplan**

Los resultados de la turbina Kaplan presenta unos generales y dos particulares que corresponden a métodos diferentes. Para observar más detalladamente los resultados finales se debe dar click sobre la lupa correspondiente.

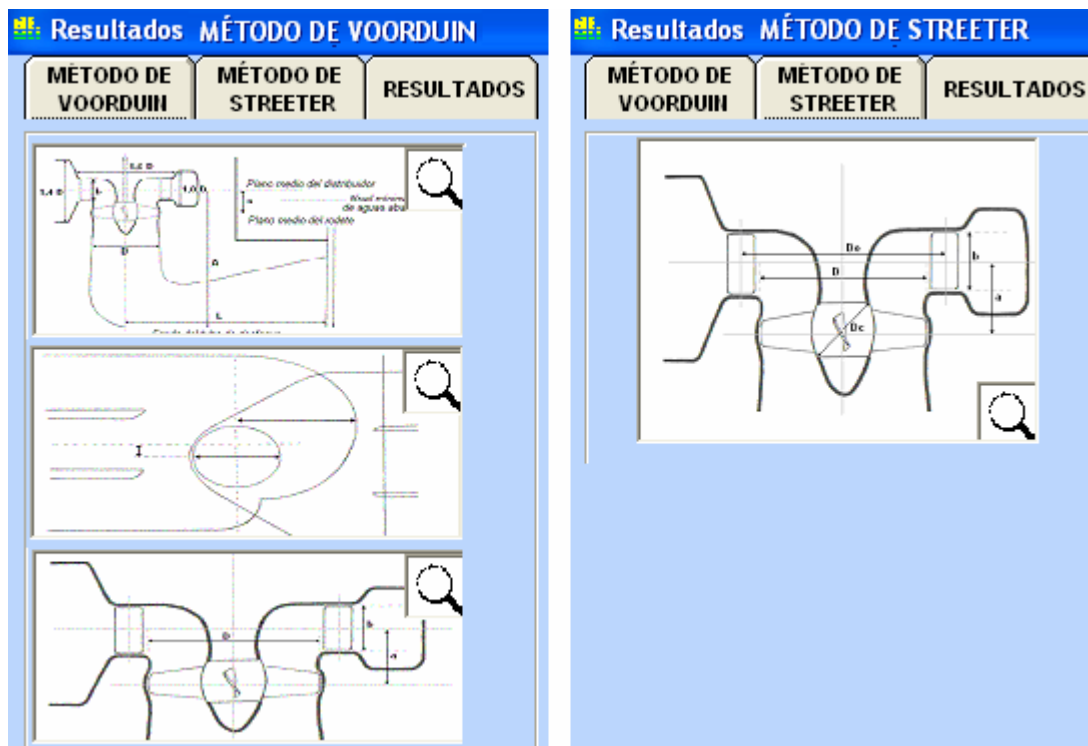
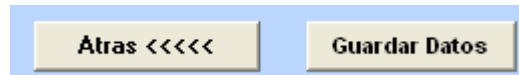


Figura 105: Datos de la turbina Kaplan por dos métodos.

| GENERALES  | MÉTODO STREETER  | MÉTODO VOORDUIN   |
|--|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Salto</li> <li>Caudal</li> <li>Vel Específica</li> <li>Vel Sincronismo</li> <li>Potencia</li> <li>Frecuencia</li> <li>Rendimiento Global</li> <li>Número de álabes</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Diámetro del rodete</li> <li>Diámetro del cubo</li> <li>Diámetro ecuatorial del distribuidor</li> <li>Altura Distribuidor</li> <li>Altura media del distribuidor al plano medio del rodete</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Diámetro del rodete</li> <li>Altura Distribuidor</li> <li>Altura media del distribuidor al plano medio del rodete</li> </ul> |
|  |  | <b>RENDIMIENTOS</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Máximo</li> <li>Media Carga</li> <li>Plena Carga</li> </ul>  |

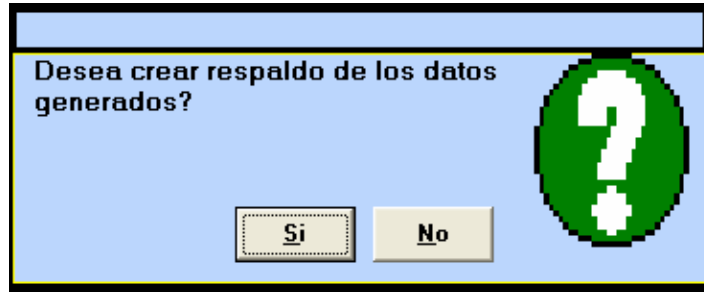
Figura 106: Datos consolidados de la turbina Kaplan.

Finalmente en la parte central inferior de los resultados de todas las turbinas, se presentan las opciones de volver a atrás y de guardar los datos.



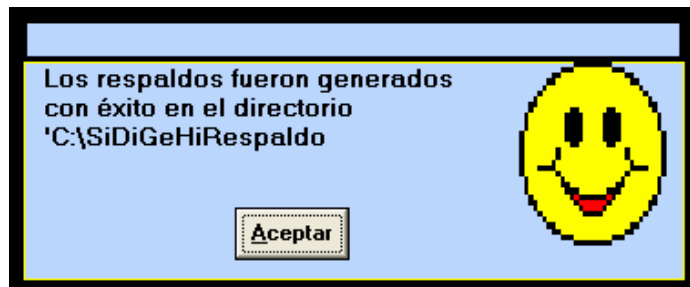
**Figura 107: Opciones para recalcular y guardar.**

Si se escoge la opción guardar, aparecerá la siguiente ventana:



**Figura 108: Opción de guardar resultados.**

Si responde afirmativamente, se creará una carpeta en C:\SiDiGeHiRespaldo, dentro de la cual se guardará la información correspondiente a la turbina que se esta trabajando.



**Figura 109: Confirmación de copiado de los resultados.**

Si elige la opción *atrás*, volverá a una de las ventanas mostradas en las Figura 99 o Figura 100, dependiendo de la turbina elegida inicialmente. Esta opción permite hacer cambios para recalcular la turbina elegida con los mismos datos de salto y caudal.

## C.6. MÓDULO DE ANIMACIONES

Por medio del menú “Animaciones” del menú principal se activa el Módulo de Animaciones, para observar el funcionamiento de las turbinas Pelton, Francis y Kaplan, como lo muestra la Figura 110, asimismo están habilitados los respectivos iconos para cada turbina como en la Figura 111.

### C.6.1. Turbina Pelton

Para ingresar a la animación de la Turbina Pelton se selecciona del menú Animaciones, donde se activa la imagen mostrada en la Figura 112. En esta



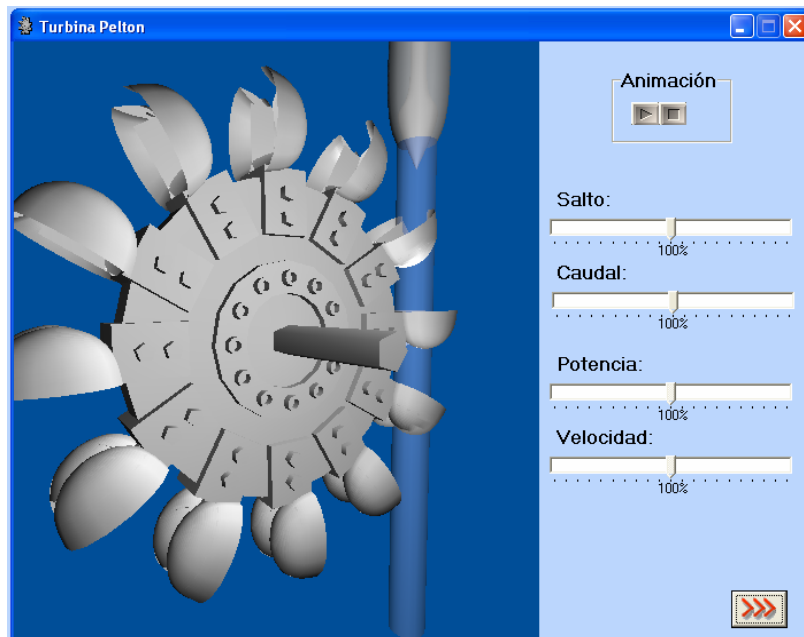
**Figura 110: Menú Animaciones**



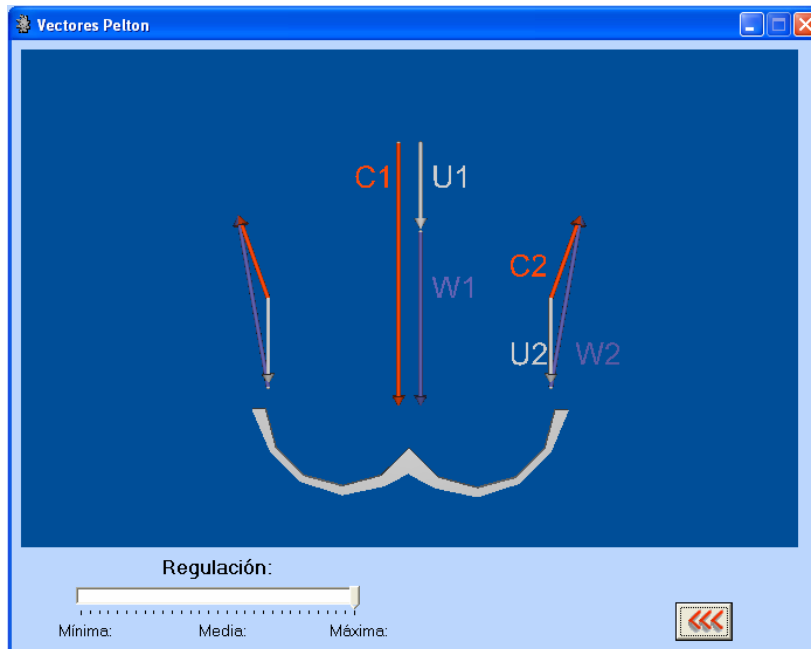
**Figura 111: Iconos del Menú Animaciones**

ventana se pueden obtener diferentes vistas de la turbina en movimiento sosteniendo el click y desplazando el objeto a voluntad, así como variar la

posición de la aguja en el interior del inyector con el scroll o barra de caudal, que provoca un cambio en la velocidad de giro y potencia de la turbina, como lo muestran las barras cualitativas de estado. Haciendo click en el botón “Siguiente” (flechas rojas) se obtiene la ventana de la Figura 113 donde se aprecian los cambios en los vectores velocidad de la turbina originados por cambios en la barra de regulación, además se puede ver el nombre de los vectores posando el puntero sobre las letras que los identifican.



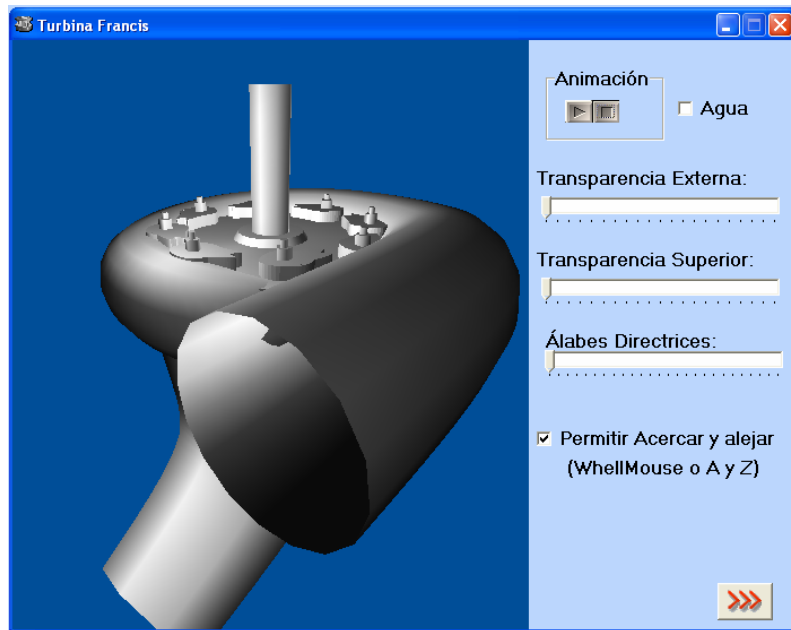
**Figura 112: Ventana de animación de la turbina Pelton**



**Figura 113: Ventana de regulación vectorial para la turbina Pelton**

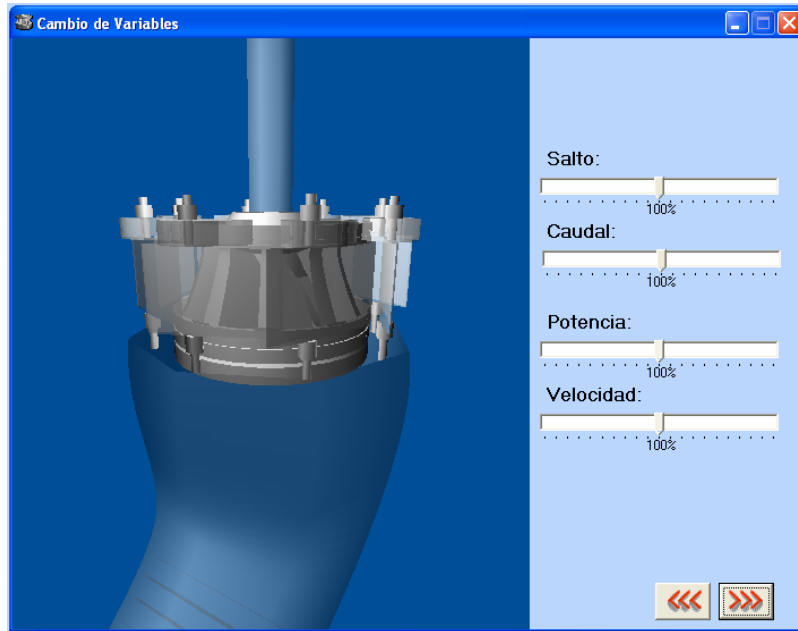
### **C.6.2. Turbina Francis**

En el menú Animaciones se da click a la opción “Francis” lo que activa la ventana mostrada en la Figura 114. Donde se puede manipular la transparencia del objeto y la posición de los álabes del distribuidor con las barras de estado respectivas, también se puede agregar partículas de agua al interior del objeto, dando click sobre el campo “Agua” de la parte superior derecha, que circularán a través de él si los álabes del distribuidor se encuentran abiertos. Para obtener una vista más cercana o lejana del objeto basta con girar el whellmouse (rueda del mouse) o con las teclas A y Z.

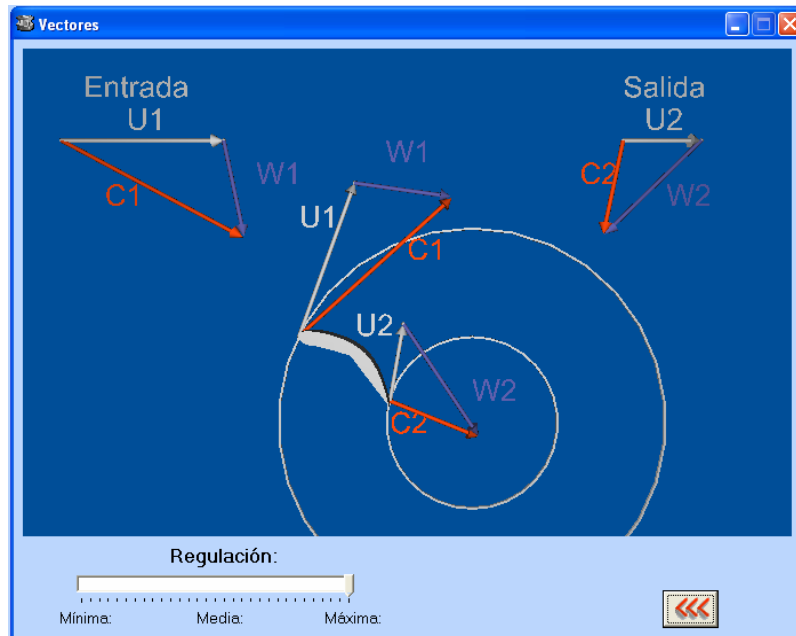


**Figura 114: Ventana de animación de la turbina Francis**

En la ventana siguiente (Figura 115), el objeto se presenta con un nivel de transparencia constante, es decir, el usuario no lo puede modificar como en el caso anterior; se pueden manipular el salto y el caudal para apreciar las variaciones de potencia y velocidad de la turbina. Por último, en el siguiente cuadro (Figura 116) se pueden apreciar las variaciones en el diagrama vectorial de velocidades para diferentes condiciones de entrada del agua a la turbina, según se cambie la posición de los álabes del distribuidor o álabes directrices.



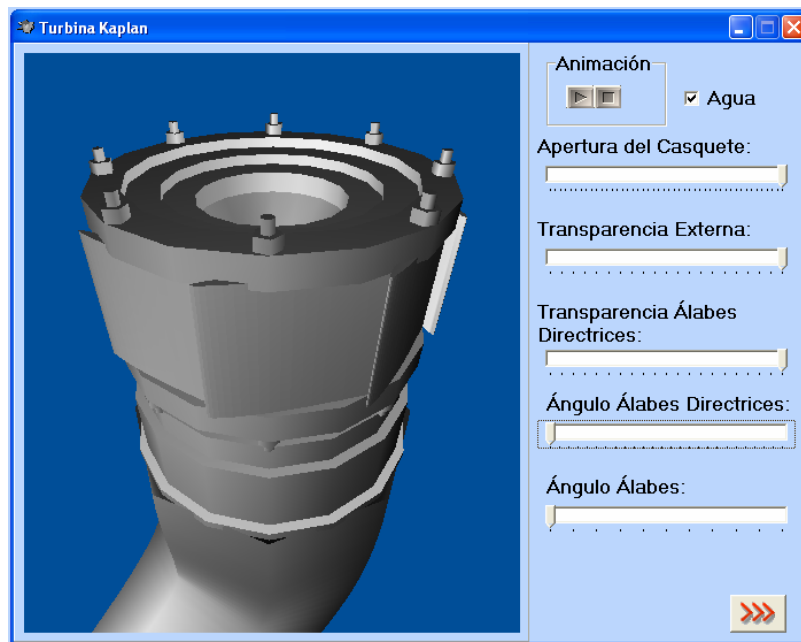
**Figura 115: Ventana de variación de salto y caudal para la turbina Francis**



**Figura 116: Ventana de regulación vectorial para la turbina Francis**

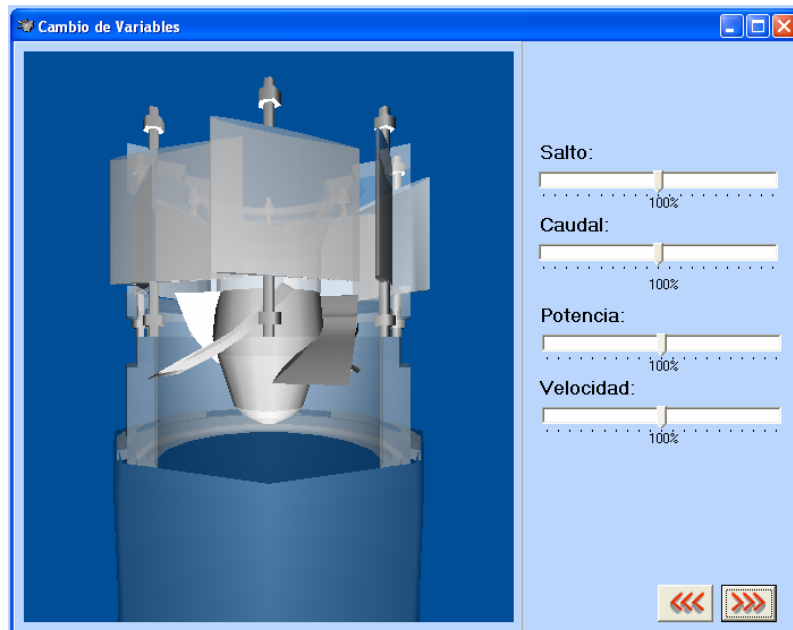
### **C.6.3. Turbina Kaplan**

Se selecciona del menú animaciones con el botón respectivo, que activa la ventana de la Figura 117. Al igual que en las anteriores turbinas, acá también se puede manipular la transparencia del objeto, así como el ángulo de visión o apertura del casquete alrededor de la turbina, y se puede cambiar la posición de los álabes del distribuidor y el ángulo de giro de los álabes de la turbina sobre su eje de rotación.



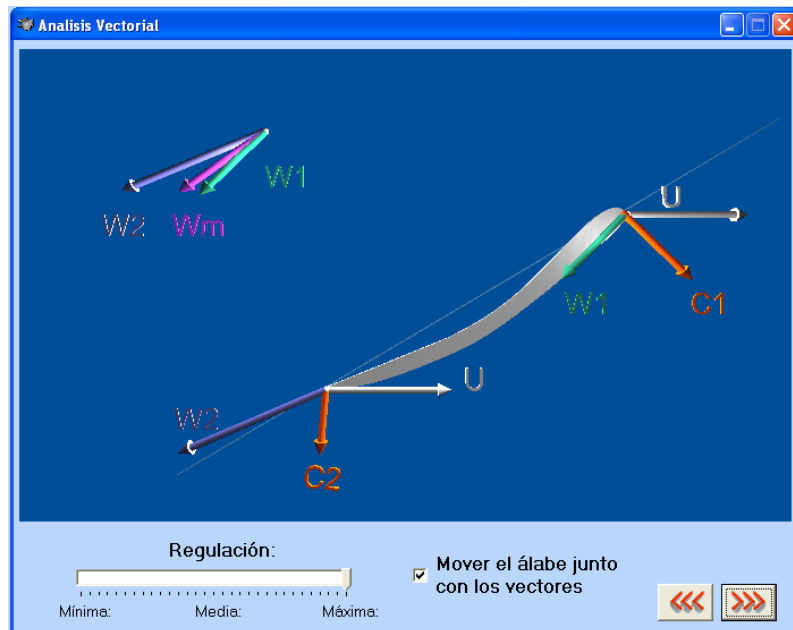
**Figura 117: Ventana de animación de la turbina Kaplan**

En la ventana siguiente (Figura 118) se aprecian las variaciones en la velocidad y potencia de la turbina, según se cambien el salto y el caudal, con los campos habilitados para ello.



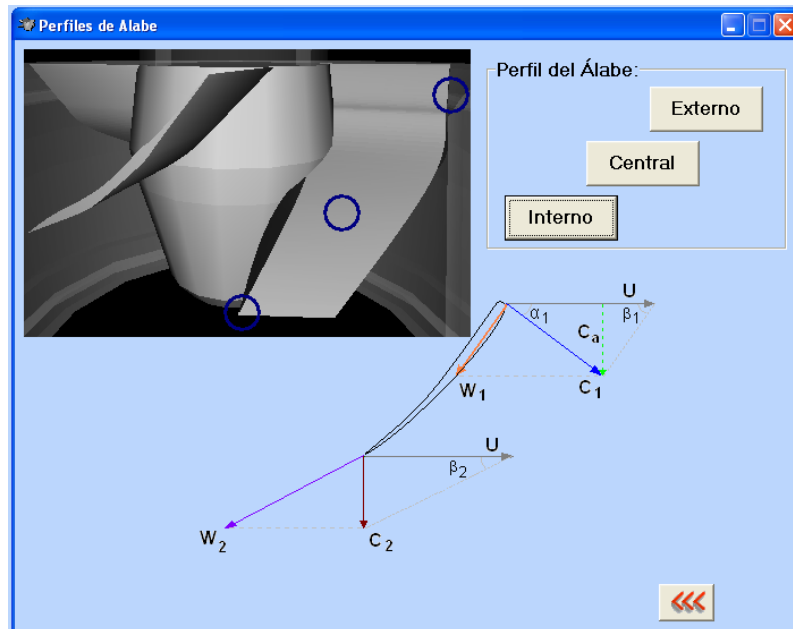
**Figura 118: Ventana de variación de salto y caudal para la turbina Kaplan**

La regulación vectorial de la turbina se aprecia en la siguiente ventana (Figura 119), donde se cambia la posición de una sección transversal del álabe de la turbina sobre su eje de rotación, perpendicular al eje de la turbina. Con el objeto de hacer más apreciable el cambio en la velocidad absoluta del agua a la salida del álabe, se habilitó un campo que permite o no el movimiento del álabe junto con los vectores.



**Figura 119: Ventana de regulación vectorial para la turbina Kaplan**

En el siguiente cuadro (Figura 120) se muestran las diferentes composiciones vectoriales para tres secciones transversales del álabe, la interna (adyacente al cubo del rodete), la media y la externa (borde extremo del álabe) con el fin de hacer ver la variabilidad de las componentes de velocidad a medida que cambia el perfil o sección transversal del álabe.



**Figura 120: Ventana de variación de perfil del álabe para la turbina Kaplan**

## **C.7 PARA EL ADMINISTRADOR**

### **C.7.1 Actualización del banco de preguntas**

Para agregar, editar o borrar preguntas del banco de preguntas se debe ingresar como *Administrador* y dirigirse a la menú *Archivo* ubicado en la barra de menú principal, luego dar clic en la opción *Mantenimiento BD*, tal como se muestra en la Figura 121 .



Figura 121: Entrando a modificar el banco de preguntas

Una vez se está en la ventana de la base de datos se pueden agregar, editar o borrar preguntas seleccionando cualquiera de los registros, dando clic derecho en el extremo izquierdo y seleccionando la opción deseada en el menú emergente (ver Figura 122 ).

| Número | Pregunta          | Complemento        | Complemento       | Complemento       | Complemento        | Complemento        | Tipo |
|--------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|------|
| 8      | Los combustibles  | Su formación, que  |                   |                   |                    |                    | 2    |
| 9      | El combustible fó | Gas natural        | Petróleo          | Carbón            | Leña               | Hulla              | 1    |
| 10     | El carbón domina  | El carbón es un c  |                   |                   |                    |                    | 2    |
| 11     | Poseen reservas   | Atlántico y Guajir | Guajira y Hulla   | Cesar y Córdoba   | Hulla y Meta       | Meta y Guajira     | 1    |
| 12     | Son producidos p  | Arenas movediza    | Arenas bituminos  | Asfaltos          | Hulla              |                    | 3    |
| 14     | La combustión de  | En los sistemas d  |                   |                   |                    |                    | 2    |
| 15     | Son medidas que   | Pulverización del  | Combustión en le  | Combustión en le  | Implementación d   |                    | 3    |
| 16     | Puede obtenerse   | Petróleo           | Uranio            | Gas               | Leña               | Carbón             | 1    |
| 17     | El combustible de | Gasolina           | Leña              | Diesel            | Gas natural        | Carbón             | 1    |
|        | El calor es       | Energía proceden   | Energía liberada  | Energía liberada  | Energía cinética   | Aumento de la te   | 1    |
|        | Es falso afirmar  | La energía está i  | La energía es la  | La cantidad y la  | La energía y el tr | La variación de e  | 1    |
|        | Se puede conver   | Termocupla         | Electrólisis      | Batería           | Celdas de combu    |                    | 3    |
| 21     | Corresponde a la  | Durante cualquie   | La energía no se  | No es posible cor | El trabajo puede   | La cantidad y la   | 1    |
| 22     | Un proceso es irr | La entropía dismi  | La entropía no c  | La entropía es ig | La entropía aume   | La entropía es ig  | 1    |
| 23     | Las leyes que go  | La ley cero de la  | La primera ley de | La segunda ley d  | La tercera ley de  |                    | 3    |
| 24     | Corresponde a la  | La energía no se   | Durante cuanqui   | La energía que e  | La cantidad y la   | La energía y el tr | 1    |
| 25     | El ciclo de carno | Dos procesos adi   | Dos procesos iso  | Dos procesos iso  | Dos procesos iso   | Dos procesos iso   | 1    |
| 26     | La cámara de ali  | De ésta manera s   |                   |                   |                    |                    | 2    |

Número de preguntas en el sistema

59

Figura 122: Banco de preguntas

Si se selecciona *Borrar*, el sistema le preguntará si realmente desea eliminar el registro; si se responde que *Sí*, automáticamente se eliminará la pregunta ubicada en el registro seleccionado sin posibilidad de recuperarla. Si se selecciona *Editar*, el programa lo llevará directamente al formulario de edición, en caso de que se seleccione *Agregar*, el programa primero le preguntará el tipo de pregunta que desea agregar y seguidamente lo enviará al formulario de edición. Para saber cómo se identifica cada tipo de pregunta véanse las tablas 10, 11 y 12 de abajo. El formulario de edición se puede apreciar en la Figura 123.

The image shows a Windows-style dialog box titled "Insercion de una nueva pregunta". Inside, there is a sub-dialog titled "Edición de la pregunta número 62". The main form contains the following elements:

- A text input field labeled "Pregunta:".
- A section labeled "Complementos" containing five numbered text input fields (1 through 5).
- A dropdown menu labeled "Tipo de Pregunta" with the value "2" selected.
- A checkbox labeled "Respuesta" which is currently unchecked.
- Two buttons at the bottom: "Aceptar" and "Cancelar".

**Figura 123: Formulario de edición**

En el formulario se pueden apreciar 8 campos: Pregunta, complemento 1, complemento 2, complemento 3, complemento 4, complemento 5, tipo de

pregunta y respuesta; en éste último siempre debe ir la información correspondiente a la respuesta correcta según el esquema de respuesta establecido para cada tipo de pregunta <sup>3</sup>.

El sistema trabaja con tres tipos de pregunta estandarizadas: selección múltiple con única respuesta, selección múltiple con múltiple respuesta y análisis de relación <sup>3</sup>. El formulario para ingresar cualquiera de los tres tipos de pregunta siempre será el mismo (Figura 123). A continuación se mostrará la manera correcta de ingresar los datos en el formulario de acuerdo al tipo de pregunta que se está registrando:

- **Selección múltiple con única respuesta**

| <b>CAMPO</b>            | <b>LO QUE DEBE INGRESARSE</b>          |                     |                     |
|-------------------------|--|---------------------|---------------------|
| <b>Pregunta</b>         | El texto correspondiente a la pregunta |                     |                     |
| <b>Complemento 1</b>    | Opción de respuesta A                  |                     |                     |
| <b>Complemento 2</b>    | Opción de respuesta B                  |                     |                     |
| <b>Complemento 3</b>    | Opción de respuesta C                  |                     |                     |
| <b>Complemento 4</b>    | Opción de respuesta D                  |                     |                     |
| <b>Complemento 5</b>    | Opción de respuesta E                  |                     |                     |
| <b>Tipo de pregunta</b> | 1                                      |                     |                     |
| <b>Respuesta</b>        | 0 si es la opción A                    | 1 si es la opción B | 2 si es la opción C |
|                         | 3 si es la opción D                    | 4 si es la opción E |                     |

**Tabla 10: Datos del formulario de edición para ingresar preguntas de selección múltiple con única respuesta**

- **Selección múltiple con múltiple respuesta**

---

<sup>3</sup> Los esquemas de respuesta a cada tipo de pregunta se pueden ver en la opción de *Ayuda* en barra de menú principal del software.

| <b>CAMPO</b>            | <b>LO QUE DEBE INGRESARSE</b>          |                                       |
|-------------------------|--|---------------------------------------|
| <b>Pregunta</b>         | El texto correspondiente a la pregunta |                                       |
| <b>Complemento 1</b>    | Opción correcta 1                      |                                       |
| <b>Complemento 2</b>    | Opción correcta 2                      |                                       |
| <b>Complemento 3</b>    | Opción correcta 3                      |                                       |
| <b>Complemento 4</b>    | Opción correcta 4                      |                                       |
| <b>Complemento 5</b>    | Se deja en blanco                      |                                       |
| <b>Tipo de pregunta</b> | 3                                      |                                       |
| <b>Respuesta</b>        | 0 si es la opción A (1 y 2 correctas)  | 1 si es la opción B (2 y 3 correctas) |
|                         | 2 si es la opción C (3 y 4 correctas)  | 3 si es la opción D (2 y 4 correctas) |
|                         | 4 si es la opción E (1 y 3 correctas)  |                                       |

**Tabla 11: Datos del formulario de edición para ingresar preguntas de selección múltiple con múltiple respuesta**

- **Análisis de relación**

| <b>CAMPO</b>            | <b>LO QUE DEBE INGRESARSE</b>            |                     |
|-------------------------|--|---------------------|
| <b>Pregunta</b>         | El texto correspondiente a la afirmación |                     |
| <b>Complemento 1</b>    | El texto correspondiente a la razón      |                     |
| <b>Complemento 2</b>    | Se deja en blanco                        |                     |
| <b>Complemento 3</b>    | Se deja en blanco                        |                     |
| <b>Complemento 4</b>    | Se deja en blanco                        |                     |
| <b>Complemento 5</b>    | Se deja en blanco                        |                     |
| <b>Tipo de pregunta</b> | 2  |                     |
| <b>Respuesta</b>        | 0 si es la opción A                      | 1 si es la opción B |
|                         | 2 si es la opción C                      | 3 si es la opción D |
|                         | 4 si es la opción E                      |                     |

**Tabla 12: Datos del formulario de edición para ingresar preguntas de análisis de relación**

Una vez se haya llenado el formulario de acuerdo al tipo de pregunta se da clic en el botón *Aceptar*, quedando así la pregunta modificada o registrada. Las nuevas preguntas que se ingresen se irán ubicando al final de los

registros existentes. Después de que ya se ha actualizado la base de datos se da clic en el botón de cerrar de la ventana presentada en la Figura 122.

### C.7.2 Generar reportes consolidados

Otra opción que se encuentra habilitada para el administrador es la de generar un archivo de texto con la información correspondiente a las evaluaciones de todos los usuarios del equipo. Para generar este reporte se debe ir a la barra de menú principal, dar clic en *Reportes* y seleccionar *Informe consolidado* (Figura 124).



**Figura 124: Informes consolidados**

Aparecerá una ventana en donde se encuentra una tabla con la información correspondiente a los usuarios que han realizado la evaluación en ese equipo (Figura 125). Dando clic en el botón *Guardar* se generará un archivo de texto con toda la información allí visualizada y aparecerá un cuadro de confirmación especificando la ubicación del archivo (Figura 126). Para salir de la ventana de *Reporte consolidado* simplemente se da clic en el botón *Salir*.



Figura 125: Visualización del reporte consolidado

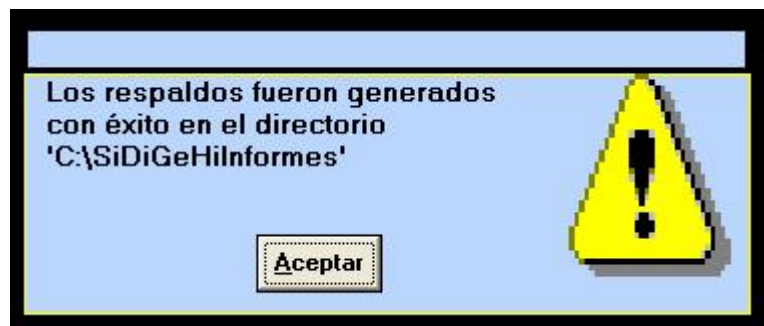


Figura 126: Confirmación de la creación del reporte consolidado

## **ANEXO D. Salidas de campo**

## Salida de campo

Localización: Segovia, Antioquia.

Fecha: Noviembre 18 de 2004

En el corregimiento de Machuca, municipio de Segovia, se encuentran unas obras civiles preliminares para la construcción de una pequeña central hidroeléctrica que fueron iniciadas en el año de 1980 y que fueron abandonadas dos años después por razones presupuestales. En principio su construcción obedeció a las necesidades de suministro a las minas de oro de la zona. Las obras civiles terminadas consisten en el canal de conducción hasta la cámara de presión con una longitud aproximada de 500 m, el tanque desarenador y la casa de máquinas; las parcialmente construidas son la presa y la bocatoma; las obras para la instalación de la tubería de presión no se iniciaron.

El desnivel entre la cámara de presión y la casa de máquinas es de aproximadamente 160 m; la casa de máquinas posee dos entradas para la tubería de presión, donde se instalarían dos turbinas Pelton de 500 caballos de fuerza cada una<sup>4</sup>. Con estas características, el caudal aproximado para cada turbina sería de 0.3 m<sup>3</sup>/s.

La quebrada donde esta instalada la presa cuenta con un abundante caudal durante todo el año, en tiempo seco su disminución no es notable, por ello la altura de la presa de derivación es tan baja, aproximadamente dos metros, esto indica que las condiciones hidrológicas de la cuenca no han sufrido gran cambio, lo que estimula a las autoridades locales a impulsar la culminación del proyecto iniciado en los años ochenta.

---

<sup>4</sup> Información suministrada por algunos habitantes de la región que participaron en la construcción de las obras.

En las siguientes imágenes se puede apreciar el estado de algunas de las obras del proyecto.

Para el salto y caudal descritos anteriormente y asumiendo un solo tubo inyector, una relación de diámetros de 12 y un rendimiento del 80%, la herramienta ofrece los siguientes resultados:

| Característica<br>Método | Diámetro del rodete (m) | Diámetro del chorro (m) | Número de álabes (m) |
|--------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|
| Cordier                  | 0.78                    | 0.065                   | 19                   |

**Tabla 13: Datos de salida a Machuca**



**Figura 127: Interior del tanque desarenador**



**Figura 128: Interior del canal de conducción**



**Figura 129: Entrada de la bocatoma y presa parcialmente construidas**

## Salida de campo

Localización: Zaragoza, Antioquia.

Fecha: Noviembre 17 de 2004

La central hidroeléctrica ubicada en el municipio de Zaragoza esta constituida por una presa de concreto de 27 m de altura desde el nivel de aguas abajo. El embalse esta surtido por un afluente al río Nechí. En el último trimestre del año 2004 la zona del nordeste antioqueño sufrió un fuerte invierno que provocó el vertimiento de las aguas de exceso por el aliviadero de la presa con un espesor de lamina de más de medio metro, que en condiciones normales no son vertidas por el aliviadero sino por un canal de descarga ubicado unos metros más abajo de la cota de coronación del aliviadero y por el canal de desfogue de las turbinas.

La central fue construida por la empresa Frontino's Golden Mines en 1950 para abastecer las actividades de exploración y explotación de oro en la zona, estaba interconectada en principio sólo con las minas y después que la actividad minera disminuyó fue conectada con el resto de la red hacia 1980; posteriormente fue entregada al municipio de Zaragoza en 1983 como parte de pago en regalías y desde entonces la central fue abandonada al continuo saqueo de sus equipos.

La central contaba con tres turbinas Francis de eje horizontal, con un caudal de  $3.5 \text{ m}^3/\text{s}$  y un salto de 23 m, que desarrollaban una potencia de 900 caballos vapor cada una a una velocidad de  $600 \text{ rpm}^5$ . En invierno funcionaban las tres máquinas y en verano funcionaban o bien una sola o dos dependiendo de las condiciones de caudal; cada máquina contaba con su propia tubería. Las turbinas Francis tenían un diámetro de entrada de 22

---

<sup>5</sup> Según se observó en la placa de una de las turbinas Francis.

pulgadas <sup>6</sup> o 55,88 cm. La regulación de velocidad, como en todas las centrales construidas en la época era mecánica.

El abandono de la central llevó a la consecuente interrupción de los programas de reforestación de la cuenca y hoy día, cuando se presenta verano, el nivel de aguas arriba desciende inclusive por debajo de la cota de admisión a la tubería de presión de las máquinas. Por este motivo, el municipio de Zaragoza esta interesado en implementar un plan de recuperación de la cuenca hídrica junto con Corantioquia y posteriormente realizar un proyecto de rehabilitación de la central a la vida productiva, previo estudio de sedimentación y posible dragado del embalse puesto que desde que fue abandonada no se le ha hecho ningún mantenimiento al mismo.

En las siguientes imágenes se puede apreciar el estado actual de la central hidroeléctrica del municipio de Zaragoza.

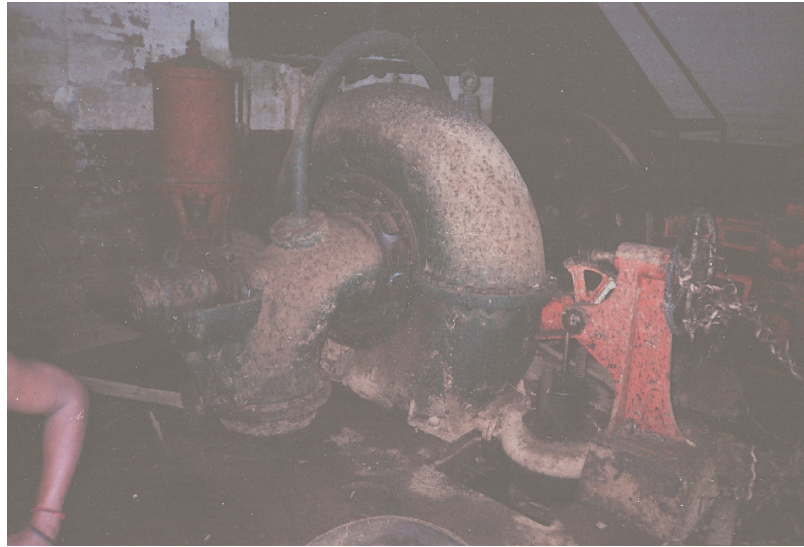
Para el salto y caudal descritos anteriormente, la herramienta ofrece los siguientes resultados:

| Característica<br>Método | Diámetro de<br>entrada del<br>rodete (m) | Diámetro de<br>salida del rodete<br>(m) | Altura del<br>distribuidor<br>(m) |
|--------------------------|--|---|-----------------------------------|
| Streeter                 | 0.56                                     | 0.79                                    | 0.206                             |
| Voorduin                 | 0.57                                     | 0.79                                    | 0.274                             |
| Turbina instalada        | 0.558                                    | n.d. <sup>7</sup>                       | n.d. <sup>6</sup>                 |

<sup>6</sup> Información suministrada por algunos habitantes de la región que participaron en la construcción de la central para Frontino's Golden Mines a mediados del siglo pasado.

<sup>7</sup> Información desconocida por los habitantes de la región que participaron en la construcción de la central.

**Tabla 14: Datos salida a Zaragoza (Antioquia)**



**Figura 130: Turbina Francis de eje horizontal**



**Figura 131: Grupo turbogenerador**



**Figura 132: Casa de máquinas y presa**



**Figura 133: Coronación de la presa y vertedero**



**Figura 134: Vista parcial del embalse**

## **Salida de campo**

Localización: Málaga, Santander.

Fecha: Abril 08 de 2005

### **CENTRALES HIDROELÉCTRICAS DE SERVITÁ Y CALICHAL**

Estas centrales están ubicadas en el municipio de Málaga, contando con una potencia instalada de 1.04 MW y una potencia efectiva de 0.84 MW.

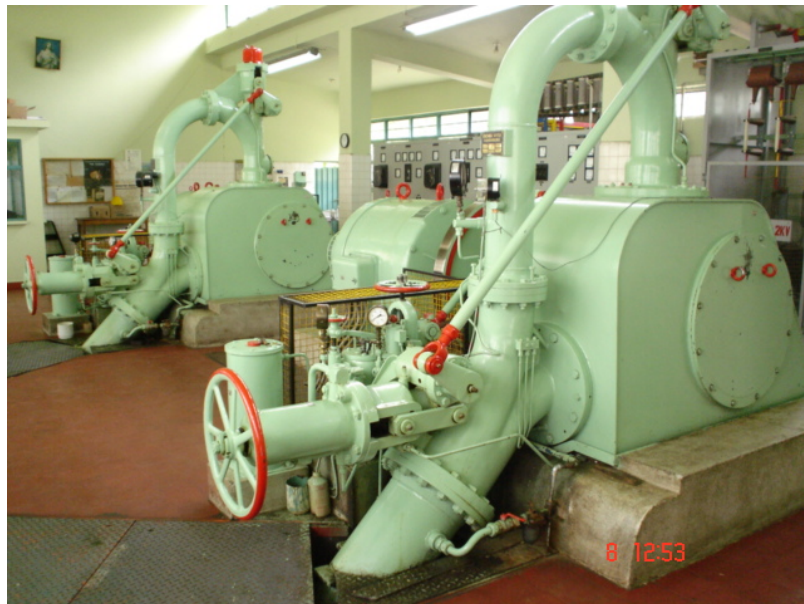
La central de Servita cuenta con dos turbinas Pelton de eje horizontal y dos inyectores, la planta esta funcionando desde 1962. La tubería tiene un diámetro de 29 pulgadas a la llegada casa de maquinas. No se cuentan con datos oficiales de salto y caudal, aunque se podría estimar la carga en aproximadamente 200 metros.

La central de Calichal, cuenta con una turbina Pelton y una turbina Francis. El salto es de aproximadamente 26 metros.

Las dos centrales se surten de las aguas del río Servitá, además este caudal lo deben compartir con un molino de la región, lo que hace que su uso sea mas racionado.



**Figura 135: Casa de máquinas de Calichal**



**Figura 136: Casa de máquinas de Servitá**

## **Salida de campo**

Localización: Bucaramanga, Santander.

Fecha: Marzo 23 de 2005

### **CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE ZARAGOZA**

La central hidroeléctrica de Zaragoza esta concebida como una central a filo de agua, tiene su captación sobre el río Suratá agua debajo de la confluencia del río Tona, tiene una potencia instalada de 1.56 MW y una potencia neta de 1.2 MW. Su primera unidad entró en servicio en 1932 y las unidades 2, 3 en los años de 1937 y 1950.

Hoy en día debido a cambios ambientales, su caudal se ha ido reduciendo y en épocas de alta pluviosidad la central llega a generar 1050 kW.

El caudal de diseño fue de aproximadamente 7 metros cúbicos por segundo, con un salto de 36 metros. El diámetro de la tubería a la llegada a la casa de maquinas es de 1,2 metros.

La central cuenta con tres turbinas Francis de eje horizontal

Los generadores síncronos trifásicos presentan las siguientes características:

Potencia: 650 kVA

Velocidad de sincronismo: 720 rpm.

Tensión: 2300 volts.

Frecuencia: 60 Hz.

Los siguientes datos referentes a información sobre el dimensionamiento de una de las turbinas de la central Zaragoza fueron facilitados por la ESSA S.A. E.S.P.

Salto = 36 m

Frecuencia = 60 Hz.

Caudal = 2.33 m<sup>3</sup>/s

Velocidad = 720 rpm.

Se compararon las dimensiones de la turbina instalada con los datos obtenidos con la herramienta:

| Característica<br>Método | Diámetro<br>de entrada<br>del rodete<br>(mm) | Diámetro<br>de salida<br>del rodete<br>(mm) | Altura del<br>distribuidor<br>(mm) |
|--------------------------|--|---|------------------------------------|
| Streeter                 | 571  | 646   | 169                                |
| Voorduin                 | 552  | 649   | 185                                |
| Turbina instalada        | 475.75                                       | 587.8                                       | 175.5                              |

**Tabla 15: Datos de salida a Zaragoza (Santander)**



**Figura 137: Cámara de presión de la central de Zaragoza**



**Figura 138: Tubería de presión de la central de Zaragoza**

## **Salida de campo**

Localización: San Gil, Santander.

Fecha: Abril 16 de 2005

### **CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE LA CASCADA**

La central está ubicada en las afueras del municipio de San Gil, en la vía San Gil - Socorro, concebida como una central a filo de agua, se alimenta mediante un canal de derivación de las aguas del río Fonce, este canal tiene una longitud de aproximadamente 880 metros.

Tiene una potencia instalada de 3.34 MW y una potencia neta de 2.6 MW. Su primera unidad entró en servicio en 1953 siendo las mas recientes las unidades 4, 5 en los años de 1956 y 1960. En épocas húmedas ha generado 19 GWh anuales, disminuyendo en un 40 % en eventos “niño”.

Los generadores síncronos trifásicos, son de diferente potencia, ya que las cinco turbinas Francis son todas de eje horizontal y no poseen todas las mismas características técnicas.

La transmisión de la potencia generada se hace a través de la subestación eléctrica de San Gil adyacente a la central hidroeléctrica.



**Figura 139: Bocatoma de la central de La Cascada**



**Figura 140: Casa de máquinas de la central La Cascada**

## **Salida de campo**

Localización: Lebrija, Santander.

Fecha: Febrero 28 de 2005

### **CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE PALMAS**

La central hidroeléctrica de Palmas está ubicada en el municipio de Lebrija. Cuenta con cuatro unidades Francis de eje vertical de 4.5 MW cada una para una potencia total instalada de 18 MW y una potencia efectiva neta de 14 MW. El túnel de carga tiene una longitud de 7 646 m y dos tuberías forzadas de 440 m, el mantenimiento de este se hace relevante debido a que esta sometido a los constantes movimientos telúricos propios de la región. Al inicio del tramo el diámetro de la tubería es de tres metros, después de la casa de válvulas ubicada aproximadamente a 500 metros de la casa de maquinas esta tubería se bifurca en dos tramos de metro y medio de diámetro cada uno, para finalmente llegar a cada una de las cuatro unidades en tuberías con un diámetro de aproximadamente 0.75 metros. En todo el trayecto solo cuenta con una almenara ubicada antes de la casa de válvulas.

Su embalse está situado en el corregimiento de Bocas y se alimenta de los ríos de Oro, Surata y Negro, los cuales forman la cuenca del río Lebrija, con un caudal medio de 20 metros cúbicos por segundo en el embalse y máximo de 40. La casa de máquinas, turbinas y generadores se encuentran en buenas condiciones. En épocas de altas afluencias hidrológicas ha llegado a generar 109.5 GWh en un año.

La primera etapa de esta central entró en operación en febrero de 1954 con dos unidades generadoras, continuando con la segunda etapa en 1960. Actualmente el caudal promedio que esta llegando a la casa de maquinas es de aproximadamente 14.5 metros cúbicos por segundo debido a que las

condiciones medioambientales de la región han cambiado en los últimos años.

La transmisión de energía se hace a través de la línea de 34.5 kV que conecta la hidroeléctrica con la subestación central de la Electrificadora ubicada en la ciudad de Bucaramanga.

Cada una de las turbinas cuenta con un generador síncrono trifásico de las siguientes características:

Potencia: 5600 kVA

Tensión: 4160 volts

Frecuencia: 60 Hertz.

Velocidad de sincronismo: 720 rpm.

Los siguientes datos referentes a información sobre el dimensionamiento de una de las turbinas de la central Palmas fueron facilitados por la ESSA S.A. E.S.P.

Salto = 126 m

Caudal = 3.4 m<sup>3</sup>/s

Frecuencia = 60 Hz.

Velocidad = 720 rpm.

Se compararon las dimensiones de la turbina instalada con los datos obtenidos con la herramienta:

| Característica<br>Método | Diámetro de entrada del rodete (mm) | Diámetro de salida del rodete (mm) | Altura del distribuidor (mm) | Altura media del distribuidor al fondo del rodete (mm) |
|--------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|------------------------------|--|
| Streeter                 | 983                                 | 740                                | 134                          | ---  |
| Voorduin                 | 935                                 | 776                                | 119                          | 224  |
| Turbina instalada        | 1050                                | 800                                | 96                           | 365  |

**Tabla 16: Datos salida a Palmas**



**Figura 141: Panorámica de la represa Bocas**



**Figura 142: Casa de máquinas de la central de Palmas**

A continuación, se presentan algunos casos comparativos que contrastan los resultados obtenidos con la herramienta e instalaciones reales y ejemplos bibliográficos de dimensionamiento debidamente referenciados a la fuente respectiva.

### **Caso comparativo 1<sup>8</sup>**

Turbina Pelton fabricada por Escher Wiss con las siguientes características:

Salto = 478.2 m

---

<sup>8</sup> Polo Encinas, Manuel. Turbomáquinas Hidráulicas, Tercera Edición 1988. Pág. 207.

Caudal = 11.64 m<sup>3</sup>/s

Frecuencia = 50 Hz

Número de chorros = 4

Velocidad de sincronismo: 375 rpm

Relación D/d: 10

Potencia: 66800 CV

Rendimiento global: 0,9

|                      | Instalada (mm) | Herramienta (mm) |
|----------------------|----------------|------------------|
| Diámetro de la rueda | 1950           | 2216             |
| Diámetro del chorro  | 195            | 222              |

**Tabla 17: Caso comparativo 1**

### **Caso comparativo 2<sup>9</sup>**

Se busca un aprovechamiento hidráulico con las siguientes características, para una turbina Francis:

Salto = 103 m

Caudal = 65 m<sup>3</sup>/s

Frecuencia = 60 Hz

Velocidad de sincronismo: 171.5 rpm

Potencia: 81000 CV

Rendimiento global: 0.9

|   | Ejemplo<br>(m) | Método Streeter<br>(m) | Método Voorduin<br>(m) |
|---|----------------|------------------------|------------------------|
| Diámetro de entrada                               | 3.91           | 3.8                    | 3.62                   |
| Diámetro de salida                                | 3.36           | 3.18                   | 3.28                   |
| Altura del distribuidor                           | 0.67           | 0.65                   | 0.6                    |
| Altura media del distribuidor al fondo del rodete | 0.94           | -                      | 1.01                   |

<sup>9</sup> Gómez Navarro, José. Saltos de agua y presas de embalse, Tercera Edición 1952. Pág. 1034.

### Tabla 18: Caso comparativo 2

#### Caso comparativo 3<sup>10</sup>

Se requieren tantear las dimensiones de una turbina Kaplan que genere una potencia de 14000 CV a partir de un salto de 13 m. Se consideran entonces las siguientes características:

Salto: 13 m

Velocidad de sincronismo: 133.5 rpm

Caudal: 95 m<sup>3</sup>/s

Potencia: 14000 CV

Frecuencia: 60 Hz

Rendimiento global: 0.85

|                     | Ejemplo (m) | Método Streeter<br>(m) | Método Voorduin<br>(m) |
|---------------------|-------------|------------------------|------------------------|
| Diámetro del rodete | 3.7         | 3.81                   | 3.75                   |

Tabla 19: Caso comparativo 3

#### Caso comparativo 4<sup>11</sup>

Turbina Francis instalada en Fontana (US) con las siguientes características:

Salto: 100.5 m

Velocidad de sincronismo: 156.5 rpm

Caudal: 75.8 m<sup>3</sup>/s

Potencia: 91500 CV

Frecuencia: 60 Hz

Rendimiento global: 0.9

---

<sup>10</sup> Gómez Navarro, José. Saltos de agua y presas de embalse, Tercera Edición 1952. Pág. 1041.

<sup>11</sup> Gómez Navarro, José. Saltos de agua y presas de embalse, Tercera Edición 1952. Pág. 1046.

|                    | Instalada (m) | Método de Streeter (m) | Método de Voorduin (m) |
|--------------------|---------------|------------------------|------------------------|
| Diámetro de salida | 3.67          | 3.45                   | 3.56                   |

**Tabla 20: Caso comparativo 4**

**Caso comparativo 5<sup>12</sup>**

Turbina Francis instalada en San Gil, unidad número 5 de la Central Hidroeléctrica de La Cascada, con las siguientes características:

Salto: 24.5 m

Velocidad de sincronismo: 450 rpm

Caudal: 6.4 m<sup>3</sup>/s

Potencia: 1.2 MW

Frecuencia: 60 Hz

Rendimiento global: 0.8

|                    | Instalada (m) | Método de Streeter (m) | Método de Voorduin (m) |
|--------------------|---------------|------------------------|------------------------|
| Diámetro de salida | 0.855         | 1.01                   | 1.02                   |

**Tabla 21: Caso comparativo 5**

---

<sup>12</sup> Datos suministrados por la Empresa Electrificadora de Santander S.A. E.S.P.