

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

**DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UNA HOJA DE CÁLCULO PARA EL  
DIMENSIONAMIENTO DE CHIMENEAS DE EQUILIBRIO**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**DARÍO NICOLÁS CALDERÓN VÁSQUEZ**

**DIEGO FERNANDO ENRÍQUEZ PAREDES**

**DIRECTOR: ING. XIMENA HIDALGO BUSTAMANTE**

**QUITO, DICIEMBRE 2011**

## **DECLARACIÓN**

Nosotros, Darío Nicolás Calderón Vásquez, Diego Fernando Enríquez Paredes, declaramos que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado ó calificación profesional; y que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad vigente.

---

**DARÍO NICOLÁS CALDERÓN  
VÁSQUEZ**

---

**DIEGO FERNANDO ENRÍQUEZ  
PAREDES**

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Darío Nicolás Calderón Vásquez y Diego Fernando Enríquez Paredes, bajo mi supervisión.

---

**Ing. XIMENA HIDALGO BUSTAMANTE**  
**DIRECTORA DE PROYECTO**

## **AGRADECIMIENTOS**

Diego Fernando Enríquez Paredes

Cinco años en la universidad, seis años de colegio, seis años de escuela, un año en el jardín de infantes, tanto tiempo para formarme tal como soy. Todo lo que he logrado se lo agradezco a toda mi familia pero en especial a mis padres, quienes siempre me han apoyado y guiado en todo momento.

Para lograr cumplir este proyecto de titulación, mucha gente me ayudó y me apoyó, pero doy gracias especialmente a mi tío José Luis, a Luis y Adri excelentes jefes y a mi directora y maestra Ingeniera Ximena Hidalgo.

## AGRADECIMIENTOS

Darío Nicolás Calderón Vásquez

Es tal vez éste uno de los momentos más esperados de la vida y de seguro el camino hacia él no hubiese existido sin la presencia y esfuerzos de varias personas que en diversas maneras, diferentes épocas y actitudes de toda índole, han contribuido de una u otra forma a que pueda alcanzar este sueño. Duros obstáculos que a lo largo de diecinueve años de arduos esfuerzos, dedicación, empeño, constancia, entereza y esa variada gama de sensaciones que cada ciclo y espacio han producido, no me hubiesen sido posibles superar sin la compañía de mi familia y en especial el apoyo incondicional de Verónica, mi hermana. La fe depositada en mis particulares deseos de superación y el fuerte deseo de ver reflejados los frutos de todos estos años tras esas interminables noches de perennes sacrificios, sembraron conjuntamente en mí la semilla de la voluntad, que en cada paso fue regada y es ahora cuando empieza a tener sus más sólidas raíces; esa fe nunca fue desechada y notablemente fue su más grande auspicio, al igual que la presencia de toda mi amada familia. Agradezco formalmente ahora, después de más de una década, a esa entrañable presencia y escuela de vida siempre latente con o sin palabras, llamada Colegio San Gabriel, reflejada fielmente en tan excepcionales y valiosos seres humanos a quienes llamo con orgullo: amigos. No es necesario nombrarlos, quienes lo son siempre estuvieron allí con sus invaluable e inagotables actitudes. Ya en la parte final de mi formación académica tuve la oportunidad de conocer a quienes agradezco ahora por su ayuda incondicional: Adriana Troncoso y Luis Ríos; testigos cercanos de los pasos finales para llegar a culminar esta etapa, grandes profesionales, seres humanos como pocos. Gracias Ingeniera Ximena Hidalgo por sus contribuciones en el ámbito académico y en este proyecto de Titulación. Gracias a todas aquellas personas de la Facultad que de una u otra forma contribuyeron a poder lograr con este sueño, independientemente de su grado de cercanía o afinidad.

## **DEDICATORIA**

Diego Fernando Enríquez Paredes

Este paso importante de mi vida, no lo hubiera podido realizar si no fuera por toda mi familia y amigos. Por tal motivo este proyecto de titulación se lo dedico mis padres a mis abuelitos sobre todo a quien ya no está más con migo, a mis tíos y a mis hermanos.

## DEDICATORIA

Darío Nicolás Calderón Vásquez

Solamente el tiempo es el más grande testigo de cuánto ha costado llegar a este momento de la vida; imposible sería intentar describir en unos cuantos renglones lo vivido en casi dos décadas en esta lucha intensa contra las murallas del camino, imposible distinguir la importancia de cada suceso y descubrir el grado de contribución de todos y cada uno de los participantes en ellos. Posible si resulta recordar, regresar a ver esas huellas dejadas desde aquellos ya lejanos días que la conciencia me permite tomar en cuenta; posible también resulta y con una enorme sensación de nostalgia, recopilar las enseñanzas que va dejando esa peculiar forma del riesgo de vivir siendo uno mismo y las sensaciones que produce el precio constante que ello implica.

Dedico a su dueño lo evidente y todo aquello que no llega a serlo, después de estos diecinueve años de inconmensurables esfuerzos, sacrificios y distintas formas de expresión de una voluntad y paciencia calificadas como interminables y de acero por quienes estuvieron más cerca. Dueño de lo que fue conseguirlo, de lo que significa ahora sentirlo y de lo que significará hasta cuando permanezca en el planeta lo que pueda hacer con este paso.

El dueño de todo esto es el tiempo, afable médico invisible, carente de sendos aplausos y para quien lo mínimo que puedo hacer en reconocimiento a todo lo brindado, es dedicar el fruto final de lo que su propia existencia me ha llevado a sacar adelante. Son inútiles los intentos por traducir a palabras cuanto elogio y exuberante gratitud merece tan fiel aliado, siempre oportuno y benevolente.

## CONTENIDO

DECLARACIÓN .....	II
CERTIFICACIÓN.....	III
AGRADECIMIENTOS.....	IV
AGRADECIMIENTOS.....	V
DEDICATORIA .....	VI
DEDICATORIA .....	VII
CONTENIDO	VIII
RESUMEN	xxx
PRESENTACIÓN .....	xxxii
CAPITULO 1. 1	
INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DEL PROYECTO DE TITULACIÓN.....	1
1.1. OBRAS COMPLEMENTARIAS EN UN EMBALSE PARA GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA .....	1
1.2. IMPORTANCIA DE LA CHIMENEA DE EQUILIBRIO EN UN EMBALSE PARA GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA.....	3
1.3. OBJETIVOS DEL PROYECTO DE TITULACIÓN.....	5
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	5
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	6
CAPITULO 2. 7	
BASES TEÓRICAS PARA EL ANÁLISIS DEL FLUJO NO PERMANENTE EN TUBERÍAS A PRESIÓN .....	7
2.1. FLUJO NO PERMANENTE.....	7
2.2. FLUJO TRANSITORIO MUY RÁPIDO Ó GOLPE DE ARIETE .....	8



2.2.1.	DESCRIPCIÓN DEL GOLPE DE ARIETE .....	9
2.3.	ECUACIONES BÁSICAS .....	16
2.3.1.	ECUACIONES GENERALES .....	17
2.3.1.1.	SOBREPRESIÓN MÁXIMA. - .....	17
2.3.1.2.	CELERIDAD DE ONDA .....	18
2.3.1.2.1.	CELERIDAD DE ONDA PARA TUBERÍAS DE PARED DE LÁMINA DELGADA:	19
2.3.1.2.2.	CELERIDAD DE ONDA PARA TUBOS DE PARED GRUESA: .....	19
2.3.1.2.3.	CELERIDAD DE ONDA DE TUBOS DE PARED INFINITA:.....	20
2.3.2.	ECUACIONES PARTICULARES.....	20
2.3.2.1.	ECUACIÓN DE CONTINUIDAD.....	20
2.3.2.2.	ECUACIÓN DEL MOVIMIENTO .....	21
2.4.	MODELO RÍGIDO .....	22
2.5.	MODELO ELÁSTICO.....	23
2.6.	OPERACIONES RÁPIDAS Y LENTAS EN APERTURAS O CIERRES	23
CAPITULO 3. 27		
ECUACIONES FUNDAMENTALES PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE CHIMENEAS DE EQUILIBRIO.....		27
3.1.	DEFINICIÓN DE CHIMENEA DE EQUILIBRIO:.....	27
3.2.	LOCALIZACIÓN Y CONFIGURACIÓN DE LAS CHIMENEAS DE EQUILIBRIO	28
3.3.	EXPLICACIÓN DEL FENÓMENO OSCILATORIO.....	29
3.4.	CRITERIOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA CHIMENEA DE EQUILIBRIO EN EL CONJUNTO DE ESTRUCTURAS DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA .....	32

3.5.	FUNCIONES Y VENTAJAS DE LAS CHIMENEAS DE EQUILIBRIO	
	<b>33</b>	
3.6.	TIPOS DE CHIMENEAS DE EQUILIBRIO.....	<b>35</b>
3.6.1.	CHIMENEAS DE EQUILIBRIO SIMPLES .....	<b>35</b>
3.6.2.	CHIMENEAS DE EQUILIBRIO CON ORIFICIO RESTRINGIDO.....	<b>37</b>
3.6.3.	CHIMENEAS COMPUESTAS O DE SECCIÓN TRANSVERSAL	
VARIABLE	<b>38</b>	
3.6.4.	CHIMENEAS DE OSCILACIÓN DIFERENCIAL.....	<b>42</b>
3.6.5.	CHIMENEA DE EQUILIBRIO DE AIRE O NEUMÁTICA.....	<b>43</b>
3.7.	DIFERENTES TIPOS DE INSTALACIONES DE LAS CHIMENEAS	
DE EQUILIBRIO.....	<b>43</b>	
3.8.	SUPOSICIONES E HIPÓTESIS PARA EL PLANTEAMIENTO Y	
SIMPLIFICACIÓN DE LAS ECUACIONES BÁSICAS PARA EL ANÁLISIS DE		
CHIMENEAS DE EQUILIBRIO .....	<b>46</b>	
3.9.	ECUACIONES BÁSICAS PARA EL ANÁLISIS DE CHIMENEAS DE	
EQUILIBRIO	<b>48</b>	
3.9.1.	ECUACIÓN DE LA CELERIDAD DE LA ONDA DE PRESIÓN EN	
EL TÚNEL DE BAJA CARGA:.....	<b>49</b>	
3.9.2.	ECUACIÓN DE ALLIEVI: .....	<b>50</b>
3.9.3.	ECUACIÓN PARA EL PERIODO DE LA ONDA EN EL TÚNEL DE	
BAJA PRESIÓN:.....	<b>52</b>	
3.9.4.	DETERMINACIÓN DEL TIPO DE MANIOBRAS.....	<b>52</b>
3.9.5.	ECUACIÓN PARA LA SOBREPRESIÓN MÁXIMA EN EL TÚNEL	
DE BAJA CARGA PARA MANIOBRAS RÁPIDAS.....	<b>53</b>	
3.9.6.	ECUACIÓN DE MICHAUD PARA LA SOBREPRESIÓN MÁXIMA	
EN EL TÚNEL DE BAJA CARGA PARA MANIOBRAS LENTAS:.....	<b>54</b>	
3.9.7.	ECUACIÓN PARA EL TIEMPO DE MANIOBRAS A SER	
ADOPTADO	<b>55</b>	

3.10.	COMPARACIÓN Y DIFERENCIACIÓN ENTRE CHIMENEAS DE EQUILIBRIO SIMPLES Y CHIMENEAS DE EQUILIBRIO CON ORIFICIO RESTRINGIDO (CHIMENEAS ESTRANGULADAS) PREVIAS A LA PRESENTACIÓN DE LAS ECUACIONES. ....	56
3.11.	ECUACIONES PARA EL FUNCIONAMIENTO DE CHIMENEAS DE EQUILIBRIO SIMPLES Y CHIMENEAS DE EQUILIBRIO CON ORIFICIO RESTRINGIDO.....	57
3.11.1.	ECUACIÓN DINÁMICA PARA CHIMENEAS DE EQUILIBRIO CON ORIFICIO RESTRINGIDO .....	57
3.11.2.	ECUACIÓN DINÁMICA PARA CHIMENEAS SIMPLES.....	58
3.11.3.	ECUACIÓN DE CONTINUIDAD DE FLUJO PARA CHIMENEAS SIMPLES Y CON ORIFICIO RESTRINGIDO.....	59
3.11.4.	ECUACIÓN DEL CAUDAL DE FLUJO HACIA CHIMENEAS SIMPLES Y CON ORIFICIO RESTRINGIDO.....	59
3.12.	CRITERIOS Y ECUACIONES PARA EL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE UNA CHIMENEA DE EQUILIBRIO .....	60
3.12.1.	CRITERIO DEL ÁREA DE THOMA .....	60
3.12.1.1.	ÁREA DE THOMA .....	63
3.12.1.2.	ÁREA DE DISEÑO .....	64
3.12.2.	CRITERIO DEL DISEÑO BALANCEADO .....	65
3.12.2.1.	OBTENCIÓN DE LA OSCILACIÓN MÁXIMA .....	65
3.12.2.2.	USO DE LOS ÁBACOS DE PARMAKIAN. ....	66
3.12.3.	CRITERIOS DE DISEÑO PARA LOS DOS TIPOS DE MANIOBRAS 71	
3.12.3.1.	CRITERIO DE DISEÑO PARA CIERRE DE VÁLVULAS.....	71
3.12.3.2.	CRITERIO DE DISEÑO PARA APERTURA DE VÁLVULAS .....	72
3.12.4.	CRITERIO DEL SITIO DE CONSTRUCCIÓN Y RELACIÓN CON LAS OTRAS ESTRUCTURAS .....	73

3.13.	ECUACIONES PLANTEADAS Y SIMPLIFICADAS UTILIZADAS EN EL SOFTWARE PARA EL CÁLCULO DE LAS OSCILACIONES Y NIVELES DE AGUA EN LA CHIMENEA DE EQUILIBRIO.....	74
3.13.1.	FÓRMULA DE LA GRAVEDAD: .....	76
3.13.2.	FÓRMULA DEL ÁREA DEL ORIFICIO RESTRINGIDO: .....	76
3.13.3.	FÓRMULA DE LA VELOCIDAD DEL AGUA EN EL ORIFICIO RESTRINGIDO: .....	77
3.13.4.	FÓRMULA DEL ÁREA DEL CONDUCTO: .....	77
3.13.5.	FÓRMULA DE LA VELOCIDAD NORMAL DEL AGUA EN EL ORIFICIO RESTRINGIDO: .....	77
3.13.6.	FÓRMULA DEL FACTOR DE PÉRDIDA DE CARGA POR FRICCIÓN EN EL TÚNEL:.....	78
3.13.7.	FÓRMULA DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA EN EL ORIFICIO RESTRINGIDO: .....	78
3.13.8.	FÓRMULA DEL FACTOR DE PÉRDIDA DE CARGA EN EL ORIFICIO RESTRINGIDO: .....	78
3.13.9.	FÓRMULA DEL NIVEL INICIAL (NORMAL) DE AGUA EN LA CHIMENEA DE EQUILIBRIO CON VÁLVULAS ABIERTAS: .....	79
3.13.10.	FÓRMULA DEL PASO DE TIEMPO MIENTRAS SE PRODUCE LA OSCILACIÓN: .....	79
3.13.11.	FÓRMULA DE LA VARIACIÓN DE CAUDAL DE CIRCULACIÓN:..	79
3.13.12.	FÓRMULA DEL GRADIENTE DE VARIACIÓN DE CAUDAL DE CIRCULACIÓN:.....	80
3.13.13.	FÓRMULA DEL ÁREA PONDERADA DE LA SECCIÓN DE LA CHIMENEA DE EQUILIBRIO: .....	80
3.13.14.	FÓRMULA DEL CAUDAL QUE PASA POR LAS TURBINAS EN EL INTERVALO DE TIEMPO $\Delta t$ :.....	81
3.13.15.	FÓRMULA DEL CAUDAL QUE PASA POR LAS TURBINAS EN EL INTERVALO DE TIEMPO $\Delta t$ :.....	81

3.13.16.	FÓRMULA DEL DIÁMETRO EQUIVALENTE DE LA CHIMENEA DE EQUILIBRIO PARA CADA TI:.....	81
3.13.17.	FÓRMULA DEL CAUDAL QUE PASA POR LAS TURBINAS EN EL INTERVALO DE TIEMPO $\Delta T$ :.....	82
3.13.18.	FÓRMULA DEL VOLUMEN QUE PASA POR LAS TURBINAS EN EL INTERVALO DE TIEMPO $\Delta T$ :.....	82
3.13.19.	FÓRMULA DE LA PÉRDIDA DE CARGA EN EL CONDUCTO Y EN EL ORIFICIO RESTRINGIDO PARA CADA TI: .....	83
3.13.20.	FÓRMULA DE LA CARGA DE ACELERACIÓN PARA CADA TI:...	84
3.13.21.	FÓRMULA DE LA CARGA DE ACELERACIÓN MEDIA PARA CADA TI:	84
3.13.22.	FÓRMULA DEL CAUDAL DE AGUA QUE CIRCULA EN LA CONDUCCIÓN PARA CADA TI:.....	85
3.13.23.	FÓRMULA DEL VOLUMEN DE AGUA QUE CIRCULA EN LA CONDUCCIÓN PARA CADA TI:.....	85
3.13.24.	FÓRMULA DE LA VELOCIDAD DE AGUA QUE CIRCULA EN LA CONDUCCIÓN PARA CADA TI:.....	85
CAPITULO 4.		87
OPTIMIZACIÓN DE LA HOJA DE CÁLCULO PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE LAS CHIMENEAS DE EQUILIBRIO.....		87
4.1.	DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA BASE INICIAL.....	87
4.1.1.	HOJA “AYUDA” .....	87
4.1.2.	HOJA “CIERRE”.....	88
4.1.3.	HOJA “APERTURA” .....	92
4.2.	DESCRIPCIÓN DE LA OPTIMIZACIÓN HECHA PARA MEJORAR LA HOJA DE CÁLCULO INICIAL.....	94
4.2.1.	OPTIMIZACIÓN EN LA INTRODUCCIÓN DE DATOS GENERALES DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA .....	96

4.2.2.	OPTIMIZACIÓN EN LA INTRODUCCIÓN DE DATOS GENERALES PARA LA SIMULACIÓN .....	100
4.2.3.	OPTIMIZACIÓN EN LA OBTENCIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA DE AGUA PARA EL SISTEMA.....	103
4.2.3.1.	OPTIMIZACIÓN EN LA OBTENCIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA DE AGUA EN LAS REJILLAS DE SEPARACIÓN DE SÓLIDOS EN LA TOMA	106
4.2.3.2.	OPTIMIZACIÓN EN LA OBTENCIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA DE AGUA EN FORMAS COMUNES DE ENTRADA AL CONDUCTO (TÚNEL DE BAJA PRESIÓN) .....	108
4.2.3.3.	OPTIMIZACIÓN EN LA OBTENCIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA DE AGUA EN FORMAS ESPECIALES DE ENTRADA AL CONDUCTO (TÚNEL DE BAJA PRESIÓN) .....	111
4.2.3.4.	OPTIMIZACIÓN EN LA OBTENCIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA DE AGUA EN LAS RANURAS DE LAS COMPUERTAS DE ENTRADA AL CONDUCTO (TÚNEL DE BAJA PRESIÓN) .....	114
4.2.3.5.	OPTIMIZACIÓN EN LA OBTENCIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA DE AGUA EN LA REDUCCIÓN GRADUAL DE LA SECCIÓN DE ENTRADA AL CONDUCTO (TÚNEL DE BAJA PRESIÓN) .....	116
4.2.3.6.	OPTIMIZACIÓN EN LA OBTENCIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA DE AGUA EN CODOS, TEES Y CONVERSIONES POSIBLEMENTE PRESENTES EN EL CONDUCTO (TÚNEL DE BAJA PRESIÓN).....	119
4.2.3.7.	OPTIMIZACIÓN EN LA OBTENCIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA DE AGUA EN DIFUSORES Y/O BOQUILLAS POSIBLEMENTE PRESENTES EN EL CONDUCTO (TÚNEL DE BAJA PRESIÓN).....	127
4.2.3.8.	OPTIMIZACIÓN EN LA OBTENCIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA DE AGUA POR FRICCIÓN A LO LARGO DEL CONDUCTO (TÚNEL DE BAJA PRESIÓN).....	131

4.2.3.9.	OPTIMIZACIÓN EN LA OBTENCIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA DE AGUA EN LAS CURVATURAS DE ALINEACIÓN EN PLANTA DEL CONDUCTO (TÚNEL DE BAJA PRESIÓN).....	134
4.2.3.10.	OPTIMIZACIÓN EN EL RESUMEN DE PÉRDIDAS EN EL CONDUCTO (TÚNEL DE BAJA PRESIÓN) Y LA PÉRDIDA TOTAL FINAL DE CARGA	138
4.2.3.11.	OPTIMIZACIÓN EN LA PRESENTACIÓN DE RESULTADOS .....	139
CAPITULO 5. 140		
	MANUAL PARA EL USUARIO .....	140
5.1.	INTRODUCCIÓN.....	140
5.2.	REQUERIMIENTOS BÁSICOS .....	141
5.3.	PROGRAMA Y MODO DE EMPLEO .....	142
5.4.	VENTANA DE DATOS .....	147
5.5.	ENTANA DE DIÁMETROS.....	151
5.6.	PÉRDIDAS DE CARGA EN EL SISTEMA .....	153
5.7.	PÉRDIDAS DE REJILLAS.....	156
5.8.	PERDIDAS EN ENTRADAS .....	159
5.9.	ENTRADAS ESPECIALES.....	162
5.10.	PÉRDIDAS POR RANURAS .....	167
5.11.	PÉRDIDAS POR CODOS Y TEES .....	169
5.12.	PÉRDIDAS POR BOQUILLAS Y DIFUSORES.....	195
5.13.	PÉRDIDA DE CARGA POR CURVATURAS .....	202
5.14.	PÉRDIDA DE CARGA POR TRANSICIÓN.....	204
5.15.	PERDIDAS DE CARGA POR FRICCIÓN.....	206
5.16.	RESUMEN DE PÉRDIDAS DE CARGA EN EL SISTEMA.....	210
5.17.	GENERACIÓN DE GRÁFICOS .....	211

## CAPITULO 6. 214

EJEMPLO DE APLICACIÓN.....	214
6.1. INTRODUCCIÓN.....	214
6.2. OBJETIVO.....	214
6.3. APLICACIÓN.....	214
6.3.1. ENUNCIADO.....	214
6.3.2. RESOLUCIÓN.....	222

## CAPITULO 7. 253

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	253
7.1. FLUJO NO PERMANENTE Y GOLPE DE ARIETE .....	253
7.2. ECUACIONES FUNDAMENTALES.....	254
7.3. OPTIMIZACIÓN DEL PROGRAMA .....	260
7.4. MANUAL DE USUARIO.....	262
7.4.1. PÉRDIDAS POR FRICCIÓN.....	266
7.4.2. PÉRDIDAS LOCALIZADAS .....	268
7.5. EJEMPLO DE APLICACIÓN.....	271
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	274



## INDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1. CLASIFICACIÓN DE LOS FLUJOS TRANSITORIOS .....	8
FIGURA 2.2. PRIMER ESTADO DE LA EVOLUCIÓN DEL GOLPE DE ARIETE 11	11
FIGURA 2.3. SEGUNDO ESTADO DE LA EVOLUCIÓN DEL GOLPE DE ARIETE 11	11
FIGURA 2.4. TERCER ESTADO DE LA EVOLUCIÓN DEL GOLPE DE ARIETE 12	12
FIGURA 2.5. CUARTO ESTADO DE LA EVOLUCIÓN DEL GOLPE DE ARIETE 13	13
FIGURA 2.6. QUINTO ESTADO DE LA EVOLUCIÓN DEL GOLPE DE ARIETE 14	14
FIGURA 2.7. SEXTO ESTADO DE LA EVOLUCIÓN DEL GOLPE DE ARIETE	14
FIGURA 2.8. SÉPTIMO ESTADO DE LA EVOLUCIÓN DEL GOLPE DE ARIETE 15	15
FIGURA 2.9. OCTAVO ESTADO DE LA EVOLUCIÓN DEL GOLPE DE ARIETE 16	16
FIGURA 2.10.....VARIACIÓN DE LA PRESIÓN Y LA VELOCIDAD EN UNA MANIOBRA DE CIERRE.....	18
FIGURA 3.1. ESQUEMA DE UNA CHIMENEA DE EQUILIBRIO Y TODOS LOS COMPONENTES GENERALES DE UNA CENTRAL .....	27
FIGURA 3.2. ESQUEMA DE UN PROTOTIPO DE CHIMENEA DE EQUILIBRIO VERTICAL 28	28
FIGURA 3.3. ESQUEMA DE UN PROTOTIPO DE CHIMENEA DE EQUILIBRIO INCLINADA 29	29
FIGURA 3.4. VARIACIÓN TEÓRICA DE LA PRESIÓN SOBRE LA VÁLVULA SIN TOMAR EN CUENTA PÉRDIDAS DE CARGA.....	30

FIGURA 3.5. VARIACIÓN TEÓRICA DE LA PRESIÓN SOBRE LA VÁLVULA CONSIDERANDO LAS PÉRDIDAS DE CARGA POR FRICCIÓN .....	31
FIGURA 3.6. VARIACIÓN DEL NIVEL DE AGUA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO (OSCILACIONES) DENTRO DE UNA CHIMENEA DE EQUILIBRIO, POSTERIOR A UNA MANIOBRA DE CIERRE DE VÁLVULAS .....	32
FIGURA 3.7. ESQUEMA DE UNA CHIMENEA DE EQUILIBRIO SIMPLE.....	36
FIGURA 3.8. ESQUEMA DE UNA CHIMENEA DE EQUILIBRIO CON ORIFICIO RESTRINGIDO .....	38
FIGURA 3.9. ESQUEMA DE UNA CHIMENEA DE EQUILIBRIO COMPUESTA CON AUMENTO DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL SUPERIOR.....	39
FIGURA 3.10.... ESQUEMA DE UNA CHIMENEA DE EQUILIBRIO COMPUESTA CON AUMENTO DE LA SECCIÓN EN DIFERENTES ZONAS.....	40
FIGURA 3.11.... ESQUEMA DE UNA CHIMENEA DE EQUILIBRIO COMPUESTA CON CÁMARAS LATERALES .....	41
FIGURA 3.12... ESQUEMA DE UNA CHIMENEA DE EQUILIBRIO DIFERENCIAL 42	
FIGURA 3.13.....ESQUEMA DE UNA CHIMENEA DE EQUILIBRIO NEUMÁTICA 43	
FIGURA 3.14.. ESQUEMA DE UNA DISPOSICIÓN DE VARIAS CHIMENEAS DE EQUILIBRIO EN UN SOLO TÚNEL DE BAJA PRESIÓN .....	44
FIGURA 3.15..... ESQUEMA DE UNA DISPOSICIÓN DE UNA CHIMENEA DE EQUILIBRIO AGUAS DEBAJO DE LAS TURBINAS .....	45
FIGURA 3.16..... ESQUEMA DE UNA DISPOSICIÓN UNA CHIMENEA DE EQUILIBRIO ANTES Y OTRA DESPUÉS DE LAS TURBINAS.....	45
FIGURA 3.17.....ESQUEMA DE UNA DISPOSICIÓN DE CHIMENEAS DE EQUILIBRIO EN PARALELO PARA VARIOS EMBALSES .....	46
FIGURA 3.18.ESQUEMA DE LA DISPOSICIÓN CLÁSICA DE LOS ELEMENTOS PRINCIPALES DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA.....	47

FIGURA 3.19.ESQUEMA DE UN CORTE TRANSVERSAL DEL TÚNEL DE BAJA PRESIÓN MOSTRANDO CIERTOS PARÁMETROS PARA LAS ECUACIONES BÁSICAS. 48

FIGURA 3.20.....ESQUEMA DE LAS ESTRUCTURAS RELACIONADAS CON LA CHIMENEA DE EQUILIBRIO EN UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MOSTRANDO CIERTOS PARÁMETROS PARA LAS ECUACIONES BÁSICAS.

51

FIGURA 3.21.....ESQUEMA DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA SOBREPRESIÓN EN EL CIERRE RÁPIDO DE VÁLVULAS ..... 53

FIGURA 3.22.....ESQUEMA DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA SOBREPRESIÓN EN EL CIERRE LENTO DE VÁLVULAS ..... 55

FIGURA 3.23.....ESQUEMA COMPARATIVO ENTRE UNA CHIMENEA DE EQUILIBRIO SIMPLE Y UNA DE ORIFICIO RESTRINGIDO ..... 56

FIGURA 3.24..... ESQUEMA DE LAS OSCILACIONES DEL AGUA (VARIACIÓN DEL NIVEL Z EN EL TIEMPO) DENTRO DE UNA CHIMENEA ESTABLE ..... 62

FIGURA 3.25..... ESQUEMA DE LAS OSCILACIONES DEL AGUA (VARIACIÓN DEL NIVEL Z EN EL TIEMPO) DENTRO DE UNA CHIMENEA INESTABLE..... 62

FIGURA 3.26.....ÁBACO DE PARMAKIAN PARA OBTENER LA OSCILACIÓN MÁXIMA EN UNA CHIMENEA DE EQUILIBRIO DEBIDO AL PARO INSTANTÁNEO DEL FLUIDO ..... 68

FIGURA 3.27.....ÁBACO DE PARMAKIAN PARA OBTENER LA OSCILACIÓN MÁXIMA EN UNA CHIMENEA DE EQUILIBRIO DEBIDO A LA APERTURA INSTANTÁNEA PARA EL PASO DEL FLUIDO ..... 69

FIGURA 3.28.... ESQUEMA DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA COMÚN EN DONDE SE REPRESENTAN LAS PÉRDIDAS DE CARGA Y CARGAS EN UN FUNCIONAMIENTO DE GENERACIÓN NORMAL DE LA CENTRAL. .... 75

FIGURA 4.1. VARIANTES DE CHIMENEAS DE EQUILIBRIO PROPUESTAS EN LA HOJA DE CÁLCULO INICIAL ..... 87

FIGURA 4.2. VARIACIÓN DEL NIVEL DE AGUA EN LA CHIMENEA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO PROPUESTA EN LA HOJA DE CÁLCULO BASE INICIAL	88
FIGURA 4.3. DATOS Y RESULTADOS PARA LA HOJA DE CÁLCULO PARA LA OPERACIÓN DE CIERRE	89
FIGURA 4.4. RESULTADOS TABULADOS PARA LA HOJA DE CÁLCULO PARA EL CIERRE DE VÁLVULAS	89
FIGURA 4.5. VARIACIÓN DEL NIVEL DE AGUA EN LA CHIMENEA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DESPUÉS DE UNA MANIOBRA DE CIERRE DIBUJADA PARA UNA CHIMENEA COMPUESTA EN EL PROGRAMA BASE INICIAL (PARA DATOS CUALESQUIERA)	91
FIGURA 4.6. DATOS Y RESULTADOS PARA LA HOJA DE CÁLCULO QUE SIMULA LA APERTURA DE VÁLVULAS	92
FIGURA 4.7. RESULTADOS TABULADOS PARA LA HOJA DE APERTURA PROPUESTOS EN EL PROGRAMA BASE INICIAL (VALORES CUALESQUIERA)	93
FIGURA 4.8. VARIACIÓN DEL NIVEL DE AGUA EN LA CHIMENEA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DESPUÉS DE UNA MANIOBRA DE APERTURA, DIBUJADA PARA UNA CHIMENEA COMPUESTA EN LA HOJA DE CÁLCULO ORIGINAL	93
FIGURA 4.9. BASE DE DATOS CREADA PARA FACILITAR EL CÁLCULO DE PÉRDIDAS EN MICROSOFT EXCEL DEL PROGRAMA FINAL	95
FIGURA 4.10.... PANTALLA DE INTRODUCCIÓN DE DATOS GENERALES DEL PROGRAMA FINAL	96
FIGURA 4.11..... MENSAJE DE ADVERTENCIA EN CASO DE COMETER ERRORES EN LOS DATOS DE CAUDALES EN CIERRE DE VÁLVULAS	97
FIGURA 4.12..... MENSAJE DE ADVERTENCIA EN CASO DE COMETER ERRORES EN LOS DATOS DE NIVELES Y COTAS EN CIERRE Y APERTURA DE VÁLVULAS	98

FIGURA 4.13.. OPTIMIZACIÓN DADA PARA EL TIEMPO DE ANÁLISIS EN UNA LISTA DE VALORES QUE EL USUARIO ELIGE.....	98
FIGURA 4.14...OPTIMIZACIÓN DADA PARA EL TIEMPO DE DURACIÓN DE LA MANIOBRA DE CIERRE O APERTURA DE VÁLVULAS EN UNA LISTA DE VALORES QUE EL USUARIO ELIGE .....	99
FIGURA 4.15..... MENSAJE DE ADVERTENCIA EN CASO DE COMETER ERRORES EN LOS DATOS DEL ÁNGULO DE LATITUD .....	99
FIGURA 4.16..... MENSAJES DE ADVERTENCIA EN CASO QUE EL USUARIO OLVIDE LLENAR ALGUNAS CASILLAS DE DATOS.....	99
FIGURA 4.17..... MENSAJES DE ADVERTENCIA EN CASO QUE EL USUARIO OLVIDE LLENAR ALGUNAS CASILLAS DE DATOS.....	101
FIGURA 4.18..... MENSAJE DE ADVERTENCIA EN CASO DE COMETER ERRORES EN LOS DATOS DE LAS COTAS DE LAS CHIMENEAS EN LA PANTALLA DE DATOS.....	103
FIGURA 4.19..... MENSAJES DE ADVERTENCIA EN CASO QUE EL USUARIO OLVIDE LLENAR ALGUNAS CASILLAS DE DATOS.....	103
FIGURA 4.20..... PANTALLA PARA ESCOGER EL TIPO DE PÉRDIDAS QUE SE DESEAN CALCULAR EN EL SISTEMA DE LA CENTRAL PARA LA CHIMENEA DE EQUILIBRIO.....	105
FIGURA 4.21.....PANTALLA DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA DE AGUA EN LAS REJILLAS DE SEPARACIÓN DE SÓLIDOS EN LA TOMA.....	106
FIGURA 4.22.... HOJA DE CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA DE AGUA EN LAS REJILLAS DE SEPARACIÓN DE SÓLIDOS EN LA TOMA .....	107
FIGURA 4.23.....LISTA DE POSIBLES SECCIONES DE BARROTES QUE AYUDAN AL USUARIO A NO RECURRIR A OTRAS FUENTES PARA DETERMINAR LOS COEFICIENTES DE PÉRDIDA .....	108
FIGURA 4.24... LISTA DE POSIBLES ÁNGULOS DE INCLINACIÓN DE LA REJA	
108	
FIGURA 4.25.....PANTALLA DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA DE AGUA EN FORMAS COMUNES DE ENTRADA AL TÚNEL DE BAJA PRESIÓN.....	109

FIGURA 4.26.... HOJA DE CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA DE AGUA EN FORMAS COMUNES DE ENTRADA AL TÚNEL DE BAJA PRESIÓN.....	110
FIGURA 4.27..... LISTA DE POSIBLES FORMAS EN VISTA LATERAL DE LA ENTRADA AL TÚNEL PARA DETERMINAR LOS COEFICIENTES DE PÉRDIDA	111
FIGURA 4.28..... LISTA DE POSIBLES COEFICIENTES DE PÉRDIDA (K) PARA UNA DE LAS FORMAS.....	111
FIGURA 4.29. PANTALLA DE OPCIONES DE TIPOS DE PÉRDIDAS DE CARGA DE AGUA EN FORMAS ESPECIALES DE ENTRADA AL TÚNEL DE BAJA PRESIÓN	112
FIGURA 4.30...PANTALLA DE LLENADO DE DATOS PARA LAS PÉRDIDAS DE CARGA DE AGUA EN FORMAS ESPECIALES DE ENTRADA AL TÚNEL DE BAJA PRESIÓN .....	113
FIGURA 4.31.....EJEMPLO DE HOJA DE CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA DE AGUA EN FORMAS ESPECIALES DE ENTRADA AL TÚNEL DE BAJA PRESIÓN .....	114
FIGURA 4.32.....PANTALLA DE OPCIONES DE TIPOS DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA DE AGUA EN LAS RANURAS DE LAS COMPUERTAS DE ENTRADA AL CONDUCTO (TÚNEL DE BAJA PRESIÓN) .....	115
FIGURA 4.33..... LISTA DE POSIBLES COEFICIENTES DE PÉRDIDA PARA RANURAS DE COMPUERTAS.....	115
FIGURA 4.34.... HOJA DE CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA DE AGUA EN LAS RANURAS DE LAS COMPUERTAS DE ENTRADA AL CONDUCTO (TÚNEL DE BAJA PRESIÓN) .....	116
FIGURA 4.35.....PANTALLA DE PÉRDIDAS DE CARGA DE AGUA EN LA REDUCCIÓN GRADUAL DE LA SECCIÓN DE ENTRADA AL CONDUCTO (TÚNEL DE BAJA PRESIÓN) .....	117
FIGURA 4.36.... HOJA DE CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA DE AGUA EN LA REDUCCIÓN GRADUAL DE LA SECCIÓN DE ENTRADA AL CONDUCTO (TÚNEL DE BAJA PRESIÓN).....	118

FIGURA 4.37. PANTALLA DE OPCIONES DE TIPOS DE PÉRDIDAS DE CARGA DE AGUA EN CODOS, TEES Y CONVERSIONES POSIBLEMENTE PRESENTES EN EL CONDUCTO.....	119
FIGURA 4.38..... BOTONES DE LA PANTALLA PRINCIPAL Y 5 HOJAS DE LLENADO DE DATOS .....	120
FIGURA 4.39....PANTALLA DE LLENADO DE DATOS #1 PARA LAS PÉRDIDAS DE CARGA DE AGUA EN CODOS .....	121
FIGURA 4.40....PANTALLA DE LLENADO DE DATOS #2 PARA LAS PÉRDIDAS DE CARGA DE AGUA EN CODOS .....	122
FIGURA 4.41....PANTALLA DE LLENADO DE DATOS #3 PARA LAS PÉRDIDAS DE CARGA DE AGUA EN CONVERSIONES.....	123
FIGURA 4.42....PANTALLA DE LLENADO DE DATOS #4 PARA LAS PÉRDIDAS DE CARGA DE AGUA EN TEES .....	123
FIGURA 4.43....PANTALLA DE LLENADO DE DATOS #5 PARA LAS PÉRDIDAS DE CARGA DE AGUA EN TEES .....	124
FIGURA 4.44.. EJEMPLO DONDE EL USUARIO ES AYUDADO CON EL VALOR CON EL QUE DEBERÁ ESCOGER LA CURVA MÁS PRÓXIMA A ÉSTE (CURVA RO/DO)	125
FIGURA 4.45.....EJEMPLO DE HOJA DE CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA DE AGUA EN CODOS, TEES Y CONVERSIONES POSIBLEMENTE PRESENTES EN EL CONDUCTO (TÚNEL DE BAJA PRESIÓN).....	126
FIGURA 4.46..... PANTALLA DE PÉRDIDAS DE CARGA DE AGUA EN DIFUSORES Y/O BOQUILLAS POSIBLEMENTE PRESENTES EN EL CONDUCTO (TÚNEL DE BAJA PRESIÓN).....	127
FIGURA 4.47.. EJEMPLO DONDE EL USUARIO ES AYUDADO CON EL VALOR CON EL QUE DEBERÁ ESCOGER LA CURVA MÁS PRÓXIMA A ÉSTE (CURVA A1/AO)	129
FIGURA 4.48.....EJEMPLO DE HOJA DE CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA DE AGUA EN DIFUSORES Y/O BOQUILLAS POSIBLEMENTE PRESENTES EN EL CONDUCTO (TÚNEL DE BAJA PRESIÓN).....	130

FIGURA 4.49.PANTALLA DE PÉRDIDAS DE CARGA DE AGUA POR FRICCIÓN A LO LARGO DEL CONDUCTO (TÚNEL DE BAJA PRESIÓN).....	131
FIGURA 4.50..... OPTANDO POR OTRO COEFICIENTE DE ROZAMIENTO EN DONDE EL USUARIO TIENE QUE DIGITARLO .....	132
FIGURA 4.51..... OPTANDO POR UN COEFICIENTE DE ROZAMIENTO PARA UNA SUPERFICIE COMPUESTA DE 3 MATERIALES EN SU PERÍMETRO...	133
FIGURA 4.52.....PANTALLA DE DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA DE AGUA EN LAS CURVATURAS DE ALINEACIÓN EN PLANTA DEL CONDUCTO (TÚNEL DE BAJA PRESIÓN) .....	134
FIGURA 4.53.....LISTA DE POSIBLES ÁNGULOS DE GIRO DADOS EN LISTA PARA EL USUARIO POR FACILIDAD .....	135
FIGURA 4.54..... LISTA DEL POSIBLE NÚMERO DE CURVAS DE UN MISMO TIPO	135
FIGURA 4.55.... HOJA DE CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA DE AGUA EN LAS CURVATURAS DE ALINEACIÓN EN PLANTA DEL CONDUCTO (TÚNEL DE BAJA PRESIÓN) .....	137
FIGURA 4.56..... PANTALLA DE RESUMEN DE PÉRDIDAS EN EL CONDUCTO (TÚNEL DE BAJA PRESIÓN) Y LA PÉRDIDA TOTAL FINAL DE CARGA .....	138
FIGURA 4.57..... PANTALLA DE RESULTADOS	139
FIGURA 5.1. BOTÓN DE OPCIONES PARA ACTIVAR LAS MACROS. ....	143
FIGURA 5.2. VENTANA DE ACTIVACIÓN DE LAS MACROS. ....	144
FIGURA 5.3. VENTANA DE ACTIVACIÓN DE VÍNCULOS. ....	145
FIGURA 5.4. PORTADA DE INICIO DEL PROGRAMA. ....	146
FIGURA 5.5. VENTANA DE ALERTA DE ACTUALIZACIÓN DE VÍNCULOS..	146
FIGURA 5.6. PANTALLA DE INICIO DEL PROGRAMA. ....	147
FIGURA 5.7. GEOMETRÍA DEL ORIFICIO RESTRINGIDO. ....	149
FIGURA 5.8. VENTANA DE INGRESO DE DATOS INICIALES. ....	150



FIGURA 5.9. VENTANA DE INGRESO DE DATOS DE CONFIGURACIÓN DE LA CHIMENEA DE EQUILIBRIO.....	152
FIGURA 5.10... VENTANA DE SELECCIÓN DEL TIPO DE PÉRDIDA DE CARGA EN EL SISTEMA. ....	155
FIGURA 5.11..... VENTANA PARA INGRESO DE DATOS PARA REJILLAS.	158
FIGURA 5.12..... VENTANA PARA EL INGRESO DE DATOS EN ENTRADAS COMUNES.	161
FIGURA 5.13.... VENTANA PARA LA SELECCIÓN DE LA ENTRADA ESPECIAL.	165
FIGURA 5.14..... VENTANA PARA EL INGRESO DE DATOS DE ENTRADAS ESPECIALES.....	166
FIGURA 5.15..... VENTANA PARA EL INGRESO DE DATOS DE RANURAS.	168
FIGURA 5.16..... VENTANA PARA LA SELECCIÓN DE CODOS Y TEES.	173
FIGURA 5.17..... VENTANA NÚMERO 1 PARA EL INGRESO DE DATOS DE CODOS	178
FIGURA 5.18..... VENTANA NÚMERO 2 PARA EL INGRESO DE DATOS DE CODOS.	182
FIGURA 5.19. VENTANA NÚMERO 1 PARA EL INGRESO DE DATOS DE TEES.	187
FIGURA 5.20. VENTANA NÚMERO 2 PARA EL INGRESO DE DATOS DE TEES.	191
FIGURA 5.21. VENTANA NÚMERO 3 PARA EL INGRESO DE DATOS DE TEES.	194
FIGURA 5.22..... VENTANA PARA EL INGRESO DE DATOS DE DIFUSORES Y BOQUILLAS.	201

FIGURA 5.23..... VENTANA PARA EL INGRESO DE DATOS DE CURVATURAS.	
	203
FIGURA 5.24... VENTANA PARA EL INGRESO DE DATOS DE TRANSICIONES.	
	205
FIGURA 5.25..... VENTANA PARA LA SELECCIÓN DEL TIPO DE MATERIAL DE LA CONDUCCIÓN. ....	209
FIGURA 5.26..... VENTANA DE AVANCE DE GENERACIÓN DE LA GRÁFICA.	
	211
FIGURA 5.27..... VENTANA PARA EL GRÁFICO DE LAS OSCILACIONES DE AGUA DENTRO DE LA CHIMENEA DE EQUILIBRIO EN MANIOBRAS DE APERTURA.	212
FIGURA 5.28..... VENTANA PARA EL GRÁFICO DE LAS OSCILACIONES DE AGUA DENTRO DE LA CHIMENEA DE EQUILIBRIO EN MANIOBRAS DE CIERRE.	213
FIGURA 6.1. VISTA EN PLANTA DE LA CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE CONDUCCIÓN.....	215
FIGURA 6.2. PERFIL DE LA CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE CONDUCCIÓN.....	215
FIGURA 6.3. VISTA FRONTAL DE LA OBRA DE TOMA.....	216
FIGURA 6.4. VISTA EN PLANTA DE LA OBRA DE TOMA .....	216
FIGURA 6.5. VISTA LATERAL DE LA OBRA DE TOMA .....	217
FIGURA 6.6. FORMA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE LOS BARROTES DE LAS REJILLAS .....	217
FIGURA 6.7. FORMA DE LAS RANURAS PARA COMPUERTA Y STOP LOG	
	218
FIGURA 6.8. TRANSICIÓN DE LA ENTRADA HACIA EL TÚNEL DE CARGA	218
FIGURA 6.9. VISTA EN PLANTA DEL CODO .....	219
FIGURA 6.10..... VISTA EN PLANTA DE LA CURVA	
	220

FIGURA 6.11.....	CHIMENEA DE EQUILIBRIO	
221		
FIGURA 6.12.....	DATOS DEL CONDUCTO.	
224		
FIGURA 6.13.....	DATOS DE LA CHIMENEA DE EQUILIBRIO.	
226		
FIGURA 6.14.....	ELECCIÓN DE PÉRDIDAS DE CARGA	
228		
FIGURA 6.15.....	PÉRDIDAS EN LAS REJILLAS DE SEPARACIÓN DE SÓLIDOS EN LA TOMA.	230
FIGURA 6.16.....	PÉRDIDAS POR FORMAS COMUNES DE LA ENTRADA AL CONDUCTO.	232
FIGURA 6.17.....	PÉRDIDA EN LAS RANURAS DE LAS COMPUERTAS.	
234		
FIGURA 6.18.....	PÉRDIDAS EN TRANSICIÓN DE SECCIÓN AL INICIO DEL TÚNEL.	236
FIGURA 6.19.....	PÉRDIDAS DE CARGA POR FRICCIÓN EN EL TÚNEL.	
238		
FIGURA 6.20.....	PÉRDIDAS EN CODOS Y TEES.	
240		
FIGURA 6.21.....	PÉRDIDAS EN CODOS Y TEES, DATOS.	
241		
FIGURA 6.22.....	PÉRDIDAS EN CURVAS DE ALINEACIÓN DEL TÚNEL.	
243		
FIGURA 6.23.....	RESUMEN DE RESULTADOS DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA EN EL SISTEMA.	245
FIGURA 6.24.....	GRÁFICO DE LAS OSCILACIONES DE AGUA DENTRO DE LA CHIMENEA DE EQUILIBRIO PARA UNA MANIOBRA DE CIERRE, NIVEL MÁXIMO EN EL EMBALSE Y MÁXIMO CAUDAL TURBINADO.	247

FIGURA 6.25..... GRÁFICO DE LAS OSCILACIONES DE AGUA DENTRO DE LA CHIMENEA DE EQUILIBRIO PARA UNA MANIOBRA DE APERTURA, NIVEL MÍNIMO EN EL EMBALSE Y MÁXIMO CAUDAL TURBINADO .....	249
FIGURA 6.26..... GRÁFICO DE LAS OSCILACIONES DE AGUA DENTRO DE LA CHIMENEA DE EQUILIBRIO PARA UNA MANIOBRA DE CIERRE, NIVEL MÁXIMO EN EL EMBALSE Y MÍNIMO CAUDAL TURBINADO .....	250
FIGURA 6.27..... GRÁFICO DE LAS OSCILACIONES DE AGUA DENTRO DE LA CHIMENEA DE EQUILIBRIO PARA UNA MANIOBRA DE APERTURA, NIVEL MÍNIMO EN EL EMBALSE Y MÍNIMO CAUDAL TURBINADO.....	251
FIGURA 6.28.....NIVEL MÁXIMO Y MÍNIMO DENTRO DE LA CHIMENEA DE EQUILIBRIO	252
FIGURA 7.1. GEOMETRÍA DEL ORIFICIO RESTRINGIDO. ....	271

**INDICE DE CUADROS**

CUADRO 5.1. MANIOBRAS DE OPERACIÓN EN LAS VÁLVULAS DE LAS TURBINAS DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA. ....	141
CUADRO 5.2. CUADRO PARA EL INGRESO DE DATOS EN ENTRADAS.....	159
CUADRO 6.1. MANIOBRAS DE OPERACIÓN EN LAS VÁLVULAS DE LAS TURBINAS DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA .....	222
CUADRO 6.2. DATOS DE LAS MANIOBRAS DE OPERACIÓN .....	222
CUADRO 6.3. RESULTADOS DE LAS CUATRO MANIOBRAS DE OPERACIÓN. 248	
CUADRO 7.1. MANIOBRAS DE OPERACIÓN EN LAS VÁLVULAS DE LAS TURBINAS DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA. ....	265

## RESUMEN

El programa inicialmente constaba de dos hojas de cálculo, en las cuales se debía de ingresar datos generales sin saber qué tipo de unidades eran las que debía tener cada uno de los datos, así como el tipo de unidades que tenían los resultados arrojados. El usuario debía de realizar aparte todos los cálculos necesarios para encontrar las pérdidas de carga en el sistema, con lo cual el tiempo que el usuario necesitaba para encontrar los niveles de las oscilaciones dentro de una chimenea de equilibrio era muy grande.

El proyecto de titulación se basó en crear un programa en el cual la interfaz con el usuario sería gráfica y amistosa, además crear una base de datos suficientemente extensa para encontrar las pérdidas de carga existentes en el sistema Obra de toma – Chimenea de equilibrio. Todas estas modificaciones permiten que el cálculo de oscilaciones de masa dentro de una chimenea de equilibrio sea eficiente, con lo cual el usuario al momento de ingresar los datos comprende de mejor manera cómo influye cada uno de los valores que ingresa.

La base de datos creada consta de cincuenta y nueve hojas de cálculo para las diferentes clases y variantes de tipos de pérdidas en el sistema Obra de toma – Chimenea de equilibrio, en donde los datos que se ingresan en las diferentes ventanas del programa automáticamente se copian a éstas hojas y ahí se realizan todos los cálculos necesarios para encontrar la pérdida de carga. Esta base de datos se obtuvo en gran parte del libro Idelchik, I.E. (1986), en donde se presentan gran cantidad de tablas y curvas, las sirvieron para encontrar ecuaciones representativas las cuales fueron usadas posteriormente para encontrar los coeficientes de pérdida de carga.

El entorno gráfico se consiguió mediante una aplicación del Visual Basic para M.O. Excel, en donde se crearon formularios con cuadros de texto, así como cuadros de imagen, además se colocaron botones para ayudar a avanzar entre formularios. Cada formulario tiene su propia programación para copiar los datos

ingresados y pegarlos en las diferentes hojas del Excel, así como también un proceso contrario en donde los resultados de los cálculos realizados en las hojas del Excel eran copiados al entorno de Visual Basic.

Con la base de datos creada y el entorno gráfico se obtuvo un resultado altamente atractivo para el usuario, así como ampliamente útil para los usuarios, ya que el programa finalmente no solo sirve para calcular los niveles de las oscilaciones de agua dentro de una chimenea de equilibrio, sino que también es muy útil para poder tener las pérdidas de carga en los diferentes accesorios.

Finalmente la versatilidad del programa es la que hace que sea de gran ayuda para estudiantes de pregrado ya que es muy amigable con el usuario, con estudiantes de postgrado ya que el tema de flujos transitorios es una materia de ese nivel y para los profesionales ya que se convierte en una buena herramienta al momento de hacer pre-diseños y diseños definitivos en sistemas donde la chimenea de equilibrio sea una opción al momento de amortiguar las presiones generadas por los flujos transitorios.

## PRESENTACIÓN

El programa “OSCILACIONES DE MASA EN UNA CHIMENEA DE EQUILIBRIO”, tiene la finalidad de ser un medio de aprendizaje para estudiantes de ingeniería civil (hidráulica), tanto de pregrado como de postgrado, así como una aplicación guía en la vida profesional.

El programa está elaborado en un medio interactivo y amigable mediante el cual el usuario al ingresar los datos requeridos, será guiado mediante una serie de imágenes de detalle, las cuales indicarán cada una de las variables así como se indicará las unidades en las que se deberá de ingresar los datos. Esta aplicación al ser interactiva permite al usuario estar siempre atento a los datos que ingresa ya que si se ingresa algún dato erróneo el programa se lo indicará. Además el usuario no necesitará realizar cálculos aparte, ya que el programa en su estructura interna realiza todos los cálculos necesarios.

El programa consta de una ventana para datos generales, una ventana para datos geométricos de la chimenea de equilibrio, una ventana para selección del tipo de pérdida en el sistema Obra de toma – Chimenea de equilibrio, nueve ventanas para ingresar los datos necesarios según el tipo de pérdida en el sistema, una hoja de resumen de pérdidas y finalmente según sea la maniobra seleccionada saldrá una ventana de resultados.

Finalmente el usuario podrá comprender la función y comportamiento de las chimeneas de equilibrio en centrales hidroeléctricas.



## **CAPITULO 1.**

# **INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DEL PROYECTO DE TITULACIÓN**

### **1.1.OBRAS COMPLEMENTARIAS EN UN EMBALSE PARA GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA**

Las obras complementarias en un embalse para generación hidroeléctrica son aquellas que permiten que se cumpla el propósito para el cual es construido el embalse, es decir son las obras que permiten conducir el agua requerida para producir cierta cantidad de energía hidroeléctrica.

Primeramente debemos señalar que existen varias clasificaciones de centrales hidroeléctricas, y cada clasificación tendrá una configuración de obras complementarias diferente.

Una primera clasificación es por la carga de energía:

- De baja carga: Son aquellas que tienen una carga menor a 50m, y habitualmente descargan grandes caudales.
- De carga media: Son aquellas que tienen una carga entre los 50m y 300m con descargas de caudales medios.
- De alta carga: Son aquellas que tienen una carga mayor a los 300m y por lo general descargan bajos caudales.

Otra clasificación es por el tránsito del flujo:

- De flujo continuo: Son aquellas que no poseen un embalse de regulación de caudales para su funcionamiento, utilizan el caudal que transita por el río y son diseñadas para caudales que circulen el 90% del tiempo.

- De flujo embalsado: Se usa un embalse para regular los caudales que harán funcionar las turbinas, su eficiencia es mayor ya que estarán en operación gran parte del año.
- De flujo bombeado: Este tipo de centrales funcionan por horas. Poseen un embalse superior el cual almacena el agua y en horas de gran demanda eléctrica el agua fluye aguas abajo haciendo que las turbinas funcionen, hacia otro embalse el cual regula los caudales, en horas de baja demanda eléctrica se bombea toda o una parte del agua descargada en el proceso normal de generación. Los embalses son de un tamaño tal que permitan el funcionamiento a plena capacidad de generación eléctrica por un período de varias horas, y el terreno debe de ser lo más impermeable posible para evitar pérdidas por evaporación o filtración.

Las obras complementarias en estas centrales variarán según el tipo, pero la mayoría tendrá los siguientes elementos: embalse, presa, obra de toma, túnel de carga, chimenea de equilibrio, tubería de presión.

**Embalse:** Es el lugar donde se almacena el agua para poder ser regulada y aprovechada posteriormente. Un embalse es un lago artificial, el cual es generado una vez que se cierra el cauce natural del río por medio de una presa. Con el almacenamiento de agua se consigue crear una diferencia de altura con la central hidroeléctrica con lo cual se aumenta la potencia de energía hidroeléctrica a obtener.

**Presa:** Es la estructura que cierra el cauce natural del río para poder almacenar el agua y posteriormente ser conducida a la casa de máquinas. Las presas pueden ser de materiales sueltos, o de hormigón. Las presas pueden tener diferentes configuraciones.

**Obra de toma:** Es aquella que permite tomar el caudal necesario para la generación de energía, pueden dejar fluir el líquido en forma gradual, derivar los volúmenes recibidos a canales o tuberías, o dar salida al agua de acuerdo a las necesidades de evacuación. La obra de toma está compuesta por: *rejillas*, su objetivo es retener todo material sólido que se encuentre en el embalse; su forma

puede variar de acuerdo al tipo de material que se desea eliminar. La disposición de las rejillas dependerá de la accesibilidad para eliminar la basura acumulada. *Compuerta de acceso*, la cual permite el paso o no del líquido (algunos proyectos poseen *stop logs* que son compuertas auxiliares las cuales se ponen en funcionamiento cuando se hace el mantenimiento a la compuerta principal); el tipo y tamaño de la compuerta va a depender del volumen de agua recibido, del clima, de los almacenamientos necesarios en el invierno. Las compuertas pueden ser de plumas y vigas, levadizas rectangulares, radiales.

Túnel de carga: Es una conducción que empieza en la obra de toma, la cual transmite el agua a bajas presiones, hasta la chimenea de equilibrio. La geometría de la sección transversal del túnel debe de ser tal que permita transitar el caudal requerido con las menores pérdidas posibles.

Chimenea de equilibrio: Son estructuras que regulan la energía en la conducción transformando la energía cinética que tiene la tubería de presión a energía potencial con un aumento de la altura de agua en la chimenea en las maniobras de cierre y transformando la energía potencial en cinética en las maniobras de apertura.

Tubería de presión: Es una conducción que va desde la chimenea de equilibrio, hasta la casa de máquinas, la cual transmite el agua a altas presiones por lo cual, generalmente, se encuentra blindada, es decir se recubre con acero y cada cierto tramo se ancla para evitar que los cambios de presión que transitan por la tubería generen daños.

## **1.2.IMPORTANCIA DE LA CHIMENEA DE EQUILIBRIO EN UN EMBALSE PARA GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA**

Las chimeneas de equilibrio son los elementos de la conducción que en sistemas grandes son pozos cilíndricos excavados en tierra o en roca cubiertos parcialmente logrando que el agua se encuentra a presión atmosférica, los cuales se encuentran ubicados al final del túnel de carga y al inicio de la tubería de presión, ubicándose lo más cercano posible a la casa de máquinas que es donde

se encuentran las turbinas, mientras que en sistemas más pequeños estos pozos pueden convertirse en tanques elevados ubicados lo más cercano posible a las turbinas.

La chimenea de equilibrio se ubica lo más cercano posible de las turbinas, debido a que el tramo de tubería comprendido entre la chimenea de equilibrio y casa de máquinas va a ser el que soporte una gran presión tanto positiva, como negativa, razón por la cual este tramo deberá ser blindado con acero, lo que lo convierte en un tramo muy caro para el sistema de la conducción.

Al producirse una maniobra de cierre en las turbinas, se va a producir un rechazo de agua que creará una onda de presión, la cual seguirá en dirección aguas arribas, hasta llegar a un lugar que se encuentre a presión atmosférica donde se refleje la onda, razón por la cual la instalación de una chimenea de equilibrio proveerá de un mecanismo que ayude a que éste rechazo de agua y de energía ingrese al pozo, con lo cual se evita que el túnel de carga absorba grandes presiones. Los cierres bruscos de válvulas en las turbinas se pueden producir también por maniobras poco usuales como cuando pudiere existir alguna falla.

Al contrario de la maniobra descrita anteriormente, si se produce una apertura de las turbinas, el agua comenzará a fluir rápidamente, con lo cual se va a necesitar de una cantidad de agua inicial que permita suplir momentáneamente la necesidad del líquido, hasta que el agua contenida en el túnel de carga comience a fluir normalmente, debido a que el flujo viajará más rápidamente en la tubería de presión, que en el túnel de carga.

Tanto para las maniobras de cierre, como de apertura, la chimenea de equilibrio deberá tener las dimensiones necesarias para que tanto los niveles máximos, como mínimos de agua se mantengan dentro de la chimenea de equilibrio, así de esa manera evitar que el agua suba tanto que se derrame sobre la superficie, ó que el agua baje tanto que se pueda producir un ingreso de aire a la tubería de presión con lo cual se generarían problemas de cavitación.

Las chimeneas de equilibrio también pueden ir ubicadas inmediatamente después de la casa de máquinas, esto ocurre si la descarga de las turbinas es bajo presión

como es el caso de las turbinas “Francis”, con lo cual se crean sistemas en que habrá dos chimeneas de equilibrio.

En este caso al producirse el cierre de las turbinas dejará de fluir agua, con lo cual la chimenea de equilibrio aguas abajo proveerá del agua necesaria para evitar que se produzcan presiones negativas en el sistema casa de máquinas – descarga.

Para el caso de la apertura de las turbinas, el agua que fluye rápidamente ingresará a la chimenea de equilibrio con lo cual se evita que recorra una onda de presión por toda la tubería de descarga, con lo cual se abarata el costo de ésta conducción.

### **1.3.OBJETIVOS DEL PROYECTO DE TITULACIÓN**

#### **1.3.1. OBJETIVO GENERAL**

Diseñar una amplia base de datos para el cálculo de pérdidas tanto localizadas, como por fricción, las cuales influirán en gran medida en la carga neta existente en el sistema. Optimizar la hoja de cálculo inicial con modificaciones que creen un ambiente amigable y fácilmente entendible para el usuario. El programa final será una hoja de cálculo, el cual se encontrará en un entorno visual gráfico que guiará al usuario en todos los pasos de manera pausada. Llegando a tener una mejor concepción de los cambios ocurridos en la conducción hasta llegar a la chimenea de equilibrio donde finalmente se generará una gráfica en la que se muestren las oscilaciones ocurridas dentro de la chimenea de equilibrio. El dimensionamiento de las chimeneas de equilibrio se dará cuando el usuario ingrese diferentes valores para los diámetros de la chimenea de equilibrio, con lo cual se puede ir ajustando la geometría dependiendo de la topografía del terreno para de esa forma obtener la que mejor se ajuste a las condiciones del terreno y conteniendo siempre el agua dentro de la misma con un margen de seguridad.

### **1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Diseñar una amplia base de datos para el cálculo de pérdidas en túnel de baja carga.
- Generar una gráfica en la cual se muestren las variaciones de nivel del agua en la chimenea de equilibrio.
- Obtener una aplicación computacional didáctica, precisa y sencilla para el usuario, mediante la aplicación de la base teórica necesaria para el dimensionamiento de chimeneas de equilibrio en centrales hidroeléctricas, a través del análisis del comportamiento de las distintas variables que intervienen en su dimensionamiento.

## CAPITULO 2.

### BASES TEÓRICAS PARA EL ANÁLISIS DEL FLUJO NO PERMANENTE EN TUBERÍAS A PRESIÓN

#### 2.1.FLUJO NO PERMANENTE

El flujo no permanente es aquel que con el tiempo varían las condiciones y características como caudal Q, velocidad V, presión P, densidad  $\rho$  en un determinado punto. Estas condiciones varían debido

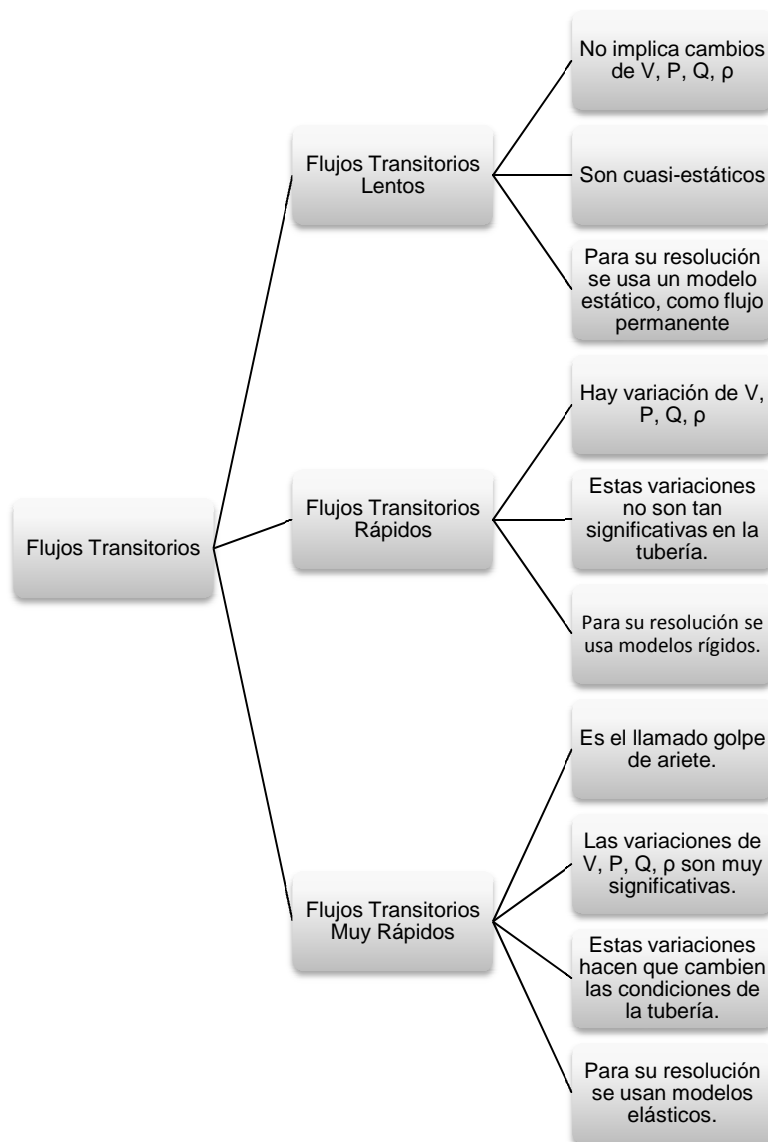
$$\frac{\partial Q}{\partial t} \neq 0 ; \frac{\partial V}{\partial t} \neq 0 ; \frac{\partial P}{\partial t} \neq 0 ; \frac{\partial \rho}{\partial t} \neq 0 \quad (2.1)$$

Una vez que determinamos lo que es flujo no permanente, se debe tener en cuenta que el flujo no permanente en una tubería a presión se trata de un transiente, que es un estado intermedio en el cual las condiciones iniciales de equilibrio cambian hasta volver a esas condiciones de equilibrio, es decir que en una tubería a presión un flujo es inicialmente permanente, hasta que por algún motivo las condiciones de éste flujo se modifican con el tiempo y finalmente vuelve a ser un flujo permanente.

Los motivos que pueden ocurrir en un proyecto de generación hidroeléctrica para que se cambie de un estado permanente a un estado no permanente, pueden ser apertura de válvulas, cierre de válvulas, las cuales pueden ser por operación normal de la central, por mantenimiento, o emergencia, variaciones drásticas en el tránsito de caudales, cambios térmicos, etc.

A los transientes ó flujos transitorios se los clasifica como se indica en la Figura 2.1.

**Figura 2.1.** Clasificación de los flujos transitorios



FUENTE: (Apuntes de clase "Flujos Inestacionarios; E.P.N)

Los flujos transitorios que se encuentran en tuberías a presión en proyectos de generación hidroeléctrica son los muy rápidos llamados también Golpe de Ariete.

## **2.2.FLUJO TRANSITORIO MUY RÁPIDO Ó GOLPE DE ARIETE**

El golpe de ariete es el fenómeno que se produce cuando se dan ciertos cambios al flujo que circula a presión dentro de una tubería, algunos motivos que pueden ocurrir en un proyecto de generación hidroeléctrica para que se cambie de un



estado permanente a un estado no permanente, pueden ser apertura de válvulas, cierre de válvulas o sistema de regulación de flujo que transitan por la turbina, las cuales pueden ser por operación normal de la central, por mantenimiento, o emergencia, variaciones drásticas en el tránsito de caudales, cambios térmicos, etc., lo que hace que se generen unas ondas de presión y velocidad, las cuales viajarán dentro de la tubería hasta llegar a un lugar donde la presión existente sea la atmosférica, de ésta manera la presión generada dentro de la tubería se podrá liberar.

Al ser este flujo transitorio muy rápido, lo que provoca que las condiciones y características del flujo cambien drásticamente, se produce un cambio de energía que pasa de ser cinética dentro del conducto, a ser potencial elástica, pero no toda la energía se convierte en potencial, ya que otra parte se convierte en energía acústica y otra se pierde por la fricción con lo cual hace que el flujo transitorio vuelva a convertirse en un flujo permanente.

“Para mitigar los efectos del golpe de ariete existen 3 formas las cuales son:

- Cambiar las propiedades de la tubería, por ejemplo el diámetro.
- Implementar procedimientos de control en las válvulas ó turbinas.
- Diseño e instalación de estructuras de control de elevación de agua.”  
(MARTIN, 2004)

De estas 3 formas para mitigar el golpe de ariete, el presente proyecto de titulación se enfoca en el diseño de una hoja de cálculo para poder determinar los niveles máximos y mínimos de agua dentro de una estructura para el control de la oscilación de agua llamada chimenea de equilibrio.

### **2.2.1. DESCRIPCIÓN DEL GOLPE DE ARIETE**

Para poder describir cómo actúa el golpe de ariete en una tubería a presión, se va a suponer que el sistema consta de un embalse, una tubería de presión y al final de la misma, una válvula. Esta descripción será de un sistema en el cual se cierra rápidamente una válvula, produciéndose golpe de ariete aguas arriba de la

válvula. Además no se considerarán las pérdidas producidas por la fricción del flujo con la tubería.

- Las condiciones iniciales en el sistema son:
- Inicialmente el flujo dentro de la tubería es permanente
- La carga de presión sobre la tubería es  $H_0$
- La longitud de la tubería es  $L$
- Se considera como eje al inicio de la tubería en el embalse y sentido positivo hacia la derecha

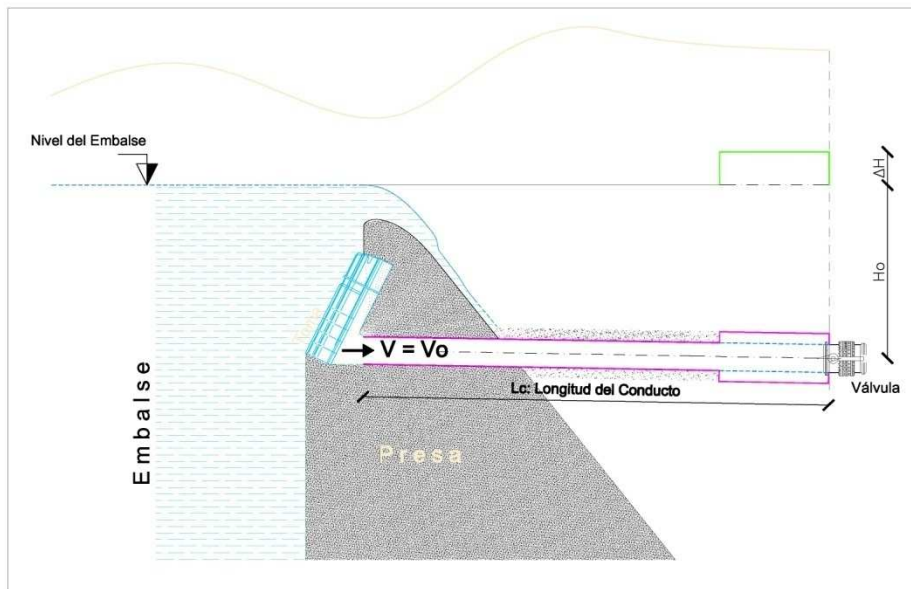
Nomenclatura:

- $t$ : Tiempo de propagación de la onda
- $L$ : Longitud de la tubería
- $V_0$ : Velocidad inicial del flujo
- $V$ : Velocidad del flujo
- $a$ : Celeridad de la onda
- $H_0$ = Carga de presión sobre la tubería
- $\Delta H$ : Variación de la presión

Inicialmente el flujo se encuentra moviéndose por la tubería, cuando al  $t=0$  se cierra inmediatamente la válvula, con lo cual el flujo que se movía con  $V_0$ , se ve interrumpido y hace que éste se pare inmediatamente y su velocidad se vuelva cero  $V=0$ , al suceder esto hace que se genere una sobrepresión  $\Delta H$  que dilata la tubería, mientras que el flujo se comprime, este fenómeno se da por capas que empiezan en la proximidad aguas arriba de la válvula.

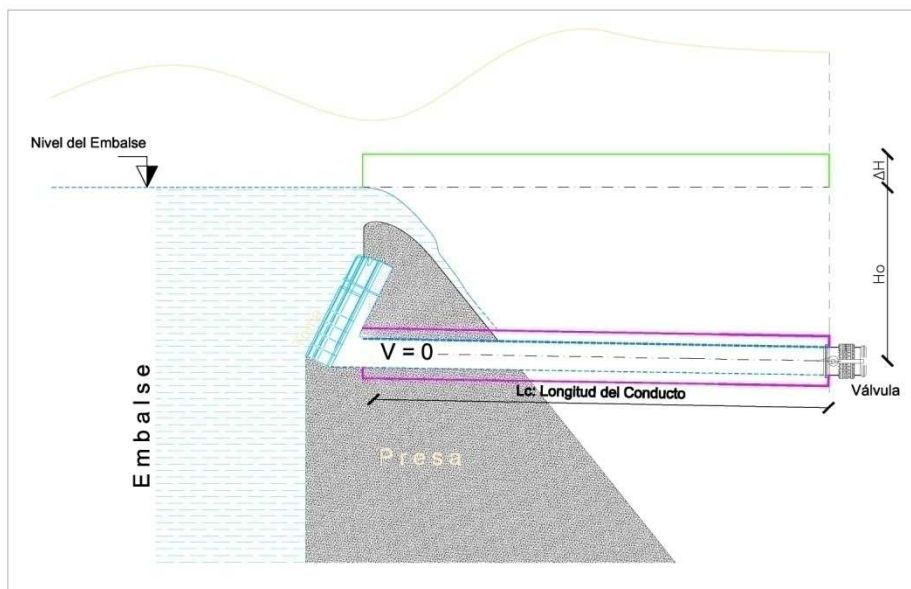
Esta sobrepresión comienza a recorrer la tubería en forma de onda, hasta llegar al embalse, proceso que dura un tiempo  $t= L/a$ .

**Figura 2.2.** Primer estado de la evolución del golpe de ariete



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

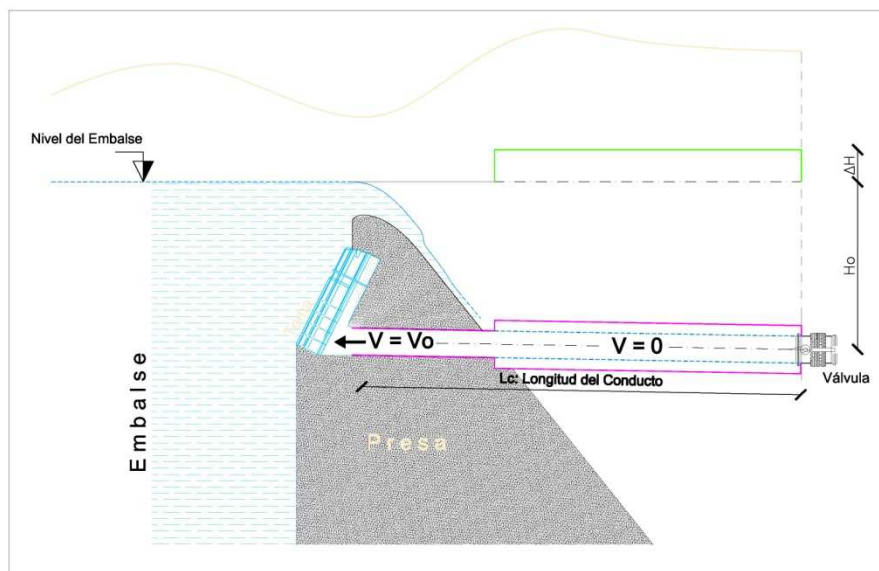
**Figura 2.3.** Segundo estado de la evolución del golpe de ariete



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

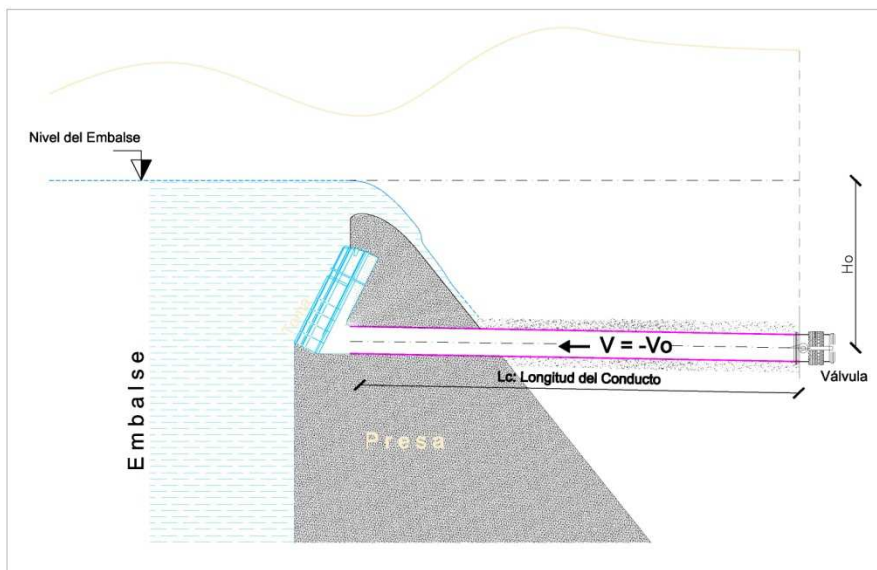
Una vez que la sobrepresión llega al embalse, toda la tubería ha quedado con velocidad cero, el flujo se ha comprimido y la tubería se ha ensanchado, por lo tanto en el extremo de la tubería existirá una presión  $H_0 + \Delta H$ , mientras que en el embalse la presión es  $H_0$ , para que ésta diferencia en las presiones se equilibre el flujo comienza a fluir con velocidad  $V = V_0$  hacia la izquierda, es decir con dirección al embalse, mientras que en la tubería el flujo se descomprime y la tubería vuelve a su ancho normal. Ésta situación hace que se produzca una onda de presión negativa, la cual recorrerá la tubería, hasta llegar a la válvula, en un tiempo  $t=2L/a$ .

**Figura 2.4.** Tercer estado de la evolución del golpe de ariete



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

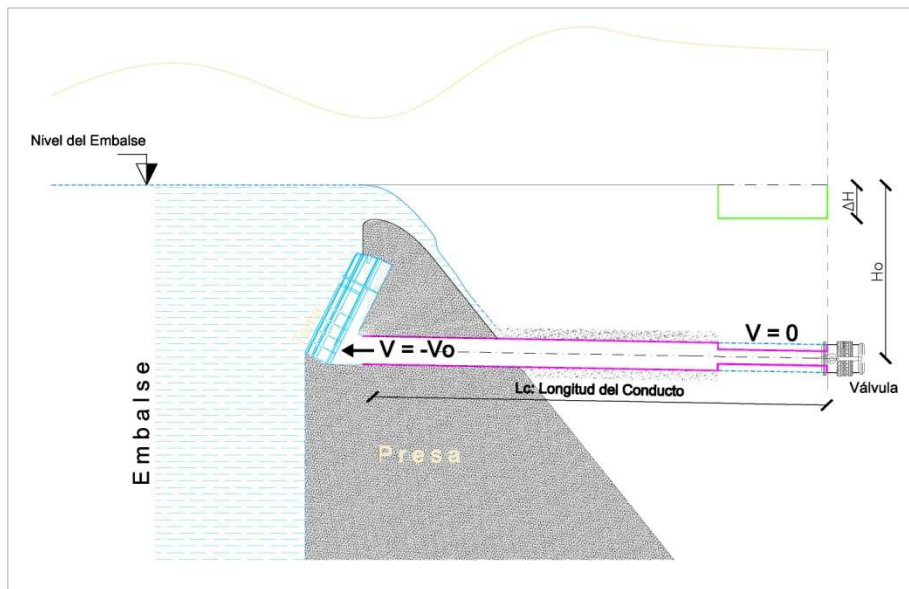
**Figura 2.5.** Cuarto estado de la evolución del golpe de ariete



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

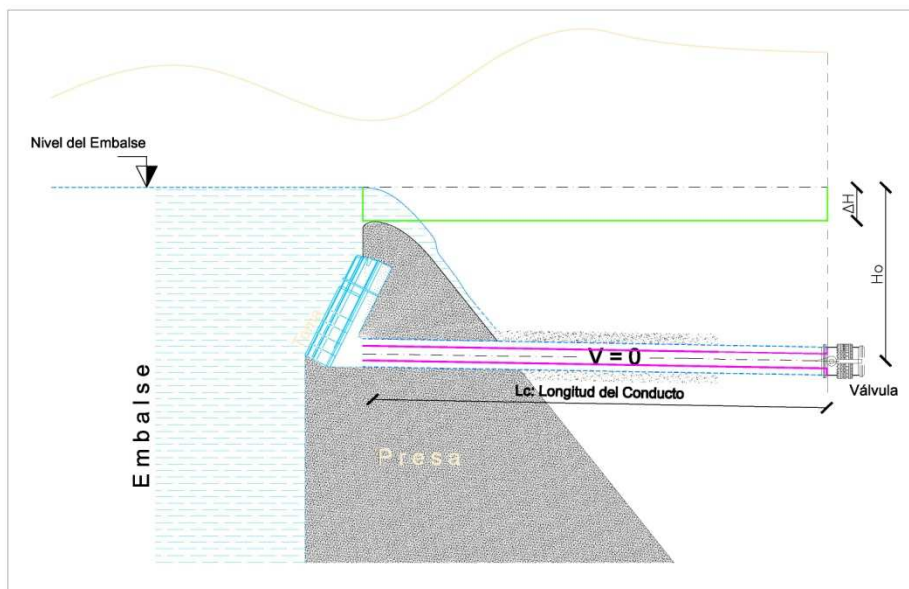
Al llegar la onda negativa de presión a la válvula, toda la tubería mantiene su ancho normal, el flujo copa toda la superficie y la velocidad es en dirección hacia el embalse. Una vez que la onda se encuentre con la válvula y debido a que la velocidad del flujo es negativa, entonces ya que no hay más flujo que pueda moverse con esa velocidad, se produce una presión negativa, la cual hace que el flujo en el extremo con la válvula se pare inmediatamente, obteniendo de esa manera una velocidad  $V=0$ , mientras tanto la presión negativa hace que el flujo se expanda y la tubería se contraiga. Este proceso se da por capas hasta que la onda recorre toda la tubería y llega al embalse, proceso que dura un tiempo  $t=3L/a$ .

**Figura 2.6.** Quinto estado de la evolución del golpe de ariete



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

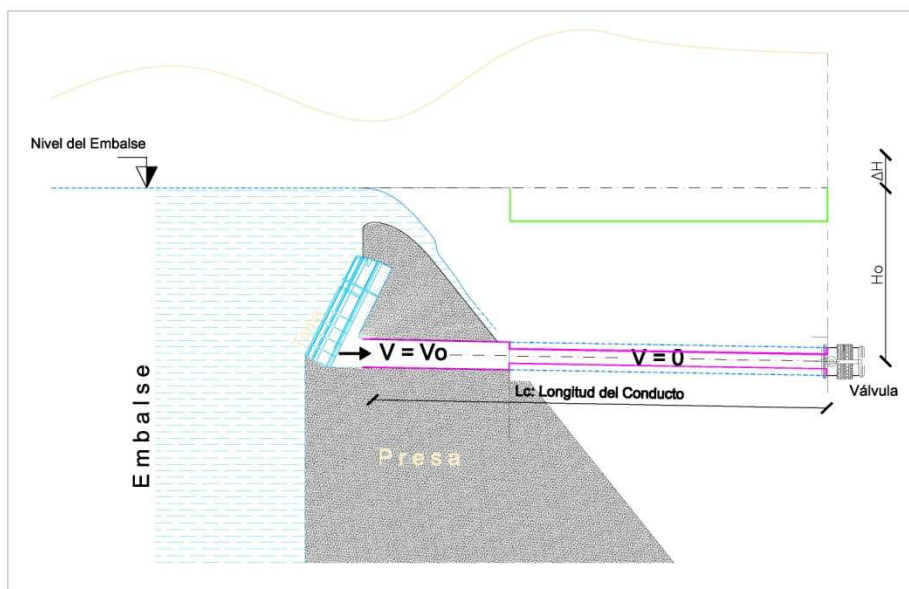
**Figura 2.7.** Sexto estado de la evolución del golpe de ariete



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

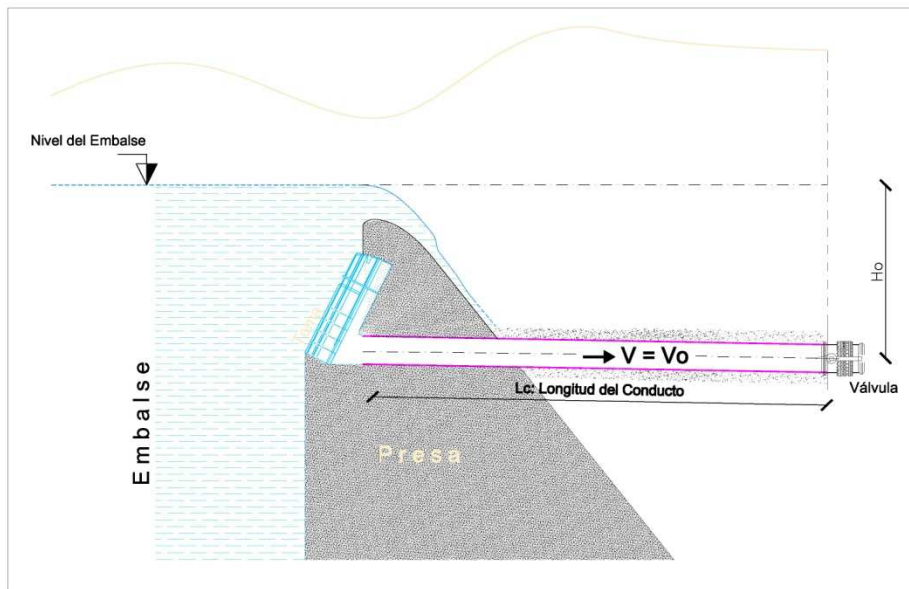
Cuando la onda haya alcanzado el embalse, la presión en el extremo de la tubería será de  $H_0 - \Delta H$ , mientras que la presión en el embalse será de  $H_0$ , ésta diferencia de presiones será disipada de manera que el flujo comience a recorrer por la tubería con velocidad positiva hacia la válvula, lo que hace que la tubería se descomprima, el flujo se vuelva a ser normal al copar toda la superficie, y la presión se restablezca a  $H_0$ . Estas condiciones se transmiten a lo largo de la tubería hasta llegar a la válvula, con lo cual toda la tubería vuelve a tener las condiciones iniciales.

**Figura 2.8.** Séptimo estado de la evolución del golpe de ariete



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

**Figura 2.9.** Octavo estado de la evolución del golpe de ariete



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

Al no haber considerando que existen pérdidas en la conducción este proceso empezará de nuevo siendo su ciclo un  $t=4L/a$ . Sin embargo en la realidad si existen pérdidas por lo que el proceso será cada vez con menores presiones, con lo cual en un corto tiempo se detendrá.

### 2.3.ECUACIONES BÁSICAS

Para conocer el comportamiento del flujo ante las diversas maniobras, las cuales producirán los flujos transitorios, se lo puede realizar mediante parámetros generales llamados “Balances Integrales de fuerzas y masas” y mediante parámetros más a detalle llamados “Balances Diferenciales de fuerza y masa”.

Los balances integrales de fuerza y masa, permiten conocer detalles generales del flujo en la tubería a presión, como la sobrepresión máxima y celeridad del flujo.

Los balances diferenciales de fuerza y masa permiten conocer paso a paso como va evolucionando el fenómeno.



### 2.3.1. ECUACIONES GENERALES

#### 2.3.1.1. Sobrepresión Máxima.-

La sobrepresión máxima que se puede alcanzar en un sistema se la conoce mediante un balance integral de fuerzas ó ecuación de Joukowski, en la que se aplica la ecuación integral de cantidad de movimiento. En el flujo no permanente cuando la velocidad del flujo en la tubería se hace cero, la presión obtiene su valor más alto como se aprecia en la Figura 2.10, donde se observa como en un punto dentro de la tubería se dan los diferentes cambios tanto de presión, como de velocidad.

$$\Delta p = \rho * a * \Delta v \quad (2.2)$$

Donde:

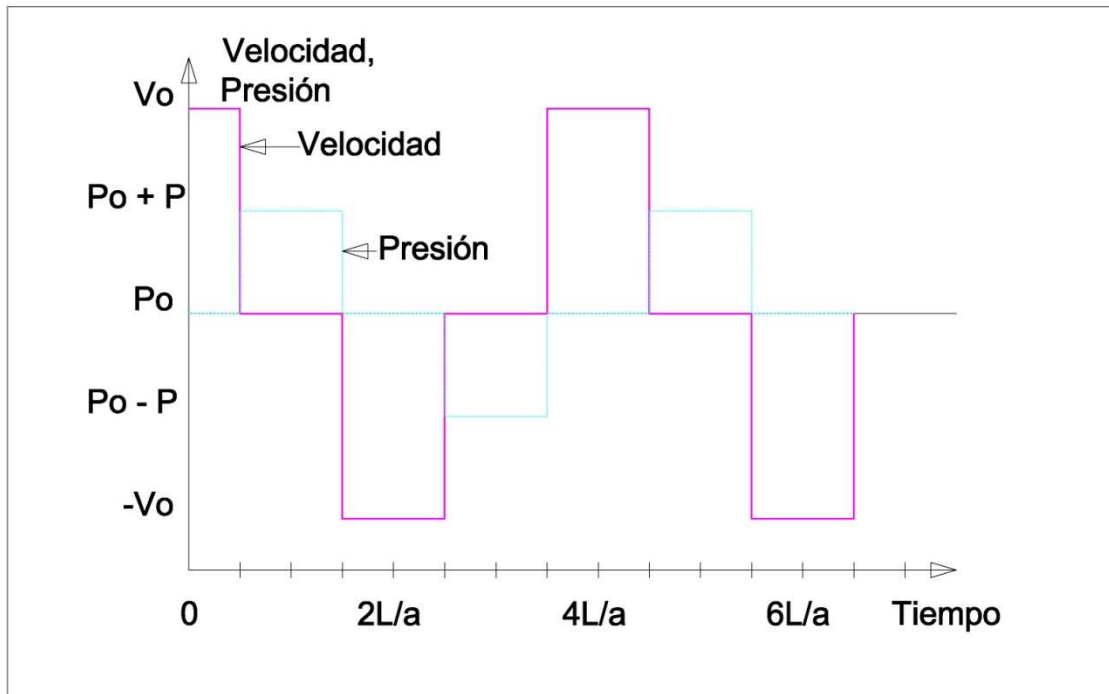
$\Delta p$ : Variación de la presión.

$\rho$ : Densidad.

$a$ : Celeridad de onda.

$\Delta v$ : Variación de la velocidad.

**Figura 2.10.** Variación de la presión y la velocidad en una maniobra de cierre



FUENTE: ABREU José, GUARGA Rafael, IZQUIERDO Joaquín, Transitorios y oscilaciones en sistemas hidráulicos a presión, La Encuadernadora; 1994; Montevideo-Uruguay; Primera edición; Pg. 59.

### 2.3.1.2. Celeridad de Onda

Al producirse las maniobras de apertura ó cierre en una central hidroeléctrica, la sobrepresión que se genera viaja a lo largo de la tubería con una velocidad tal que en poco tiempo llega al extremo opuesto desde donde empezó.

Ésta velocidad que alcanza la onda de presión dentro de la tubería depende de la geometría y del material de la tubería, así como de las propiedades elásticas del fluido es decir su densidad. Es decir los parámetros influyentes serían:

- Geometría: circular, rectangular, etc.

- Condiciones de borde: extremos anclados, enterrados, anclados con juntas de dilatación
- Materiales: PVC, hierro dúctil, hierro fundido, acero, hormigón, roca

A continuación se presentan las diferentes ecuaciones de celeridad de onda para diferentes tipos de conducciones:

**2.3.1.2.1. Celeridad de onda para tuberías de pared de lámina delgada:**

$$a = \sqrt{\frac{\frac{k}{\rho}}{1 + \frac{k \cdot D}{e \cdot E}}} \quad (2.3)$$

Donde:

a: Celeridad de onda

k: Módulo de elasticidad del agua

$\rho$ : Densidad del líquido

D: Diámetro de la tubería

e: Espesor de la tubería

E: Módulo de elasticidad del material de la tubería

**2.3.1.2.2. Celeridad de onda para tubos de pared gruesa:**

$$\frac{1}{a^2} = \rho \left[ \frac{1}{k} + \frac{2}{E} \left( \frac{re^2 + ri^2}{re^2 - ri^2} + u \right) \right] \quad (2.4)$$

Donde:

a: Celeridad de onda

k: Módulo de elasticidad del agua

$\rho$ : Densidad del líquido

E: Módulo de elasticidad del material de la tubería

u: Módulo de Poisson

re: Radio externo de la tubería

ri: Radio interno de la tubería

### 2.3.1.2.3. *Celeridad de onda de tubos de pared infinita:*

$$\frac{1}{a^2} = \rho \left[ \frac{1}{k} + \frac{2}{E} (1 + u) \right] \quad (2.5)$$

Donde:

a: Celeridad de onda

k: Módulo de elasticidad del agua

$\rho$ : Densidad del líquido

E: Módulo de elasticidad del material de la tubería

u: Módulo de Poisson

## 2.3.2. ECUACIONES PARTICULARES

### 2.3.2.1. Ecuación de Continuidad

Ésta ecuación formula que la ecuación de conservación de masa es la que se aplica, es decir que la masa en el sistema no aumenta ni disminuye. Se tiene en cuenta las siguientes consideraciones:

- “El flujo es comprensible y las paredes de la conducción son elásticas
- El flujo es unidimensional
- La presión y velocidad son uniformes en el volumen de control”  
(CHAUDHRY, 1987)

La ecuación de la continuidad es:

$$\frac{g}{a^2} \frac{dH}{dt} + \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{g}{a^2} V \text{sen} \theta = 0 \quad (2.6)$$

Donde:

g: Aceleración de la gravedad

a: Celeridad de onda

$\Theta$ : Ángulo de inclinación de la conducción con referencia a un eje horizontal

V: Velocidad del flujo

### 2.3.2.2. Ecuación del Movimiento

Ésta ecuación también es llamada ecuación dinámica. Aquí se aplica la ecuación de cantidad de movimiento. Se tiene en cuenta las siguientes consideraciones:

- “El flujo es unidimensional
- El rozamiento se calcula como si fuere un flujo permanente
- De las fuerzas exteriores, dos son de carácter superficial, presión y rozamiento. Una tercera fuerza es de carácter volumétrico, la fuerza gravitatoria” (ABREU, 1994)

La ecuación del movimiento es:

$$\frac{dV}{dt} + f \frac{V|V|}{2D} + g \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad (2.7)$$

Para poder resolver estas ecuaciones en diferentes casos de la vida real se hacen simplificaciones que son “equivalentes a no considerarlas variaciones de energía cinética a lo largo del conducto durante los regímenes transitorios.” (ABREU, 1994)

Las ecuaciones simplificadas son:

Ecuación de Continuidad:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2.8)$$

Ecuación del Movimiento:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial x} + f \frac{V|V|}{2D} = 0 \quad (2.9)$$

## 2.4.MODELO RÍGIDO

Este modelo también llamado oscilación en masa. Es usado cuando los cambios que se presentan en las condiciones y características iniciales no son tan bruscos.

En éste modelo se hacen las siguientes consideraciones:

- Las propiedades elásticas del material no son importantes, ya que se considera como si fuera totalmente rígido y no se ensancharía ó encogería
- El fluido es incomprensible
- La celeridad tiende a infinito
- La presión es uniforme en la conducción
- La velocidad es uniforme en la conducción

La ecuación diferencial ordinaria que rige éste modelo es:

$$\frac{dQ}{dt} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + f \frac{Q|Q|}{2DA} = 0 \quad (2.10)$$

Donde:

Q: Caudal

H: Altura piezométrica

g: Aceleración de la gravedad

A: Área de la sección transversal de la conducción

f: Factor de fricción

D: Diámetro de la conducción

Se debe de tener muy en cuenta que los modelos rígidos y elásticos no tienen nada que ver con las operaciones de apertura o cierre, es decir que para los transitorios muy rápidos y donde se usa el modelo elástico, no influye en nada que las maniobras sean lentas ó rápidas para apertura ó cierre.

## 2.5.MODELO ELÁSTICO

Este modelo se usa cuando los cambios que se presentan en las condiciones y características iniciales son muy bruscos.

En éste modelo se hacen las consideraciones realizadas para las ecuaciones de continuidad y de movimiento:

- El flujo es unidimensional
- El flujo es compresible y las paredes de la conducción son elásticas
- La presión y velocidad son uniformes en el volumen de control
- El rozamiento se calcula como si fuere un flujo permanente

Las ecuaciones que caracterizan a este modelo son las de continuidad y de movimiento.

Ecuación de Continuidad:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2.11)$$

Ecuación del Movimiento:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial x} + f \frac{V|V|}{2D} = 0 \quad (2.12)$$

## 2.6.OPERACIONES RÁPIDAS Y LENTAS EN APERTURAS O CIERRES

Se consideran aperturas rápidas o lentas para apertura o cierre, cuando el tiempo que dura la maniobra de operación es menor ó mayor a:

$$T = \frac{2L}{a} \quad (2.13)$$

Donde:

T: Tiempo de apertura ó cierre de las válvulas

L: Longitud de la conducción

a: Celeridad de onda

El tiempo  $T = \frac{2L}{a}$  es aquel que se demora una onda de presión desde que se cierra la válvula, llega al embalse y vuelve de nuevo a la válvula, es decir al completarse el ciclo, proceso que se mostró en las págs. 11 a 13.

Por lo tanto si el tiempo que se demora una válvula en abrirse o cerrarse, es menor a  $\frac{2L}{a}$  entonces quiere decir que la maniobra se realizó antes de que la onda vuelva a la válvula, con lo cual se considera una maniobra rápida.

Si el tiempo que se demora una onda de presión en realizar la respectiva maniobra, es mayor a  $\frac{2L}{a}$ , entonces quiere decir que la onda de presión ha llegado de nuevo a la válvula y sin embargo la maniobra en la válvula aún no ha concluido su operación.

Tiempo de maniobra rápida:

$$T \leq \frac{2L}{a} \quad (2.14)$$

Tiempo de maniobra lenta:

$$T \geq \frac{2L}{a} \quad (2.15)$$

Para el cálculo de la sobrepresión máxima en operaciones de control lentas, se utiliza la ecuación de Michaud, la cual no toma en cuenta:

- Elasticidad del conducto
- Compresibilidad del agua

La fórmula para la sobrepresión de Michaud es:



$$\Delta H = \frac{2 * L * V}{g * T} \quad (2.16)$$

Donde:

$\Delta H$ : Sobrepresión

L: Longitud de la conducción

V: Velocidad del flujo en la conducción

G: Aceleración de la gravedad

T: Tiempo de la maniobra de apertura ó cierre

Para el cálculo de la sobrepresión máxima en operaciones de control rápidas, se utiliza la ecuación de Allievi, la cual no considera la longitud de la tubería, ni el tiempo de duración de la maniobra.

La fórmula para la sobrepresión de Allievi es:

$$\Delta H = \frac{a * V}{g} \quad (2.17)$$

Donde:

$\Delta H$ : Sobrepresión

V: Velocidad del flujo en la conducción

a: Celeridad de onda

Para poder determinar si una maniobra dada es rápida ó lenta se iguala las dos ecuaciones (Michaud y Allievi) con lo cual tenemos obtenemos una longitud crítica, la cual nos permitirá determinar qué clase de maniobra es.

$$L = \frac{a * T}{2} \quad (2.18)$$

Donde:

L: Longitud crítica de maniobra

a: Celeridad de onda

T: Tiempo de la maniobra de apertura ó cierre

De lo cual se puede apreciar que si la longitud de la conducción es menor a la longitud crítica, la maniobra será lenta y por el contrario si la longitud de la conducción es mayor a la longitud crítica, la operación será rápida.

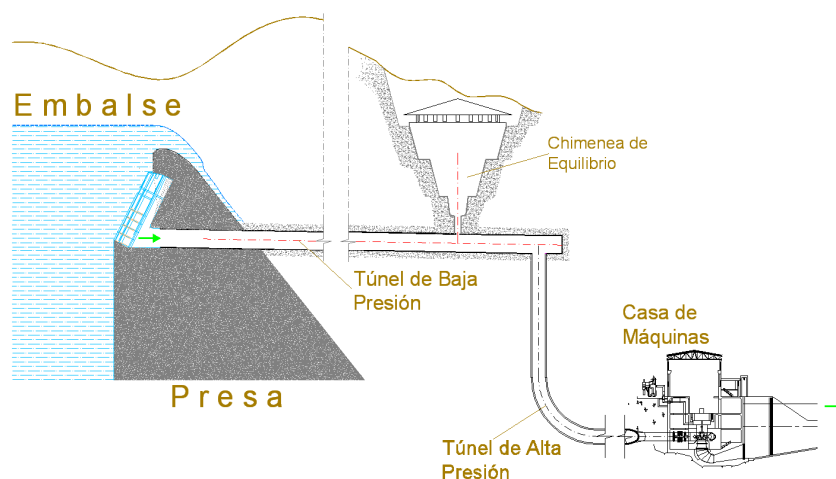
## CAPITULO 3.

### ECUACIONES FUNDAMENTALES PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE CHIMENEAS DE EQUILIBRIO

#### 3.1.DEFINICIÓN DE CHIMENEA DE EQUILIBRIO:

Una chimenea de equilibrio, pozo piezométrico, cámara de oscilaciones o embalse artificial, es una tubería, pozo o torre generalmente de una sencilla sección circular, ubicada en la parte final del túnel de baja presión, y al inicio de la tubería o pozo de alta presión (lo más cercano posible a la casa de máquinas), diseñada para reducir o eliminar los efectos de transitorios indeseables (debido a maniobras de apertura o cierre de las válvulas) en todo el conjunto de estructuras de las centrales hidroeléctricas, como cambios de presión excesivos, separación de la columna de agua, sobrevelocidad en las turbinas (generando fallas de potencia y rechazos de carga)<sup>1</sup>

**Figura 3.1.** Esquema de una chimenea de equilibrio y todos los componentes generales de una central



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

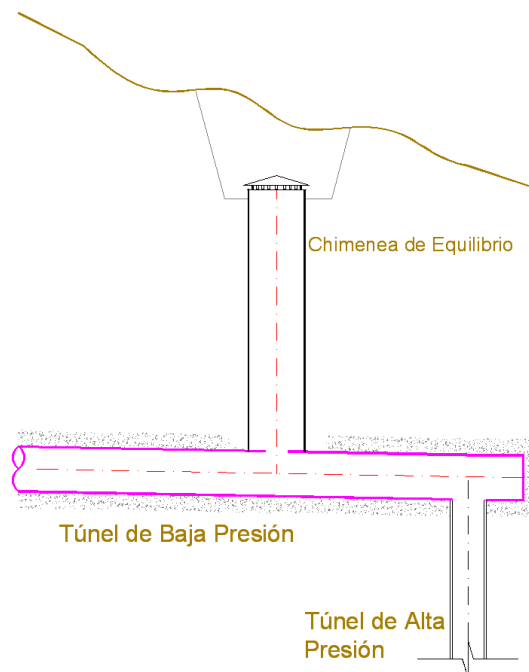
<sup>1</sup>CFE (Comisión Federal de Electricidad), Manual de Diseño de Obras Civiles- Cámaras de Oscilación, Centro Editorial de la CFE; 1981; México D.F., México; Pág. 2.5.1

### 3.2.LOCALIZACIÓN Y CONFIGURACIÓN DE LAS CHIMENEAS DE EQUILIBRIO

Las chimeneas de equilibrio se las construye generalmente tan cerca como sea posible de la casa de máquinas para un funcionamiento altamente efectivo, excavando un pozo en el suelo, o roca, sin embargo algunas pueden sobresalir por la superficie.<sup>2</sup>

Las Chimeneas son usualmente abiertas con una cubierta parcial, logrando que el agua se encuentre a presión atmosférica. En general son tuberías de gran diámetro ubicadas verticalmente, desde la unión del túnel de carga con la tubería de presión, hacia la superficie natural del terreno, sin embargo existen otras configuraciones, como las chimeneas inclinadas, las cuales son construidas cuando la longitud vertical disponible para una tubería no es suficiente para permitir que las oscilaciones del agua puedan fluctuar eficientemente, entre otras configuraciones que se tratarán posteriormente.

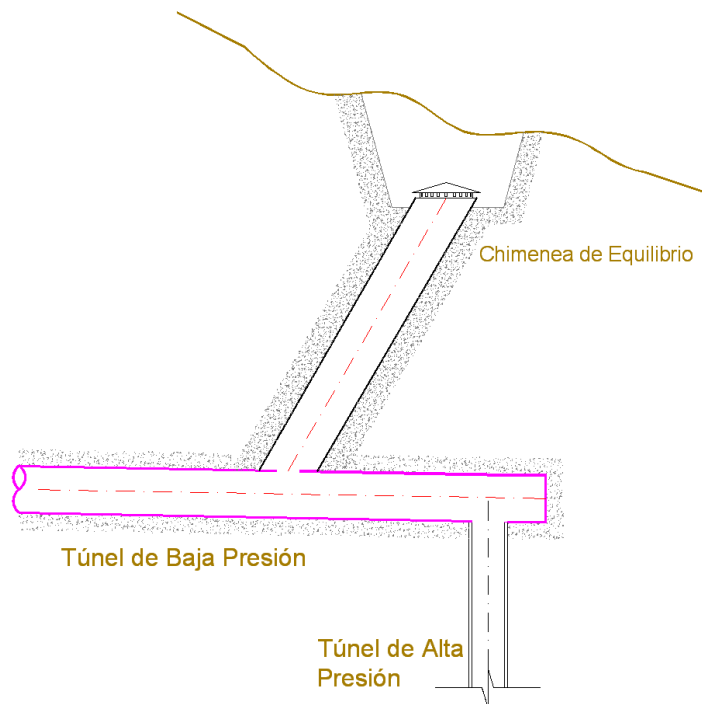
**Figura 3.2.** Esquema de un prototipo de chimenea de Equilibrio vertical



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

<sup>2</sup>MAYS Larry, Hydraulic Design for Energy Generation, Hydraulic Design Handbook, Chapter 8; 2004, Chicago, USA; Pág. 17.

**Figura 3.3.** Esquema de un prototipo de chimenea de Equilibrio Inclínada



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

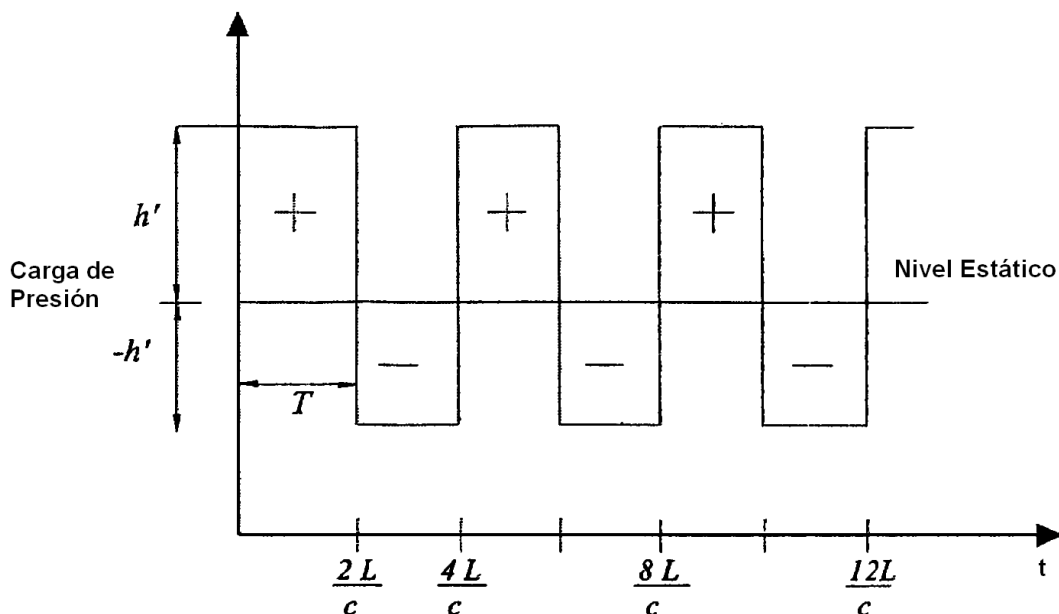
Las chimeneas de equilibrio deben de tener siempre un cierto nivel de agua para así evitar que entre aire hacia la tubería de presión, razón por la cual debe existir una distancia igual al 15% de la disminución de la mínima oscilación desde el nivel normal del embalse. Igualmente en la parte superior se debe de dejar una altura de seguridad la cual será igual al 10% del aumento de la máxima oscilación desde el nivel normal del embalse.

### 3.3.EXPLICACIÓN DEL FENÓMENO OSCILATORIO

En la operación cotidiana de las centrales hidroeléctricas de mediano y gran tamaño, serán necesarias maniobras de apertura y cierre de válvulas de paso del flujo hacia las turbinas en la casa de máquinas. “Estas acciones crean una onda de presión que viaja por el túnel de alta presión y luego por el de baja presión hasta encontrar una superficie libre en donde se refleja la onda de presión hasta regresar a la turbina, punto en la que fue creada. El tiempo requerido por la onda de presión en ir y regresar es evidentemente  $2L/a$  (donde  $L$  es la longitud del túnel de baja presión, y  $a$  es la velocidad de la onda)”(CFE, 1981)

Los transientes hidráulicos provocados involucran efectos de compresibilidad del flujo en el pozo y túnel de alta presión sin una chimenea de equilibrio, pero con su presencia, estos no tienen un efecto que se propague más allá de su eje, pues el gran momento en el flujo de agua dentro del túnel es disipado en el flujo, llegando a oscilar hasta parar y alcanzar un nivel tal que, su presión o carga de agua esté balanceada con la presión creada por el transiente hidráulico a modo de golpe de ariete.<sup>3</sup>A ésta presión se la conoce con el nombre de sobrepresión máxima y que de no ser por la presencia de una chimenea de equilibrio, quien tendría que soportarla sería el túnel de baja presión, implicando así un diseño robusto (de paredes gruesas)<sup>4</sup>de tal manera de evitar un colapso, con un consecuente incremento en el costo de construcción.

**Figura 3.4.** Variación teórica de la presión sobre la válvula sin tomar en cuenta pérdidas de carga

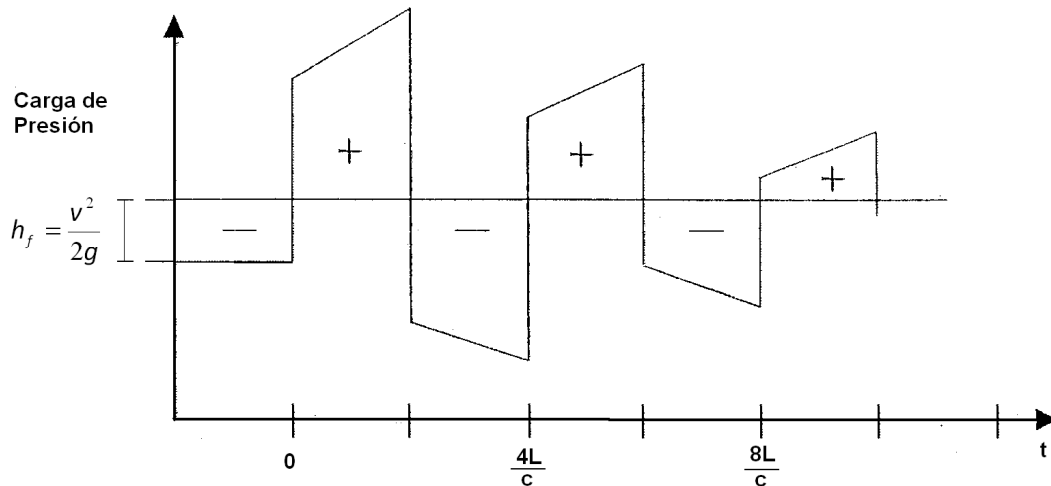


FUENTE: (UNIVERSIDAD DEL CAUCA)

<sup>3</sup>FEATHERSTONE, R., Civil Engineering Hydraulics, Blackwell Science, 3ª Edición; 1995; Oxford, Inglaterra; Pág. 309.

<sup>4</sup> CFE (Comisión Federal de Electricidad), Manual de Diseño de Obras Civiles- Cámaras de Oscilación, Centro Editorial de la CFE; 1981; México D.F., México; Pág. 2.5.3

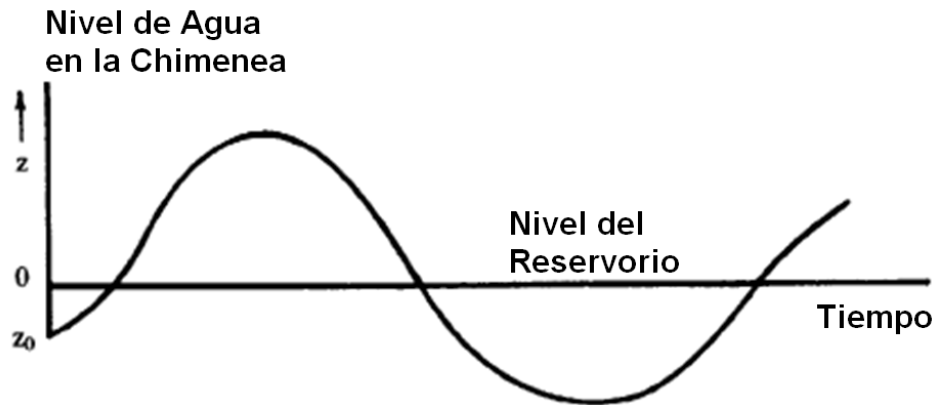
**Figura 3.5.** Variación teórica de la presión sobre la válvula considerando las pérdidas de carga por fricción



FUENTE: (UNIVERSIDAD DEL CAUCA)

En una maniobra de cierre de válvulas se produce un rechazo de carga, razón por la cual el agua ingresa a la chimenea de equilibrio. Cuando el agua ha alcanzado su máximo nivel (llegando a un momentáneo reposo en una cota mayor a la cota del reservorio o embalse), un proceso descendente de flujo inverso comienza, dando inicio así a lo que se define como oscilación: fenómeno que consiste en el cambio de nivel de la masa de agua y está definido por su duración (periodo), que es el tiempo que transcurre desde el inicio del movimiento ascendente del flujo (en caso de cierre de válvulas), posterior descenso y segundo ascenso, hasta el instante en que el agua alcanza el nivel normal de operación, en el cual se encontraba antes de iniciada la maniobra. En la Figura 3.6 se puede observar una gráfica explicativa de la variación del nivel en función del tiempo (oscilaciones). Se observa que el nivel normal de operación o nivel inicial del agua en la chimenea de equilibrio, es inferior al nivel del agua en el reservorio, esto debido a las pérdidas de carga por fricción y localizadas que se producen desde la toma y a lo largo de todo el túnel de baja presión, por lo tanto, el desnivel existente entre estos dos es equivalente a las pérdidas totales de carga.

**Figura 3.6.** Variación del nivel de agua en función del tiempo (oscilaciones) dentro de una chimenea de equilibrio, posterior a una maniobra de cierre de válvulas



FUENTE: (FEATHERSTONE, 1995)

Después de la primera oscilación el agua continúa en su ascenso, pero esta vez el nivel alcanzado será menor, como una consecuencia del amortiguamiento de la energía que está ligada a su movimiento en el túnel de baja presión, y los diferentes tipos de pérdidas de carga. El amortiguamiento de las oscilaciones continuará por algún tiempo hasta que éstas sean ya imperceptibles o sin mayor trascendencia, es decir, se irán disminuyendo las amplitudes de onda de oscilación de la masa de agua.

“Análogamente, cuando existe demanda de carga, la chimenea de equilibrio proporciona el volumen de líquido que las turbinas requieren, con lo que el nivel de su superficie libre desciende. En el túnel, este gradiente acelera gradualmente el líquido en el que excede el valor necesario para el equilibrio y, por tanto, se crea un estado oscilatorio que, si la cámara está bien diseñada, se amortiguará hasta llegar al equilibrio.”(CFE, 1981)

En las operaciones de apertura de válvulas, los cambios de presión son menores a los producidos por cierres bruscos, y también son mucho mejor controlados.

### **3.4.CRITERIOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA CHIMENEA DE EQUILIBRIO EN EL CONJUNTO DE ESTRUCTURAS DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA**



Un criterio breve y efectivo que justifica la implementación en el diseño y construcción de una chimenea de equilibrio en una central hidroeléctrica, es que cuando la velocidad máxima producida por la maniobra más desfavorable no puede ser reducida más del 60 % de la velocidad promedio generada por otros métodos como el incremento del diámetro de la tubería de alta presión, incrementando la inercia (dimensiones) del generador, disminuyendo el tiempo de maniobra de operación de las válvulas, etc.

Otro criterio está dado por una sencilla relación mostrada en la expresión 3.1, de cuyo resultado depende la implementación de una chimenea de equilibrio en el conjunto de estructuras, la cual se describe a continuación:

$$X = \frac{\sum L_i V_i}{H_n} \left( \frac{m}{s} \right) \quad (3.1)$$

- Si  $X > 3 - 5$  m/s      Entonces implementar una Chimenea de Equilibrio
- Si  $X < 3 - 5$  m/s      Entonces no es necesario implementar una Chimenea de Equilibrio

Donde:

X: Valor condicionante para la implementación (m/s)

Li: Longitud de cada segmento de la tubería de alta presión (m)

Vi: Velocidad del flujo en cada segmento de la tubería de alta presión (m/s)

Hn: Carga neta mínima (m)

El término  $L_i \cdot V_i$  debe ser tomado en cuenta desde la toma hasta el inicio de la turbina.<sup>5</sup>

### **3.5.FUNCIONES Y VENTAJAS DE LAS CHIMENEAS DE EQUILIBRIO**

A continuación se mencionarán las más importantes y comunes:

- ✓ Mantienen un balance de la energía en la conducción transformando la energía cinética que tiene la tubería de presión a energía potencial con un

---

<sup>5</sup>MAYS Larry, Hydraulic Design for Energy Generation, Hydraulic Design Handbook, Chapter 8; 2004, Chicago, USA; Pág. 17

aumento de la altura de agua en la chimenea en las maniobras de cierre y transformando la energía potencial en cinética en las maniobras de apertura.

- ✓ Disminuyen la amplitud de las fluctuaciones de presión, disipándolas en forma de carga por altura de agua, tal y como sucede a la llegada del golpe de ariete por maniobras en las válvulas. Así el golpe de ariete solo tiene influencia en la longitud correspondiente a la tubería de alta presión, razón por la cual las variaciones en la presión son menores.<sup>6</sup>
- ✓ De no ser por la chimenea de equilibrio, el efecto de la sobrepresión por golpe de ariete producido en túneles de grandes longitudes, sería tan grande que el espesor de sus paredes debería ser aumentado (por ende el costo de construcción). O en su defecto, para disminuir los efectos de los transientes, sería necesario aumentar el diámetro del túnel de baja presión para reducir la velocidad de circulación reduciendo así la eficacia de la producción de energía de la central y aumentando el costo de excavación.<sup>7</sup>
- ✓ “El tiempo de aceleración hidráulica de un sistema de potencia se reduce, lo cual mejora las características de regulación de la planta”(CFE, 1981).Esto es producto de la reducción de la longitud de túneles considerada para el análisis de la aceleración hidráulica como se explicó en el literal b.
- ✓ Una chimenea de equilibrio tiene la función de tanque de almacenamiento del agua rechazada desde las válvulas en la ejecución de la maniobra de cierre de éstas; mientras que cumple con la función de tanque proveedor de agua en la maniobra de apertura de válvulas.
- ✓ Otra gran función es absorber las ondas de sobrepresión y de presión y acortar la longitud de la tubería de presión que es donde se generan las grandes variaciones de presión.

---

<sup>6</sup> CFE (Comisión Federal de Electricidad), Manual de Diseño de Obras Civiles- Cámaras de Oscilación, Centro Editorial de la CFE; 1981; México D.F., México; Pág. 2.5.2

<sup>7</sup>Ibídem pg. 2.5.2

- ✓ Evita el colapso del túnel de baja presión producto de una inadmisibles cavitación o del ingreso de aire cuando se produzcan las maniobras que generen los niveles mínimos del agua, pues evita una separación de la columna de agua que provocaría disminuciones en las presiones hasta llegar a la presión de vapor.

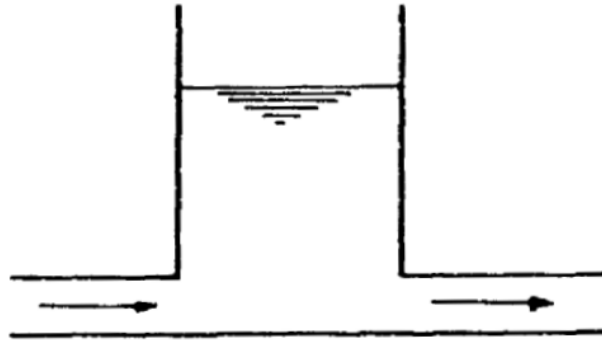
### **3.6.TIPOS DE CHIMENEAS DE EQUILIBRIO**

Varias son las configuraciones que pueden tomar las chimeneas de equilibrio, dependiendo de las características y limitaciones topográficas y de desnivel del lugar donde vayan a ser construidas o excavadas (en el caso de centrales hidroeléctricas cercanas a terrenos montañosos o rocosos), además de las necesidades hidráulicas del proyecto propias de cada diseño en particular. Dichas configuraciones van desde simples formas cilíndricas de diámetro constante, hasta formas específicas de secciones especiales y diámetros variables a lo largo de todo el eje vertical e inclusive chimeneas hidroneumáticas o de cámaras de aire para amortiguar las oscilaciones. “Cuando la geometría de la sección transversal es un simple cilindro, su análisis es relativamente simple y puede ser realizado únicamente con el uso de ábacos, mientras que si la geometría ya no es la de una chimenea simple, el modelo de simulación necesariamente requerirá de cálculos que, para agilizarlos, se deberá contar con la ayuda de un software propio“(MAYS, Cap. 8, 2004)

#### **3.6.1. CHIMENEAS DE EQUILIBRIO SIMPLES**

Las chimeneas de equilibrio simples constan de un solo conducto de diámetro constante como se muestra en la Figura 3.7, el cual se coloca lo más cerca posible a la casa de máquinas con lo cual se tiene una menor longitud de la tubería de presión, además debe de encontrarse en una cota superior a la casa de máquinas, para mejorar su eficiencia, caso contrario se deberá de incrementar la altura de la chimenea. Este tipo de chimeneas tienen dimensiones muy grandes ya que requieren un gran volumen, por lo que se vuelven muy caras y no son muy utilizadas.

**Figura 3.7.** Esquema de una Chimenea de Equilibrio simple



FUENTE: (CFE, 1981)

Este tipo de chimeneas son una práctica y excelente solución para cubrir los niveles máximo y mínimo de oscilación de las masas de agua si se tiene una idónea topografía en el sitio (que el nivel máximo del embalse esté lo suficientemente por debajo del nivel máximo de oscilación en la chimenea que se ubica aguas debajo de éste y al mismo tiempo, el nivel del terreno en la zona de la chimenea esté lo suficientemente alto como para soportar la oscilación máxima). Su practicidad radica en la relativa facilidad de su excavación, una vez construidas su mantenimiento es esporádico y sencillo, su modelación es sencilla y de mayor precisión; sin embargo, debido a la marcada ausencia de puntos altos aguas abajo de la zona del embalse, las chimeneas de equilibrio simples resultan ilógicas para ser tomadas en cuenta en un posible diseño. A pesar de ello, Parmakian en 1968 afirmó que este tipo de chimeneas es el diseño más fiable dentro de los posibles diseños de protecciones contra los transientes hidráulicos y sus efectos posteriores.<sup>8</sup>

Una desventaja evidente de este tipo de chimeneas es su alto costo inicial de excavación y recubrimiento de las paredes internas que toman contacto con el agua oscilante, debido al gran área de la sección transversal que deberá tener en comparación con otros tipos de chimeneas, puesto que la única manera como equilibra las sobrepresiones generadas por el golpe de ariete es con la carga de agua que se tenga en ella (al carecer de una pérdida de carga o resistencia al

<sup>8</sup>MAYS Larry, Hydraulic Design for Energy Generation, Hydraulic Design Handbook, Chapter 12; 2004, Chicago, USA; Pág. 22.

flujo en su base) y por ende su estabilidad está en función de la inercia que pueda proporcionar una gran masa de agua.

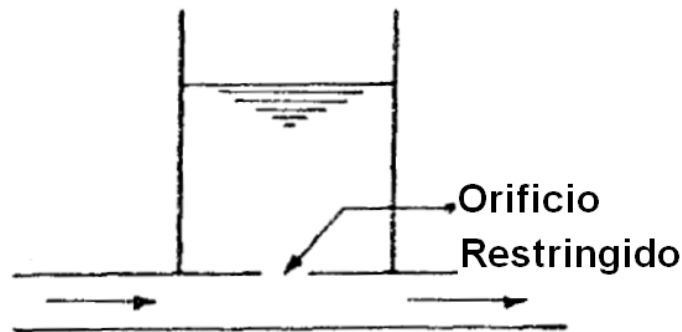
Si los estudios arrojan un resultado de un posible desbordamiento del agua con la utilización de una chimenea simple, será necesaria la inclusión de ciertos cambios en la geometría de la chimenea tales como un estrangulamiento en su parte inicial en la conexión con el túnel de baja presión o en su defecto, una ampliación del diámetro en la zona superior cercana al nivel del terreno donde la chimenea toma contacto con la atmósfera. Si estos cambios son realizados, dejará de ser una chimenea simple y pasa a tomar la denominación dada para los otros tipos de chimenea que se explican en los próximos incisos.

### **3.6.2. CHIMENEAS DE EQUILIBRIO CON ORIFICIO RESTRINGIDO**

Se trata de chimeneas de equilibrio simples, a las cuales se les añade un orificio restringido o estrangulamiento como se muestra en la Figura 3.8, es decir, en la intersección entre la tubería y la chimenea la abertura es menor con lo cual se consigue una mayor pérdida de carga localizada, ayudando así a compensar la sobrepresión generada posterior al golpe de ariete y reduciendo la inercia restante necesaria que deberá ser generada por una carga de agua en la chimenea, lo cual equivale a no tener que aumentar el área de la sección transversal en un valor tan grande como en una chimenea simple. Otra gran ventaja es la reducción del tiempo de respuesta ante la variación de producción (carga o descarga de agua) de este dispositivo frente a cómo respondería una chimenea simple. La influencia del orificio en la reducción del tiempo de reacción es evidente en grandes variaciones de carga, pero con pequeñas, es imperceptible. En este tipo de chimeneas y con grandes variaciones de carga (cierres bruscos), el control de la velocidad y caudal de agua sobre las turbinas puede convertirse en un serio inconveniente, aún con los gobernadores (reguladores automáticos de velocidad) de respuesta rápida. Se podría contrarrestar este fenómeno con la máxima reducción posible del diámetro del orificio restringido, sin embargo esto está limitado por un diámetro mínimo que permita la entrada del flujo suficiente a la

chimenea, pues un orificio demasiado pequeño no tendría efecto sobre el golpe de ariete y su onda de celeridad directa.

**Figura 3.8.** Esquema de una Chimenea de Equilibrio con Orificio Restringido



FUENTE: (CFE, 1981)

En las operaciones de cierre de válvulas, el agua es rechazada y la altura de agua que ingresa en la chimenea de equilibrio será igual a la pérdida en el orificio restringido. Si en el diseño del orificio restringido se adopta un diámetro muy grande, la chimenea de equilibrio dejará de funcionar como chimenea con orificio restringido y pasará a funcionar como una chimenea simple, ya que se dejará de dar la función para la que estaba diseñado, caso contrario, si el diámetro del orificio restringido es muy pequeño, la carga de agua rechazada será igual al golpe de ariete producido sin la presencia de chimenea de equilibrio.

Las chimeneas de equilibrio con orificio restringido son mucho más eficientes y económicas que las simples, sin embargo debido a los cambios repentinos de presión en el orificio restringido las chimeneas de equilibrio con orificio restringido no son aconsejables en instalaciones donde se tiene un costo adicional de las unidades generadoras de energía debido al incremento de inercia requerido.

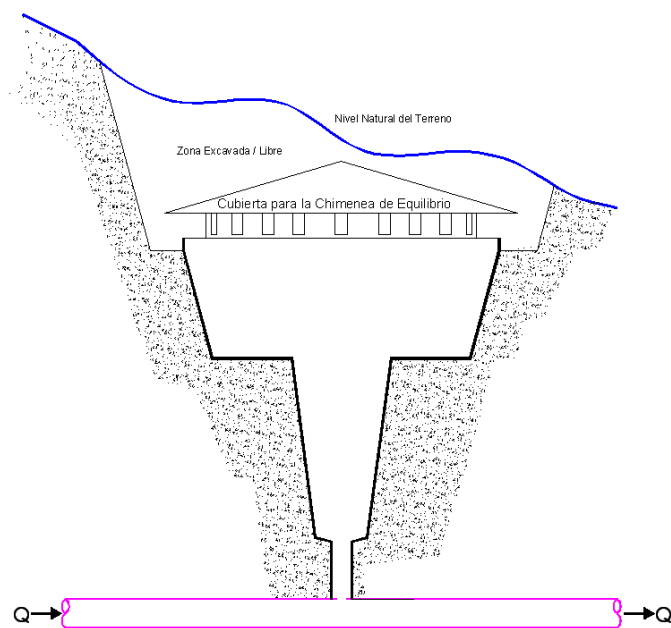
### **3.6.3. CHIMENEAS COMPUESTAS O DE SECCIÓN TRANSVERSAL VARIABLE**

Se opta por éstas cuando chimeneas de equilibrio simples o con orificio restringido, debido a las características topográficas y geológicas propias del terreno, no logran evitar un posible desbordamiento del agua el momento de

producirse la máxima oscilación superior, o una succión al producirse la mínima oscilación. Algunas de las formas de chimeneas compuestas son:

- ✓ Chimenea de equilibrio compuesta con un aumento de la sección transversal en la zona superior próxima al contacto con la atmósfera en el nivel del terreno cuando la máxima oscilación hace que sobrepase el nivel superior de la tubería. Su esquema se puede observar en la Figura 3.9

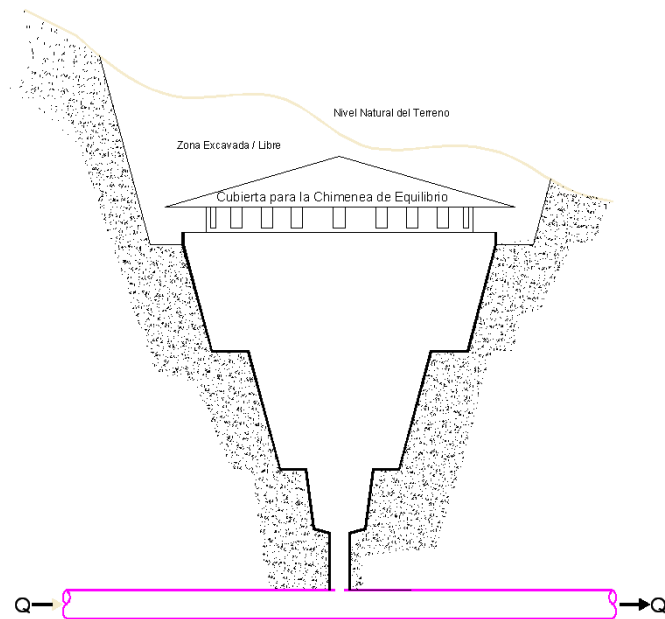
**Figura 3.9.** Esquema de una Chimenea de Equilibrio Compuesta con aumento de la sección transversal superior



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

- ✓ Chimenea de equilibrio compuesta de una tubería vertical con divisiones verticales.
- ✓ Chimenea de equilibrio compuesta de diferentes diámetros incrementándose a medida que sube a la superficie. Su esquema se puede observar en la Figura 3.10.

**Figura 3.10.** Esquema de una Chimenea de Equilibrio Compuesta con aumento de la sección en diferentes zonas

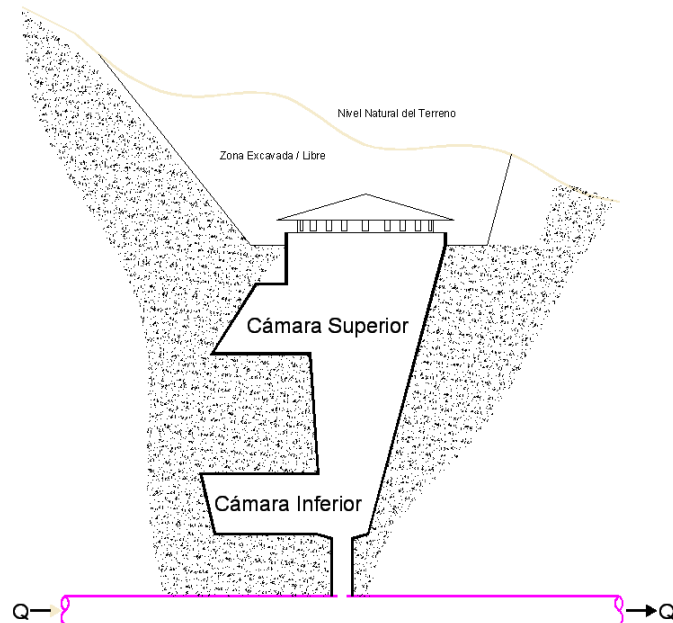


FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

- ✓ Chimenea de equilibrio compuesta de una tubería vertical con cámaras laterales ubicadas en la parte inferior e intermedia de la tubería: Las cámaras laterales inferiores cumplen la función de ser grandes reservorios de agua para evitar que se produzca una succión de la chimenea ante la oscilación mínima. “Cuando se toma carga, el nivel cae velozmente hasta la cámara inferior favoreciendo la aceleración del líquido en el conducto. La cámara inferior es entonces vaciada lentamente” (CFE, 1981) Su esquema se puede observar en la Figura 3.11



**Figura 3.11.** Esquema de una Chimenea de Equilibrio Compuesta con cámaras laterales



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

O en su defecto, estas cámaras laterales sirven igualmente de grandes reservorios para evitar que el nivel del agua suba más allá del límite superior, pues tienen el efecto de una desaceleración inmediata por su brusco cambio de sección.

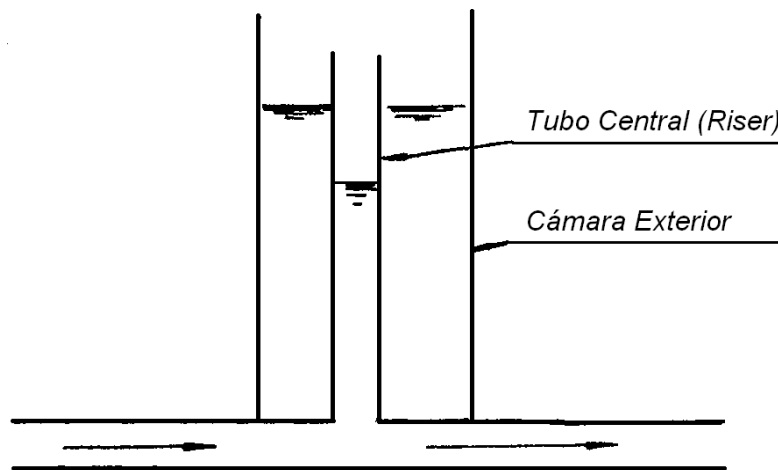
Es conveniente ubicar la cámara intermedia en una posición tal que coincida con el nivel de operación normal del agua dentro de la chimenea de equilibrio (cuando no se han ejecutado maniobras bruscas y las turbinas están siendo abastecidas con el caudal de diseño). “Debido a la alta carga estática de la instalación, el área requerida para la estabilidad en la cámara intermedia es pequeña” (CFE, 1981). El diseño de chimeneas compuestas, en sus diferentes formas, es viable y económico si se tienen las características geológicas adecuadas, tales que permitan una excavación en el terreno de forma relativamente sencilla y cuyo valor final no sea mayor al que se realizaría con la construcción de otro tipo de chimeneas más complejas.<sup>9</sup>

<sup>9</sup> CFE (Comisión Federal de Electricidad), Manual de Diseño de Obras Civiles- Cámaras de Oscilación, Centro Editorial de la CFE; 1981; México D.F., México; Pág. 2.5.7

### 3.6.4. CHIMENEAS DE OSCILACIÓN DIFERENCIAL

Son chimeneas de equilibrio conformadas por un pozo o chimenea principal en cuyo interior existe una “tubería central o “riser”, con orificios en su parte inferior, y un diámetro aproximado al del conducto (80% como mínimo)”(CFE). La función de esta tubería central es desacelerar al líquido que entra en su interior rápidamente, al mismo tiempo que éste circula lentamente en la chimenea principal. El orificio superior del riser tiene la función de, una vez que el agua alcance su nivel, verter el líquido hacia la chimenea principal y de ésta manera mantener constante la carga en el túnel de baja presión. Su esquema se observa en la Figura 3.12.

**Figura 3.12.** Esquema de una Chimenea de Equilibrio Diferencial



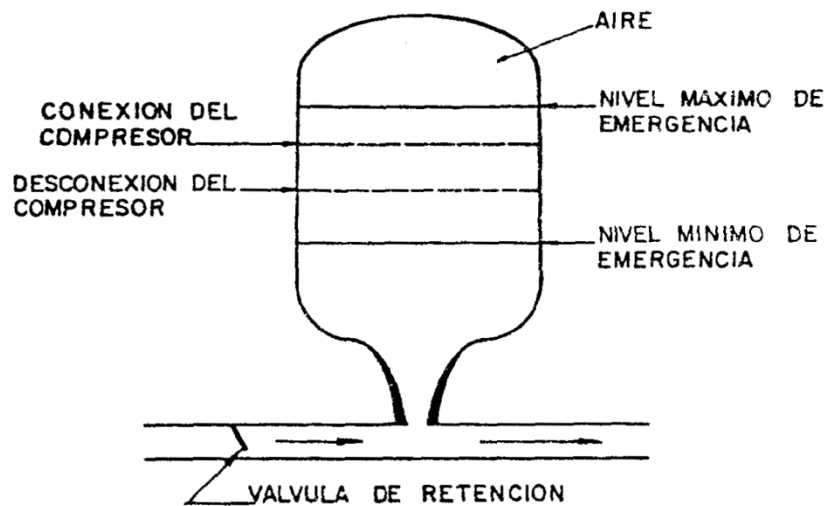
FUENTE: (CFE, 1981)

En maniobras bruscas de apertura de válvulas, donde el túnel de baja presión tiene una alta demanda de agua, y con chimeneas de oscilación diferencial, su riser proporciona aceleradamente el líquido necesario hacia la tubería de presión; paralelamente en maniobras de apertura leves, la chimenea principal proporciona el agua necesaria a suministrarse para la tubería de presión. En fin, este tipo de chimeneas reducen las oscilaciones producidas por maniobras bruscas o leves de forma efectiva, disminuyendo los efectos del golpe de ariete de cualquier forma. Su principal ventaja y la razón para su nombre, es que “las funciones de suministro y almacenamiento se separan en forma más efectiva de las funciones de aceleración del líquido en el conducto” (CFE, 1981) comparando con las chimeneas simples o las de orificio restringido.

### 3.6.5. CHIMENEA DE EQUILIBRIO DE AIRE O NEUMÁTICA

A diferencia de los otros tipos de chimeneas que tienen en su parte superior un contacto libre con la atmósfera, éste tipo de chimeneas se encuentran cerradas y únicamente llenas con un volumen de aire que se comprime en casos en que el nivel de agua aumente en la chimenea y se lo descomprime en casos que éste disminuya. Su esquema se puede observar en la Figura 3.13.

**Figura 3.13.** Esquema de una Chimenea de Equilibrio Neumática



FUENTE: (CFE, 1981)

Este tipo de chimeneas tiene un costo adicional correspondiente a la zona neumática (con requerimientos adicionales de tamaño, compresores de aire y tirantes de aire) y por ende solamente se las debe poner a consideración si los otros tipos de chimeneas resultan de una instalación difícil o poco económica.

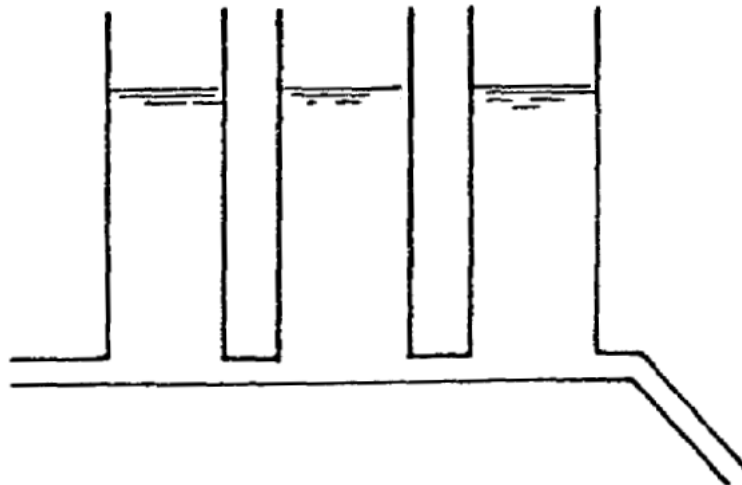
### 3.7. DIFERENTES TIPOS DE INSTALACIONES DE LAS CHIMENEAS DE EQUILIBRIO

El caso más común para la instalación de chimeneas de equilibrio es que ésta sea única y esté al extremo del túnel de baja presión, sea cual sea su tipo. Sin embargo, existen otras formas de localización menos comunes, pero que pueden

resultar útiles en ciertos casos. Se mencionan a continuación algunos diseños utilizados:

- a) Varias chimeneas de equilibrio en el túnel de baja presión. Su esquema se puede observar en la Figura 3.14. Ésta posibilidad es factible en los siguientes casos:
- ✓ Si en el diseño se determina un diámetro de una cámara única y éste es muy grande
  - ✓ Si se aumenta la capacidad de la central hidroeléctrica posterior a su construcción original
  - ✓ Si la zona de construcción es complicado la excavación de una sola chimenea de gran diámetro.

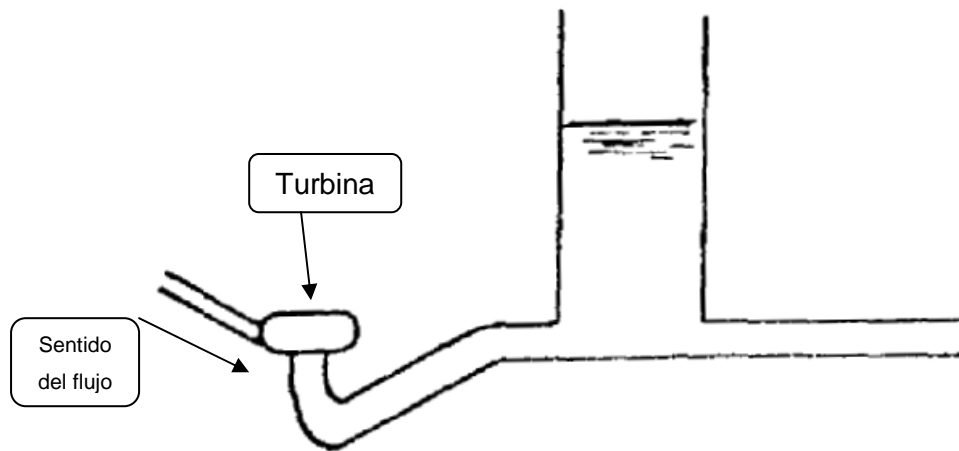
**Figura 3.14.** Esquema de una disposición de Varias Chimeneas de Equilibrio en un solo túnel de Baja presión



FUENTE: (CFE, 1981)

- b) Una Chimenea de Equilibrio aguas abajo de las turbinas: se lo utiliza en caso que la longitud del túnel de desfogue sea muy grande y así evitar una separación de columna líquida como consecuencia del golpe de ariete. Su esquema se puede observar en la 0.

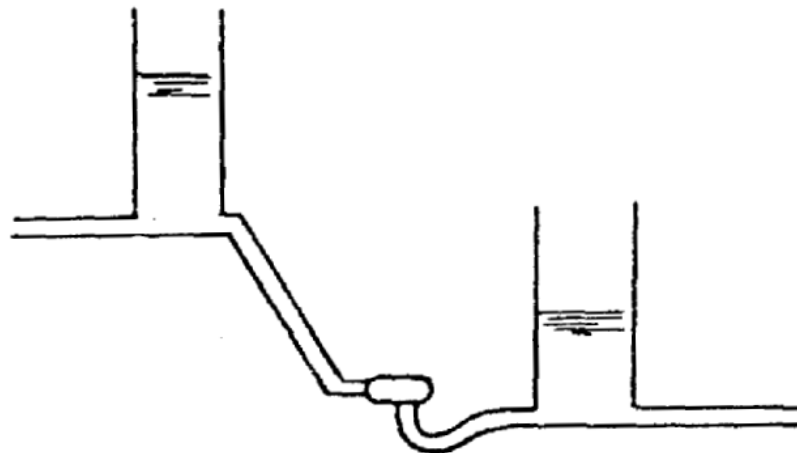
**Figura 3.15.** Esquema de una disposición de una Chimenea de Equilibrio Aguas debajo de las Turbinas



FUENTE: (CFE, 1981)

- c) Una chimenea de Equilibrio antes y otra después de las turbinas: se utilizan dos chimeneas dispuestas en esta forma en el caso de tener un túnel de presión y uno de desfogue de gran longitud. Su esquema se puede observar en la Figura 3.16.

**Figura 3.16.** Esquema de una disposición Una chimenea de Equilibrio antes y otra después de las turbinas

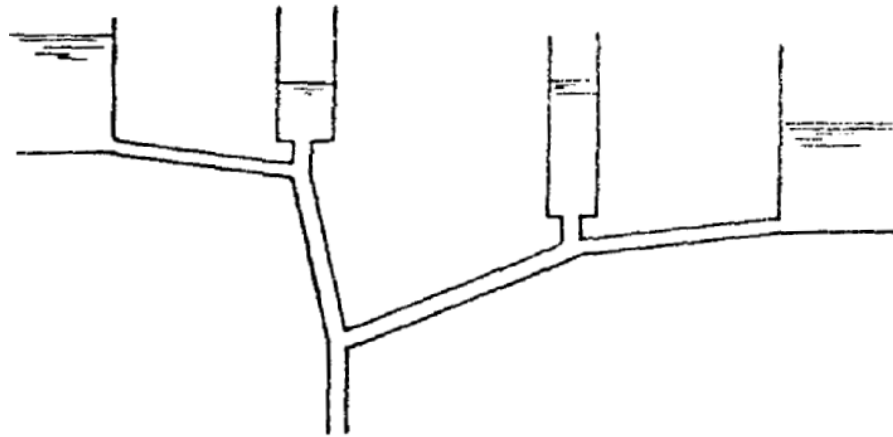


FUENTE: (CFE, 1981)

- d) Una sola chimenea para dos embalses diferentes de una misma central: si se tienen dos embalses por separado entonces cada uno de ellos tiene su propio túnel de baja carga y ambos túneles pueden unirse aguas arriba de una sola chimenea de equilibrio que sirve para ambos o en su defecto la central puede ser diseñada con varias chimeneas en paralelo dependiendo

de la capacidad y número de embalses.<sup>10</sup> Su esquema se puede observar en la Figura 3.17.

**Figura 3.17.** Esquema de una disposición de chimeneas de Equilibrio en paralelo para varios embalses



FUENTE: (CFE, 1981)

### **3.8.SUPOSICIONES E HIPÓTESIS PARA EL PLANTEAMIENTO Y SIMPLIFICACIÓN DE LAS ECUACIONES BÁSICAS PARA EL ANÁLISIS DE CHIMENEAS DE EQUILIBRIO**

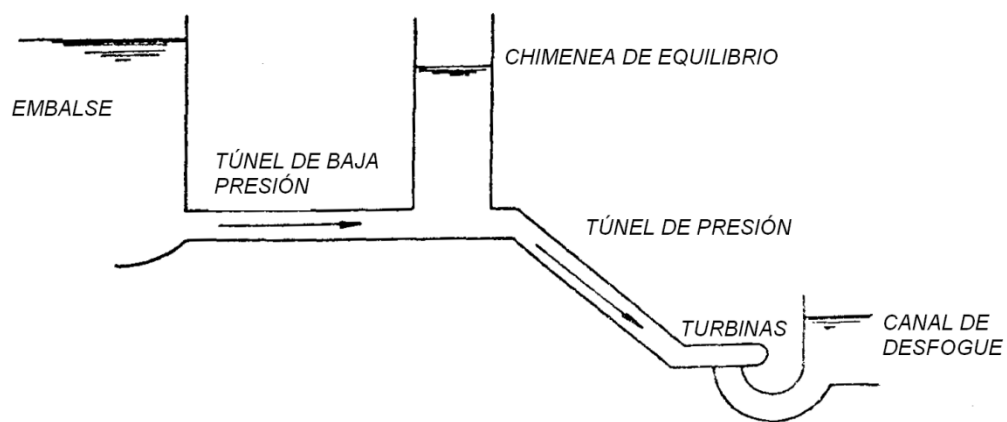
Un modelo matemático para simular adecuadamente a un flujo inestacionario a lo que se define como oscilación propiamente dicha, considera las siguientes condiciones:

- a) La velocidad del cambio del movimiento del fluido es moderada
- b) Este cambio ocurre típicamente en un período de tiempo de minutos
- c) El flujo es incomprensible (por lo tanto su densidad es constante)
- d) Las paredes que rodean al flujo son rígidas e indeformables
- e) “Las dos anteriores suposiciones implican que las velocidades de flujo no son una función de la posición a lo largo de una tubería o túnel de sección transversal constante y que el flujo es uniforme. En otras palabras, no

<sup>10</sup> CFE (Comisión Federal de Electricidad), Manual de Diseño de Obras Civiles- Cámaras de Oscilación, Centro Editorial de la CFE; 1981; México D.F., México; Pág.2.5.8

existe una cantidad de fluido adicional almacenado en una longitud de tubo como una consecuencia de la variación de presiones; ya que las velocidades son uniformes, la velocidad con la que el fluido entra a la tubería es igual a velocidad de descarga. Sin embargo, la aceleración del fluido y su acumulación y reducción desde el reservorio están explicados en un modelo de oscilación”(MAYS, Cap. 2, 2004)

**Figura 3.18.** Esquema de la disposición clásica de los elementos principales de una central hidroeléctrica



FUENTE: (CFE, 1981)

Con la finalidad de que las ecuaciones fundamentales para describir el funcionamiento de las Chimeneas de Equilibrio sean reducidas a lo más simples posible y al mismo tiempo determinen los parámetros a incluirse en su análisis con una adecuada precisión, se han hecho simplificaciones basadas en hipótesis que, de ser tomadas en cuenta, no alteran de forma significativa los resultados de los análisis comparados con aquellos valores determinados sin hacer las simplificaciones. Las suposiciones que simplifican el análisis son las siguientes:

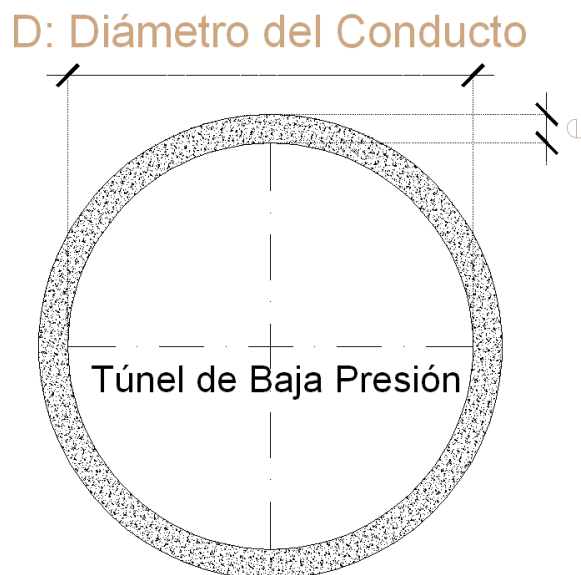
- a) El material de las paredes internas del Túnel de Baja Presión y de la Chimenea de Equilibrio con quienes toma contacto el líquido son rígidas, mientras que el agua circulante es incompresible en su circulación. Estas suposiciones son permisibles teniendo en cuenta que la elevación oscilante

del líquido en la chimenea de equilibrio es gradual además de considerar que el túnel está conectado en ambos extremos a embalses abiertos.

- b) El valor de la inercia del agua en la Chimenea de Equilibrio es despreciable en comparación con el valor de la inercia del agua en el Túnel de Baja Presión, razón por la cual será tomada como nula.
- c) Las pérdidas de carga que se calculan para el sistema en su funcionamiento (en el Régimen de Flujo No Permanente) pueden ser calculadas con los valores obtenidos de las fórmulas de pérdidas de carga utilizadas para Flujo Permanente con el valor de la velocidad obtenida para este régimen de flujo.<sup>11</sup>

### 3.9.ECUACIONES BÁSICAS PARA EL ANÁLISIS DE CHIMENEAS DE EQUILIBRIO

**Figura 3.19.** Esquema de un corte transversal del túnel de baja presión mostrando ciertos parámetros para las ecuaciones básicas.



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

<sup>11</sup> CFE (Comisión Federal de Electricidad), Manual de Diseño de Obras Civiles- Cámaras de Oscilación, Centro Editorial de la CFE; 1981; México D.F., México; Pág. 2.5.11



### 3.9.1. ECUACIÓN DE LA CELERIDAD DE LA ONDA DE PRESIÓN EN EL TÚNEL DE BAJA CARGA:

$$C = \sqrt{\frac{E_v / \rho}{1 + \left(\frac{E_v}{E}\right) \left(\frac{D}{e}\right) a_1}} \quad (3.2)$$

Donde:

C: Celeridad o velocidad de propagación de la onda de sobrepresión.

$E_v$ : Módulo de elasticidad volumétrico del agua ( $\text{Kg}/\text{m}^2$ )

$\rho$ : Densidad del Agua Circulante ( $\text{Kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$ )

E: Módulo de Elasticidad de Young del material interno del Túnel de Baja Presión ( $\text{Kg}/\text{m}^2$ )

D: Diámetro interno del Túnel de Baja Presión (m)

e: Espesor de la pared del Túnel de Baja Presión

$a_1$ : Parámetro adimensional que describe el efecto de la velocidad de onda sobre el Túnel. Sus valores son los siguientes según el caso:

$a_1 = 1 - \zeta$  Para Túneles asegurados a todo lo largo para prevenir un movimiento axial y sin juntas de expansión

$a_1 = 1$  Para Túneles asegurados a todo lo largo y con juntas de expansión para permitir un movimiento longitudinal.

Donde  $\zeta$  es la relación de Poisson (En función del material interno del túnel)

Dentro de la Ecuación, en el numerador de la fracción interna dentro de la raíz, se

puede distinguir la expresión  $E_v / \rho$ , conocida como la Velocidad de Onda Elástica

para el Agua Circulante, al cual se le puede asignar el valor  $E_v / \rho = 1480(\text{m} / \text{s})$  para

agua a 20°C. Si además se cumple la condición que el túnel sea asegurado a todo lo largo y con juntas de expansión, entonces se obtiene una ecuación más simplificada conocida como la Ecuación de Allievi.<sup>12</sup>

### 3.9.2. ECUACIÓN DE ALLIEVI:

$$C = \sqrt{\frac{1480}{1 + \left(\frac{E_v}{E}\right)\left(\frac{D}{e}\right)}} [\text{Sistema MKS}] \quad (3.3)$$

Donde:

C: Celeridad o velocidad de propagación de la onda de sobrepresión (Con valores cercanos a los 1000 m/s)

$E_v$ : Módulo de elasticidad volumétrico del agua ( $\text{Kg/m}^2$ )

E: Módulo de Elasticidad de Young del material interno del Túnel de Baja Presión ( $\text{Kg/m}^2$ )

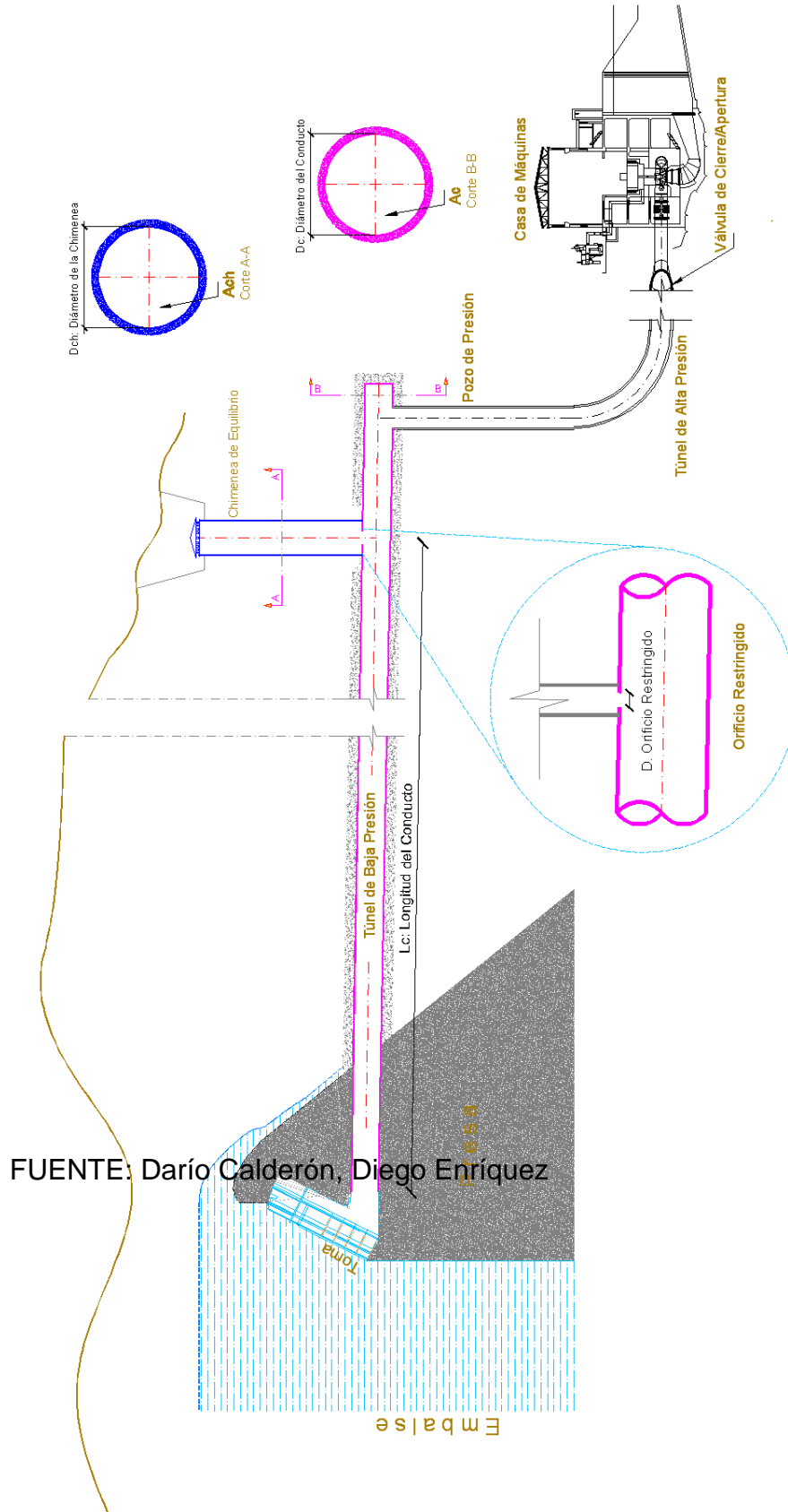
D: Diámetro interno del Túnel de Baja Presión (m)

e: Espesor de la pared del Túnel de Baja Presión

---

<sup>12</sup> UNIVERSIDAD DEL CAUCA, Golpe de Ariete y Chimenea de Equilibrio, Práctica N° 15, Cauca, Editorial del Departamento de Hidráulica.

**Figura 3.20.** Esquema de las estructuras relacionadas con la chimenea de equilibrio en una central hidroeléctrica mostrando ciertos parámetros para las ecuaciones básicas.



### 3.9.3. ECUACIÓN PARA EL PERIODO DE LA ONDA EN EL TÚNEL DE BAJA PRESIÓN:

Se denomina período o fase para el túnel de baja carga, al tiempo que transcurre desde el momento de inicio de la onda de sobrepresión en el extremo de éste (Válvula de Cierre maniobrada), su ida hacia el otro extremo (Embalse) y regreso al mismo punto de partida.<sup>13</sup>

$$T = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{A_{CH} * L}{g * A_C}} \quad (3.4)$$

Donde:

T: Período de la Onda en el Túnel de Baja presión (s)

$A_{CH}$ : Área de la sección transversal de la Chimenea de Equilibrio(m<sup>2</sup>)

L: Longitud del Túnel de Baja Presión (m)

g: Aceleración de la Gravedad en el Sitio (m/s<sup>2</sup>)

$A_C$ : Área del Túnel de Baja Presión (Túnel) (m<sup>2</sup>)

### 3.9.4. DETERMINACIÓN DEL TIPO DE MANIOBRAS

Se tienen básicamente dos tipos de tipos de maniobras: Cierre y apertura de válvulas para el paso del agua hacia la casa de máquinas; éstas maniobras se ejecutan en un tiempo determinado y éste tiempo comparado con el tiempo del periodo de la onda de sobre presión en el túnel de baja presión, determinan si la maniobra es lenta o rápida.

Si  $t_m < T$  entonces se tiene una Maniobra Lenta

Si  $t_m > T$  entonces se tiene una Maniobra Rápida

Donde:

$t_m$ : tiempo que se demora la maniobra de Cierre o apertura de válvulas

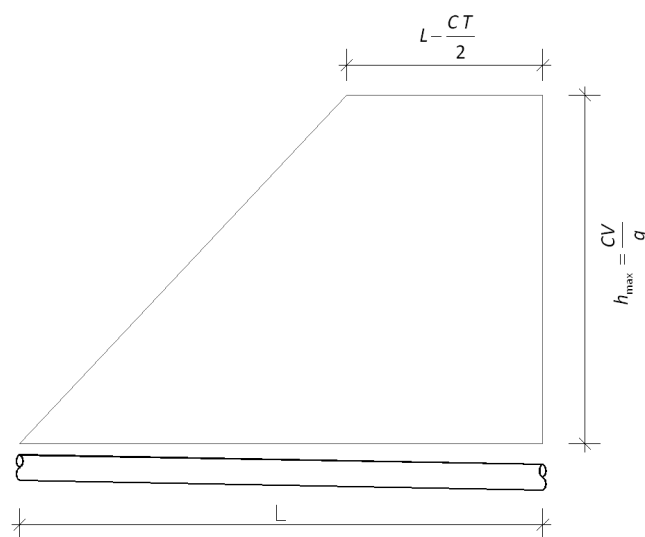
<sup>13</sup> UNIVERSIDAD DEL CAUCA, Golpe de Ariete y Chimenea de Equilibrio, Práctica N° 15, Cauca, Editorial del Departamento de Hidráulica.

T: Período de la Onda en el Túnel de Baja presión (s)

### 3.9.5. ECUACIÓN PARA LA SOBREPRESIÓN MÁXIMA EN EL TÚNEL DE BAJA CARGA PARA MANIOBRAS RÁPIDAS

Ocurre únicamente una sobrepresión máxima distribuida a lo largo del túnel de baja presión en el caso que se realice una maniobra rápida, debido a que el tiempo utilizado para la maniobra es menor al período, es decir es un tiempo escaso para que la onda vaya hasta el embalse y regrese hasta la válvula. En la Figura 3.21 se tiene un esquema explicativo de la distribución de sobrepresiones para cierre de válvulas.

**Figura 3.21.** Esquema de la distribución de la sobrepresión en el cierre rápido de válvulas



FUENTE: (UNIVERSIDAD DEL CAUCA)

$$h_{\max} = V_{Ch} \sqrt{\frac{\nabla_{Ch}}{A_c * g}} \quad (3.5)$$

Donde:

$h_{\max}$ : Sobrepresión máxima en el túnel de baja carga para maniobras rápidas (m)

$V_{Ch}$ : Velocidad de circulación del agua dentro de la Chimenea de Equilibrio (m/s)

$\nabla_{Ch}$ : Volumen de Agua dentro de la chimenea de equilibrio (m<sup>3</sup>)

$A_c$ : Área del Túnel de Baja Presión (Túnel) ( $m^2$ )

$g$ : Aceleración de la Gravedad en el Sitio ( $m/s^2$ )

### **3.9.6. ECUACIÓN DE MICHAUD PARA LA SOBREPRESIÓN MÁXIMA EN EL TÚNEL DE BAJA CARGA PARA MANIOBRAS LENTAS:**

En este caso, debido a que la maniobra es lenta, no sería necesaria la presencia de una chimenea de equilibrio, razón por la cual en la ecuación (denominada de Michaud) no se toma en cuenta ningún parámetro referente a la chimenea. El valor de sobrepresión máximo ocurrirá precisamente en el extremo más cercano a la válvula de maniobra en el túnel de baja carga. En la Figura 3.22 se tiene un esquema explicativo de la distribución de sobrepresiones para cierre de válvulas.

$$h_{\max} = \frac{2LV_c}{g * t_m} \quad (3.6)$$

Donde:

$h_{\max}$ : Sobrepresión máxima en el túnel de baja carga para maniobras rápidas (m)

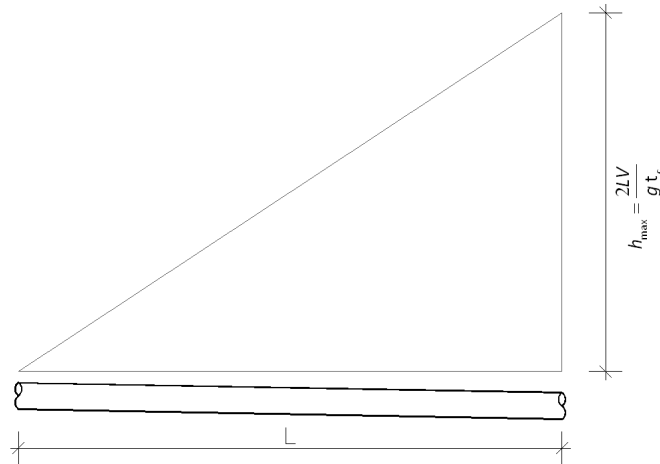
$L$ : Longitud del Túnel de Baja Presión (m)

$V_c$ : Velocidad del Agua en el Túnel de Baja Presión (Túnel) (m/s)

$g$ : Aceleración de la Gravedad en el Sitio ( $m/s^2$ )

$t_m$ : tiempo que se demora la maniobra de Cierre o apertura de válvulas

**Figura 3.22.** Esquema de la distribución de la sobrepresión en el cierre lento de válvulas



FUENTE: (UNIVERSIDAD DEL CAUCA)

### 3.9.7. ECUACIÓN PARA EL TIEMPO DE MANIOBRAS A SER ADOPTADO

Si se desea obtener el tiempo adecuado de ejecución de maniobras en función de una sobrepresión máxima admisible por parte del túnel de baja presión, se puede despejar de la ecuación de Michaud y así dar una recomendación por parte del diseñador hacia los operadores y evitar tiempos demasiado rápidos de ejecución de maniobras que generen sobrepresiones inadmisibles en el túnel.

$$t_m = \frac{2LV_c}{g * h_{\max}} \quad (3.7)$$

Donde:

$t_m$ : tiempo recomendado a ser adoptado para la maniobra de Cierre o apertura de válvulas

$h_{\max}$ : Sobrepresión máxima en el túnel de baja carga para maniobras rápidas (m)

$L$ : Longitud del Túnel de Baja Presión (m)

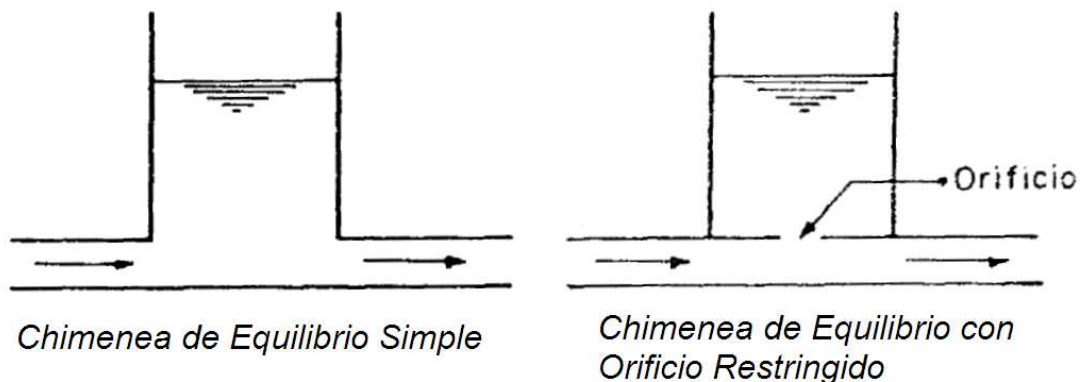
$V_c$ : Velocidad del Agua en el Túnel de Baja Presión (Túnel) (m/s)

$g$ : Aceleración de la Gravedad en el Sitio ( $m/s^2$ )

### 3.10. COMPARACIÓN Y DIFERENCIACIÓN ENTRE CHIMENEAS DE EQUILIBRIO SIMPLES Y CHIMENEAS DE EQUILIBRIO CON ORIFICIO RESTRINGIDO (CHIMENEAS ESTRANGULADAS) PREVIAS A LA PRESENTACIÓN DE LAS ECUACIONES.

Las Chimeneas de Equilibrio con Orificio Restringido poseen en su parte inferior un orificio o sección de chimenea de menor diámetro que el diámetro de la parte más inferior de la Chimenea y también de menor diámetro que el túnel de baja presión, como es lógico. Para que la chimenea sea calificada de Orificio Restringido se tendrá la condición que el diámetro del orificio restringido sea menor al del túnel de baja presión, de lo contrario se la considerará como Chimenea Simple a pesar que el diámetro de la Chimenea más arriba del orificio restringido sea aún mayor. Opuestamente, si el diámetro del orificio restringido es demasiado pequeño en comparación con el diámetro del túnel de baja carga, el flujo de agua hacia y desde la cámara será muy escaso y la chimenea terminará siendo prácticamente inútil en sus funciones.<sup>14</sup>

**Figura 3.23.** Esquema comparativo entre una Chimenea de Equilibrio Simple y una de Orificio Restringido



FUENTE: (UNIVERSIDAD DEL CAUCA)

El área de una Chimenea con orificio restringido es menor a la de una Chimenea Simple para un mismo proyecto; esto debido al hecho que el volumen de agua que circula hacia y desde una Chimenea con orificio es menor al de una Simple

<sup>14</sup> CFE (Comisión Federal de Electricidad), Manual de Diseño de Obras Civiles- Cámaras de Oscilación, Centro Editorial de la CFE; 1981; México D.F., México; Pág. 2.5.4



debido a la presencia misma del orificio restringido, sin embargo se debe tener en cuenta que una gran desventaja de una Chimenea con orificio restringido es que las ondas provocadas por el golpe de ariete se transmiten hacia el túnel de baja presión y no totalmente hacia la Chimenea de Equilibrio, razón por la cual será necesario diseñar el túnel de baja presión para que pueda soportar este tipo de ondas. Asimismo se tiene otra desventaja en cuanto a la facilidad de la operación de las turbinas a consecuencia de las cargas de aceleración y desaceleración provocadas, descritas anteriormente en el caso de Chimeneas con Orificio Restringido.<sup>15</sup>

### **3.11. ECUACIONES PARA EL FUNCIONAMIENTO DE CHIMENEAS DE EQUILIBRIO SIMPLES Y CHIMENEAS DE EQUILIBRIO CON ORIFICIO RESTRINGIDO**

Las Ecuaciones que describen el flujo del agua dentro de estos dos tipos de Chimeneas de Equilibrio son similares, razón por la cual se hace su análisis paralelamente.

#### **3.11.1. ECUACIÓN DINÁMICA PARA CHIMENEAS DE EQUILIBRIO CON ORIFICIO RESTRINGIDO**

En las centrales hidroeléctricas se realiza un análisis del golpe de ariete asumiéndolo como constante, esto debido a que, en el corto período de tiempo en que se ejecuta el movimiento de la válvula de maniobras, la tubería de presión (inmediata al túnel de baja carga) tiene variaciones de presión muy altas. En ese mismo corto período de tiempo, el nivel del agua en la chimenea de equilibrio no cambia sustancialmente. Por tales motivos y con la intención de que el análisis y cálculos sean lo más prácticos posibles, se analiza el fenómeno transitorio de flujo como dos sucesos separados:

---

<sup>15</sup> CFE (Comisión Federal de Electricidad), Manual de Diseño de Obras Civiles- Cámaras de Oscilación, Centro Editorial de la CFE; 1981; México D.F., México; Pág. 2.5.4

- ✓ Golpe de Ariete: con cambios abruptos en la velocidad del agua debido a las altas velocidades en períodos cortos.
- ✓ Aceleración de Masas: en el túnel de baja presión y chimenea de equilibrio se produce una aceleración de masas líquidas de baja velocidad.

Basándose en el fenómeno de la aceleración de las masas, se deduce la ecuación dinámica para chimeneas de equilibrio también conocida como la ecuación de cantidad de movimiento de las masas:

$$\frac{L}{g} \frac{dv_t}{dt} = -z - c * v_t^2 - H_0 \quad (3.8)$$

Donde:

$v_t$ : Velocidad del Agua en el Túnel de Baja Presión (De valor positivo si va en dirección desde el embalse hacia la Chimenea de Equilibrio) (m/s)

L: Longitud del Túnel de Baja Presión (m)

z: Desnivel entre la superficie del agua en la Chimenea de Equilibrio y el agua en el Embalse (m)

$H_0$ : Carga sobre el Orificio Restringido (m)

g: Aceleración de la Gravedad en el Sitio ( $m/s^2$ )

t: Tiempo transcurrido (s)

c: Coeficiente de pérdida de carga en el Túnel de Baja Presión ( $s^2/m$ ) calculado con la fórmula siguiente:  $c = \frac{1}{2g} \left( 1 + f \frac{L}{D} \right)$  donde  $f$  es el coeficiente de fricción en función del material de recubrimiento interno del túnel de baja presión.

### 3.11.2. ECUACIÓN DINÁMICA PARA CHIMENEAS SIMPLES

$$\frac{L}{g} \frac{dv_t}{dt} = -z - c * v_t^2 \quad (3.9)$$

Donde:

$v_t$ : Velocidad del Agua en el Túnel de Baja Presión (De valor positivo si va en dirección desde el embalse hacia la Chimenea de Equilibrio) (m/s)

L: Longitud del Túnel de Baja Presión (m)

z: Desnivel entre la superficie del agua en la Chimenea de Equilibrio y el agua en el Embalse (m)

c: Coeficiente de pérdida de carga en el Túnel de Baja Presión ( $s^2/m$ )

g: Aceleración de la Gravedad en el Sitio ( $m/s^2$ )

t: Tiempo transcurrido (s)

### **3.11.3. ECUACIÓN DE CONTINUIDAD DE FLUJO PARA CHIMENEAS SIMPLES Y CON ORIFICIO RESTRINGIDO**

$$A_t * V_t = Q_s + Q_{tur} \quad (3.10)$$

Donde:

$v_t$ : Velocidad del Agua en el Túnel de Baja Presión (De valor positivo si va en dirección desde el embalse hacia la Chimenea de Equilibrio) (m/s)

$Q_s$ : Caudal de circulación en la Chimenea de Equilibrio (De valor positivo si va hacia la Chimenea de Equilibrio) ( $m^3/s$ )

$Q_{tur}$ : Caudal de circulación hacia las Turbinas ( $m^3/s$ )

### **3.11.4. ECUACIÓN DEL CAUDAL DE FLUJO HACIA CHIMENEAS SIMPLES Y CON ORIFICIO RESTRINGIDO**

$$Q_s = C_d A_o \sqrt{2g * H_o} \quad (3.11)$$

Donde:

$Q_s$ : Caudal de circulación en la Chimenea de Equilibrio (De valor positivo si va hacia la Chimenea de Equilibrio) ( $m^3/s$ )

$C_d$ : Coeficiente de Descarga del Orificio

$A_0$ : Área del Orificio Restringido ( $m^2$ )

$g$ : Aceleración de la Gravedad en el Sitio ( $m/s^2$ )

$H_0$ : Carga sobre el Orificio Restringido equivalente a la pérdida de carga que se produce cuando el agua fluye a través de éste (m)

### **3.12. CRITERIOS Y ECUACIONES PARA EL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE UNA CHIMENEA DE EQUILIBRIO**

El criterio básico para el dimensionamiento de una Chimenea de Equilibrio está relacionado con su estabilidad, es decir que las oscilaciones del agua dentro de la misma deben ser amortiguadas. Esto se lo consigue con unas dimensiones tales que, ante cualquier cambio en la demanda de agua en las operaciones de cierre y apertura de válvulas, se logre un tiempo de amortiguamiento corto, lo cual a su vez se refleja en una pequeña relación entre el tiempo hasta que se produzca la máxima oscilación y su tiempo anterior (Relación de amortiguamiento)<sup>16</sup>“La estabilidad y el dimensionamiento de las chimeneas de equilibrio en plantas hidroeléctricas han sido abordados por distintos autores con diferentes aproximaciones, sin que se hayan obtenido conclusiones definitivas”(CONGRESO LATINOAMERICANO, 2006)

#### **3.12.1. CRITERIO DEL ÁREA DE THOMA**

Un criterio pionero para el dimensionamiento de chimeneas de equilibrio fue planteado en 1910 por D.T. Thoma, quien propuso que las oscilaciones del agua serán estables si su área transversal es mayor a un valor mínimo de un área teórica llamada el Área de Thoma<sup>17</sup>valor calculado por una ecuación deducida a partir de las ecuaciones dinámica y de continuidad para chimeneas simples bajo

<sup>16</sup> CFE (Comisión Federal de Electricidad), Manual de Diseño de Obras Civiles- Cámaras de Oscilación, Centro Editorial de la CFE; 1981; México D.F., México; Pág. 2.5.35

<sup>17</sup>CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, Análisis de Estabilidad y Diseño de Cámaras de Oscilación Simples y Estranguladas, Congreso N° 12, Managua, Editorial del Instituto Nicaragüense de Energía.

el supuesto de que las oscilaciones en ésta son pequeñas.<sup>18</sup> Además de esa suposición, se hicieron otras cuantas que permiten simplificar lo máximo posible la ecuación de Thoma, estas son:

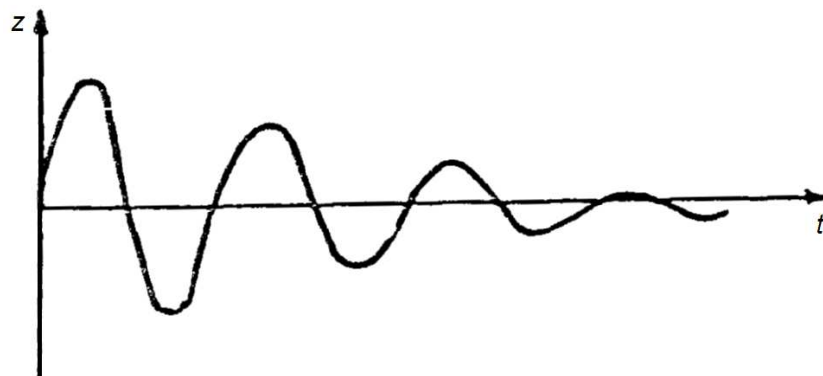
- a) El Regulador de velocidad entre la válvula de apertura y turbina conserva la potencia constante
- b) La eficiencia de las turbinas es constante
- c) Las pérdidas de presión en el túnel de baja presión son despreciables
- d) La carga de velocidad en el túnel es despreciable
- e) El Regulador de velocidad entre la válvula de apertura y turbina es muy sensible y reacciona de forma inmediata
- f) La central hidroeléctrica no tiene conexión con otras centrales

“Las oscilaciones son estables si se amortiguan en un tiempo razonable y son inestables si se incrementan con el tiempo”(CFE, 1981). En la Figura 3.24y en la Figura 3.25 se pueden observar oscilaciones de tipo estable e inestable respectivamente.

---

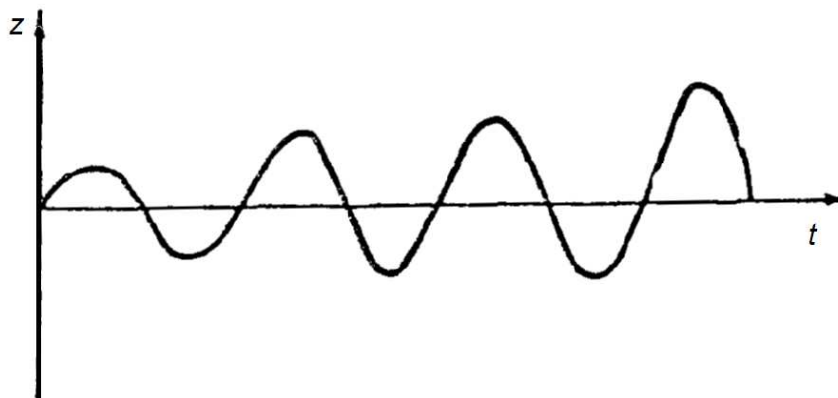
<sup>18</sup> CFE (Comisión Federal de Electricidad), Manual de Diseño de Obras Civiles- Cámaras de Oscilación, Centro Editorial de la CFE; 1981; México D.F., México; Pág. 2.5.35

**Figura 3.24.** Esquema de las oscilaciones del agua (Variación del nivel  $Z$  en el tiempo) dentro de una chimenea estable



FUENTE: (CFE, 1981)

**Figura 3.25.** Esquema de las oscilaciones del agua (Variación del nivel  $Z$  en el tiempo) dentro de una chimenea inestable



FUENTE: (CFE, 1981)

Si las oscilaciones llegan a ser demasiado inestables, el flujo dentro de la chimenea de equilibrio puede llegar a desbordarse de su nivel superior o una situación de drenaje de la chimenea, la cual se debe evitar. Otros factores que ayudan a un posible drenaje de la chimenea es una situación específica producida consecuentemente a una gran demanda de fluido por parte de las turbinas y en la cual, si la aceleración del fluido en el túnel de baja presión no es la suficiente, la chimenea suministrará ese fluido y su nivel puede ser bajar a tal punto de un posible drenaje de la chimenea. Una lenta aceleración del agua dentro del túnel

de baja presión es producida en general por altas pérdidas de carga localizadas y por fricción a lo largo de toda la conducción.<sup>19</sup>

### 3.12.1.1. Área de Thoma

$$A_{Th} = \frac{L * A_t}{2g * c * H_0} \quad (3.12)$$

Donde:

$A_{Th}$ : Área de Thoma transversal de la Chimenea de Equilibrio (m<sup>2</sup>)

L: Longitud del Túnel de Baja Presión (m)

$A_t$ : Área del Conducto (Túnel) de Baja Presión (Túnel) (m<sup>2</sup>)

g: Aceleración de la Gravedad en el Sitio (m/s<sup>2</sup>)

c: Factor de pérdidas de carga por fricción en el túnel (s<sup>2</sup>/m)

$$c = \frac{\Delta H}{V_t^2} \quad (3.13)$$

Donde:

$\Delta H$ : Pérdida de Carga Total por fricción en el Túnel (m)

$V_t$ : Velocidad de flujo en el Conducto (Túnel) de Baja Presión (Túnel) (m/s)

$H_0$ : Carga neta de agua sobre las turbinas (m)

$$H_0 = H - c * V_t^2 \quad (3.14)$$

Donde:

H: Carga bruta de agua sobre las turbinas (m)

c: Factor de pérdidas de carga por fricción en el túnel (s<sup>2</sup>/m)

---

<sup>19</sup> CFE (Comisión Federal de Electricidad), Manual de Diseño de Obras Civiles- Cámaras de Oscilación, Centro Editorial de la CFE; 1981; México D.F., México; Pág. 2.5.39

$V_t$ : Velocidad de flujo en el Conducto (Túnel) de Baja Presión (Túnel) (m/s)

### 3.12.1.2. Área de Diseño

$$A_D = n * A_{Th} \quad (3.15)$$

Donde:

$A_D$ : Área de la sección transversal de la Chimenea recomendada para que ésta sea estable ( $m^2$ )

$A_{Th}$ : Área de Thoma transversal de la Chimenea de Equilibrio ( $m^2$ )

n: Factor de estabilidad de la Chimenea de Equilibrio ( $n > 1$ ).

En las chimeneas de equilibrio que constan de un solo conducto se recomienda que para un amortiguamiento eficiente el valor de n debe ser 1.25 en chimeneas con orificio restringido y 1.50 para chimeneas simples.<sup>20</sup> El aumento del área obtenida se lo hace con la finalidad de que el amortiguamiento de las oscilaciones se produzca en un menor lapso de tiempo.<sup>21</sup>

Si la condición del área mínima de diseño no se satisface, se presentará una inestabilidad en las oscilaciones en la chimenea, es decir que éstas no serán amortiguadas después del instante de la maniobra de cierre o apertura de las válvulas para dar paso al flujo hacia las turbinas.

Posterior a Thoma, otros autores (Jaeger, Calame, Gaden, Frank, Schüller, Karas y otros) con diferentes aproximaciones han dado sus criterios con respecto a la estabilidad para el dimensionamiento de Chimeneas de Equilibrio; sin embargo, no se han obtenido conclusiones definitivas, consecuentemente la fórmula de Thoma continúa con una sustancial vigencia como base para el

<sup>20</sup> CFE (Comisión Federal de Electricidad), Manual de Diseño de Obras Civiles- Cámaras de Oscilación, Centro Editorial de la CFE; 1981; México D.F., México; Pág. 2.5.37

<sup>21</sup> MAYS Larry, Hydraulic Design for Energy Generation, Hydraulic Design Handbook, Chapter 8; 2004, Chicago, USA; Pág. 19



dimensionamiento de chimeneas de equilibrio debido a que en posteriores análisis no han sido de gran magnitud las modificaciones hechas por otros autores.<sup>22</sup>

### 3.12.2. CRITERIO DEL DISEÑO BALANCEADO

En las chimeneas de equilibrio con orificio restringido (estrangulamiento), éste se lo ubica en su pie, para generar una pérdida de carga localizada y así permitir que las oscilaciones de masa disminuyan en su magnitud. El funcionamiento del orificio restringido responde a la siguiente ecuación, detallada en el literal correspondiente al caudal de flujo hacia la chimenea de equilibrio.

$$Q_s = C_d A_o \sqrt{2g^* H_o} \quad (3.16)$$

El diseño balanceado de una chimenea de equilibrio consiste en estimar un diámetro del orificio restringido (o en su defecto del orificio de entrada para chimeneas simples) cuyo valor sea tal, que se consiga una igualdad entre la sobrepresión máxima y la pérdida de carga por el estrangulamiento al pie de la chimenea. En prediseño, para obtener una breve primera aproximación de la máxima sobrepresión que se producirá en la chimenea de equilibrio, es útil el uso de los ábacos de Parmakian.<sup>23</sup>

#### 3.12.2.1. Obtención de la oscilación máxima

En chimeneas de equilibrio cilíndricas, con el fin de tener un diseño balanceado, es posible determinar la máxima sobrepresión que equivale al nivel de la oscilación máxima medido desde la base de la chimenea. Ésta se la obtiene a partir de los ábacos de Parmakian.

<sup>22</sup>CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, Análisis de Estabilidad y Diseño de Cámaras de Oscilación Simples y Estranguladas, Congreso N° 12, Managua, Editorial del Instituto Nicaragüense de Energía.

<sup>23</sup>PARMAKIAN, John. Waterhammer Analysis. Dover Publications. Capítulo XVII; 1963, Denver, USA; Pág 123.

### 3.12.2.2. Uso de los ábacos de Parmakian.

Los ábacos de Parmakian son dos, los cuales consisten cada uno en una gráfica con dos ejes ortogonales y un sistema de curvas que representan la relación entre pérdidas del orificio restringido y las pérdidas en el sistema. Cada curva corresponde a una relación:

$$\frac{h_{f2}}{h_{f1}} \quad (3.17)$$

En los ejes ortogonales, el eje de las abscisas corresponde a una relación geométrica, la cual corresponde a la siguiente ecuación:

$$b_o = \frac{h_{f1}}{Q_o} \sqrt{\frac{Fg}{L/A}} \quad (3.18)$$

Donde:

$b_o$ : Relación geométrica

$h_{f1}$ : Pérdidas de carga en el sistema. Son las pérdidas de fricción más la carga de velocidad, más todas las pérdidas de carga que se producen entre el reservorio y la chimenea de equilibrio.

$Q_o$ : Caudal de circulación

$F$ : Área transversal de la chimenea de equilibrio.

$g$ : Aceleración de la gravedad.

$L$ : Longitud de la conducción entre el reservorio y la chimenea de equilibrio.

$A$ : Área transversal de la conducción.

En el eje de las ordenadas corresponde a una relación entre la máxima carga de presión producida por el cierre o abertura de la válvula y la pérdida de carga en el sistema. La relación es:

$$\frac{S_A}{h_{f1}} \quad (3.19)$$

Donde:

$S_A$ : Máxima carga de presión.

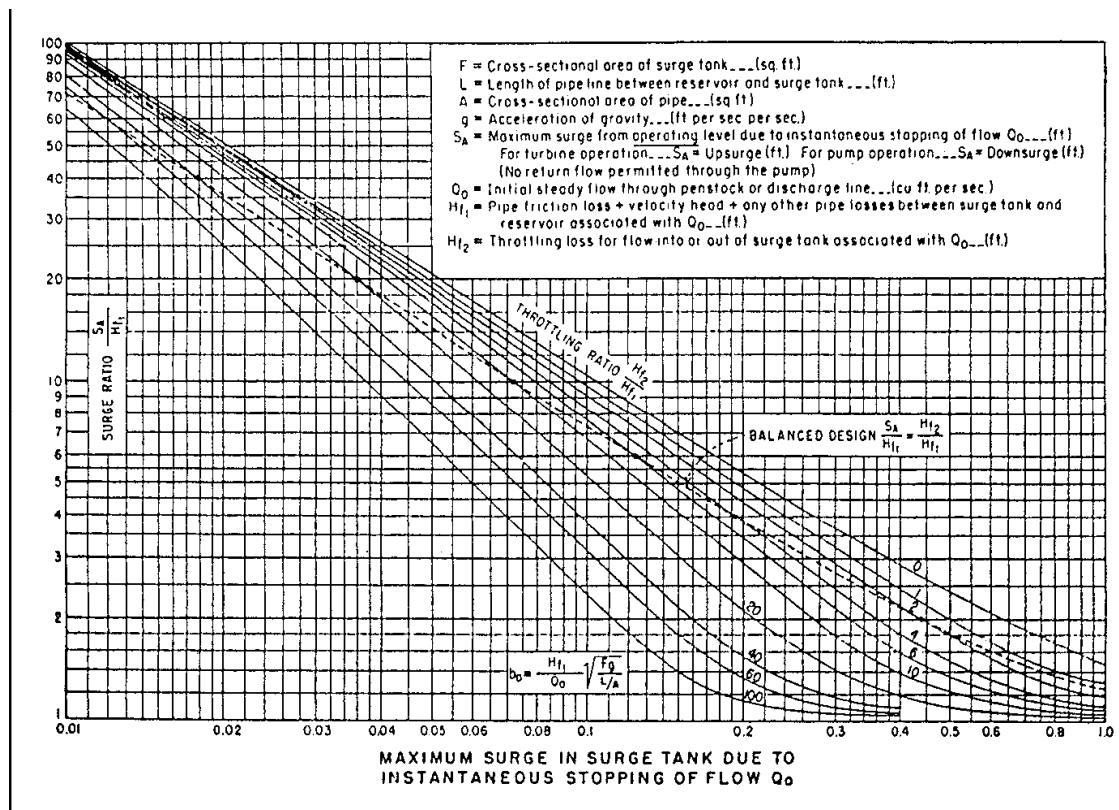
$h_{f1}$ : Pérdidas de carga en el sistema. Son las pérdidas de fricción más la carga de velocidad, más todas las pérdidas de carga que se producen entre, el reservorio y la chimenea de equilibrio.

Para poder obtener el diseño balanceado se procede a calcular la relación entre pérdidas, la cual puede dar valores entre cero y cien ó mayores, donde cero corresponde a una situación donde no exista orificio restringido, es decir donde la chimenea de equilibrio se trate de un pozo simple. Los valores de cien ó mayores corresponden a valores del orificio restringido extremadamente pequeños. Posteriormente se procede a calcular la relación geométrica, tomando en cuenta, que los ábacos de Parmakian son útiles solamente para chimeneas de equilibrio con un solo diámetro a lo largo de toda su longitud, es decir solamente para una sola geometría.

Una vez que se obtienen los dos valores, se procede a ubicar el valor de la relación geométrica, se sube por la gráfica, hasta que se tope con la relación de pérdidas establecida. Una vez que se encuentra éste punto de intersección, se procede a desplazarse en la gráfica hasta la izquierda, con lo cual se obtiene el valor de la relación entre Carga Máxima y Pérdida en el sistema. Una vez conocidas, se despeja la carga máxima de presión.

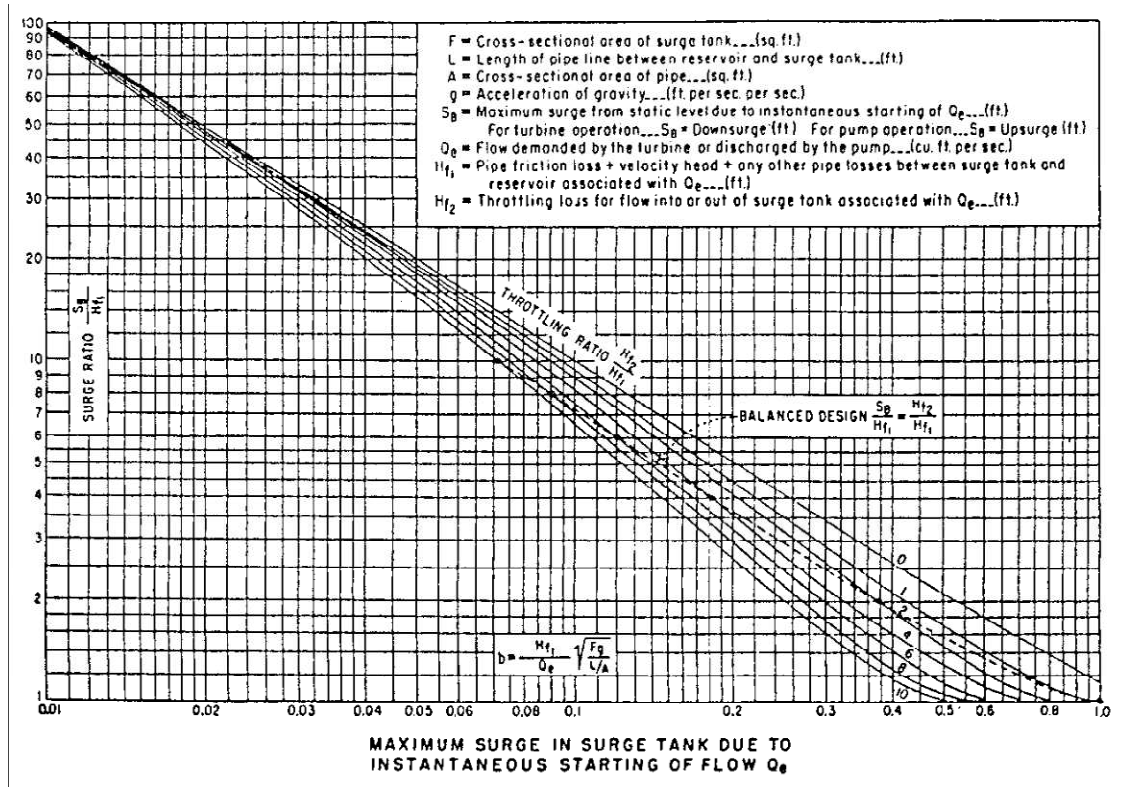
Dentro de la familia de curvas que se encuentran en la gráfica, se encuentra la curva de diseño balanceado, la cual corresponde al diseño óptimo que se debería tener. Para poder obtener el diseño balanceado se debe cambiar la geometría del orificio restringido, para así ajustarse lo mejor posible.

**Figura 3.26.** Ábaco de Parmakian para obtener la oscilación máxima en una chimenea de equilibrio debido al paro instantáneo del fluido



FUENTE: (MAYS, Cap. 8, 2004)

**Figura 3.27.** Ábaco de Parmakian para obtener la oscilación máxima en una chimenea de equilibrio debido a la apertura instantánea para el paso del fluido



FUENTE: (MAYS, Cap. 8, 2004)

Para determinar el nivel superior del agua en la máxima oscilación se debe tomar en cuenta las siguientes especificaciones en cuanto a los datos particulares de cada central:

- ✓ Usar la máxima carga bruta de agua
- ✓ Usar las mínimas pérdidas de agua entre el reservorio y la chimenea
- ✓ Usar el caudal máximo de operación
- ✓ Asumir el máximo rechazo de carga en el mínimo tiempo posible.

Para determinar el nivel inferior del agua en la máxima oscilación se debe tomar en cuenta las siguientes especificaciones en cuanto a los datos particulares de cada central:

- ✓ Usar la mínima carga bruta de agua

- ✓ Usar las máximas pérdidas de agua entre el reservorio y la chimenea
- ✓ Asumir que se recibirá un flujo de agua desde el 50 al 100% en el tiempo más corto razonable.

Es recomendable adicionar por seguridad un 10% al valor obtenido del nivel de la oscilación máxima superior, para determinar la cota del borde superior de la chimenea de equilibrio; mientras que el porcentaje de seguridad es del 15% en caso de la oscilación inferior, para evitar que se vacíe la chimenea en casos de demanda de agua en apertura de válvulas y así evitar la posible entrada de aire hacia la tubería de alta presión.<sup>24</sup>

Una vez obtenida la sobrepresión aproximada ( $Z_{max}$ ) se la debe igualar a la ecuación de la pérdida de carga en el estrangulamiento u orificio restringido:

$$H_0 = \frac{Q_s^2}{2g * C_0^2 * A_0^2} = Z_{MAX} \quad (3.20)$$

Despejando de la expresión anterior se puede obtener el área transversal y diámetro más adecuados del orificio que satisfagan la condición del diseño balanceado.

$$A_B = \frac{Q_s}{C_0 * \sqrt{2g * Z_{MAX}}} \quad (3.21)$$

Donde:

$A_B$ : Área del Orificio restringido que satisface la condición del diseño balanceado ( $m^2$ )

$Q_s$ : Caudal de circulación en la Chimenea de Equilibrio (De valor positivo si va hacia la Chimenea de Equilibrio) ( $m^3/s$ )

$C_0$ : Coeficiente de Descarga del Orificio estimado entre 0.6 y 0.9

$g$ : Aceleración de la Gravedad en el Sitio ( $m/s^2$ )

---

<sup>24</sup>MAYS Larry, Hydraulic Design for Energy Generation, Hydraulic Design Handbook, Chapter 8; 2004, Chicago, USA; Pág. 21.

$Z_{MAX}$ : Sobrepresión máxima que se producirá en la chimenea de equilibrio equivalente a la pérdida de carga en el Orificio Restringido, para el caso de Condición Balanceada (m)

Sin embargo, en algunos casos no es posible realizar un diseño que satisfaga la condición balanceada, ya que la sobrepresión que se produce es extremadamente alta en relación a las pérdidas de carga que se producen en el orificio restringido y cuya consecuencia es un gran incremento de la velocidad de flujo que consecuentemente ocasionaría problemas de cavitación en la estructura. En tal caso, el diámetro del orificio restringido se verá limitado a una dimensión, tal que, en éste la velocidad máxima de circulación del flujo sea inferior a la velocidad límite antes de la cavitación, la cual es dependiente del material de recubrimiento interno y de las condiciones hidráulicas asociadas a las dimensiones y parámetros propios de cada caso.

### **3.12.3. CRITERIOS DE DISEÑO PARA LOS DOS TIPOS DE MANIOBRAS**

#### **3.12.3.1. Criterio de Diseño para Cierre de Válvulas**

El cierre de las válvulas de paso del fluido hacia las turbinas produce un efecto de rechazo de carga, el cual a su vez provoca un aumento en el nivel del agua en la chimenea de equilibrio. Si se desea estimar el máximo nivel al que llegará el agua en esta oscilación, se deberán considerar las siguientes condiciones de la central hidroeléctrica:

- ✓ El embalse está a su nivel máximo de operación y por ende se considerará la cota máxima correspondiente a esta situación
- ✓ El Cierre de las válvulas se produce para cambiar la demanda desde el caudal máximo hasta el cierre total.

Si se desea estimar el mínimo nivel al que llegará el agua en esta oscilación, se deberán considerar las siguientes condiciones de la central hidroeléctrica:

- ✓ El embalse está a su nivel mínimo de operación y por ende se considerará la cota mínima correspondiente a esta situación.

- ✓ El Cierre de las válvulas se produce para cambiar la demanda desde el caudal máximo hasta el cierre total.

Existe una eventualidad en particular que conviene ser analizada y que podría provocar el nivel máximo maximorum de una oscilación dentro de la chimenea de equilibrio en el caso de centrales hidroeléctricas de una sola turbina: la posible falla de la turbina pocos instantes después de haber sido abierta la válvula de paso de agua (con la chimenea conteniendo agua aún oscilante debido a la apertura de válvulas) y en el momento justo en que el agua está en su nivel máximo por apertura dentro de ella, con lo cual se produciría un rechazo de carga que provocaría que el nivel aumente aún más.<sup>25</sup>

### **3.12.3.2. Criterio de Diseño para Apertura de Válvulas**

La apertura de las válvulas de paso del fluido hacia las turbinas produce un efecto de demanda de carga, el cual a su vez provoca una disminución en el nivel del agua en la chimenea de equilibrio. Si se desea estimar el mínimo nivel al que llegará el agua en esta oscilación, se deberán considerar las siguientes condiciones de la central hidroeléctrica:

- ✓ El embalse está a su nivel mínimo de operación y por ende se considerará la cota máxima correspondiente a esta situación
- ✓ La apertura de las válvulas se produce para cambiar la demanda desde un caudal intermedio máximo hasta la apertura total. Este caudal intermedio puede ser:
  - ✓ 25%, 50% y hasta 75% del caudal máximo de producción para plantas de producción media
  - ✓ 50% y 75 % para plantas de alta producción o interconectadas

---

<sup>25</sup> CFE (Comisión Federal de Electricidad), Manual de Diseño de Obras Civiles- Cámaras de Oscilación, Centro Editorial de la CFE; 1981; México D.F., México; Pág. 2.5.4



- ✓ 25% en plantas para abastecer picos de demanda.<sup>26</sup>

### 3.12.4. CRITERIO DEL SITIO DE CONSTRUCCIÓN Y RELACIÓN CON LAS OTRAS ESTRUCTURAS

Para conseguir el resultado ideal, las chimeneas de equilibrio deberían de ser construidas inmediatamente antes de la casa de máquinas, es decir justo antes de las turbinas, sin embargo realizar esto haría que las dimensiones de la chimenea sean demasiado grandes y por lo tanto excesivamente costosas, razón por la cual se instala la tubería de alta presión de una relativa corta longitud. Ya que su conexión es directa a las válvulas de maniobra de carga de agua, el túnel de alta presión transmitirá las ondas de celeridad y el efecto del golpe de ariete hacia el primer lugar donde puedan reflejarse y ser aplacadas, es decir, hacia la chimenea de equilibrio. Además de ello debe existir un diseño integral completo de todos los elementos de la central hidroeléctrica enfocados a combatir los efectos del golpe de ariete generado en las operaciones de maniobra.

La chimenea de equilibrio es una tubería de mucho mayor diámetro que el del túnel de baja presión, es decir que la relación entre sus áreas transversales debe ser lo más grande posible, pero sin que resulte antieconómica su excavación y construcción.

$$\frac{A_{chimenea}}{A_{tubería}} = \text{Muy grande}$$

Si la relación es grande entonces las ondas de sobrepresión o depresión no se propagarán más allá de la chimenea de equilibrio; ésta deberá ser de alrededor de 16 ó mayor para que solo se transmita un 10% de la onda a la chimenea de equilibrio.

Asimismo, se deberán tomar en cuenta las siguientes recomendaciones el momento de plantear los posibles diseños y dimensiones de los elementos de la central, teniendo en cuenta la influencia de estos en la magnitud que puede tener el golpe de ariete:

---

<sup>26</sup> CFE (Comisión Federal de Electricidad), Manual de Diseño de Obras Civiles- Cámaras de Oscilación, Centro Editorial de la CFE; 1981; México D.F., México; Pág. 2.5.5

- ✓ Entre mayor sea la longitud del túnel de baja presión, mayor será el efecto del golpe de ariete.
- ✓ Entre mayor sea la velocidad del agua dentro del túnel de baja presión, mayor será el efecto del golpe de ariete; razón por la cual se deberá diseñar con un diámetro lo suficientemente grande como para que la velocidad sea moderada.
- ✓ Entre menor sea el tiempo de maniobra de válvulas, mayor será el efecto del golpe de ariete.<sup>27</sup>

### **3.13. ECUACIONES PLANTEADAS Y SIMPLIFICADAS UTILIZADAS EN EL SOFTWARE PARA EL CÁLCULO DE LAS OSCILACIONES Y NIVELES DE AGUA EN LA CHIMENEA DE EQUILIBRIO**

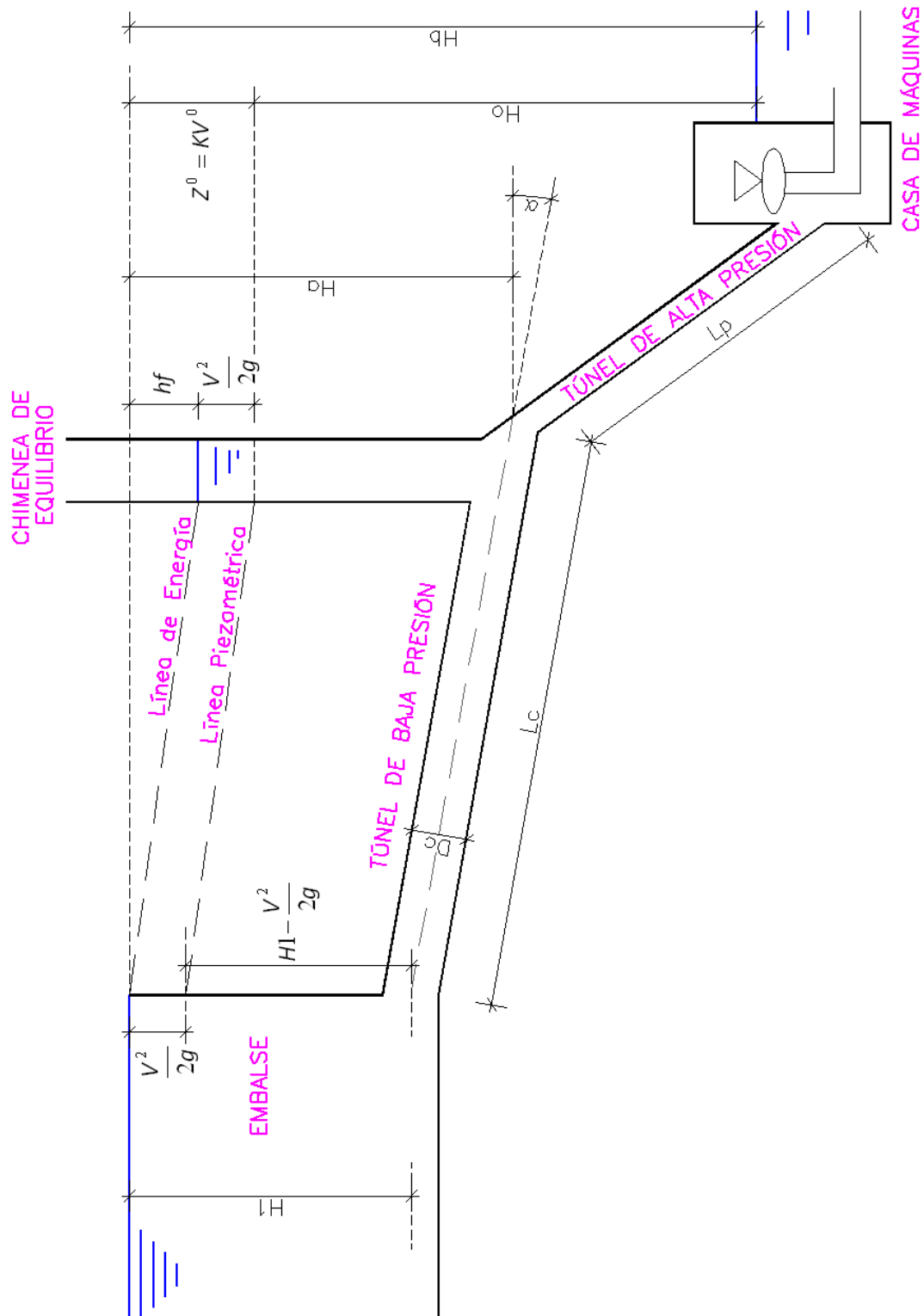
El flujo no permanente analizado en el software para la chimenea de equilibrio se resuelve mediante ecuaciones diferenciales que, debido a su complejidad, se opta por solucionar por un método numérico iterativo cuyas fórmulas y ecuaciones se presentan a continuación y cuyos resultados el programa los va tabulando en los cuadros de cálculo y resultados respectivos.

Para el entendimiento básico de las pérdidas de carga producidas desde la toma, pasando por el túnel de baja presión hasta la chimenea de equilibrio, se muestra a continuación un esquema que contiene las descripciones básicas de las cargas y pérdidas de carga producidas en un funcionamiento de producción normal de la central hidroeléctrica.

---

<sup>27</sup> MATAIX, Claudio, Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas, Ediciones del Castillo; 1986 Madrid, España; 2da Edición.

**Figura 3.28.** Esquema de una central hidroeléctrica común en donde se representan las pérdidas de carga y cargas en un funcionamiento de generación normal de la central.



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

Donde:

$H_1$ : Carga de agua del embalse sobre la toma (m)

$V^2/2g$ : Carga de Velocidad en el Túnel de baja Presión (m)

$hf$ : Pérdidas de Carga por fricción en el Túnel de baja Presión (m)

$H_a$ : Carga bruta de agua del embalse sobre el pie de la Chimenea de Equilibrio (m)

$L_c$ : Longitud del Túnel de Baja presión (m)

$L_p$ : Longitud del Túnel de Alta presión (m)

$\alpha$ : Ángulo de Inclinación promedio de el Túnel de Baja presión ( $^\circ$ )

$H_b$ : Carga bruta de agua del embalse sobre las turbinas (Carga Bruta del Sistema) (m)

$H_o$ : Carga Neta de agua del embalse sobre las turbinas (Carga Neta del Sistema) (m)

$Z^o$ : Diferencia entre la carga bruta y la neta de agua sobre las turbinas, equivalente a la suma de pérdidas de carga y la carga de velocidad (m)

### 3.13.1. FÓRMULA DE LA GRAVEDAD:

$$g_\phi = 9.780327(1 + 0.0053024 \sin^2 \phi - 0.0000058 \sin^2 2\phi) \quad (3.22)$$

Donde:

$g_\phi$ : Aceleración de la Gravedad en función de la Latitud ( $m/s^2$ )

$\phi$ : Ángulo de Latitud del Sitio de Ubicación de la Central Hidroeléctrica ( $0^\circ < \phi < 90^\circ$ )

### 3.13.2. FÓRMULA DEL ÁREA DEL ORIFICIO RESTRINGIDO:

$$A_R = \frac{\pi * D_R^2}{4} \quad (3.23)$$

Donde:

$A_R$ : Área del Orificio Restringido (m/s)

$D_R$ : Diámetro del Orificio Restringido (m)

### 3.13.3. FÓRMULA DE LA VELOCIDAD DEL AGUA EN EL ORIFICIO RESTRINGIDO:

$$V_R = \frac{Q_{ini}}{A_R} \quad (3.24)$$

Donde:

$V_R$ : Velocidad de Agua en el Orificio Restringido (m/s)

$Q_{ini}$ : Caudal Inicial de Circulación desde la Toma hacia el Túnel (m<sup>3</sup>/s)

$A_R$ : Área del Orificio Restringido (m/s)

### 3.13.4. FÓRMULA DEL ÁREA DEL CONDUCTO:

$$A_c = \frac{\pi * D_c^2}{4} \quad (3.25)$$

Donde:

$A_c$ : Área del Conducto (Túnel) de Baja Presión (Túnel) (m<sup>2</sup>)

$D_c$ : Diámetro del Conducto de Baja Presión (Túnel) (m<sup>2</sup>)

### 3.13.5. FÓRMULA DE LA VELOCIDAD NORMAL DEL AGUA EN EL ORIFICIO RESTRINGIDO:

$$V_n = \frac{Q_{ini}}{A_c} \quad (3.26)$$

Donde:

$V_n$ : Velocidad Normal de Agua en el Conducto (m/s)

$Q_{ini}$ : Caudal Inicial de Flujo antes del Cierre de Válvulas (m<sup>3</sup>/s)

$A_c$ : Área del Conducto de Baja Presión (Túnel) ( $m^2$ )

### 3.13.6. FÓRMULA DEL FACTOR DE PÉRDIDA DE CARGA POR FRICCIÓN EN EL TÚNEL:

$$C_1 = \frac{\Delta H}{V_n^2} \quad (3.27)$$

Donde:

$C_1$ : Coeficiente de Pérdida de Carga Total por fricción en el Túnel

$\Delta H$ : Pérdida de Carga Total por fricción en el Túnel (m)

$V_n$ : Velocidad Normal de Agua en el Conducto (m/s)

### 3.13.7. FÓRMULA DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA EN EL ORIFICIO RESTRINGIDO:

$$\Delta H_R = K_R \frac{V_R^2}{2g} \quad (3.28)$$

Donde:

$\Delta H_R$ : Pérdida de Carga en el Orificio Restringido (m)

$K_R$ : Coeficiente de pérdida de Carga en el Orificio Restringido

$V_R$ : Velocidad de Agua en el Orificio Restringido (m/s)

$g$ : Aceleración de la Gravedad en el Sitio ( $m/s^2$ )

### 3.13.8. FÓRMULA DEL FACTOR DE PÉRDIDA DE CARGA EN EL ORIFICIO RESTRINGIDO:

$$C_R = \frac{\Delta H_R + \frac{V_R^2}{2g}}{V_R^2} \quad (3.29)$$

Donde:

$C_R$ : Factor de Pérdida de Carga en el Orificio Restringido

$\Delta H_R$ : Pérdida de Carga en el Orificio Restringido (m)

$V_R$ : Velocidad de Agua en el Orificio Restringido (m/s)

$g$ : Aceleración de la Gravedad en el Sitio ( $m/s^2$ )

### 3.13.9. FÓRMULA DEL NIVEL INICIAL (NORMAL) DE AGUA EN LA CHIMENEA DE EQUILIBRIO CON VÁLVULAS ABIERTAS:

$$N_{ini} = CNE - \Delta H \quad (3.30)$$

Donde:

$N_{ini}$ : Nivel Inicial (Normal) de Agua en Chimenea de Equilibrio con Válvulas Abiertas (msnm)

CNE: Nivel de Agua en el Embalse (msnm)

$\Delta H$ : Pérdida de Carga Total en el Túnel (m)

### 3.13.10. FÓRMULA DEL PASO DE TIEMPO MIENTRAS SE PRODUCE LA OSCILACIÓN:

$$Paso = \Delta t_i = t_i - t_{i-1} = t_{i+1} - t_i \quad (3.31)$$

Donde:

$\Delta t_i$ : Paso de Tiempo mientras se produce la Oscilación (s)

$t_i$ : Instante de Tiempo  $i$  para el cual se analiza la oscilación (s)

$t_{i+1}$ : Instante de Tiempo siguiente al instante  $i$  para el cual se analiza la oscilación (s)

$t_{i-1}$ : Instante de Tiempo anterior al instante  $i$  para el cual se analiza la oscilación (s)

### 3.13.11. FÓRMULA DE LA VARIACIÓN DE CAUDAL DE CIRCULACIÓN:

$$\Delta Q = Q_{inicial} - Q_{final} \quad (3.32)$$

Donde:

$\Delta Q$ : Variación del Caudal de Circulación ( $m^3/s$ )

$Q_{inicial}$ : Caudal Inicial de Circulación desde la Toma hacia el Túnel ( $m^3/s$ )

$Q_{final}$ : Caudal Final de Circulación desde la Toma hacia el Túnel ( $m^3/s$ )

### 3.13.12. FÓRMULA DEL GRADIENTE DE VARIACIÓN DE CAUDAL DE CIRCULACIÓN:

$$Q_c = \frac{\Delta Q}{T_m} \quad (3.33)$$

Donde:

$Q_c$ : Gradiente de Variación del Caudal de Circulación ( $m^3/s^2$ )

$\Delta Q$ : Variación del Caudal de Circulación ( $m^3/s$ )

$T_m$ : Tiempo de Ejecución de la Maniobra en la Válvula (s)

### 3.13.13. FÓRMULA DEL ÁREA PONDERADA DE LA SECCIÓN DE LA CHIMENEA DE EQUILIBRIO:

$$A_D = \frac{\pi}{4} \left( \frac{(D_2 + D_1)(N_2 - N_1) + (D_4 + D_3)(N_3 - N_2) + (D_6 + D_5)(N_4 - N_3) + (D_8 + D_7)(N_5 - N_4)}{2(N_5 - N_1)} \right)^2 \quad (3.34)$$

Donde:

$A_D$ : Área Ponderada de la Sección de la Chimenea de Equilibrio ( $m^2$ )

$D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, D_6, D_7, D_8$ : Diámetros de las Distintas Secciones de la Chimenea de Equilibrio (Indicadas en el Esquema Correspondiente) (m)

$N_1, N_2, N_3, N_4, N_5$ : Niveles de las Distintas Secciones de la Chimenea de Equilibrio (Indicadas en el Esquema Correspondiente) (msnm)



**3.13.14. FÓRMULA DEL CAUDAL QUE PASA POR LAS TURBINAS EN EL INTERVALO DE TIEMPO  $\Delta t_i$ :**

$$QT_i = Q_{ini} - t_i * Q_c \quad (3.35)$$

Donde:

$QT_i$ : Caudal que pasa por las Turbinas en el Intervalo de Tiempo  $\Delta t_i$  ( $m^3/s$ )

$Q_{ini}$ : Caudal Inicial de Circulación desde la Toma hacia el Túnel ( $m^3/s$ )

$t_i$ : Instante de Tiempo  $i$  para el cual se analiza la oscilación (s)

$Q_c$ : Gradiente de Variación del Caudal de Circulación ( $m^3/s^2$ )

**3.13.15. FÓRMULA DEL CAUDAL QUE PASA POR LAS TURBINAS EN EL INTERVALO DE TIEMPO  $\Delta t_i$ :**

$$VT_i = \frac{Q_i + Q_{i-1}}{2} * Paso \quad (3.36)$$

Donde:

$VT_i$ : Volumen que pasa por las Turbinas en el Intervalo de Tiempo  $\Delta t_i$  ( $m^3$ )

$Q_i$ : Caudal que Ingresa o Sale de la Chimenea de Equilibrio en cada  $\Delta t_i$  ( $m^3/s$ )

$Q_{i-1}$ : Caudal que Ingresa o Sale de la Chimenea de Equilibrio en cada  $\Delta t_{i-1}$  ( $m^3/s$ )

**3.13.16. FÓRMULA DEL DIÁMETRO EQUIVALENTE DE LA CHIMENEA DE EQUILIBRIO PARA CADA  $t_i$ :**

$$D_i = D_{inf} + \frac{D_{sup} - D_{inf}}{Cota_{sup} - Cota_{inf}} (N_i - Cota_{inf}) \quad (3.37)$$

Donde:

$D_i$ : Diámetro Equivalente de la Chimenea de Equilibrio para cada  $t_i$  (m)

$D_{SUP}$ : Diámetro de la Chimenea de Equilibrio inmediatamente superior establecido como dato con respecto al nivel que ocupa el agua en cada  $t_i(m)$

$D_{INF}$ : Diámetro de la Chimenea de Equilibrio inmediatamente inferior establecido como dato con respecto al nivel que ocupa el agua en cada  $t_i(m)$

$COTA_{SUP}$ : Nivel de Agua Correspondiente al Diámetro de la Chimenea de Equilibrio inmediatamente superior establecido como dato con respecto al nivel que ocupa el agua en cada  $t_i(m)$

$COTA_{INF}$ : Nivel de Agua Correspondiente al Diámetro de la Chimenea de Equilibrio inmediatamente inferior establecido como dato con respecto al nivel que ocupa el agua en cada  $t_i(m)$

$N_i$ : Nivel del Agua en la Chimenea de Equilibrio para cada  $t_i(msnm)$

### 3.13.17. FÓRMULA DEL CAUDAL QUE PASA POR LAS TURBINAS EN EL INTERVALO DE TIEMPO $\Delta t_i$ :

$$Q_i = \frac{N_i - N_{i-1} * \pi * D_i^2}{t_i - t_{i-1} \quad 4} \quad (3.38)$$

Donde:

$Q_i$ : Caudal que entra o sale de la Chimenea en el Intervalo de Tiempo  $\Delta t_i(m^3)$

$N_i$ : Nivel del Agua en la Chimenea de Equilibrio para cada  $t_i(msnm)$

$N_{i-1}$ : Nivel del Agua en la Chimenea de Equilibrio para cada  $t_{i-1}(msnm)$

$t_i$ : Instante de Tiempo  $i$  para el cual se analiza la oscilación (s)

$t_{i-1}$ : Instante de Tiempo anterior al instante  $i$  para el cual se analiza la oscilación (s)

$D_i$ : Diámetro Equivalente de la Chimenea de Equilibrio para cada  $t_i(m)$

### 3.13.18. FÓRMULA DEL VOLUMEN QUE PASA POR LAS TURBINAS EN EL INTERVALO DE TIEMPO $\Delta t_i$ :

$$\Delta V_i = Q_i * \Delta t_i = (N_i - N_{i-1}) \frac{\pi * D_i^2}{4} \quad (3.39)$$

Donde:

$\Delta V_i$ : Volumen que entra o sale de la Chimenea en el Intervalo de Tiempo  $\Delta t_i$  (m<sup>3</sup>)

$Q_i$ : Caudal que entra o sale de la Chimenea en el Intervalo de Tiempo  $\Delta t_i$  (m<sup>3</sup>)

$\Delta t_i$ : Paso de Tiempo mientras se produce la Oscilación (s)

$N_i$ : Nivel del Agua en la Chimenea de Equilibrio para cada  $t_i$  (msnm)

$N_{i-1}$ : Nivel del Agua en la Chimenea de Equilibrio para cada  $t_{i-1}$  (msnm)

$D_i$ : Diámetro Equivalente de la Chimenea de Equilibrio para cada  $t_i$  (m)

Fórmula del Desnivel de Agua entre el Embalse y la Chimenea de Equilibrio para cada  $t_i$ :

$$\Delta N_i = C.N.E. - N_i \quad (3.40)$$

Donde:

$\Delta N_i$ : Desnivel de Agua entre el Embalse y la Chimenea de Equilibrio para cada  $t_i$  (m)

CNE: Nivel de Agua en el Embalse (msnm)

$N_i$ : Nivel del Agua en la Chimenea de Equilibrio para cada  $t_i$  (msnm)

### 3.13.19. FÓRMULA DE LA PÉRDIDA DE CARGA EN EL CONDUCTO Y EN EL ORIFICIO RESTRINGIDO PARA CADA TI:

$$\Delta H + \Delta H_R = -C_1 * [V_{inicial} * |V_{inicial}|] - C_R * \left[ \frac{Q_i}{\frac{\pi * D_R^2}{4} * \frac{\pi * D_R^2}{4}} \right] \quad (3.41)$$

Donde:

$\Delta H$ : Pérdida de Carga Total en el Túnel (m)

$\Delta H_R$ : Pérdida de Carga en el Orificio Restringido (m)

$C_1$ : Coeficiente de Pérdida de Carga Total en el Túnel

$V_{ini}$ : Velocidad Inicial de Circulación desde la Toma hacia el Túnel (m/s)

$|V_{ini}|$ : Valor Absoluto de la Velocidad Inicial de Circulación hacia el Túnel (m/s)

$C_R$ : Factor de Pérdida de Carga en el Orificio Restringido

$Q_i$ : Caudal que entra o sale de la Chimenea en el Intervalo de Tiempo  $\Delta t_i$  (m<sup>3</sup>/s)

$D_R$ : Diámetro del Orificio Restringido (m)

### 3.13.20. FÓRMULA DE LA CARGA DE ACELERACIÓN PARA CADA TI:

$$H_{a(i)} = \Delta N_i + \Delta H_i + \Delta H_R \quad (3.42)$$

Donde:

$H_{a(i)}$ : Carga de Aceleración para cada  $t_i$  (m)

$\Delta H_i$ : Pérdida de Carga Total en el Túnel para cada  $t_i$  (m)

$\Delta N_i$ : Desnivel de Agua entre el Embalse y la Chimenea de Equilibrio para cada  $t_i$  (m)

$\Delta H_R$ : Pérdida de Carga en el Orificio Restringido (m)

### 3.13.21. FÓRMULA DE LA CARGA DE ACELERACIÓN MEDIA PARA CADA TI:

$$\overline{H_{a_i}} = \frac{H_{a_i} + H_{a(i-1)}}{2} \quad (3.43)$$

Donde:

$\overline{H_{a_i}}$ : Carga Media de Aceleración para cada  $t_i$  (m)

$H_{a(i)}$ : Carga de Aceleración para cada  $t_i$  (m)

$H_{a(i-1)}$ : Carga de Aceleración para cada  $t_{i-1}$  (m)

**3.13.22. FÓRMULA DEL CAUDAL DE AGUA QUE CIRCULA EN LA CONDUCCIÓN PARA CADA TI:**

$$Q_{C_i} = Q_{C_{(i-1)}} + \overline{Ha} * g * A_c * \frac{t_i - t_{i-1}}{L_c} \quad (3.44)$$

Donde:

$Q_{C_i}$ : Caudal de Agua que Circula en la Conducción para cada  $t_i$  ( $m^3/s$ )

$Q_{C_{i-1}}$ : Caudal de Agua que Circula en la Conducción para cada  $t_{i-1}$  ( $m^3/s$ )

$\overline{Ha}$ : Carga Media de Aceleración para cada  $t_i$  (m)

$g$ : Aceleración de la Gravedad en el Sitio ( $m/s^2$ )

$A_c$ : Área del Conducto de Baja Presión (Túnel) ( $m^2$ )

$t_i$ : Instante de Tiempo  $i$  para el cual se analiza la oscilación (s)

$t_{i-1}$ : Instante de Tiempo anterior al instante  $i$  para el cual se analiza la oscilación (s)

$L_c$ : Longitud del Conducto de Baja Presión (m)

**3.13.23. FÓRMULA DEL VOLUMEN DE AGUA QUE CIRCULA EN LA CONDUCCIÓN PARA CADA TI:**

$$V_{C_i} = Q_{C_i} * (t_i - t_{i-1}) \quad (3.45)$$

Donde:

$V_{C_i}$ : Volumen de Agua que Circula en la Conducción para cada  $t_i$  ( $m^3$ )

$Q_{C_i}$ : Caudal de Agua que Circula en la Conducción para cada  $t_i$  ( $m^3/s$ )

$t_i$ : Instante de Tiempo  $i$  para el cual se analiza la oscilación (s)

$t_{i-1}$ : Instante de Tiempo anterior al instante  $i$  para el cual se analiza la oscilación (s)

**3.13.24. FÓRMULA DE LA VELOCIDAD DE AGUA QUE CIRCULA EN LA CONDUCCIÓN PARA CADA TI:**

$$v_{C_i} = \frac{Q_{C_i}}{A_C} \quad (3.46)$$

Donde:

$V_{C_i}$ : Velocidad de Agua que Circula en la Conducción para cada  $t_i$  (m/s)

$Q_{C_i}$ : Caudal de Agua que Circula en la Conducción para cada  $t_i$ (m<sup>3</sup>/s)

$A_C$ : Área del Conducto de Baja Presión (Túnel) (m<sup>2</sup>)

## CAPITULO 4.

# OPTIMIZACIÓN DE LA HOJA DE CÁLCULO PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE LAS CHIMENEAS DE EQUILIBRIO

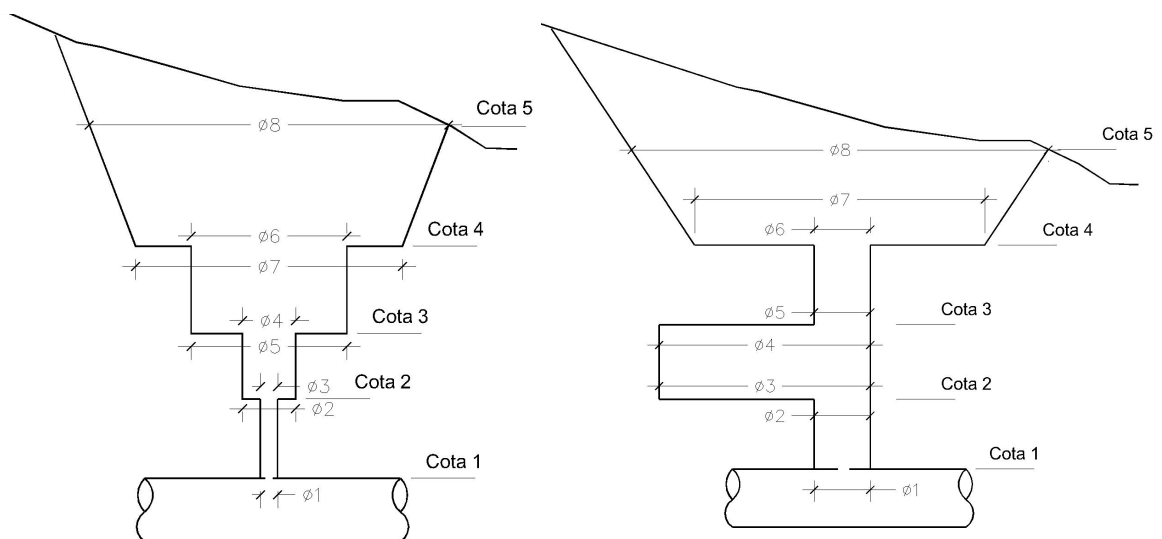
### 4.1.DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA BASE INICIAL

La hoja de Microsoft Excel inicial para el Cálculo de las Oscilaciones en una Chimenea de Equilibrio estaba conformada por tres hojas diferentes y desvinculadas en Microsoft Excel, (Cierre, Apertura y Ayuda)

#### 4.1.1. HOJA “AYUDA”

Presenta únicamente esquemas de dos variantes geométricas para chimeneas de equilibrio.

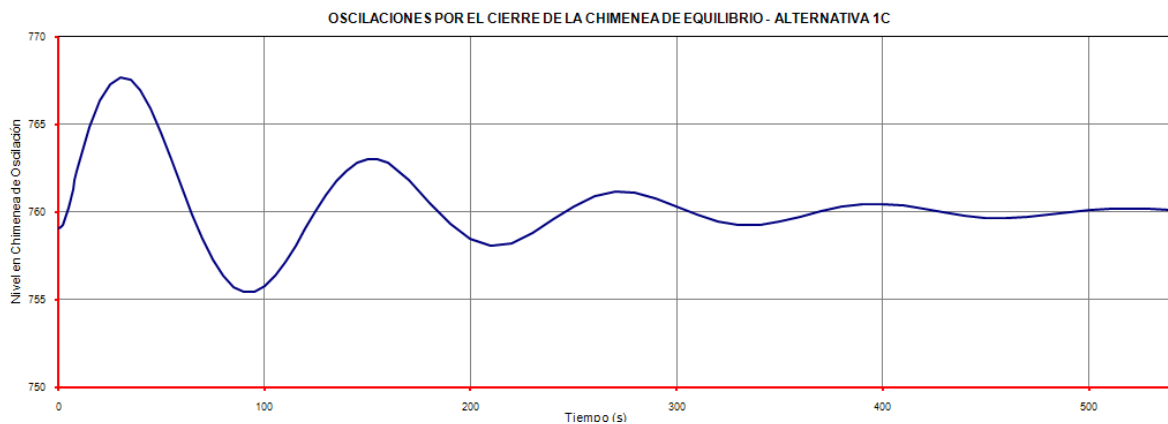
**Figura 4.1.** Variantes de Chimeneas de Equilibrio propuestas en la hoja de cálculo Inicial



FUENTE: Programa Inicial.

La segunda gráfica únicamente es la copia de la gráfica generada en la hoja “Cierre” del programa.

**Figura 4.2.** Variación del nivel de agua en la chimenea en función del tiempo propuesta en la hoja de cálculo Base Inicial



FUENTE: Programa Inicial.

#### 4.1.2. HOJA “CIERRE”

Esta hoja incluye la gráfica de la variación del nivel del agua en función del tiempo después de producirse un cierre de válvulas. En la parte media se encuentran una serie de características, datos y resultados. Los valores no tienen unidades. No existen instrucciones para el ingreso de información. La hoja de cálculo puede ser usada únicamente por la persona que la creó o la conoce. En consecuencia, existe una alta probabilidad de que los resultados obtenidos no sean válidos, por error en la información de entrada.

En la Figura 4.3 se muestra la presentación de la hoja de cálculo disponible para la obtención de los niveles máximos y mínimos en la chimenea de equilibrio para la simulación de la operación de cierre de válvula en 6 segundos.



**Figura 4.3.** Datos y Resultados para la Hoja de Cálculo para la operación de cierre

TIEMPO: 0.15		CALCULO			
<b>Datos de Entrada</b>		<b>Chimenea de Equilibrio</b>			
Tiempo de Analisis	0.5	Cota1	735.1	Diam 5	14
Caudal inicial	90.00	Diam 1	4	Cota 4	780
Caudal Final	0.00	Cota 2	739.29	Diam 6	14
Cota Normal Embalse	760.00	Diam 2	14	Diam 7	14
Tiempo de Cierre	6	Diam 3	14	Cota 5	795
Diametro del Orificio Restringido	4	Cota 3	770	Diam 8	14
Diámetro del conducto	7	Diam 4	14		
Area media del conducto	38.485				

Coef de Pérdida por Fricción Tunel (C/V <sup>2</sup> ) =	0.170	<b>NIVELES EN LA CHIMENEA</b>		
Coef de Pérdida por Orificio Restringido =	0.076			
Longitud del Conducto =	876.86			
Area del Depósito =	153.938	MIN	755.447	90.000
Velocidad Inicial Túnel =	2.339	MAX	767.71	30.000
Pérdida de Carga Inicial =	0.930			
Cota Inicial Chimenea =	759.07			

FUENTE: Programa Inicial.

En la parte inferior de la hoja de cierre se presenta una tabla generada a partir de la programación del algoritmo de resolución escrito en el Editor de Visual Basic de Microsoft Excel, que toma los datos introducidos por el usuario y los procesa para entregar los resultados respectivos. Ésta tabla se la obtiene haciendo un clic en el botón CÁLCULO de esta misma hoja que se muestra en la Figura 4.4.

Uno de los mayores inconvenientes de la hoja disponible inicial es el tiempo extendido que requiere el cálculo de esta tabla, que se debe a la programación hecha que ordena ir dibujando los puntos de la gráfica a medida que los va calculando (nivel de las oscilaciones en cada tiempo después de la maniobra).

**Figura 4.4.** Resultados Tabulados para la Hoja de Cálculo para el cierre de válvulas

Tiempo	Caudal de las Turbinas	Volumen a través de Turbinas	Nivel de Agua en el Depósito	Caudal de Ingreso al Depósito	Volumen Depósito	Salto en Conducto	Pérdida de Carga en Conducto +Orificio	Carga de Acelerac.	Media de carga de Acelerac.	Caudal de Conducto	Velocidad Conducto	Volumen Conducto	Col 4 + Col 7	Verificación de Velocidad
2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0.000	180.000		773.000	0.000		4.000	-4.000	0.000		180.000				4.68
1.000	162.000	171.000	773.068	8.970	8.970	3.932	-4.069	-0.136	-0.068	179.969	4.68	179.97	179.97	4.68
2.000	144.000	153.000	773.269	26.790	26.790	3.731	-4.366	-0.635	-0.386	179.795	4.67	179.79	179.79	4.67
3.000	126.000	135.000	773.603	44.300	44.300	3.397	-4.963	-1.566	-1.101	179.296	4.66	179.30	179.30	4.66

FUENTE: Programa Inicial.

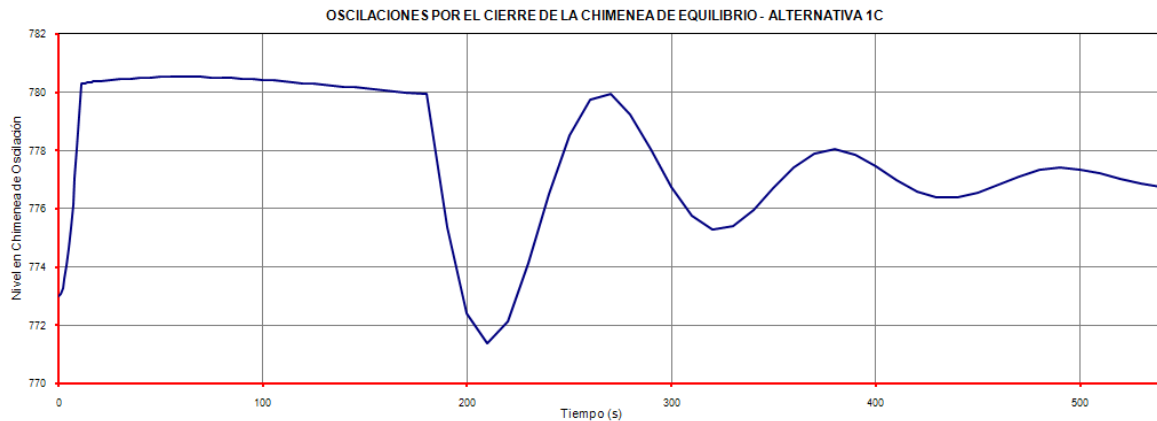
Dentro de la programación específica para la hoja “Cierre” se tiene unos pocos errores en las líneas de código principales, estos son:

En la selección de los casos, según el nivel que ocupa el agua dentro de la chimenea de equilibrio, en sus 4 diferentes posibles zonas determinadas por las cotas, existe un error en las fórmulas de determinación del diámetro promedio equivalente. No se ha tomado en cuenta adecuadamente las variaciones de los diámetros de la chimenea. A continuación se presenta el código original de la programación base inicial.

```
Select case Cells (39 + x1, 7).Value
Case cota1 To cota2
diam = diam1 + (Cells(x1 + 40, 7).Value * (diam2 - diam1) / (cota2 - cota1))
Cells (24, 8).Value = diam
Case cota2 To cota3
diam = diam3 + (Cells(x1 + 40, 7).Value * (diam4 - diam3) / (cota3 - cota2))
Cells (24, 8).Value = diam
Case cota3 To cota4
diam = diam5 + (Cells(x1 + 40, 7).Value * (diam6 - diam5) / (cota4 - cota3))
Cells (24, 8).Value = diam
Case cota4 To cota5
diam = diam5 + (Cells(x1 + 40, 7).Value * (diam8 - diam7) / (cota5 - cota4))
Cells (24, 8).Value = diam
```

Si se utilizan estas fórmulas codificadas, los diámetros equivalentes de la chimenea de equilibrio, para cada nivel que alcance el agua al tener diámetros variables estarán mal calculados. Consecuentemente los demás resultados del programa serán también erróneos. La Figura 4.5 muestra gráficamente el grado de influencia de los errores en estas fórmulas.

**Figura 4.5.** Variación del nivel de agua en la chimenea en función del tiempo después de una maniobra de cierre dibujada para una chimenea compuesta en el Programa Base Inicial (Para datos cualesquiera)



FUENTE: Programa Inicial.

La Figura 4.5 muestra los resultados de las oscilaciones obtenidas con la programación original para chimeneas compuestas, es decir con diámetros variables. En el presente trabajo se introdujo la corrección respectiva, quedando el código de la siguiente manera en la selección de los casos:

```
Select Case Cells (39 + X1, 7).Value
Case cota1 To cota2
diam = diam1 + ((Cells(X1 + 40, 7).Value - cota1) * (diam2 - diam1) / (cota2 - cota1))
Cells (24, 8).Value = diam
Case cota2 To cota3
diam = diam3 + ((Cells(X1 + 40, 7).Value - cota2) * (diam4 - diam3) / (cota3 - cota2))
Cells (24, 8).Value = diam
Case cota3 To cota4
diam = diam5 + ((Cells(X1 + 40, 7).Value - cota3) * (diam6 - diam5) / (cota4 - cota3))
Cells (24, 8).Value = diam
Case cota4 To cota5
diam = diam7 + ((Cells(X1 + 40, 7).Value - cota4) * (diam8 - diam7) / (cota5 - cota4))
Cells (24, 8).Value = diam
```

En la codificación de la selección de casos anteriormente descrita, hay un quinto caso que corresponde al desborde teórico del agua fuera de la chimenea, se hace cita a un dato “Case ls> cota 8” siendo erróneo, pues la línea de código es “Case ls> cota5”

#### 4.1.3. HOJA “APERTURA”

Esta hoja presenta la gráfica de la variación del nivel del agua en función del tiempo después de producirse una apertura de válvulas. Similar a lo descrito en la hoja “cierre” la utilización exige el conocimiento de la misma. No se cuenta con ayudas para identificar errores en la introducción de datos. La forma de presentación es similar a la hoja anterior y se presenta en la Figura 4.6.

**Figura 4.6.** Datos y Resultados para la Hoja de Cálculo que simula la Apertura de válvulas

TIEMPO: 0.15	CALCULO				
<b>Datos de Entrada</b>					
Tiempo de Analisis	0.5	<b>Chimenea de Equilibrio</b>			
Caudal inicial	0.00	Cota1	735	Diam 5	14
Caudal Final	90.00	Diam 1	4	Cota 4	780
Cota en el Embalse =	760.00	Cota 2	740	Diam 6	14
Tiempo de Apertura	10	Diam 2	14	Diam 7	14
Diametro del Orificio Restringido =	4	Diam 3	14	Cota 5	795
Diámetro del conducto	7	Cota 3	770	Diam 8	14
Area media del conducto	38.485	Diam 4	14		

Coef de Pérdida por Fricción Tunel (CV <sup>2</sup> ) =	0.206	<b>NIVELES EN LA CHIMENEA</b>		
Coef de Pérdida por Orificio Restringido =	0.0779			
Longitud del Conducto =	832.9	MIN	751.426	30.000
Area del Depósito =	153.938	MAX	762.039	90.000
Velocidad Inicial Túnel =	2.339			
Pérdida de Carga Inicial =	0.426			
Cota Inicial Chimenea =	758.87			

FUENTE: Programa Inicial.

En la Figura 4.7 se presentan los resultados obtenidos con la forma de oscilaciones calculada por la programación original.

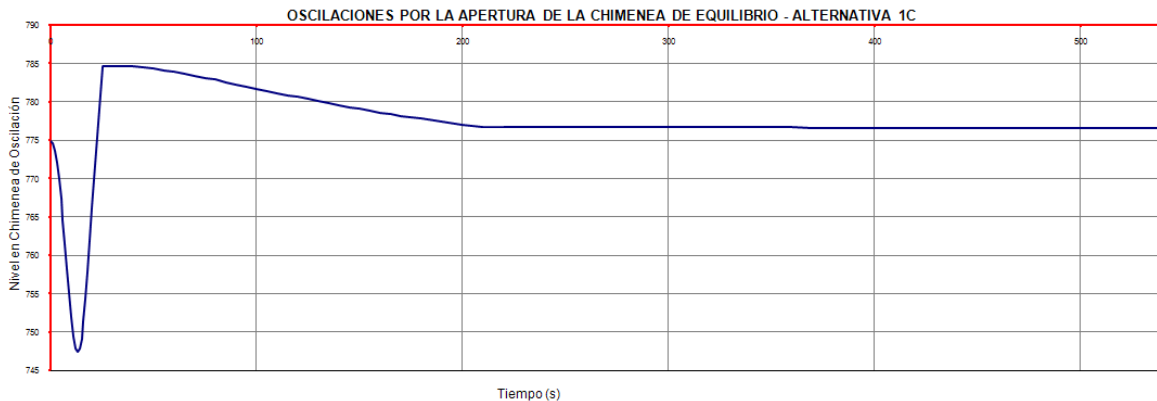
**Figura 4.7.** Resultados Tabulados para la Hoja de Apertura propuestos en el Programa Base Inicial (Valores cualesquiera)

Tiempo	Caudal de las Turbinas	Volumen a través de Turbinas	Nivel de Agua en el Depósito	Caudal de Ingreso al Depósito	Volumen Depósito	Salto en Conductor	Pérdida de Carga en Conductor +Orificio	Carga de Acelerac.	Media de carga de Acelerac.	Caudal de Conductor	Velocidad Conductor	Volumen Conductor	Col 4 + Col	Verificación de Velocidad
2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0.000	0.000		758.873	0.000		0.000	0.000	0.000		0.000				0.00
1.000	9.000	4.500	758.845	-4.240	-4.240	1.155	0.009	1.164	0.582	0.263	0.01	0.26	0.26	0.01
2.000	18.000	13.500	758.763	-12.680	-12.680	1.237	0.079	1.316	1.240	0.825	0.02	0.82	0.82	0.02
3.000	27.000	22.500	758.626	-21.020	-21.020	1.374	0.218	1.591	1.454	1.483	0.04	1.48	1.48	0.04
4.000	36.000	31.500	758.437	-29.210	-29.210	1.563	0.420	1.983	1.787	2.292	0.06	2.29	2.29	0.06

FUENTE: Programa Inicial.

Los errores detectados en la hoja “cierre” se mantienen en la hoja “Apertura”. En la Figura 4.8 se muestra gráficamente el grado de influencia de los mismos en la forma de oscilación calculada para esta operación.

**Figura 4.8.** Variación del nivel de agua en la chimenea en función del tiempo después de una maniobra de apertura, dibujada para una chimenea compuesta en la hoja de cálculo original



FUENTE: Programa Inicial.

Se introdujo la corrección respectiva, quedando el código de la siguiente manera en la selección de los casos:

```
Select Case Cells (39 + X1, 7).Value
Case cota1 To cota2
diam = diam1 + ((Cells(X1 + 40, 7).Value - cota1) * (diam2 - diam1) / (cota2 - cota1))
Cells (24, 8).Value = diam
Case cota2 To cota3
diam = diam3 + ((Cells(X1 + 40, 7).Value - cota2) * (diam4 - diam3) / (cota3 - cota2))
```

```

Cells (24, 8).Value = diam
Case cota3 To cota4
diam = diam5 + ((Cells(X1 + 40, 7).Value - cota3) * (diam6 - diam5) / (cota4 -
cota3))
Cells (24, 8).Value = diam
Case cota4 To cota5
diam = diam7 + ((Cells(X1 + 40, 7).Value - cota4) * (diam8 - diam7) / (cota5 -
cota4))
Cells (24, 8).Value = diam

```

En la codificación de la selección de casos anteriormente descrita, hay un quinto caso que corresponde al desborde teórico del agua fuera de la chimenea, se hace cita a un dato “Case Is> cota 8” siendo erróneo, pues la línea de código es “Case Is> cota5”

#### **4.2.DESCRIPCIÓN DE LA OPTIMIZACIÓN HECHA PARA MEJORAR LA HOJA DE CÁLCULO INICIAL**

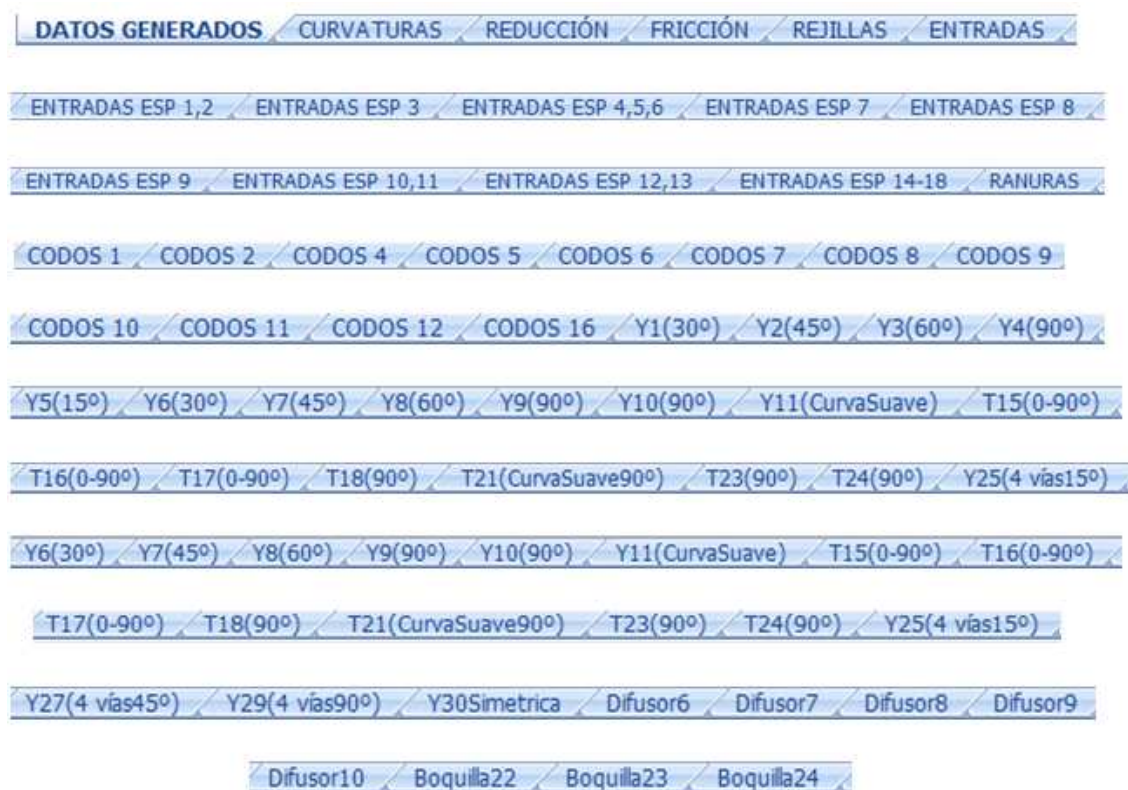
Se ha cambiado completamente el entorno del programa, la interfaz del usuario ahora no es directamente con las hojas de cálculo de Microsoft Excel sino con pantallas interactivas, de fácil uso, ordenadas, gráficas, precisas, restrictivas y en un entorno de Microsoft Visual Basic, donde el usuario va introduciendo y/o escogiendo progresivamente todos los datos necesarios, de acuerdo a los parámetros de diseño definidos en la central hidroeléctrica, para la modelación de la chimenea de equilibrio. Los resultados calculando van generándose en forma automática, sin posibilidad de que el usuario los altere.

Primordialmente la optimización de la hoja de cálculo se basó en modificar las tablas, los gráficos, insertar comentarios, restringir ciertos datos, ubicar estratégicamente varias figuras para ofrecer la ayuda requerida por el usuario que le permita comprender de forma visual, la manera en que se encuentran las diferentes variantes de accesorios y estructuras analizadas.

Uno de los aportes significativos del presente trabajo es haber creado una extensa base de datos que está conformada por 60 hojas de cálculo en Microsoft

Excel, adaptadas hacia un entorno de usuario de Microsoft Visual Basic, para la introducción y cálculo de las pérdidas de carga en toda la conducción desde el embalse hasta la chimenea de Equilibrio, organizadas categóricamente y de tal manera que el usuario se sienta cómodo y cuente con toda la ayuda posible para definir coeficientes de pérdida de fricción y localizadas, obtenidos a partir de información técnica comprobada y validada que ha sido introducida dentro del programa, tomando en cuenta que el programa base no brinda al usuario la posibilidad de un cálculo de las pérdidas producidas. En la Figura 4.9 se presenta un resumen de las hojas que conforman la base de datos para el cálculo de pérdidas en el tramo de baja presión.

**Figura 4.9.** Base de datos creada para facilitar el cálculo de pérdidas en Microsoft Excel del Programa Final



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

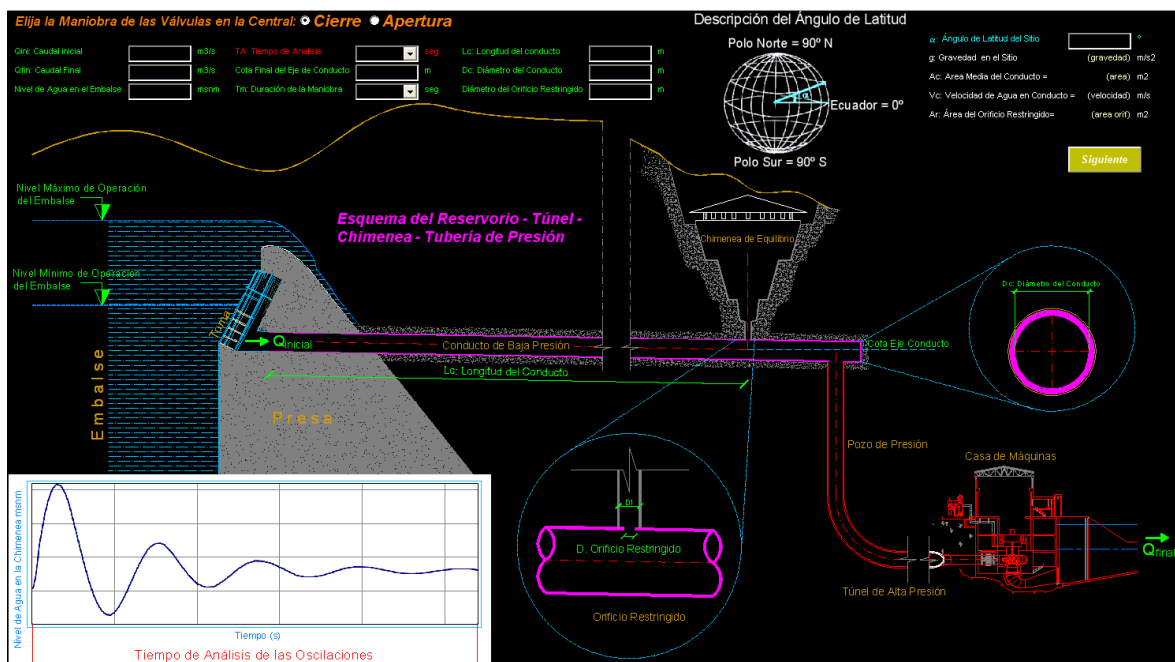
En la base de datos creada se ha previsto un control para eliminar errores en la introducción de datos por parte del usuario. Se cuenta con cajas de texto, a modo de mensaje de advertencia, que restringen el avance de la introducción de datos si es que existe alguna incoherencia en cuanto a los signos, valores o relación de

ciertos datos con otros del mismo sistema. La distinción con colores de los valores de opciones, datos, valores calculados inmediatos y resultados es una parte importante del programa que ayudará al usuario a familiarizarse con éste más rápida y fácilmente.

La guía escrita creada para el usuario será suficiente para acompañar el ingreso de información dando las pautas necesarias para el uso del programa, de tal manera que después de una primera utilización, éste ya esté capacitado para hacer uso de todos los elementos del programa.

#### 4.2.1. OPTIMIZACIÓN EN LA INTRODUCCIÓN DE DATOS GENERALES DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA

**Figura 4.10.** Pantalla de Introducción de Datos Generales del Programa Final



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

En la primera pantalla del programa se tiene como mejora inicial el hecho de poder correr el programa únicamente para maniobras en el caso de Cierre o para Apertura de las válvulas de paso de agua hacia las turbinas, un solo caso a la vez. El botón de cada una de las opciones gobierna el programa y conduce a que



los datos introducidos se procesen automáticamente sin tener que recurrir a las hojas de Microsoft Excel a ningún momento. Al mismo tiempo estos botones borran cualquier información introducida anteriormente por el usuario en anteriores corridas.

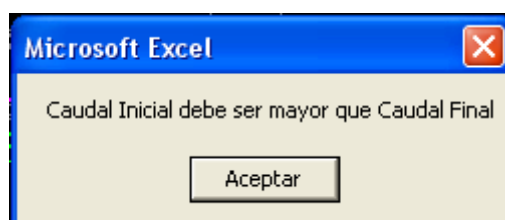
En todos los datos de todas las pantallas se impide el ingreso de datos con signo negativo, caracteres que no sean números así como se impide que posibles resultados negativos sean procesados dentro de las respuestas finales (a consecuencia de la introducción de datos absurdos). Asimismo en todos los casos se han ubicado las unidades de medición de los parámetros, datos y resultados a lo largo de todo el programa.

Para el ingreso de todos los datos, se ha establecido una forma ordenada y lógica, de tal manera que el usuario solamente necesita dar un enter para pasar a llenar la siguiente casilla de datos.

En la parte inferior se cuenta con la ayuda de un esquema colorido que contiene los parámetros a ser llenados en esta pantalla y de esta forma ayudar al usuario a distinguir con facilidad y sin riesgo de confusiones, cuáles son los datos que está ingresando.

Según sea el caso, el programa impide que se introduzcan datos de caudales inicial y final inadecuados o absurdos, esto es, en el caso de cierre de válvulas impedir que el caudal inicial sea mayor que el caudal final y como es lógico también se impide que el caudal final sea mayor que el caudal inicial en el caso de apertura de válvulas. Si se comenten estos errores, el programa automáticamente mostrará los mensajes que se indican en la Figura 4.11.

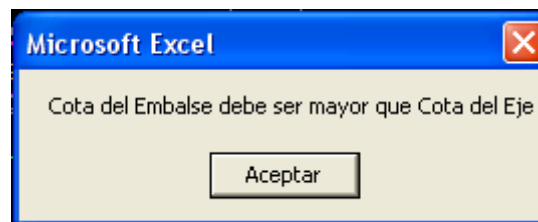
**Figura 4.11.** Mensaje de Advertencia en caso de cometer errores en los datos de Caudales en Cierre de Válvulas



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

Tal y como en el impedimento anterior, se ha diseñado el programa de tal manera que imposibilite el ingreso de valores del Nivel de Agua en el Embalse menores que la Cota Final del Eje del Conducto de Baja presión. En la Figura 4.12 se indica el mensaje que es mostrado en caso de ser introducidos datos absurdos con respecto a los niveles de agua en el embalse.

**Figura 4.12.** Mensaje de Advertencia en caso de cometer errores en los datos de Niveles y Cotas en Cierre y Apertura de Válvulas



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

Se ha optado por utilizar un botón de lista de opciones para el caso del dato del Tiempo de Análisis (tiempo hasta el cual se mostrará el análisis de las oscilaciones en el gráfico) y no una casilla libre para ingresar el dato, debido a que las maniobras producen oscilaciones que durarán durante algunos minutos y sería ilógico medir los tiempos de oscilación en segundos que no den un número exacto de minutos para ser graficados.

**Figura 4.13.** Optimización dada para el tiempo de análisis en una lista de valores que el usuario elige



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

De igual manera, se ha optado por utilizar un botón de lista de opciones para el caso del dato del Tiempo de Duración de la Maniobra (Cierre y/o Apertura), dando valores de números enteros en segundos, puesto que éstas no pueden ser

medidas en forma exacta con decimales de segundos y tampoco pueden ser de una duración demasiado extendida.

**Figura 4.14.** Optimización dada para el tiempo de duración de la maniobra de cierre o apertura de válvulas en una lista de valores que el usuario elige



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

Para el caso del dato del ángulo de Latitud del sitio (útil para calcular el valor de la gravedad con mayor precisión en función del lugar donde se ubique el proyecto en el planeta) se ha optado por mostrar un mensaje de advertencia e impedimento para continuar avanzando en el programa, limitando como es lógico su valor límite a  $90^\circ$  de ambos hemisferios del planeta.

**Figura 4.15.** Mensaje de Advertencia en caso de cometer errores en los datos del Ángulo de Latitud



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

Ya que ésta es una pantalla fundamental en la que se introducen los datos más importantes de todo el programa, en caso de que el usuario olvide llenar alguno de los datos, se ha incluido un sistema automático de control que informa al usuario las casillas donde no se tienen datos.

**Figura 4.16.** Mensajes de Advertencia en caso que el usuario olvide llenar algunas casillas de datos

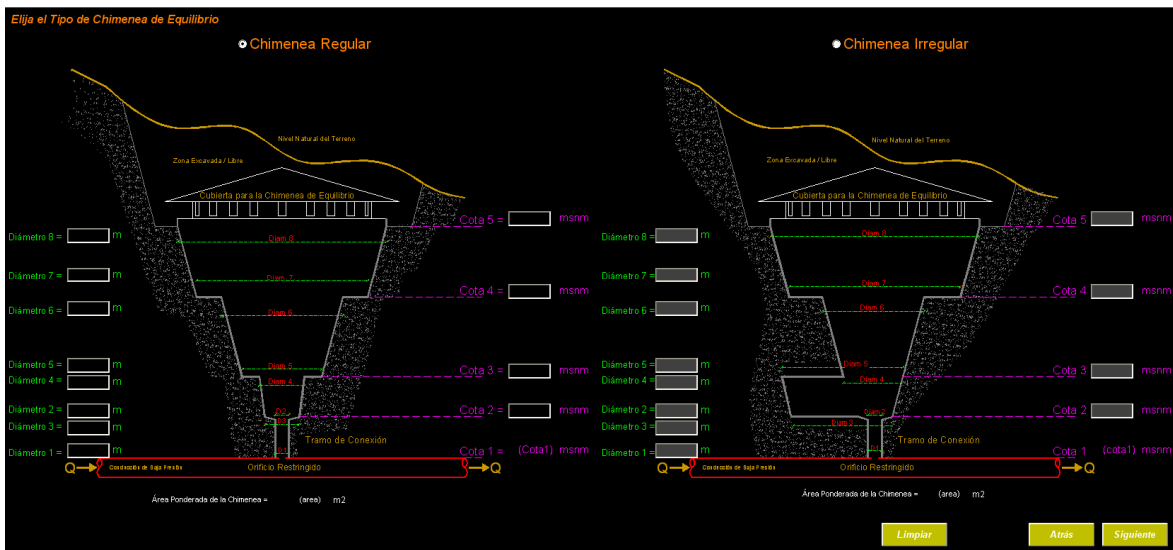


FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

Una parte importante de esta pantalla y con la finalidad de que el usuario pueda tener una noción de los parámetros introducidos y que influyen sobre todos los posteriores cálculos, es la presentación de los parámetros que se calculan inmediatamente con los datos iniciales introducidos, tales como el área del túnel de baja presión (conducto), la velocidad de circulación y el área del orificio restringido. De esta manera el usuario puede estimar con mayor criterio (en caso de ser un pre diseño) los valores a adoptar para las dimensiones de las estructuras de la central.

#### **4.2.2. OPTIMIZACIÓN EN LA INTRODUCCIÓN DE DATOS GENERALES PARA LA SIMULACIÓN**

**Figura 4.17.** Mensajes de Advertencia en caso que el usuario olvide llenar algunas casillas de datos



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

En esta pantalla del programa se tiene como mejora inicial el hecho de poder correr el programa escogiendo entre una chimenea Regular (Simple, con Orificio Restringido o Compuesta con diferentes diámetros) y una Chimenea Compuesta con Cámaras Laterales, con la ayuda de un esquema colorido que contiene los parámetros a ser llenados en esta pantalla y de esta forma ayudar al usuario a distinguir con facilidad y sin riesgo de confusiones, cuáles son los datos que está ingresando. Ambas opciones de chimeneas tienen el mismo sistema de cálculo, sin embargo se las ha separado con la finalidad de que el usuario pueda diferenciar con mayor facilidad los diámetros que está introduciendo y que se ajusten los esquemas lo más próximos posibles a su chimenea en particular. En el manual del usuario se especificará de mejor manera una forma sencilla de introducir los datos.

El programa está diseñado para que los datos de los diámetros y de las cotas de los puntos donde éstos cambian, no se activen si el usuario no ha escogido previamente la opción del tipo de esquema de chimenea que más se ajuste a su necesidad y si éste decide cambiar de opción en cualquier momento, el programa automáticamente elimina todos los datos anteriores y de esta manera evitar confusiones y la infiltración de datos que no corresponden al caso. Como parte de

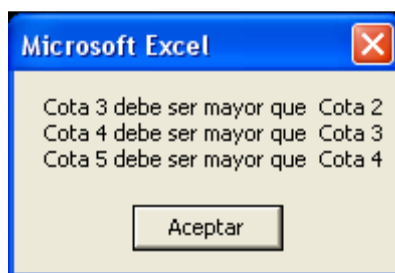
la optimización del programa, en algunas pantallas de forma estratégica se copian valores calculados anteriormente a partir de los datos de otras pantallas o dichos datos en sí. O también puede darse el caso que esos valores calculados y mostrados en pantalla vayan variando a medida que se van llenando los datos como en éste caso en particular con lo que respecta al área ponderada promedio de la chimenea de equilibrio.

Con el fin de que sea más eficaz el programa, se han adaptado botones de limpieza de los datos introducidos, de tal manera de volver a introducirlos de ser el caso en una equivocación o confusión del usuario.

En todos los datos de todas las pantallas se impide el ingreso de datos con signo negativo, caracteres que no sean números así como se impide que posibles resultados negativos (debido a datos absurdos) sean procesados dentro de las respuestas finales. Asimismo en todos los casos se han ubicado las unidades de medición de los parámetros, datos y resultados a lo largo de todo el programa.

Para el ingreso de todos los datos, se ha establecido una forma de llenado ordenada y lógica, de tal manera que el usuario solamente necesita dar un enter para pasar a llenar la siguiente casilla de datos. En esta pantalla en particular y debido a su gran importancia, se ha diseñado un sistema de mensajes de advertencia que impide que se introduzcan datos de las cotas en desorden, es decir que aquellos datos de cotas que se encuentran en partes superiores deberán ser mayores a los de las inferiores, con la finalidad de evitar que el cálculo del área ponderada y el área equivalente de la chimenea se altere y así tampoco se alteren los cálculos basados en estos datos. En caso de cometer errores en este aspecto el programa emite mensajes como el mostrado en la Figura 4.18.

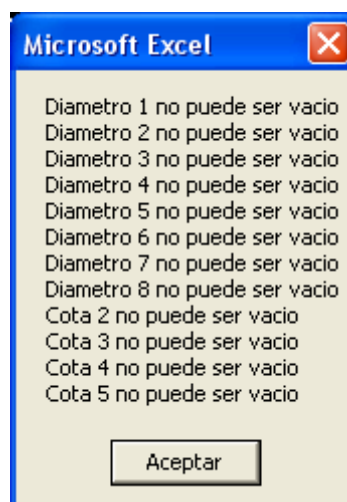
**Figura 4.18.** Mensaje de Advertencia en caso de cometer errores en los datos de las Cotas de las Chimeneas en la pantalla de datos



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

Ya que ésta es una pantalla fundamental en la que se introducen algunos de los datos más importantes de todo el programa, en caso de que el usuario olvide llenar alguno de los datos, se ha incluido un sistema automático que identifica este problema y avisa al usuario las casillas donde no se tienen datos.

**Figura 4.19.** Mensajes de Advertencia en caso que el usuario olvide llenar algunas casillas de datos



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

#### **4.2.3. OPTIMIZACIÓN EN LA OBTENCIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA DE AGUA PARA EL SISTEMA**

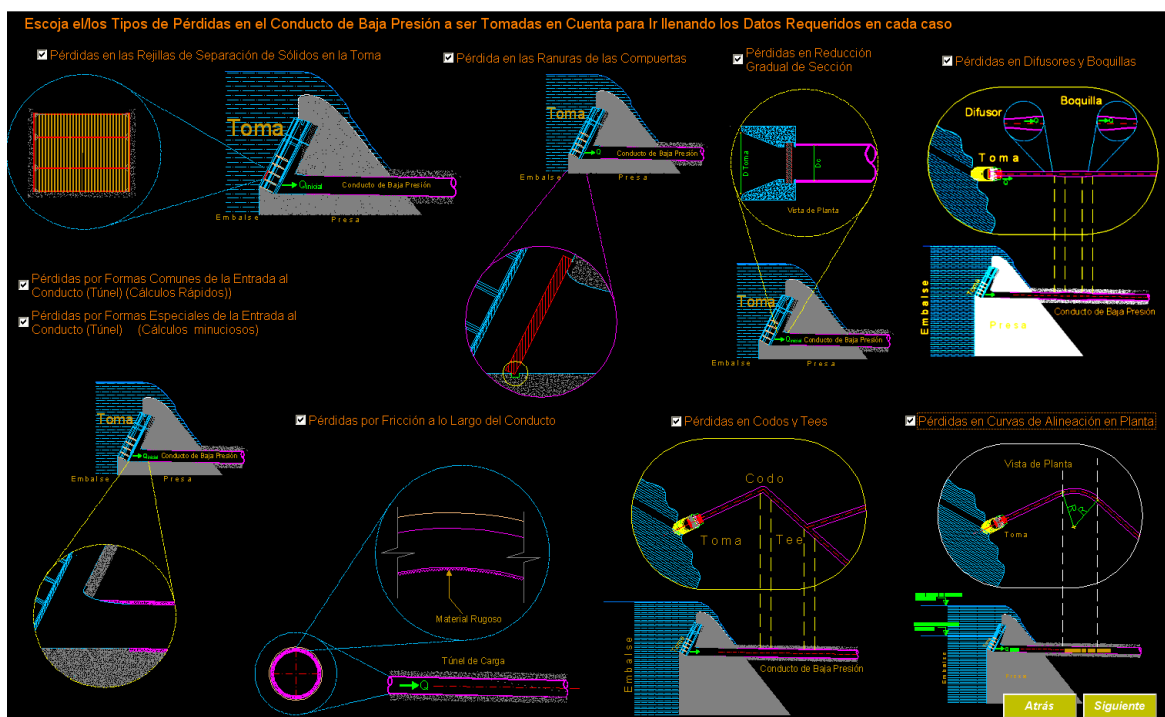
En la tercera pantalla del programa se tiene como mejora inicial el hecho de poder escoger las categorías de pérdidas requeridas para la simulación. Estas serán calculadas posteriormente, a partir de los datos ingresados en cada caso. Las

categorías en las que se han dividido todas las posibles pérdidas que se han considerado en el programa son las siguientes:

- ✓ Pérdidas en las Rejillas de Separación de Sólidos en la Toma
- ✓ Pérdidas en las Ranuras de las Compuertas
- ✓ Pérdidas en la Reducción Gradual de la Sección
- ✓ Pérdidas en Difusores y Boquillas
- ✓ Pérdidas por Formas Comunes de la Entrada al Túnel de Baja Presión (Cálculos Rápidos)
- ✓ Pérdidas por Formas Especiales de la Entrada al Túnel de Baja Presión (Cálculos Minuciosos)
- ✓ Pérdidas por Fricción a lo largo del Conducto (Túnel de baja presión)
- ✓ Pérdidas en Codos, Conversiones y Tees
- ✓ Pérdidas en Curvas de Alineación en Planta del Conducto



**Figura 4.20.** Pantalla para escoger el tipo de pérdidas que se desean calcular en el Sistema de la Central para la Chimenea de Equilibrio



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

Para facilidad del usuario se han ubicado botones que le permiten escoger las opciones que considere necesario, pudiendo así escoger una sola categoría, varias de ellas o todas. El programa está diseñado para que únicamente se muestren en las próximas pantallas aquellos datos, figuras y opciones que corresponden a las categorías escogidas, mientras que aquellas que no han sido seleccionadas no se presentan al usuario en las próximas pantallas.

En la parte inferior a cada nombre de categoría, se cuenta con la ayuda de un esquema colorido que contiene una ampliación del sitio de la central al cual corresponde la pérdida y de ésta manera el usuario pueda identificar de manera más fácil, didáctica, gráfica, cómoda y rápida la categoría a la cual pertenece la pérdida que desea calcular sin dar lugar a posibles confusiones.

En caso que el usuario ya haya escogido algunas de las opciones de entre las planteadas y continúe hacia las siguientes pantallas y necesite realizar alguna rectificación, se ha pensado en optimizar el programa dando la oportunidad de volver con los botones ATRÁS hacia las pantallas anteriores, de tal manera que

se pueda modificar todo aquello que se desee, sin tener que volver a llenar todos los datos, sino que únicamente se cambiarán los que sean necesarios. Así como los botones SIGUIENTE que sirven para continuar hacia la pantalla que continúa una vez llenados o modificados los datos deseados.

#### 4.2.3.1. Optimización en la obtención de las pérdidas de carga de agua en las Rejillas de Separación de Sólidos en la Toma

**Figura 4.21.** Pantalla de las pérdidas de carga de agua en las Rejillas de Separación de Sólidos en la Toma

Ubicación y Esquema de una Rejilla de Separación de Sólidos en la Toma

En Función de los Esquemas y Parámetros, llene los Datos:

H: Alto de Cada Rejilla  m

B: Ancho de Cada Rejilla  m

Número de Rejillas en la Toma

Caudal por Cada Rejilla  (q) m<sup>3</sup>/s

h: Separación entre Barrotes  m

s: Ancho de los Barrotes  m

Número de Barrotes por Rejilla  (número)

Área Neta Total de Rejillas  (área) m<sup>2</sup>

Velocidad de Agua por las Rejillas =  (Velocidad) m/s

Sección de los Barrotes de las Rejillas

Coefficiente de forma de barrotes Cf =  (Cf)

θ: Ángulo de inclinación de la Reja  °

Coefficiente de Pérdida de Carga K:  (K)

Pérdida de Carga en las Rejillas de Separación de Sólidos en la Toma =  (perdidarejilla) m

# de Sección:	1	2	3	4	5	6	7
Forma:							
Cf =	2.42	1.63	1.67	1.62	0.92	0.75	1.79

Coeeficientes en función de la Forma de Sección de los Barrotes (Cf)

FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

Al igual que para todas las pantallas de introducción de datos, éstos se procesen automáticamente en el entorno que maneja el usuario en Visual Basic, sin tener que recurrir a las hojas de Microsoft Excel a ningún momento.

**Figura 4.22.** Hoja de Cálculo de las pérdidas de carga de agua en las Rejillas de Separación de Sólidos en la Toma

DATOS QUE SE COPIAN DESDE OTRAS VENTANAS		
Q: Caudal de Diseño	181.00	m <sup>3</sup> /s
g: Gravedad	9.78	m/s <sup>2</sup>
PÉRDIDA EN LAS REJILLAS DE LA ENTRADA AL TÚNEL DE CONDUCCIÓN DE BAJA CARGA		
b: Distancia entre barrotes	0.02	m
s: Ancho de barrotes	0.07	m
θ: Ángulo de Inclinación de las Rejillas de las Ventanas (0.5 : 1)	30	°
Ancho de Ventanas =	5	m
Altura de Ventanas =	5	m
# Ventanas =	7	
# Barrotes =	56	
Ao: Area neta de cada Ventana =	5.40	m <sup>2</sup>
Ab: Area bruta de cada Ventana =	25	m <sup>2</sup>
s/b =	3.500	
Cf: Coeficiente de Forma de las Barras =	1.83	
k <sub>(1 ventana)</sub> : Coeficiente de Pérdida de Carga=	4.862	
Caudal para Cada Ventana =	25.86	m <sup>3</sup> /s
Velocidad de Agua en la Rejilla =	4.79	m/s
ΔH: Pérdidas en cada Rejilla =	5.6985	m
<b>ΔH: Pérdidas Totales en Rejillas =</b>	<b>39.890</b>	<b>m</b>

<b>CLAVE</b>
DATOS DESDE PROGRAMA
FORMULAS O AUTOMATICO
<b>RESULTADOS</b>
<i>DESDE ANTES</i>

FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

Ésta pantalla es óptima y de fácil uso, pues para la introducción de los datos es necesario únicamente guiarse en los gráficos de la parte derecha. A medida que se los va llenando, automáticamente se calculan ciertos parámetros que guían al usuario en la estimación de las dimensiones de sus estructuras siendo útiles sus valores para ratificar o rectificar el diseño definido.

Se ha decidido ayudar al usuario para evitar posibles equivocaciones limitando con listas para los datos de las dimensiones y número de barrotes al mismo tiempo que las gráficas son claras en cuanto a la explicación de estos parámetros.

En el caso de los coeficientes de pérdida, no se tiene opción a equivocaciones, puesto que el usuario únicamente escogerá la forma de los barrotes y automáticamente tendrá la certeza que se estará calculando la pérdida en función de los valores de coeficiente de pérdida que brinda la bibliografía respectiva.

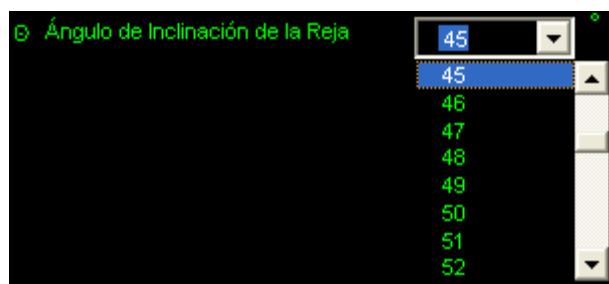
**Figura 4.23.** Lista de posibles secciones de barros que ayudan al usuario a no recurrir a otras fuentes para determinar los coeficientes de pérdida



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

Es útil también para el usuario el que se haya limitado con una lista los valores de inclinación de la rejilla y de ésta manera el programa no procese datos posiblemente ilógicos.

**Figura 4.24.** Lista de posibles ángulos de inclinación de la reja



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

En todos los datos se impide el ingreso de datos con signo negativo, caracteres que no sean números así como se impide que posibles resultados negativos (debido a datos absurdos) sean procesados dentro de las respuestas finales. Asimismo se han ubicado las unidades de medición de los parámetros, datos y resultados.

Para el ingreso de todos los datos, se ha establecido el orden del llenado de los datos de una forma ordenada y lógica, de tal manera que el usuario solamente necesita dar un enter para pasar a llenar la siguiente casilla de datos.

#### 4.2.3.2. Optimización en la obtención de las pérdidas de carga de agua en formas comunes de entrada al conducto (túnel de baja presión)

**Figura 4.25.** Pantalla de las pérdidas de carga de agua en formas comunes de entrada al túnel de baja presión

**Esquema de la Entrada al Conducto de Baja Presión:**

**Formas Comunes (Vista Lateral) de la Entrada al Conducto**

6 Posibles Formas de Entradas Comunes

**Parámetros Fijados Anteriormente:**

Diámetro del Conducto = (anterior) m  
 Área Media del Conducto = (anterior) m<sup>2</sup>  
 Gravedad para el Sitio = (anterior) m/s<sup>2</sup>  
 Velocidad de Agua en Conducto = (anterior) m/s

**En Función de los Esquemas y Parámetros, llene los Datos:**

Forma en Vista Lateral de la Entrada al Túnel

Inclinación del Tubo de Entrada  
 (Para la Forma Recta Inclinada Exclusivamente)  
 (valores entre 30 y 90 grados)

Coefficiente de Pérdida de Carga por la forma de entrada (k)

Pérdida Total de Carga por la Forma de la Entrada al Conducto de Baja Carga = (perdida) m

1 Forma Recta  $k = 0.5$

2 Forma Recta Inclinada  $k = f(\theta)$

3 Forma de Boquilla Cónica Interna  $k = 0.15 - 0.25$

4 Forma de Boquilla Cónica salida  $k = 0.5$

5 Forma Parabólica con Obstrucción en medio  $k = 0.06 - 0.10$

6 Forma de Elipse  $k = 0.04 - 0.10$

Atrás Siguiendo

FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

Para mayor facilidad se han separado las formas de entrada más comunes que se tienen en proyectos hidroeléctricos de aquellas que no son tan comunes, con la finalidad de que el usuario elija entre escoger coeficientes calculados de forma rápida y aquellos coeficientes calculados minuciosamente como se verá en la pantalla respectiva. En este caso únicamente se tienen seis formas básicas de entrada.

Al igual que para todas las pantallas de introducción de datos, éstos se procesan automáticamente en el entorno que maneja el usuario en Visual Basic, sin tener que recurrir a las hojas de Microsoft Excel a ningún momento.

**Figura 4.26.** Hoja de Cálculo de las pérdidas de carga de agua en formas comunes de entrada al túnel de baja presión

DATOS QUE SE COPIAN DESDE OTRAS VENTANAS			CLAVE
D: Diametro del Conducto	7.100	m	
Ac: Area del conducto	39.592	m <sup>2</sup>	DATOS DESDE PROGRAMA
g: Gravedad	9.782	m/s <sup>2</sup>	FORMULAS O AUTOMATICO
V: Velocidad de flujo en tunel	4.572	m/s	RESULTADOS
			DESDE ANTES
Inclinación del Tubo de Entrada (Para la Forma Recta Inclinada Exclusivamente)	30.00	°	
Coefficiente de Pérdida de Carga forma de entrada (K) (Para la Forma Recta Inclinada Exclusivamente)	0.91		
Coefficiente de Pérdida de Carga forma de entrada (K)	0.50		
<b>Pérdida de carga por entrada <math>\Delta H =</math></b>	<b>0.53</b>	<b>m</b>	
<b>Pérdida de carga por entrada <math>\Delta H</math> (Inclinada)=</b>	<b>0.97</b>	<b>m</b>	

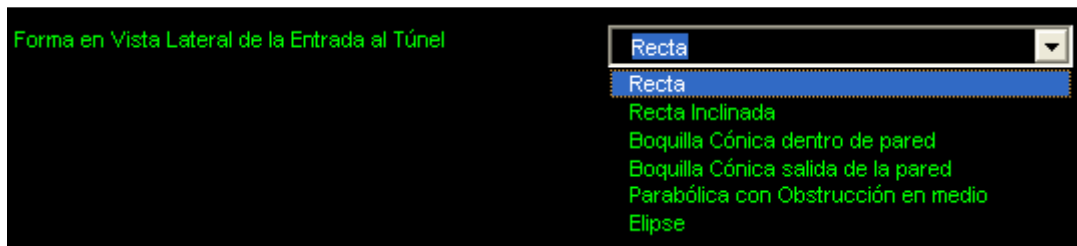
FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

Esta pantalla es de fácil uso, pues para la introducción de los datos es necesario únicamente guiarse en los gráficos de la parte derecha. A medida que se los va llenando, automáticamente se calculan ciertos parámetros que guían al usuario en la estimación de las dimensiones de sus estructuras siendo útiles sus valores para dar más credibilidad al criterio ingenieril (en caso de ser un pre diseño).

Antes de llenar los datos necesarios, el usuario tiene la ventaja de poder conocer algunos de los valores de los parámetros que han sido introducidos anteriormente como datos o han sido calculados por el programa, tales como: diámetro del túnel de baja presión, área del túnel de baja presión, velocidad de circulación del flujo, gravedad en el sitio.

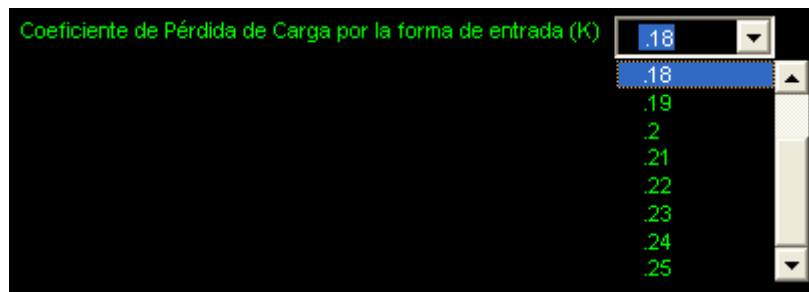
Otra ayuda prevista para el usuario es minimizar el riesgo de equivocaciones ofreciendo listas de selección para escoger datos de las formas de las entradas y de los posibles valores de los coeficientes de pérdida propuestos en la bibliografía. Las gráficas son claras en cuanto a la explicación de estos parámetros.

**Figura 4.27.** Lista de posibles formas en vista lateral de la entrada al túnel para determinar los coeficientes de pérdida



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

**Figura 4.28.** Lista de posibles coeficientes de pérdida (k) para una de las formas



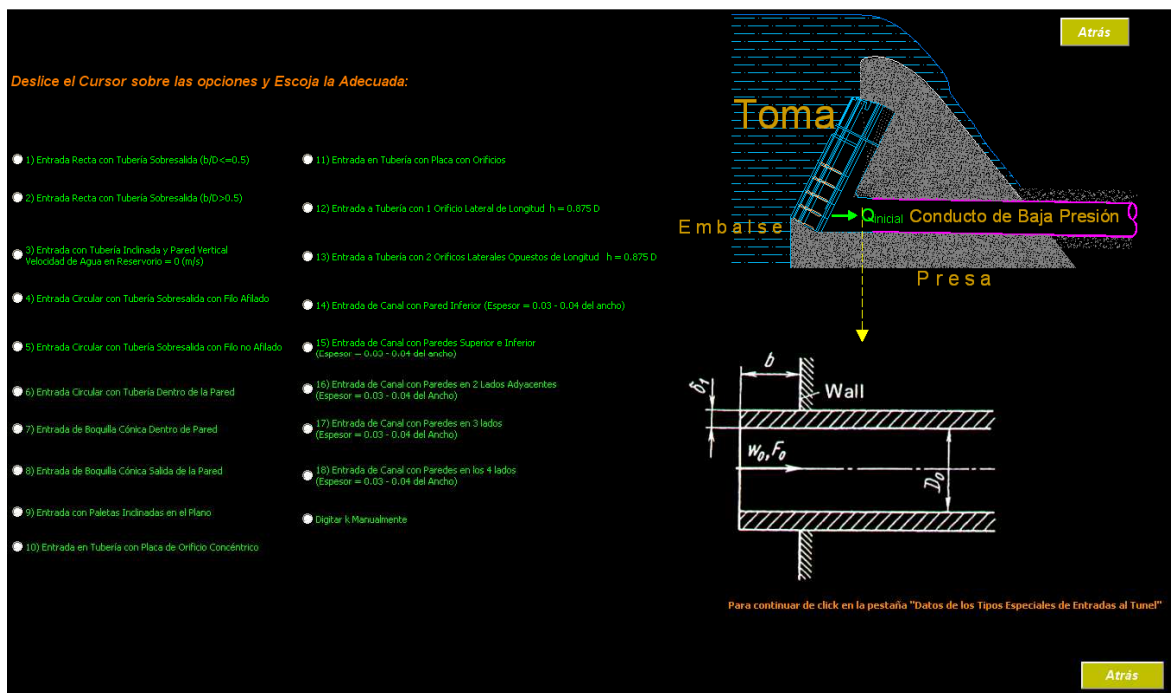
FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

En todos los datos se impide el ingreso de datos con signo negativo, caracteres que no sean números así como se impide que posibles resultados negativos (debido a datos absurdos) sean procesados dentro de las respuestas finales. Asimismo se han ubicado las unidades de medición de los parámetros, datos y resultados.

Para los datos se ha establecido un orden lógico de llenado, de tal manera que el usuario solamente necesita dar un enter para pasar a llenar la siguiente casilla de datos.

#### 4.2.3.3. Optimización en la obtención de las pérdidas de carga de agua en formas especiales de entrada al conducto (túnel de baja presión)

**Figura 4.29.** Pantalla de opciones de tipos de pérdidas de carga de agua en formas especiales de entrada al túnel de baja presión



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

Se ha separado el ingreso de datos para las geometrías de entrada más frecuentemente utilizadas de aquellas más complejas. En esta pantalla, el usuario tiene la ventaja de poder escoger entre 18 tipos de opciones de entradas especiales y una adicional para introducir el coeficiente de pérdidas manualmente. La ayuda principal de esta pantalla permite al usuario deslizarse con el cursor sobre los botones de opción y visualizar paralelamente el gráfico en la parte derecha, en donde se indica el esquema correspondiente a cada geometría, de tal manera que se cuenta con una ayuda gráfica muy útil e inmediata, sin tener que recurrir a otras fuentes bibliográficas para estimar las pérdidas producidas en la entrada al túnel de baja presión. A su vez, el usuario solamente podrá escoger una de las formas de entrada, coincidiendo así con la realidad.

Una vez que el usuario escoge su forma de entrada especial, pasará a llenar los datos necesarios de ésta en la misma pantalla. Se cuenta también con una segunda hoja, en la cual solamente están activados los campos específicos para el caso escogido, mientras que los otros están desactivados; el usuario no tiene opción de equivocarse llenando los campos de otras formas de entrada que no



han sido escogidas. Se tiene siempre la ayuda de un gráfico de definición de geometrías y dimensiones.

En todos los datos se impide el ingreso de datos con signo negativo, caracteres que no sean números así como se impide que posibles resultados negativos (debido a datos absurdos) sean procesados dentro de las respuestas finales. Asimismo se han ubicado las unidades de medición de los parámetros, datos y resultados.

Para el ingreso de todos los datos, se ha establecido el orden del llenado de los datos de una forma ordenada y lógica, de tal manera que el usuario solamente necesita dar un enter para pasar a llenar la siguiente casilla de datos.

**Figura 4.30.** Pantalla de llenado de datos para las pérdidas de carga de agua en formas especiales de entrada al túnel de baja presión

**Llene los Datos de Acuerdo a la Forma Escogida:**

**DATOS PARA CASO 1 y/o CASO 2**

Longitud sobresalida  $b =$   m

Espesor de tubería  $d =$   m

$d/D =$   (d/D)

$b/D =$   (b/D)

Escoja el valor Más próximo al calculado de  $b/D$ :

**DATOS PARA CASO 3**

f: Alto del Orificio de Entrada  m

a: Ancho del Orificio de Entrada  m

Relación  $f/a =$   (f/a)

Ángulo de Inclinación Conductor  °

Escoja el valor Más próximo al calculado de  $f/a$ :

**DATOS PARA CASO 4, 5 y/o 6**

r: Radio de Curvatura Boga  m

$r/D =$   (r/D)

**DATOS PARA CASO 7**

f: Profundidad de Sección Inicial  m

Ángulo de Abertura de Cono  °

ID =  (ID)

Escoja el valor Más próximo al calculado de ID:

**Toma**

**Embalse**

**Presal**

**Conducto de Baja Presión**

**Wall**

$w_0, F_0$

$D_0$

D: Diámetro del Conductor = 7.1 m

**DATOS PARA CASO 8**

f: Profundidad de Sección Inicial  m

Ángulo de Abertura de Cono  °

ID =  (ID)

Escoja el valor Más próximo al calculado de ID:

**DATOS PARA CASO 9**

Área Orificios Entre Paletas  m<sup>2</sup>

b: Separación entre paletas  m

f (Área Orificios/Área Total) =  (f)

**DATOS PARA CASOS 10 Y 11**

Área de los Orificios  m<sup>2</sup>

f (Área Orificios/Área Total) =  (f)

**DATOS PARA CASOS 12 y/o 13**

Altura de Orificio  $t_1 =$  (m) 0.8750  m

Ancho de Orificio  $b =$   m

f (Área Orificios/Área Total) =  (f)

**DATOS PARA CASOS 14, 15, 16, 17, y/o 18**

Espesor del Canal de Entrada  $e =$   m

Espesor/Ancho =  $(0.03 \leq e/b \leq 0.04)$

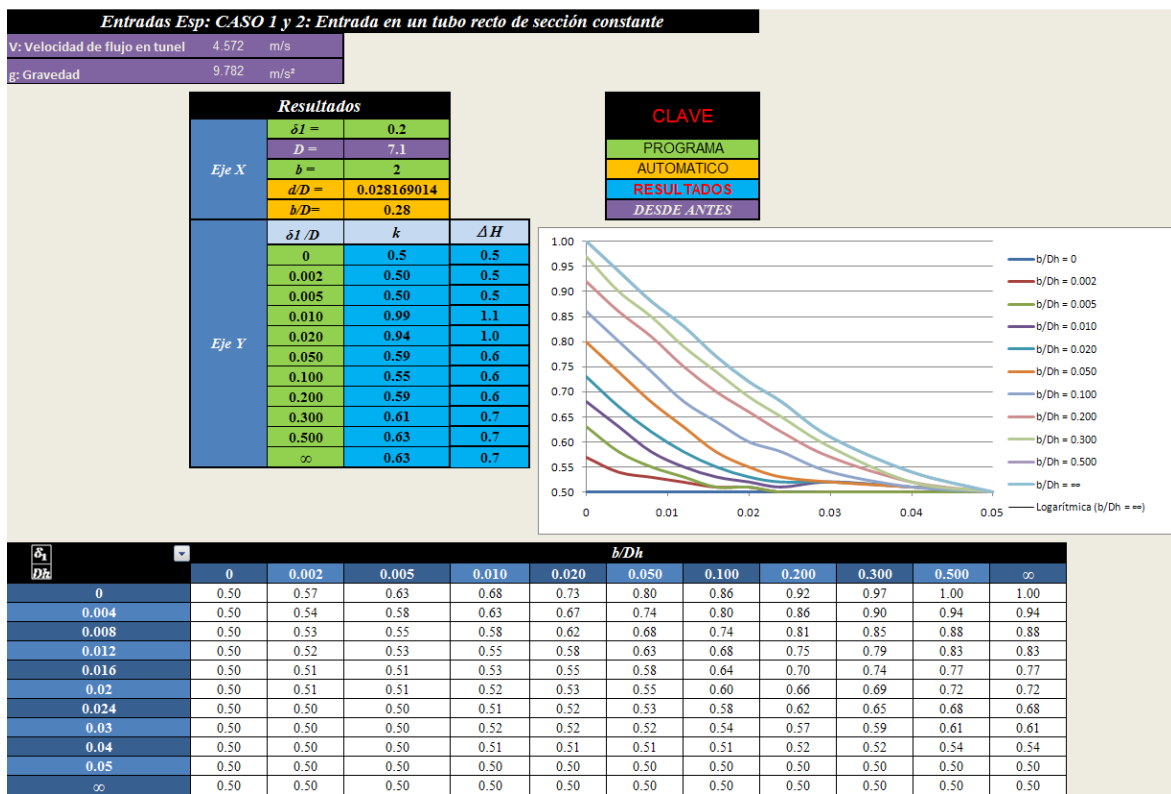
Coefficiente de Pérdida de Carga  $K =$

Pérdida de Carga en la Entrada  $H =$   m

FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

El resultado del coeficiente de pérdidas y la pérdida de carga producida, se muestra al final de la pantalla. Los valores seguirán acumulándose para la pérdida de carga total que se tiene al final de todas las pantallas.

**Figura 4.31.** Ejemplo de hoja de Cálculo de las pérdidas de carga de agua en formas especiales de entrada al túnel de baja presión

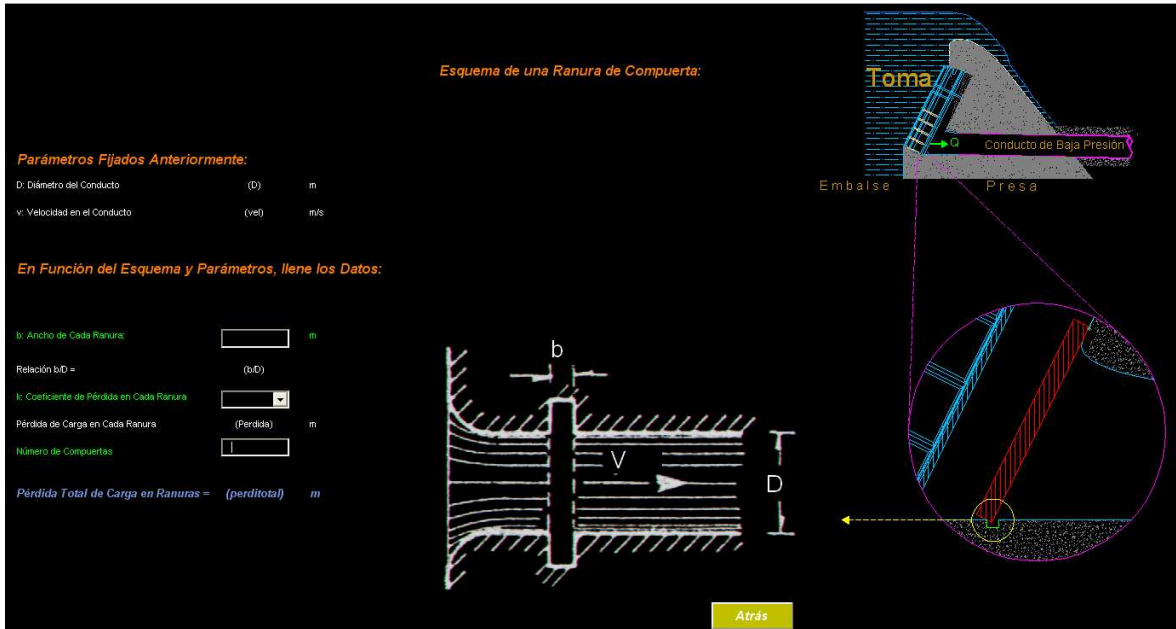


FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

En caso que el usuario ya haya escogido algunas de las opciones de entre las planteadas y continúe hacia las siguientes pantallas y necesite realizar alguna rectificación, se ha pensado en optimizar el programa dando la oportunidad de volver con los botones ATRÁS hacia las pantallas anteriores, de tal manera que se pueda modificar todo aquello que se desee, sin tener que volver a llenar todos los datos, sino que únicamente se cambiarán los que sean necesarios.

**4.2.3.4. Optimización en la obtención de las pérdidas de carga de agua en las ranuras de las compuertas de entrada al conducto (túnel de baja presión)**

**Figura 4.32.** Pantalla de opciones de tipos de las pérdidas de carga de agua en las ranuras de las compuertas de entrada al conducto (túnel de baja presión)

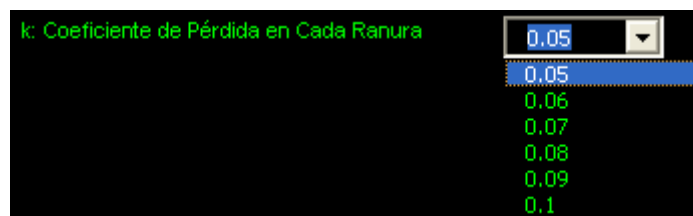


FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

Para la introducción de los datos es necesario únicamente guiarse en los gráficos explicativos de la parte derecha. A medida que se los va llenando, automáticamente se calculan ciertos parámetros que guían al usuario en la estimación de las dimensiones de sus estructuras.

Se mantiene la opción de selección de parámetros a partir de una lista.

**Figura 4.33.** Lista de posibles coeficientes de pérdida para ranuras de compuertas



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

El programa calcula la pérdida para una sola compuerta, sin embargo, el usuario puede introducir el número de compuertas que se tienen en la conducción así

como su geometría. El usuario podrá incluir las pérdidas que se producen en todas las ranuras de compuerta. Se restringe el ingreso de información errónea. Se indican las unidades de los parámetros, datos y resultados.

Para el ingreso de todos los datos, se ha establecido un orden del llenado lógico, de tal manera que el usuario solamente necesita dar un enter para pasar a llenar la siguiente casilla de datos.

**Figura 4.34.** Hoja de Cálculo de las pérdidas de carga de agua en las ranuras de las compuertas de entrada al conducto (túnel de baja presión)

DATOS QUE SE COPIAN DESDE OTRAS VENTANAS		CLAVE
D: Diámetro del Conducto	7.100 m	
g: Gravedad	9.78 m/s <sup>2</sup>	FORMULAS O AUTOMATICO
V: Velocidad de flujo en tunel	4.572 m/s	RESULTADOS
b: Ancho de cada Ranura =	0.50 m	DESDE ANTES
Relación b/D (como condición para el valor de k)=	0.07	
Coefficiente de Pérdida de Carga forma de entrada (K)	0.07	
Número de Compuertas =	1.00	
<b>Pérdida de carga por ranuras <math>\Delta H =</math></b>	<b>0.075 m</b>	

FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

La pérdida final de carga en las ranuras de todas las compuertas de entrada se muestra calculada al final de la pantalla para que el usuario visualice el valor que el programa ha calculado y en caso de rectificaciones o comprobaciones no tenga que esperar al final del programa para saberlo.

#### 4.2.3.5. Optimización en la obtención de las pérdidas de carga de agua en la reducción gradual de la sección de entrada al conducto (túnel de baja presión)

**Figura 4.35.** Pantalla de pérdidas de carga de agua en la reducción gradual de la sección de entrada al conducto (túnel de baja presión)

*Esquema de una Transición al Inicio del Conducto:*

*En Función del Esquema y Parámetros, llene los Datos:*

DToma: Ancho Inicial del Conducto:  m

Dc: Ancho Final del Conducto:  m

Longitud del tramo de Transición:  m

Ángulo de Reducción Gradual: 21.239 °

Coefficiente pérdida local (K): 0.54

Pérdida Total de Carga por Transición: 0.577 m

**Vista de Planta**

**Toma**

**Embalse**      **Presa**

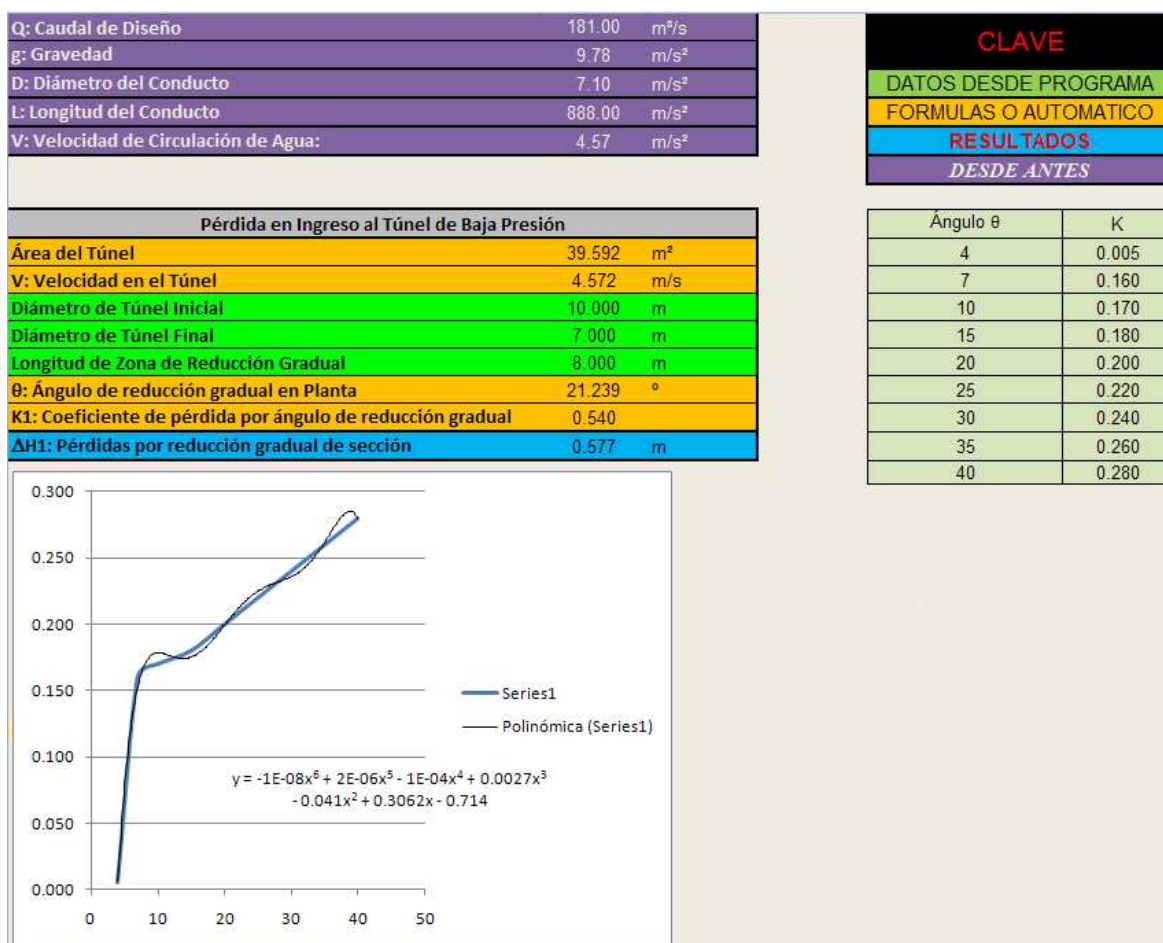
Conducto de Baja Presión

**Atrás**

FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

Para la introducción de los datos se tiene la ayuda de gráficos explicativos. A medida que se los va llenando, automáticamente se calculan ciertos parámetros que guían al usuario en la estimación de las dimensiones de sus estructuras, tal como el ángulo de reducción gradual que calcula el programa automáticamente en función de los datos dados, así como el coeficiente de pérdida y la carga de agua en función de los datos introducidos en hojas anteriores. Es una pantalla sencilla de cálculo, pero de mucha utilidad, puesto que en la gran mayoría de obras de toma se tiene que reducir las dimensiones de la entrada de forma gradual y no bruscamente y así evitar pérdidas de carga excesivas.

**Figura 4.36.** Hoja de Cálculo de las pérdidas de carga de agua en la reducción gradual de la sección de entrada al conducto (túnel de baja presión)



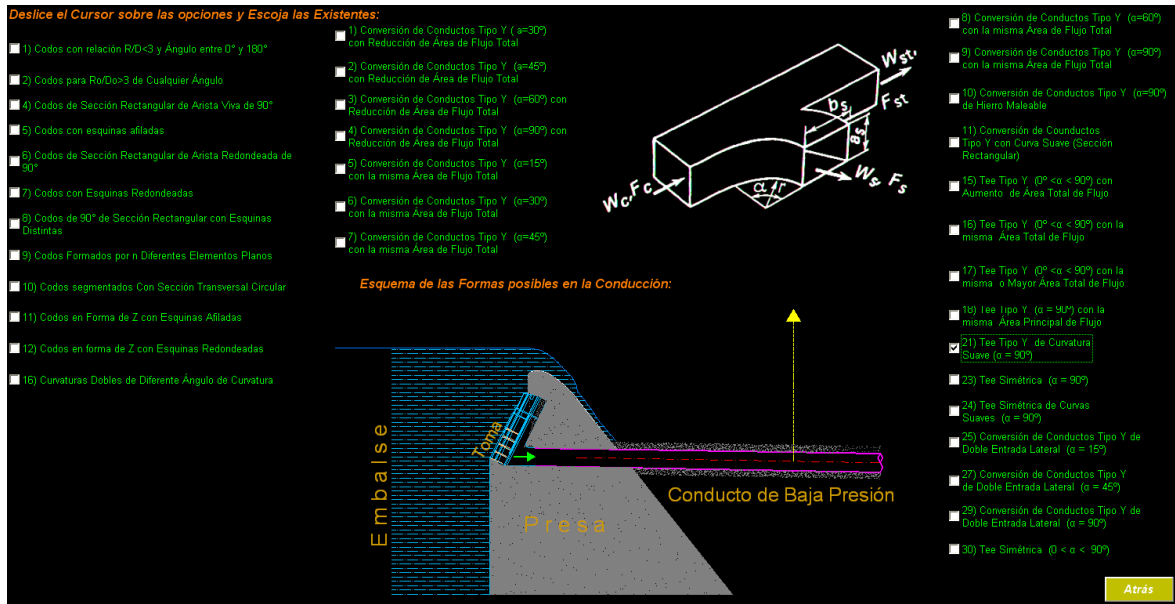
FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

En todos los datos se impide el ingreso de datos con signo negativo, caracteres que no sean números así como se impide que posibles resultados negativos (debido a datos absurdos) sean procesados dentro de las respuestas finales. Se muestran las unidades de los parámetros, datos y resultados.

Para el ingreso de todos los datos, se ha establecido el orden del llenado lógico, de tal manera que el usuario solamente necesita dar un enter para pasar a llenar la siguiente casilla de datos.

#### 4.2.3.6. Optimización en la obtención de las pérdidas de carga de agua en Codos, Tees y Conversiones posiblemente presentes en el conducto (Túnel de baja presión)

**Figura 4.37.** Pantalla de opciones de tipos de pérdidas de carga de agua en Codos, Tees y Conversiones posiblemente presentes en el conducto



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

Las pérdidas de carga localizadas también se presentan en las diferentes formas que pueden tener los túneles de baja presión en toda su longitud, debido a múltiples razones tales como: topografía de la zona, geología del terreno a excavar, necesidad de curvaturas debido al cruce del proyecto con zonas protegidas o inapropiadas para el paso del túnel, conexión del túnel del proyecto con el de otros proyectos, desviación de parte del agua que fluye hacia otros túneles para multipropósitos, diseños propios del túnel que se ajustan a otras necesidades, etc. Estas pérdidas de carga no son tan usuales en proyectos comunes y corrientes, sin embargo el alcance del programa ha llegado al punto que el usuario puede calcular con la introducción de sus datos las pérdidas producidas en 34 diferentes formas de estructuras de curvatura, desviación o conexión divididas en la siguiente manera:

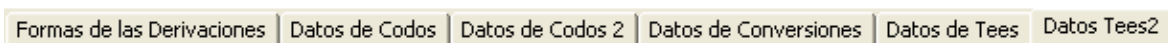
- ✓ 8 tipos de TEES (donde los flujos se subdividen hacia 2 conductos)
- ✓ 12 tipos de CODOS

- ✓ 14 tipos de CONVERSIONES (donde los flujos convergen hacia un conducto)

La optimización principal de ésta pantalla consiste en que el usuario a medida que desliza el cursor sobre los botones de opción, en el gráfico de la parte derecha se irá indicando el esquema correspondiente al tipo de estructura del túnel posible, de tal manera que éste cuenta con una ayuda gráfica muy útil e inmediata, sin tener que recurrir a otras fuentes bibliográficas para estimar las pérdidas producidas. A diferencia de la pantalla para escoger los tipos de entradas al conducto, en ésta el usuario podrá escoger el número de estructuras que desee, pues una forma no es mutuamente excluyente de otras, es decir, varias de ellas pueden estar presentes a lo largo del túnel de baja presión hasta la chimenea de equilibrio.

Una vez que el usuario escoge la/las estructuras donde se producirán pérdidas de carga, pasará a llenar los datos necesarios de éstas en la misma pantalla, pero que cuenta con 5 hojas adicionales, en las cuales solamente están activados los campos específicos de los casos escogidos, mientras que los otros están desactivados; de esta manera el usuario no tiene opción a equivocarse llenando los campos de otras estructuras que no han sido escogidas por éste. Otra optimización de la pantalla de llenado de datos es, tal y como en otras pantallas anteriores, la ayuda gráfica que se tiene al lado de cada grupo de datos y que sirve de guía para los parámetros a ser llenados.

**Figura 4.38.** Botones de la pantalla principal y 5 hojas de llenado de datos



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

En todos los datos se impide el ingreso de datos con signo negativo, caracteres que no sean números así como se impide que posibles resultados negativos (debido a datos absurdos) sean procesados dentro de las respuestas finales. Asimismo se han ubicado las unidades de medición de los parámetros, datos y resultados.



Para el ingreso de todos los datos, se ha establecido un orden de llenado lógico, de tal manera que el usuario solamente necesita dar un enter para pasar a llenar la siguiente casilla de datos.

**Figura 4.39.** Pantalla de llenado de datos #1 para las pérdidas de carga de agua en Codos

**Llene los Datos de Acuerdo a la Forma Escogida:**

**1) Codos con relación Ro/Do > 3 y Ángulo entre 0° y 180°**

Ángulo de Apertura:  °

Ro: Radio de Giro Interno:  m

Para Tuberías Circulares  $ao = bo = Do$

ao(Do): Ancho de la Tubería:  m

so(Do): Alto de la Tubería:  m

K: Coeficiente de Pérdida = 0.109

H: Pérdida de Carga = 0.116 m

**2) Codos con relación Ro/Do > 3 y Ángulo Cualquiera**

Ángulo de Apertura:  °

Ro: Radio de Giro Interno:  m

Para Tuberías Circulares  $ao = bo = Do$

ao(Do): Alto de la Tubería:  m

Relación Ro/Do Calculada = (Ro/Do)

Escoja el Valor so(bo) más aproximado al Calculado:

m

K: Coeficiente de Pérdida = (k)

H: Pérdida de Carga = (H) m

**4) Codos de Sección Rectangular de Arista Viva de 90°**

Lo: Longitud Total de Codo:  m

D: Diámetro de Codo:  m

bo: Ancho de Codo a la Entrada:  m

b1: Ancho de Codo a la Salida:  m

so: Alto de Codo:  m

Relación so(bo) Calculada = (so(bo))

Escoja el Valor so(bo) más aproximado al Calculado:

m

K: Coeficiente de Pérdida = (k)

H: Pérdida de Carga = (H) m

**5) Codos con Esquinas Abisadas**

Ángulo de Apertura:  °

ao(Do): Alto de la Tubería:  m

bo(Do): Ancho de la Tubería:  m

K: Coeficiente de Pérdida = (k)

H: Pérdida de Carga = (H) m

**6) Codos de Sección Rectangular de Arista Redondeada de 90°**

Ángulo de Apertura:  °

ao: Alto de la Tubería:  m

bo: Ancho Inicial de la Tubería:  m

b1: Ancho final de la Tubería:  m

r: Radio de Curvatura del Eje:  m

Relación r/bo(bo) Calculada = (r/bo(bo))

Escoja el Valor so(bo) más aproximado al Calculado:

m

K: Coeficiente de Pérdida = (k)

H: Pérdida de Carga = (H) m

**7) Codos con Esquinas Redondeadas**

Ángulo de Apertura:  °

r: Radio de Curvatura del Eje:  m

Para Tuberías Circulares  $ao = bo = Do$

ao(Do): Alto de la Tubería:  m

bo(Do): Ancho de la Tubería:  m

K: Coeficiente de Pérdida = (k)

H: Pérdida de Carga = (H) m

**8) Codos de 90° de Sección Rectangular con Esquinas Distintas**

a) Codo 90° (esquina interna redonda y externa abisada)

b) Codo 90° (esquina interna redonda y externa inclinada 45°)

c) Codo con esquina interna inclinada 45° y externa abisada

d) Codo (esquina interna con 2 inclinaciones de 30° y externa (R))

e) Codo (esquina interna con 2 inclinaciones de 30°, externa 30°)

f) Codo 90° (sección rectangular con Geometría Aerodinámica)

ao: Alto de la Tubería:  m

bo: Ancho de la Tubería:  m

ro: Radio del Gráfico:  m

r1: Radio del Gráfico:  m

l1: Largo de Esquina:  m

K: Coeficiente de Pérdida = (k)

H: Pérdida de Carga = (H) m

**Siguiente**

FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

**Figura 4.40.** Pantalla de llenado de datos #2 para las pérdidas de carga de agua en Codos

**9) Codos Formados por n Diferentes Elementos Planos**

- a) Codo de 45° de 3 elementos
- b) Codo de 60° de 3 elementos
- c) Codo de 90° de 3 elementos de 45° cada uno

**10) Codos Segmentados Con Sección Transversal Circular**

- a) Codo de 90° de 5 elementos de 22.5° cada uno
- b) Codo de 90° de 4 elementos de 30° cada uno
- c) 2 Codos de 30° cada uno con sección transversal circular

**11) Codos en Forma de Z con Esquinas Abolladas**

- a) Codo Z de 90° Sección transversal rectangular
- b) 2 Codos de 90° con sección transversal rectangular

**12) Codos en forma de Z con Esquinas Redondeadas**

- a) 2 Codos de Cualquier Apertura Situados en el Mismo Plano
- b) 2 Codos de Cualquier Apertura Situados en Planos Perpendiculares

**16) Codos en forma de S con Esquinas Redondeadas**

- a) 2 Codos de Cualquier Apertura Situados en el Mismo Plano
- b) 2 Codos de Cualquier Apertura Situados en Planos Perpendiculares

**Datos para Caso 10 a, b y c:**

- ro: Radio de Curvatura:  m
- Longitud cada elemento:  m
- Do: Diámetro Interno:  m
- K: Coeficiente de Pérdida = 0.299
- H: Pérdida de Carga =  m

**Para Tuberias Circulares no = bo = Do**

- Ángulo de Apertura:  °
- ro: Radio de Curvatura:  m
- K: Coeficiente de Pérdida =  (K)
- H: Pérdida de Carga =  m

**Para Tuberias Rectangulares**

- so(Do): Alto de la Tubería:  m
- bo(Do): Ancho de la Tubería:  m
- K: Coeficiente de Pérdida =  (K)
- H: Pérdida de Carga =  m

**Para Tuberias Rectangulares con Esquinas Redondeadas**

- so(Do): Alto de la Tubería:  m
- bo(Do): Ancho de la Tubería:  m
- K: Coeficiente de Pérdida =  (K)
- H: Pérdida de Carga =  m

**Para Tuberias Rectangulares con Esquinas Abolladas**

- so: Alto de Sección:  m
- bo: Ancho de Sección:  m
- Longitud cada elemento:  m
- lo: Longitud del Codo:  m
- Do: Diámetro Interno:  m
- ro: Radio de Curvatura:  m
- K: Coeficiente de Pérdida =  (K)
- H: Pérdida de Carga =  m

**Siguiente**

FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

Figura 4.41. Pantalla de llenado de datos #3 para las pérdidas de carga de agua en Conversiones

FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

Figura 4.42. Pantalla de llenado de datos #4 para las pérdidas de carga de agua en Tees

FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

**Figura 4.43.** Pantalla de llenado de datos #5 para las pérdidas de carga de agua en Tees

**25) Conversión de Conductos Tipo Y de Doble Entrada Lateral ( $\alpha = 15^\circ$ )**

Q1s: Caudal de Entrada Lateral 1:  m<sup>3</sup>/s

D1s: Diámetro de Entrada Lateral 1:  m

Relación Q2s/Q1s Calculada =  $(Q2s/Q1s)$

Escoga el valor Más próximo al calculado de Q2s/Q1s:

Relación F1s/Fc Calculada =  $(F1s/Fc)$

Escoga el valor Más próximo al calculado de F1s/Fc:

K: Coeficiente de Pérdida =  (k)

H: Pérdida de Carga =  (H) m

**27) Conversión de Conductos Tipo Y de Doble Entrada Lateral ( $\alpha = 45^\circ$ )**

Q1s: Caudal de Entrada Lateral 1:  m<sup>3</sup>/s

D1s: Diámetro de Entrada Lateral 1:  m

Relación Q2s/Q1s Calculada =  $(Q2s/Q1s)$

Escoga el valor Más próximo al calculado de Q2s/Q1s:

Relación F1s/Fc Calculada =  $(F1s/Fc)$

Escoga el valor Más próximo al calculado de F1s/Fc:

K: Coeficiente de Pérdida =  (k)

H: Pérdida de Carga =  (H) m

**29) Conversión de Conductos Tipo Y de Doble Entrada Lateral ( $\alpha = 90^\circ$ )**

Q1s: Caudal de Entrada Lateral 1:  m<sup>3</sup>/s

D1s: Diámetro de Entrada Lateral 1:  m

Relación Q2s/Q1s Calculada =  $(Q2s/Q1s)$

Escoga el valor Más próximo al calculado de Q2s/Q1s:

Relación F1s/Fc Calculada =  $(F1s/Fc)$

Escoga el valor Más próximo al calculado de F1s/Fc:

K: Coeficiente de Pérdida =  (k)

H: Pérdida de Carga =  (H) m

**30) Tee Simétrica ( $0 < \alpha < 90^\circ$ )**

Q1s: Caudal de Entrada Lateral 1:  m<sup>3</sup>/s

D1s: Diámetro de Entrada Lateral 1:  m

Ángulo de Desviación Lateral:  °

K: Coeficiente de Pérdida =  (k)

H: Pérdida de Carga =  (H) m

**Siguiente**

FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

En algunas de las estructuras que están dentro de estas 5 hojas de llenado de datos, el usuario deberá usar su criterio para algunos parámetros, puesto que el programa en su codificación realiza la iteración de ciertos valores a partir de las ecuaciones que representan las curvas de los ábacos obtenidos de la bibliografía, pero en ciertos casos, no se cuentan con curvas para todos los valores, razón por la cual se ha optimizado el programa de manera que el usuario escogerá de entre estas curvas mediante botones de lista de opciones de valores a aquella que más se ajuste a los valores particulares de su conducción y estructura, ayudado por el programa que le calculará automáticamente los parámetros para únicamente tener que escoger de entre las curvas. En el capítulo del manual del usuario se verá cómo hacerlo.

**Figura 4.44.** Ejemplo donde el usuario es ayudado con el valor con el que deberá escoger la curva más próxima a éste (Curva Ro/Do)

**2) Codos con relación Ro/Do > 3 y Ángulo Cualquier**

Ángulo de Apertura  °

Ro: Radio de Giro Interno:  m

Para Tuberías Circulares  $a_o = b_o = D_o$

bo(Do): Alto de la Tubería:  m

Relación Ro/Do Calculada = 5

Escoja el Valor Ro/Do más aproximado al Calculado:

▾

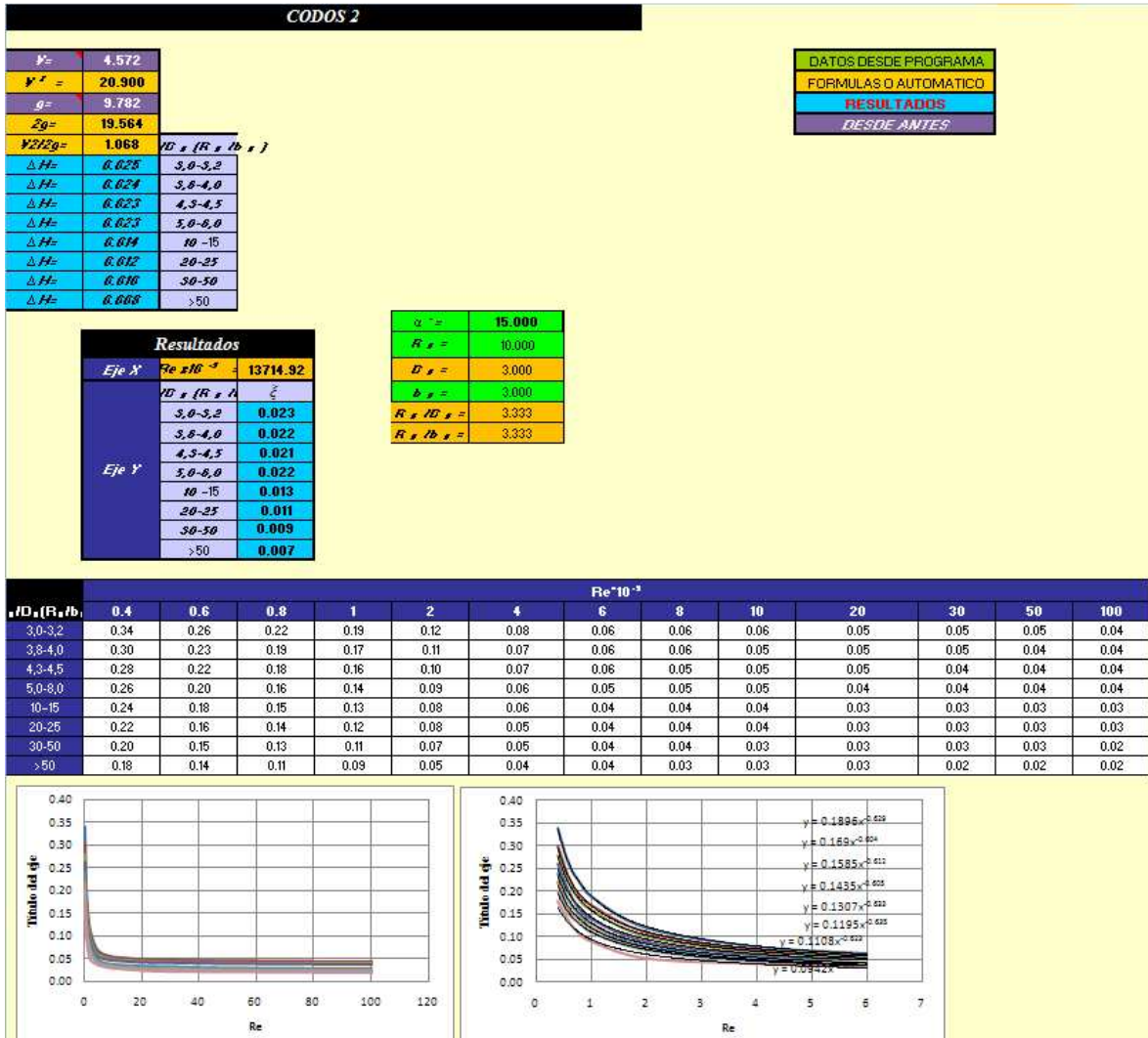
K: Coeficiente de Pérdida = 0.02

H: Pérdida de Carga = 0.021 m

FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

Ya que se pueden escoger las estructuras que se deseen entre las 34 propuestas, la ventaja del programa es que muestra el valor de la pérdida de carga inmediatamente después de llenar los datos de cada uno de los casos escogidos y no únicamente al final de todas las hojas y cuyos valores seguirán acumulándose para la pérdida de carga total que se tiene en la última de las pantallas.

**Figura 4.45.** Ejemplo de hoja de Cálculo de las pérdidas de carga de agua en Codos, Tees y Conversiones posiblemente presentes en el conducto (Túnel de baja presión)



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

En caso que el usuario ya haya escogido algunas de las opciones de entre las planteadas y continúe hacia las siguientes pantallas y necesite realizar alguna rectificación, se ha pensado en optimizar el programa dando la oportunidad de volver con los botones ATRÁS hacia las pantallas anteriores, de tal manera que se pueda modificar todo aquello que se desee, sin tener que volver a llenar todos los datos, sino que únicamente se cambiarán los que sean necesarios; asimismo el usuario se puede desplazar entre las 5 hojas que contienen los datos a llenar y la pantalla principal en caso de querer rectificar cualquiera de los datos introducidos o aumentar una o más estructuras a las ya escogidas.

#### 4.2.3.7. Optimización en la obtención de las pérdidas de carga de agua en Difusores y/o Boquillas posiblemente presentes en el conducto (Túnel de baja presión)

Figura 4.46. Pantalla de pérdidas de carga de agua en Difusores y/o Boquillas posiblemente presentes en el conducto (Túnel de baja presión)

FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

Las pérdidas de carga localizadas también se presentan en las diferentes reducciones o ampliaciones de la sección transversal que pueden tener los túneles de baja presión en toda su longitud, debido a múltiples razones tales como: topografía de la zona, geología del terreno a excavar, necesidad de adaptación de acople de túneles de diferente diámetro, presencia de una sección transversal para localización de válvulas, diseños propios del túnel que se ajustan a otras necesidades, etc. Estas pérdidas de carga no son tan usuales en proyectos comunes y corrientes, sin embargo el alcance del programa ha llegado al punto que el usuario puede calcular con la introducción de sus datos las pérdidas producidas en 8 diferentes formas de estructuras de cambio de sección en el conducto, divididas en la siguiente manera:

- ✓ 5 tipos de DIFUSORES (secciones de ampliación del área transversal)
- ✓ 2 tipos de BOQUILLAS (secciones de reducción del área transversal)

✓ 1 tipo de PIEZA DE CAMBIO REPENTINO DE SECCIÓN

La optimización principal de ésta pantalla consiste en que el usuario cuenta con la opción directa de escoger con botones de señalamiento la o las estructuras que desee y considere para su cálculo de pérdidas de carga, teniendo la confianza que únicamente se activarán los campos correspondientes a los datos de las estructuras escogidas, mientras que el resto de campos se mantienen inactivos; además éste cuenta con una ayuda gráfica muy útil e inmediata junto a cada caso, sin tener que recurrir a otras fuentes bibliográficas para estimar las pérdidas producidas. A diferencia de la pantalla para escoger los tipos de entradas al conducto, en ésta el usuario podrá escoger el número de estructuras que desee, pues una no es mutuamente excluyente de la otra, es decir, varias de ellas pueden estar presentes a lo largo del túnel de baja presión hasta la chimenea de equilibrio.

En todos los datos se impide el ingreso de datos con signo negativo, caracteres que no sean números así como se impide que posibles resultados negativos (debido a datos absurdos) sean procesados dentro de las respuestas finales. Asimismo se han ubicado las unidades de medición de los parámetros, datos y resultados.

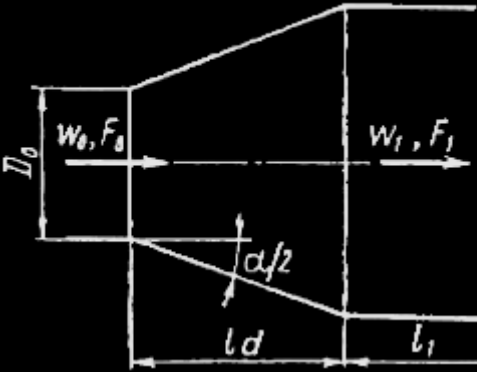
Para el ingreso de todos los datos, se ha establecido el orden del llenado lógico, de tal manera que el usuario solamente necesita dar un enter para pasar a llenar la siguiente casilla de datos.

En algunas de las estructuras el usuario deberá usar su criterio para el llenado de algunos parámetros, puesto que el programa en su codificación realiza la iteración de ciertos valores a partir de las ecuaciones que representan las curvas de los ábacos obtenidos de la bibliografía, pero en ciertos casos, no se cuentan con curvas para todos los valores, razón por la cual se ha optimizado el programa de manera que el usuario escogerá de entre estas curvas mediante botones de lista de opciones de valores cuál es la que más se ajusta a los valores particulares de su conducción y estructura, ayudado por el programa que le calculará automáticamente los parámetros para únicamente tener que escoger de entre las curvas. En el capítulo del manual del usuario se verá cómo hacerlo.



**Figura 4.47.** Ejemplo donde el usuario es ayudado con el valor con el que deberá escoger la curva más próxima a éste (Curva A1/Ao)

6) Difusor de Sección Circular de Paredes Rectas



Do: Diámetro Menor de Difusor:  m

D1: Diámetro Mayor de Difusor:

Ángulo de Ampliación del Difusor:

Relación A1/Ao Calculada = 1.96

Escoja el valor Más próximo al calculado de A1/A0:

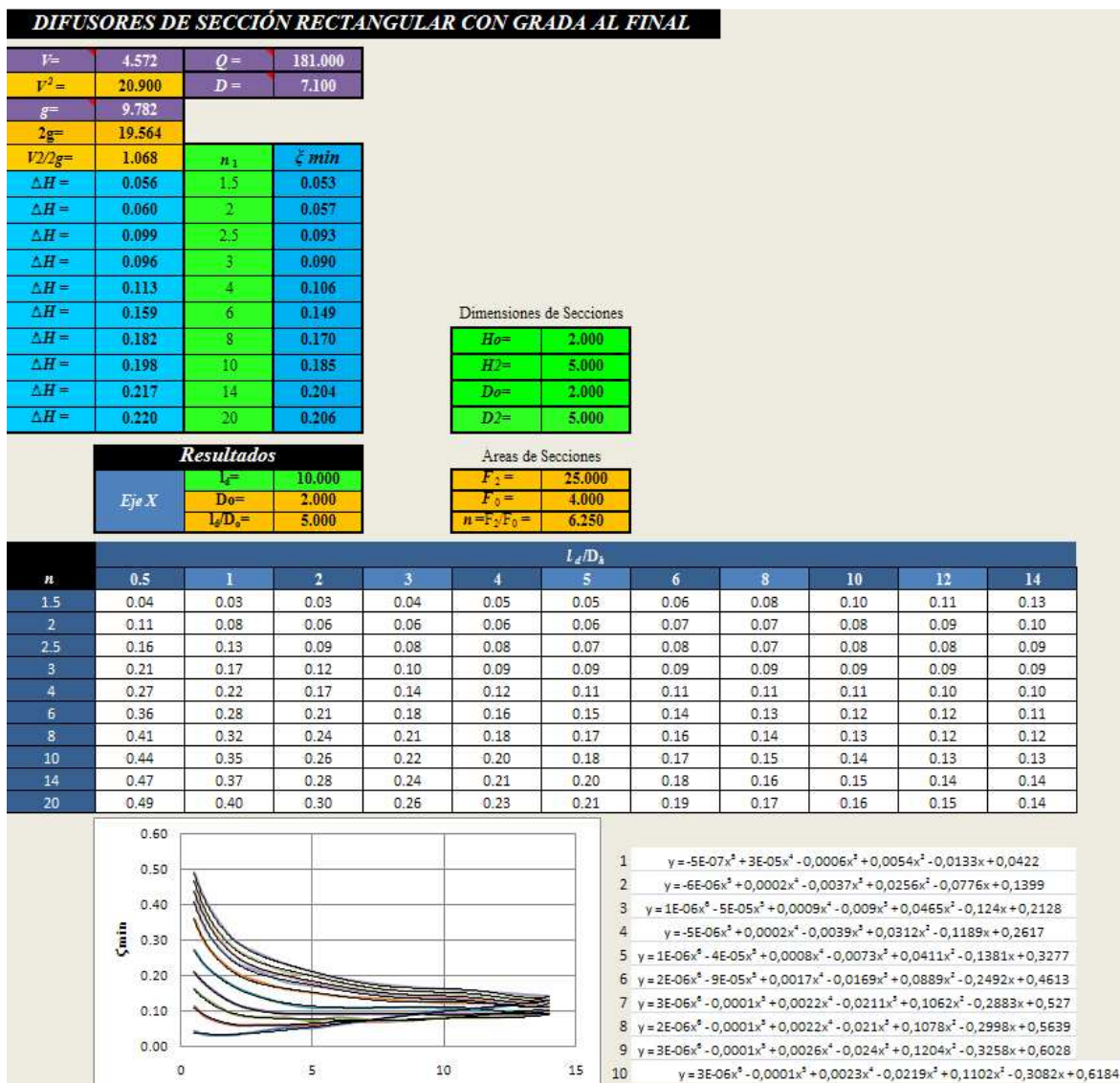
▾

K: Coeficiente de Pérdida = 0.906

FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

Ya que se pueden escoger las estructuras que se deseen entre las 8 propuestas y en este caso solo se tiene una pantalla de cálculo, la ventaja del programa es que muestra el valor de la pérdida de carga al final inmediatamente después de llenar los datos de los casos escogidos y cuyos valores seguirán acumulándose para la pérdida de carga total que se tiene al final de todas las pantallas.

**Figura 4.48.** Ejemplo de hoja de Cálculo de las pérdidas de carga de agua en Difusores y/o Boquillas posiblemente presentes en el conducto (Túnel de baja presión)

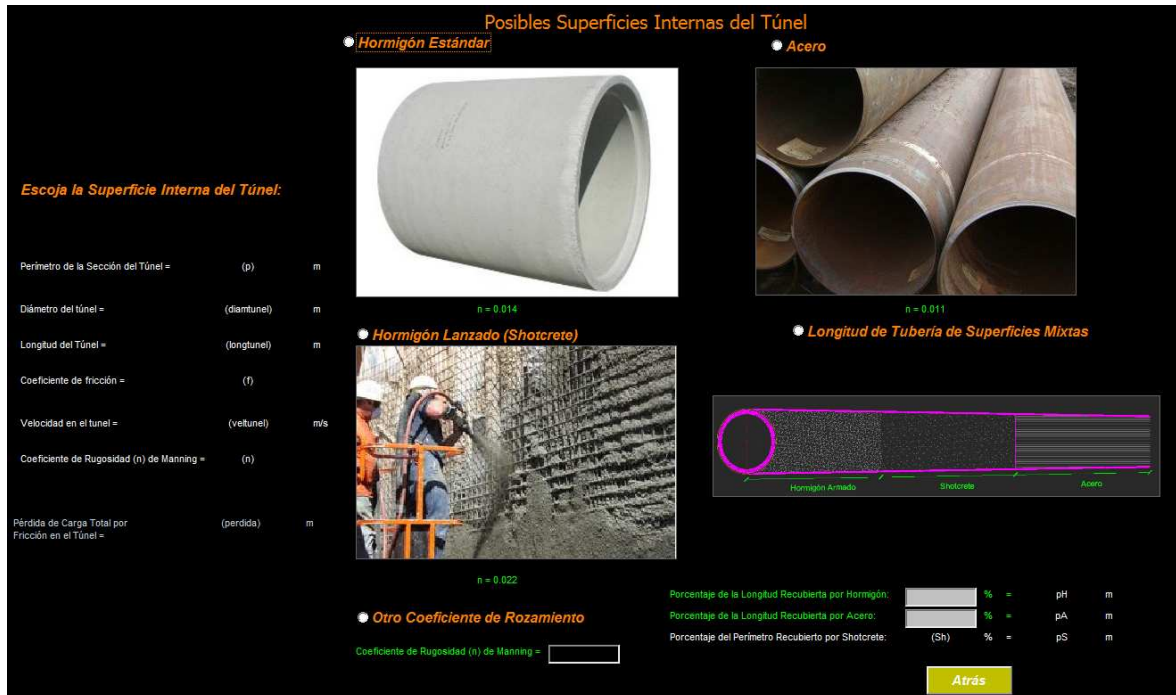


FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

En caso que el usuario ya haya escogido algunas de las opciones de entre las planteadas y continúe hacia las siguientes pantallas y necesite realizar alguna rectificación, se ha pensado en optimizar el programa dando la oportunidad de volver con los botones ATRÁS hacia las pantallas anteriores, de tal manera que se pueda modificar todo aquello que se desee, sin tener que volver a llenar todos los datos, sino que únicamente se cambiarán los que sean necesarios.

#### 4.2.3.8. Optimización en la obtención de las pérdidas de carga de agua por fricción a lo largo del conducto (Túnel de baja presión)

**Figura 4.49.** Pantalla de pérdidas de carga de agua por fricción a lo largo del conducto (Túnel de baja presión)



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

Las pérdidas de carga por rozamiento o fricción que se producen a lo largo del túnel de baja presión dependen del material que se utilice para el recubrimiento interno de las paredes del túnel y éste puede ser de una sola clase de superficie o en su defecto de la combinación de varias superficies (como consecuencia del método constructivo, el costo del proyecto, el tipo de material del sitio donde se ha excavado, entre otros motivos propios de cada túnel en particular). La principal optimización del programa es que brinda al usuario la oportunidad de escoger entre 3 tipos diferentes de superficies, cada una de las cuales tiene su propio coeficiente de rozamiento para la ecuación de Manning:

- ✓ Acero de recubrimiento de túneles
- ✓ Hormigón de superficie Lisa
- ✓ Hormigón Lanzado (Shotcrete)

Al escoger cualquiera de estas 3 opciones, se ha pensado en el usuario de tal manera que éste no tenga que ingresar el valor de los coeficientes, sino únicamente escoger el material y automáticamente el programa llenará su valor. Sin embargo, si se desea indicar al programa para que haga los cálculos con otro coeficiente de rozamiento correspondiente a otro material o a los mismos materiales pero con valores distintos, se ha optado por incluir una cuarta opción en la que el usuario puede digitar el coeficiente de rozamiento que estime adecuado, cuya casilla solamente se activará si el usuario escoge el botón correspondiente y su valor será procesado internamente del programa tal y como si estuviese escogiendo uno de los materiales.

**Figura 4.50.** Optando por otro coeficiente de rozamiento en donde el usuario tiene que digitarlo



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

Como ya se mencionó, cabe también la posibilidad que el túnel esté recubierto internamente por varios tipos de superficie, como por ejemplo el caso en el cual en la parte inferior del túnel se tiene una estructura de sostenimiento hecha en hormigón armado y cuya superficie es de hormigón con acabado liso, mientras que en la parte superior no es necesario la construcción de una estructura en hormigón, sino únicamente un recubrimiento para evitar el desmoronamiento del suelo en dicha zona con el paso del agua a la velocidad de circulación de ésta. En ocasiones se necesitarán también placas de acero en ciertas partes del perímetro del túnel, aunque ésta opción sea la menos tomada en cuenta debido al costo del material. Cualquiera que sea el caso, se ha optimizado el programa de tal manera que únicamente tiene que ingresar en una quinta opción los porcentajes del 100% del perímetro total que corresponden a cada una de las 3 posibles superficies (acero, hormigón liso y/o shotcrete), siendo éste último porcentaje automático y equivalente al valor faltante para completar el 100% del perímetro. Los datos se procesan para estimar un promedio ponderado del coeficiente de rozamiento, el

cual será mostrado al usuario entre los valores automáticos de la parte izquierda de la pantalla.

**Figura 4.51.** Optando por un coeficiente de rozamiento para una superficie compuesta de 3 materiales en su perímetro

Perímetro de Superficies Mixtas				
Porcentaje del Perímetro Recubierto por Hormigón:	<input type="text" value="50"/>	% =	11.153	m
Porcentaje del Perímetro Recubierto por Acero:	<input type="text" value="30"/>	% =	6.692	m
Porcentaje del Perímetro Recubierto por Shotcrete:	20	% =	4.461	m
Coeficiente de fricción =			0.014	

FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

Además el usuario cuenta con una ayuda gráfica muy útil e inmediata junto a cada caso, sin tener que recurrir a otras fuentes bibliográficas para estimar las pérdidas producidas. En todos los datos se impide el ingreso de datos con signo negativo, caracteres que no sean números así como se impide que posibles resultados negativos (debido a datos absurdos) sean procesados dentro de las respuestas finales. Asimismo se han ubicado las unidades de medición de los parámetros, datos y resultados.

Para el ingreso de todos los datos, se ha establecido un orden del llenado lógico, de tal manera que el usuario solamente necesita dar un enter para pasar a llenar la siguiente casilla de datos.

En caso que el usuario ya haya escogido algunas de las opciones de entre las planteadas y continúe hacia las siguientes pantallas y necesite realizar alguna rectificación, se ha pensado en optimizar el programa dando la oportunidad de volver con los botones ATRÁS hacia las pantallas anteriores, de tal manera que se pueda modificar todo aquello que se desee, sin tener que volver a llenar todos los datos, sino que únicamente se cambiarán los que sean necesarios.

#### 4.2.3.9. Optimización en la obtención de las pérdidas de carga de agua en las curvaturas de alineación en planta del conducto (túnel de baja presión)

**Figura 4.52.** Pantalla de de las pérdidas de carga de agua en las curvaturas de alineación en planta del conducto (túnel de baja presión)

Dímetro del Túnel (D) (D) m

Esquema de las Curvas de Alineación

**Curva # 1**

Radio de Curvatura (R1) (R1) m

Relación (R1/D) (R1/D)

Ángulo de Giro (C1)

Coefficiente de Fricción (revestimiento liso) C1 (C1)

Coefficiente de Corrección para el Ángulo de giro (Coe1)

Pérdida de Carga Localizada en Curva 1 (h1) m

Número de Curvas # 1

Pérdida Total de Carga Localizada en Curvas Tipo (H1) m

**Curva # 2**

Radio de Curvatura (R2) (R2) m

Relación (R2/D) (R2/D)

Ángulo de Giro (C2)

Coefficiente de Fricción (revestimiento liso) C2 (C2)

Coefficiente de Corrección para el Ángulo de giro (Coe2)

Pérdida de Carga Localizada en Curva 2 (h2) m

Número de Curvas # 2

Pérdida Total de Carga Localizada en Curvas Tipo (H2) m

**Curva # 3**

Radio de Curvatura (R3) (R3) m

Relación (R3/D) (R3/D)

Ángulo de Giro (C3)

Coefficiente de Fricción (revestimiento liso) C3 (C3)

Coefficiente de Corrección para el Ángulo de giro (Coe3)

Pérdida de Carga Localizada en Curva 3 (h3) m

Número de Curvas # 3

Pérdida Total de Carga Localizada en Curvas Tipo (H3) m

**Curva # 4**

Radio de Curvatura (R4) (R4) m

Relación (R4/D) (R4/D)

Ángulo de Giro (C4)

Coefficiente de Fricción (revestimiento liso) C4 (C4)

Coefficiente de Corrección para el Ángulo de giro (Coe4)

Pérdida de Carga Localizada en Curva 4 (h4) m

Número de Curvas # 4

Pérdida Total de Carga Localizada en Curvas Tipo (H4) m

Nivel Máximo de Operación del Embalse

Nivel Mínimo de Operación del Embalse

Embalse

Toma

Conducto de Baja Presión

Pérdida Total de Carga Localizada en Curvas de Alineación (HT) m

Atrás

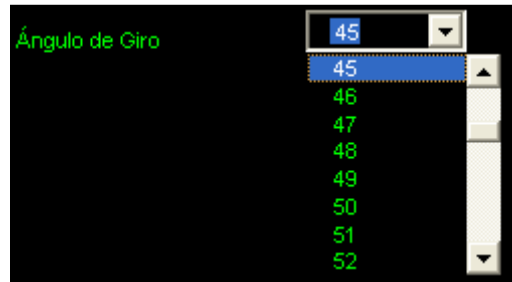
FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

En ciertos diseños, con la finalidad de reducir las pérdidas que se podrían producir en codos muy cerrados para cambiar la dirección del túnel de baja presión, se opta por la utilización de curvaturas de alineación de radios de giro bastante grandes con relación al tamaño de la tubería. En este programa se ha optado por considerar un máximo de 4 tipos diferentes de curvas de alineación y un máximo de 5 curvas del mismo tipo por cada una de ellas, es decir, un total de 20 posibles curvas de alineación para el conducto. El usuario tiene la seguridad que solamente se calcularán las pérdidas de carga para las curvas que elija y asimismo solamente se activarán las casillas de datos de las curvas elegidas.

Ésta pantalla es muy óptima y de fácil uso, pues para la introducción de los datos es necesario únicamente guiarse en los gráficos explicativos de la parte derecha. A medida que se los va llenando, automáticamente se calculan ciertos parámetros que guían al usuario en la estimación de las dimensiones de sus estructuras.

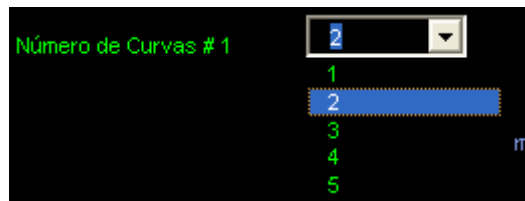
Se ha decidido ayudar al usuario para evitar posibles equivocaciones limitando con listas para los datos de los ángulos de giro (entre 1° y 180°) y el número de curvas (que por supuesto deberá ser un número entero) para evitar posibles equivocaciones, fallas en el programa o que los resultados sean inadecuados.

**Figura 4.53.** Lista de posibles ángulos de giro dados en lista para el usuario por facilidad



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

**Figura 4.54.** Lista del posible número de curvas de un mismo tipo



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

El programa calcula automáticamente los coeficientes de pérdida por fricción en función de la relación radio de curvatura-diámetro del túnel:

$$Co_1 = 0.2467 \left( \frac{R}{D} \right)^{-0.574} \quad (4.1)$$

Donde:

Co1: Coeficiente de pérdida por fricción (Para revestimiento hidráulicamente liso)

R: Radio de Curvatura (m)

D: Diámetro de la Conducción (m)

Y se calcula automáticamente el coeficiente de pérdida en función del ángulo de giro (que determina a su vez la extensión a lo largo de la cual se produce la pérdida).

$$C_{c_1} = \frac{\theta^\circ}{90} \quad (4.2)$$

Donde:

$C_{c_1}$ : Coeficiente de pérdida por ángulo de giro:

$\theta$ : Ángulo de Giro de la Curvatura ( $^\circ$ )

Ambos coeficientes se muestran calculados inmediatamente después de llenar los datos respectivos, así como la pérdida de carga total para una sola curva y para el número de curvas del mismo tipo que hayan sido elegidas. La pérdida para cada curva se calcula con la Expresión 4.2.

$$\Delta H = C_{c_1} * C_{o_1} * \frac{V^2}{2g} \quad 28 \quad (4.2)$$

Donde:

$\Delta H$ : Pérdida de Carga Localizada en Curvaturas de alineación en planta (m)

$C_{c_1}$ : Coeficiente de pérdida por ángulo de giro

$C_{o_1}$ : Coeficiente de pérdida por fricción

$V$ : Velocidad de Circulación del Flujo en la Curvatura (m/s)

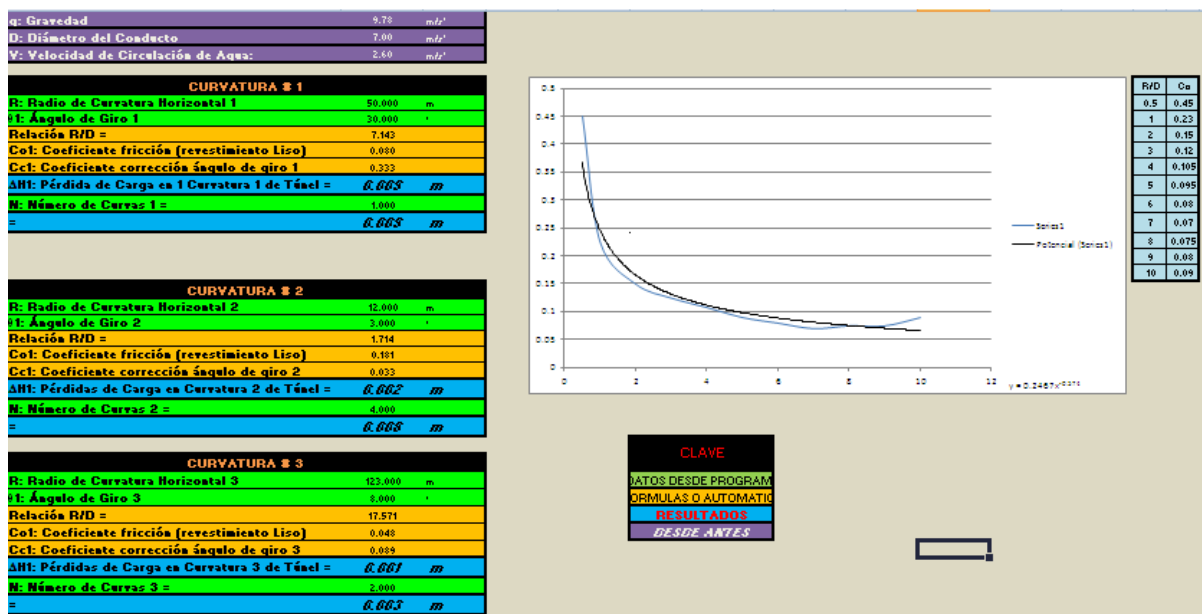
$g$ : Aceleración de la Gravedad ( $m/s^2$ )

---

<sup>28</sup>SOTELO, Gilberto, Hidráulica General, Limusa; 1997; México D.F., México; Pág304



Figura 4.55. Hoja de Cálculo de las pérdidas de carga de agua en las curvaturas de alineación en planta del conducto (túnel de baja presión)



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

En todos los datos se impide el ingreso de datos con signo negativo, caracteres que no sean números así como se impide que posibles resultados negativos (debido a datos absurdos) sean procesados dentro de las respuestas finales. Asimismo se han ubicado las unidades de medición de los parámetros, datos y resultados.

Para el ingreso de todos los datos, se ha establecido el orden del llenado lógico, de tal manera que el usuario solamente necesita dar un enter para pasar a llenar la siguiente casilla de datos.

#### 4.2.3.10. Optimización en el resumen de pérdidas en el conducto (túnel de baja presión) y la pérdida total final de carga

**Figura 4.56.** Pantalla de resumen de pérdidas en el conducto (túnel de baja presión) y la pérdida total final de carga

*A continuación las Pérdidas de Carga Calculadas para el Túnel de Baja Presión:*

Pérdidas en la Rejilla de Separación de Sólidos =	( )	m	Por lo Tanto:		
Pérdidas por la Forma en Vista lateral de la Entrada al Túnel =	( )	m	Pérdidas Localizadas Totales en la Entrada del Túnel =	( )	m
Pérdidas por Formas Especiales de la Entrada al Túnel =	( )	m	Pérdidas Totales por Fricción a lo Largo del Túnel =	( )	m
Pérdida en las Ranuras de las Compuertas =	( )	m	Pérdidas Localizadas Totales a lo largo del Túnel =	( )	m
Pérdidas en transición de Sección al Inicio del túnel (Desde las compuertas hacia el Túnel) =	( )	m	Pérdidas de Carga por Velocidad a lo largo del Túnel =	( )	m
Pérdidas por Fricción a lo Largo del Túnel =	( )	m	Por lo Tanto:		
Pérdidas en Difusores y Boquillas =	( )	m	<i>Pérdidas de Carga Totales del Sistema =</i>	( )	m
Pérdidas en Codos y/o Tees =	( )	m			
Pérdidas en Curvas de Alineación del túnel =	( )	m			

FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

El programa presenta una hoja con el resumen de las pérdidas producidas que se han calculado desde un principio y la pérdida total de carga en el sistema. A pesar de ello, el usuario todavía tiene la opción de regresar a las anteriores pantallas en caso de que necesite realizar alguna rectificación, con los botones ATRÁS, de tal manera que se pueda modificar todo aquello que se desee, sin tener que volver a llenar todos los datos, sino que únicamente se cambiarán los que sean necesarios.

#### 4.2.3.11. Optimización en la presentación de resultados

Figura 4.57. Pantalla de resultados



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

Finalmente el programa presenta una pantalla que contiene los resultados gráficos y numéricos principales para una chimenea de equilibrio que se calculan en pocos segundos, como es la representación gráfica de la variación en función del tiempo del nivel del agua dentro de la chimenea después de una maniobra de cierre o apertura de válvulas, respectivamente; así como la presentación de los niveles críticos y más importantes como son el máximo y mínimo, así como los tiempos en los que se tiene estimado se presentarán estos.

Con la presentación de estos resultados, el usuario tiene finalmente cumplido el objetivo más importante que se busca desde el inicio del programa, es decir la obtención de los valores críticos de oscilación frente a las maniobras que se tenga previsto realizar en la central hidroeléctrica.

## **CAPITULO 5.**

### **MANUAL PARA EL USUARIO**

#### **5.1.INTRODUCCIÓN**

Este manual describe la secuencia y los parámetros necesarios que se deben utilizar para poder ejecutar el programa “OSCILACIONES DE MASA EN UNA CHIMENEA DE EQUILIBRIO”.

El programa está diseñado para que su interfaz con el usuario sea lo más amigable posible, permitiendo que al ingresar al programa, se encuentre un medio gráfico en el cual cada uno de los datos necesarios para el cálculo se presente con una imagen que facilite un enfoque específico a detalle.

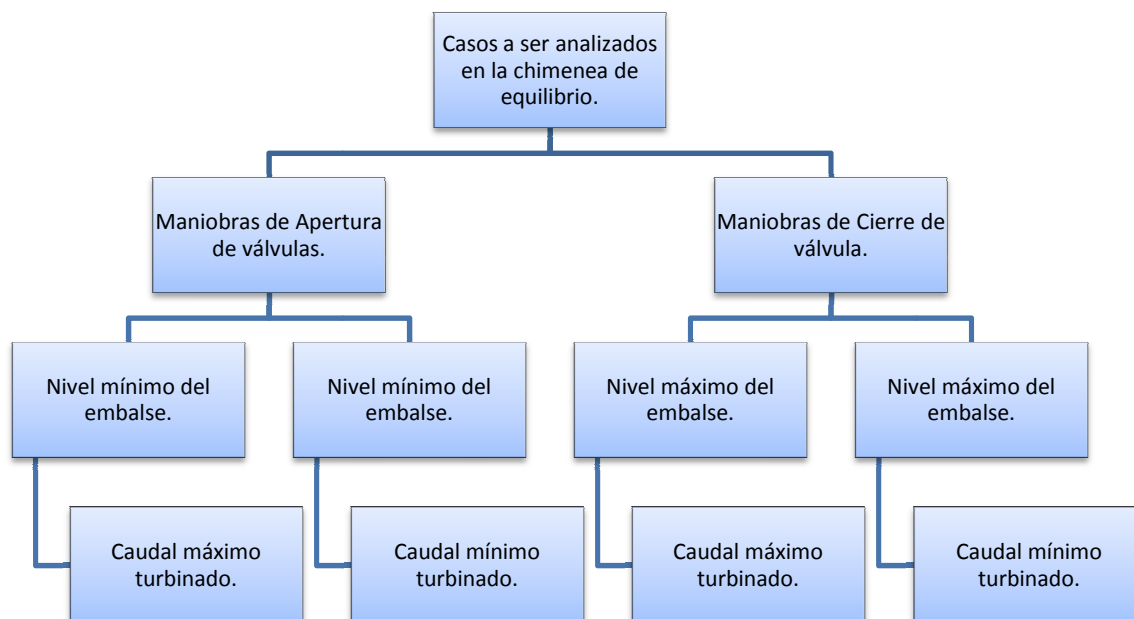
Los resultados que el programa entrega serán mediante una gráfica de dispersión con ejes ortogonales, en los cuales se presentará en el eje de las abscisas el tiempo de duración de las oscilaciones y en el eje de las ordenadas el nivel de las oscilaciones de agua dentro de la chimenea de equilibrio.

El programa “OSCILACIONES DE MASA EN UNA CHIMENEA DE EQUILIBRIO”, está diseñado para poder determinar la sobrepresión en chimeneas de equilibrio por medio de la oscilación de masas dentro de la misma. Para poder determinar las oscilaciones de masa, es decir, las oscilaciones del nivel de agua dentro de la chimenea de equilibrio, se requiere de un modelo rígido de flujos transitorios, el cual crea un sistema de ecuaciones diferenciales y que se resuelve mediante un método numérico.

Gran parte del programa está destinado a encontrar las pérdidas primarias o de fricción y las pérdidas secundarias o localizadas en el sistema de aducción embalse-chimenea de equilibrio.

Para determinar los niveles de agua extremos (máximo maximorum y mínimo minimorum) dentro de la chimenea de equilibrio se recomienda realizar las maniobras de operación mostradas en el Cuadro 5.1.

**Cuadro 5.1.** Maniobras de operación en las válvulas de las turbinas de una central hidroeléctrica.



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

De entre los 4 valores obtenidos simulando las maniobras anteriormente mencionadas, frecuentemente se tiene que el nivel mínimo minimorum registrado en la chimenea de equilibrio corresponde a la maniobra de apertura de válvulas teniendo el nivel mínimo en el embalse y con el máximo caudal posible turbinado; mientras que el nivel máximo maximorum registrado en la chimenea de equilibrio corresponde a la maniobra de cierre de válvulas teniendo el nivel máximo en el embalse y con el máximo caudal posible turbinado. Sin embargo el usuario será el encargado de discernir entre los resultados que arroje el programa y bajo su criterio determinar los niveles extremos del agua en las maniobras posibles de operación de la central.

## 5.2.REQUERIMIENTOS BÁSICOS

Computadora con sistema operativo WINDOWS XP y posterior

Procesador de textos: Microsoft Office Excel 2007 y posterior

Pentium IV y posterior

### **5.3.PROGRAMA Y MODO DE EMPLEO**

El programa se encuentra diseñado en una base de Visual Basic en Microsoft Office Excel 2007, su interfaz es gráfica y está configurado de tal manera que aparecen diferentes ventanas, según sea el requerimiento, para los diferentes datos que necesita el programa.

Cada ventana posee las siguientes partes:

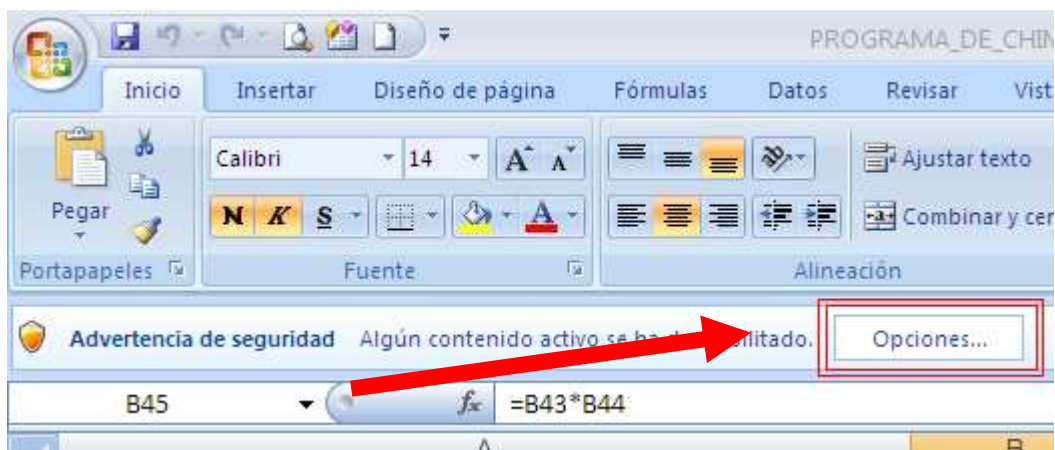
- Imágenes explicativas
- Ingreso de datos
- Visualización de valores resueltos automáticamente
- Una parte para recorrer entre ventanas
- Además, un botón para continuar a las siguientes ventanas y otro para regresar a la ventana anterior. La última ventana de resultados solo mostrará el grafico final y tendrá un botón para salir del programa

Para el ingreso de datos se debe de tomar en cuenta las siguientes restricciones:

- No se admitirán datos negativos
- No se admitirán letras en lugar de números
- No se admitirán símbolos
- Para los decimales se deben colocar puntos (.) y no comas (,)

No se debe olvidar que al ingresar a la aplicación desarrollada, por defecto Microsoft Office Excel 2007 deshabilita las macros, por razones de seguridad y/o virus, activando de forma inmediata una Advertencia de Seguridad, indicándonos que algún contenido activo se ha deshabilitado, junto a un botón de opciones que se encuentra en la parte superior izquierda de la ventana principal.

Figura 5.1. Botón de opciones para activar las macros.



Al dar un clic en **OPCIONES**, se debe de activar los contenidos de los macros y de vínculos, para lo cual en la ventana que aparece se debe seleccionar en la parte superior e inferior de la ventana mediante un clic la opción **HABILITAR ESTE CONTENIDO**.

Figura 5.2. Ventana de activación de las macros.

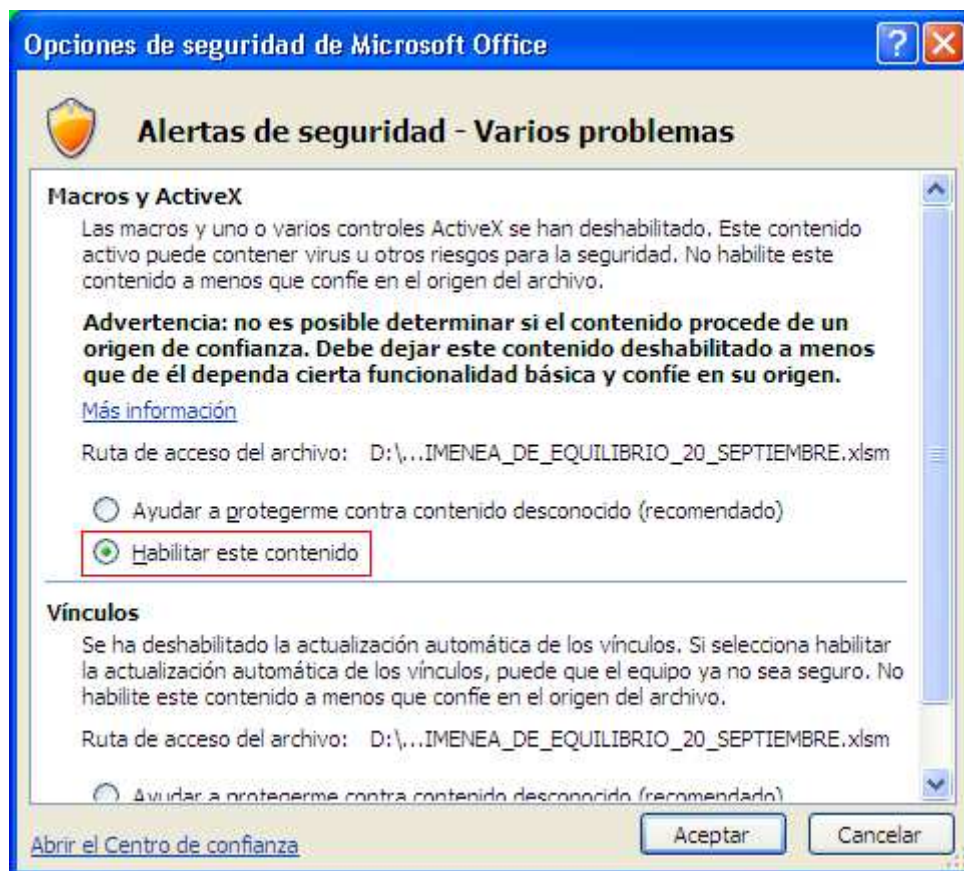
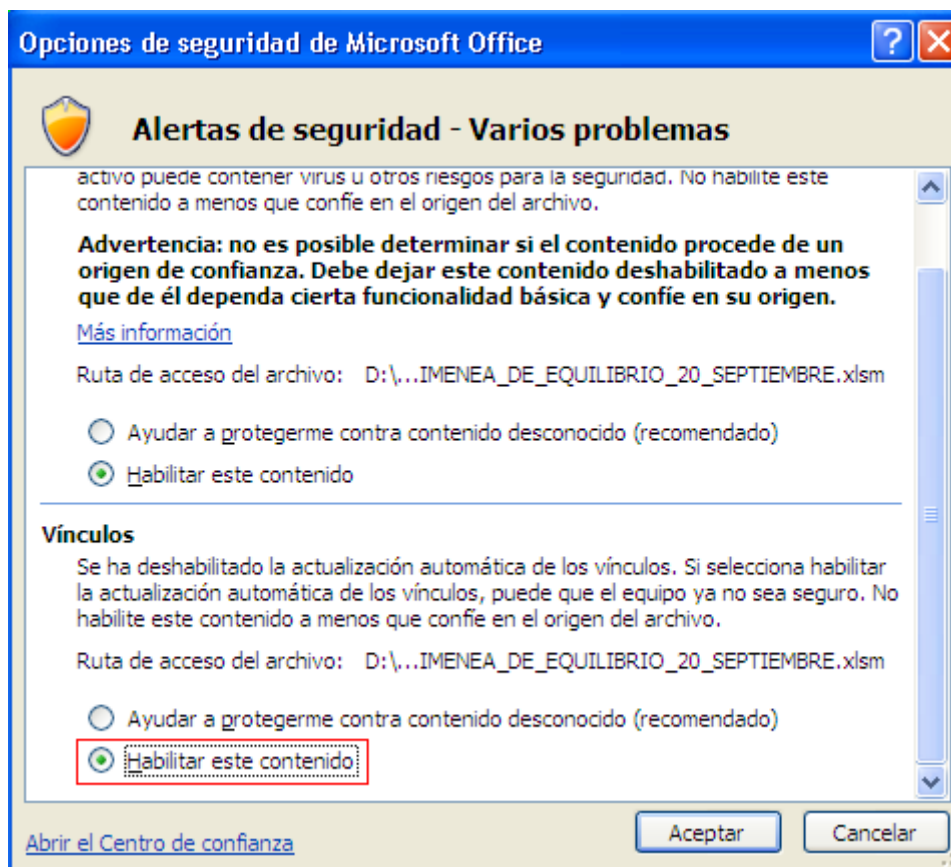


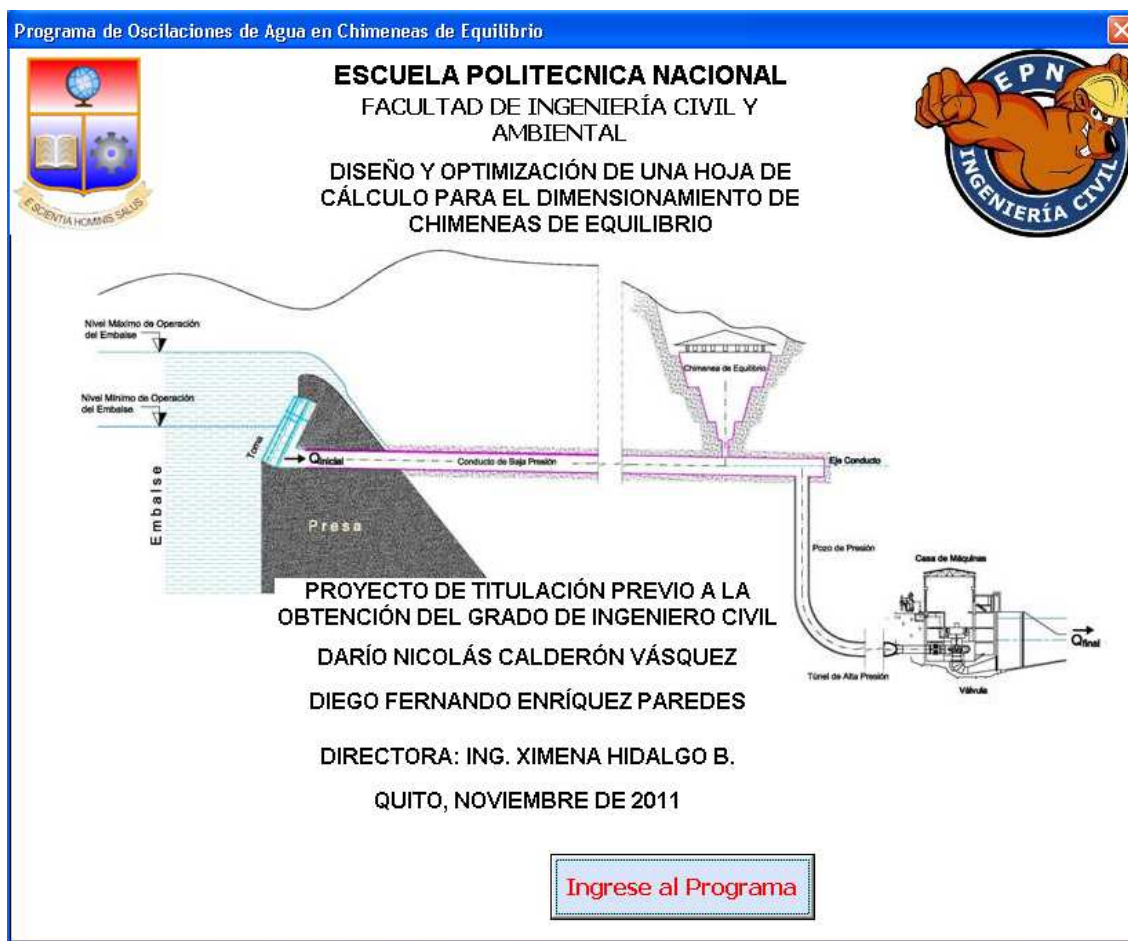


Figura 5.3. Ventana de activación de vínculos.



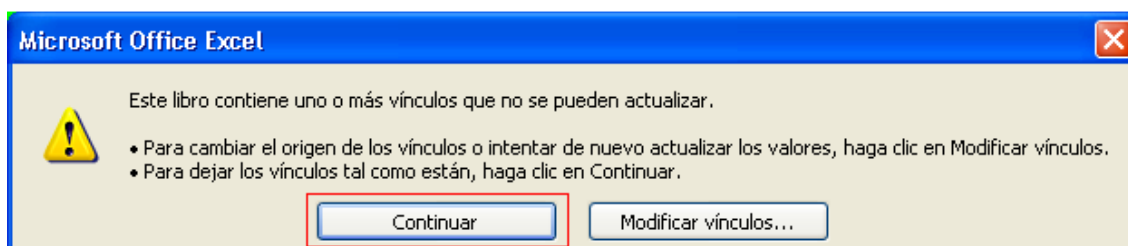
Una vez habilitados los contenidos de macros y de vínculos aparece la portada de inicio del programa, en la cual se debe dar un clic en el botón de “INGRESE AL PROGRAMA”.

Figura 5.4. Portada de inicio del programa.



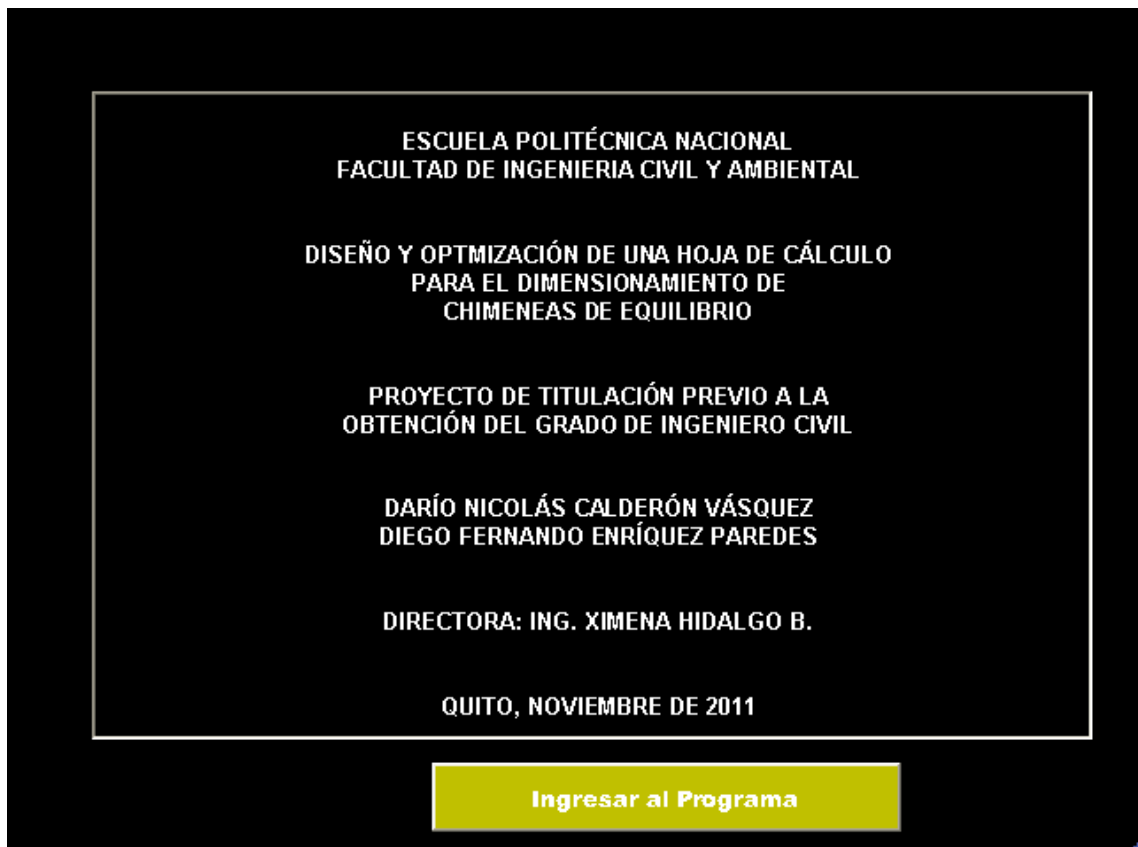
Posteriormente saldrá una ventana anunciando que uno o más vínculos no se pueden actualizar en la cual se debe dar clic sobre el botón **CONTINUAR**.

Figura 5.5. Ventana de alerta de actualización de vínculos.



Al dar clic en el botón de “CONTINUAR” aparece la pantalla de inicio del programa, en la cual se debe de dar un clic en el botón “INGRESAR AL PROGRAMA” con lo cual aparece la primera ventana de ingreso de datos del programa.

**Figura 5.6.** Pantalla de inicio del programa.



#### **5.4. VENTANA DE DATOS**

En esta ventana se debe de ingresar primeramente la maniobra de operación de la válvula a realizar: *cierre o apertura*.

Una vez elegida la maniobra a realizar se debe ingresar los datos generales necesarios, como son:

- Caudal inicial
- Caudal final
- Nivel de agua en el embalse: Nivel de agua al momento de realizar la maniobra
- Tiempo de análisis del fenómeno: Tiempo en el cual se desea conocer el efecto del fenómeno

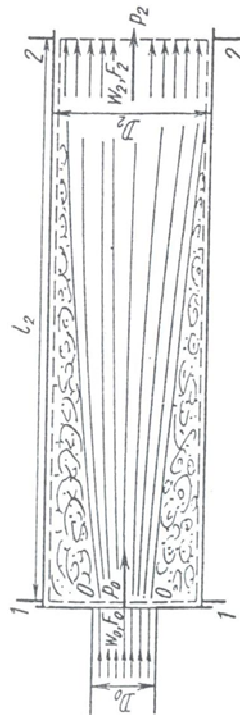
- Cota final del eje del conducto: Cota del eje de la conducción debajo de la chimenea de equilibrio
- Duración de la maniobra: Tiempo de ejecución de la maniobra
- Longitud de la conducción
- Diámetro de la conducción
- Diámetro del orificio restringido: Dato necesario para chimeneas con orificio restringido
- Ángulo de latitud del sitio: Ubicación del sitio de la obra

Se debe de tener en cuenta que todos los datos que se ingresan se debe colocar en unidades del Sistema Internacional de Medidas. Se puede recurrir también a la norma nacional INEN.

En la ventana de datos aparece un gráfico general en la que se puede apreciar la configuración del sistema de tal manera que se considera de manera detallada cada dato necesario. Adicionalmente, se presenta una gráfica que permite comprender cuál es el ángulo de latitud del sitio de la obra. Se debe de tener en cuenta que el ángulo de latitud siempre se considerará en valor absoluto.

Para la determinación del coeficiente de pérdida debido al orificio restringido, sólo se estableció una geometría tal que la expansión en el diámetro sea abrupta. Como se observa en la Figura 5.7.

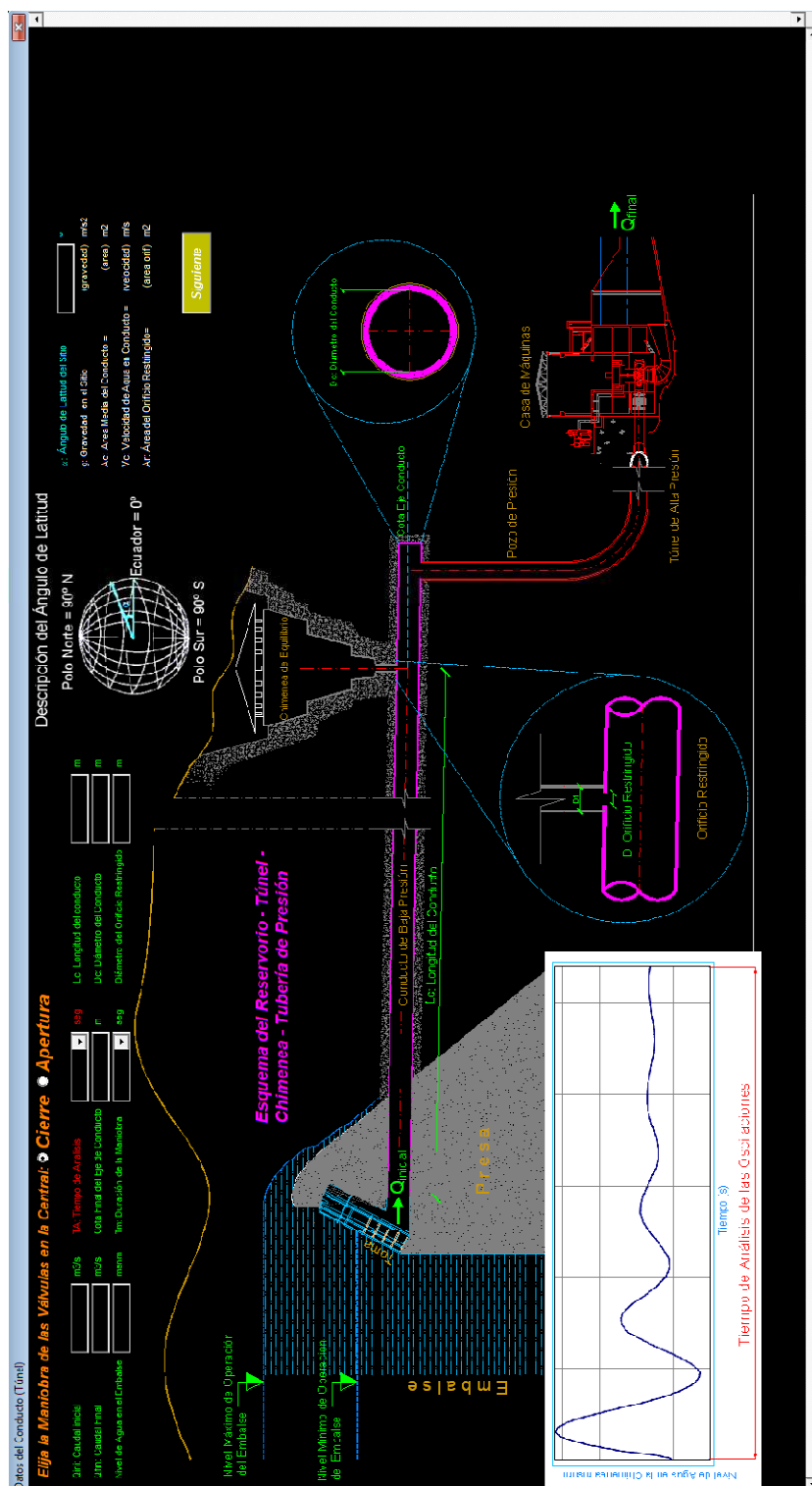
Figura 5.7. Geometría del orificio restringido.



Fuente: IDELCHIK I., Handbook of Hydraulic Resistance, Hemisphere Publishing Corporation; 1986; New York; 2º edición.

Una vez que se hayan ingresado todos los datos generales se debe dar un clic en el botón de "SIGUIENTE", con el cual se traslada a la próxima ventana.

Figura 5.8. Ventana de ingreso de datos iniciales.



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez.

## 5.5. ENTANA DE DIÁMETROS

La siguiente ventana es la de datos geométricos de la chimenea de equilibrio, en la que se puede apreciar dos gráficas, la primera es para una chimenea de geometría escalonada y la segunda es para una chimenea de geometría con cámaras auxiliares.

En ambas configuraciones se tiene la ubicación de los diámetros a la izquierda, mientras que la ubicación de las cotas se encuentra a la derecha.

Al momento en que se activa esta ventana el cursor estará ubicado en “Diámetro 8”, lo cual quiere decir que los datos de diámetros a ingresar serán de forma descendente desde el “Diámetro 8” hasta el “diámetro 1”. Una vez que se ha ingresado el “diámetro 1” se debe dar un enter y el cursor se ubicará en “Cota 2”, lo cual quiere decir que los datos de cotas se ingresarán de forma ascendente.

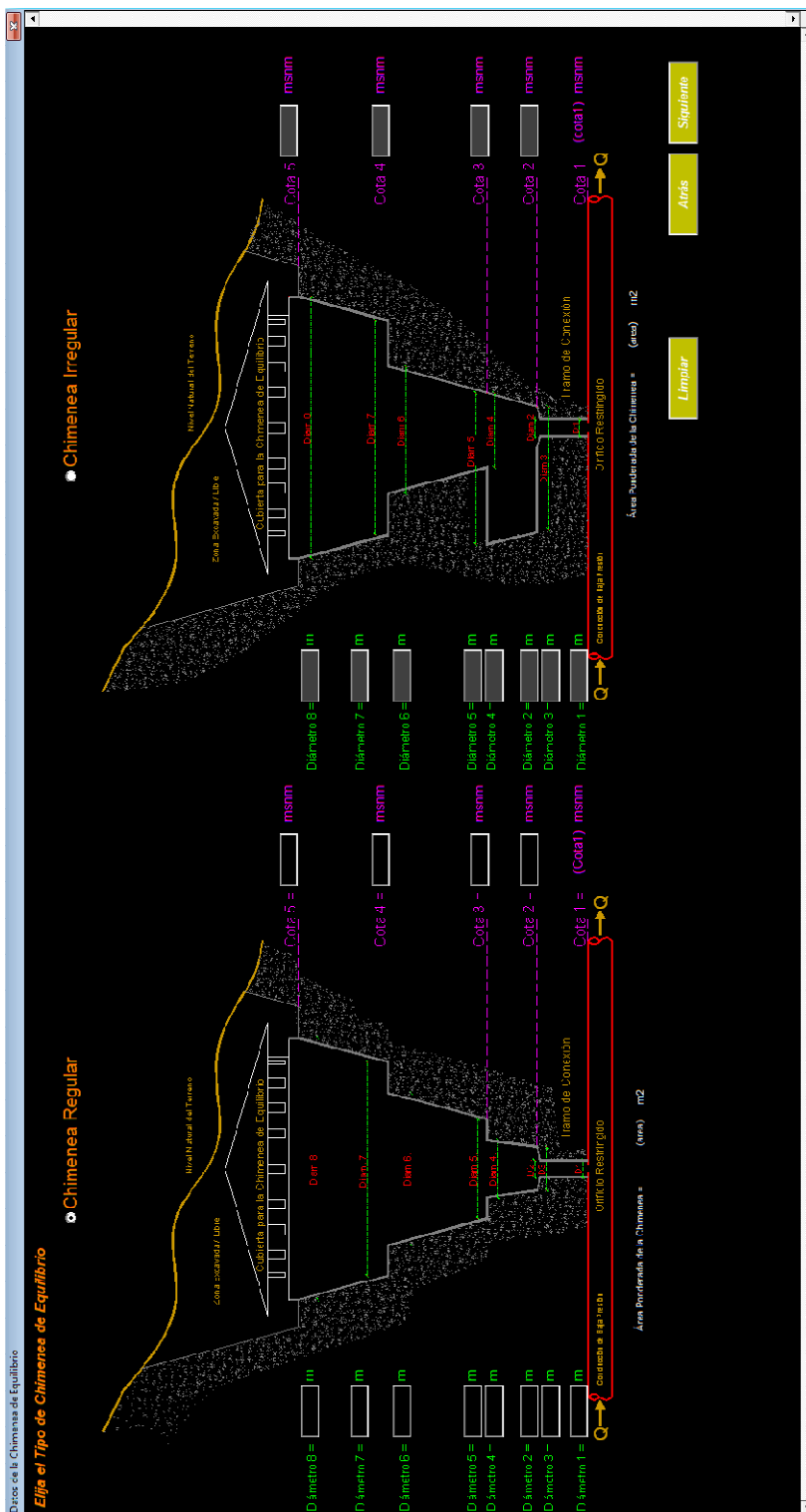
Se debe de tomar en cuenta que al momento de ingresar los valores de las cotas sólo se puede realizar en forma ascendente, es decir, que si la cota 1 es 700 m.s.n.m. (metros sobre el nivel del mar), la cota 2 deberá ser mayor a 700 m.s.n.m., y así sucesivamente.

Al haber ingresado todos los datos de diámetros en la parte inferior se mostrará el valor del área ponderada de la chimenea de equilibrio, la cual a más de darnos una mejor idea sobre la chimenea, también servirá para los cálculos del programa.

En esta ventana a más de los botones “SIGUIENTE” y “ATRÁS”, existe el botón “LIMPIAR”, éste sirve para que se borren todos los datos de cotas y diámetros ingresados, con lo cual se podrá ingresar otros valores.

Una vez que se hayan ingresado todos los datos de la geometría se debe dar un clic en el botón “SIGUIENTE”, con el cual se traslada a la ventana a continuación.

**Figura 5.9.** Ventana de ingreso de datos de configuración de la chimenea de equilibrio.



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez.



## 5.6.PÉRDIDAS DE CARGA EN EL SISTEMA

En esta ventana se encuentran nueve diferentes opciones para poder determinar las pérdidas de carga. De manera general, se puede escoger una sola, así como todas las nueve.

En esta ventana se muestran una gráfica diferente para cada tipo de pérdida existente, con lo cual se puede apreciar fácilmente de que se trata cada tipo de pérdida.

Las diferentes clases de pérdidas entre las cuales se pueden escoger son:

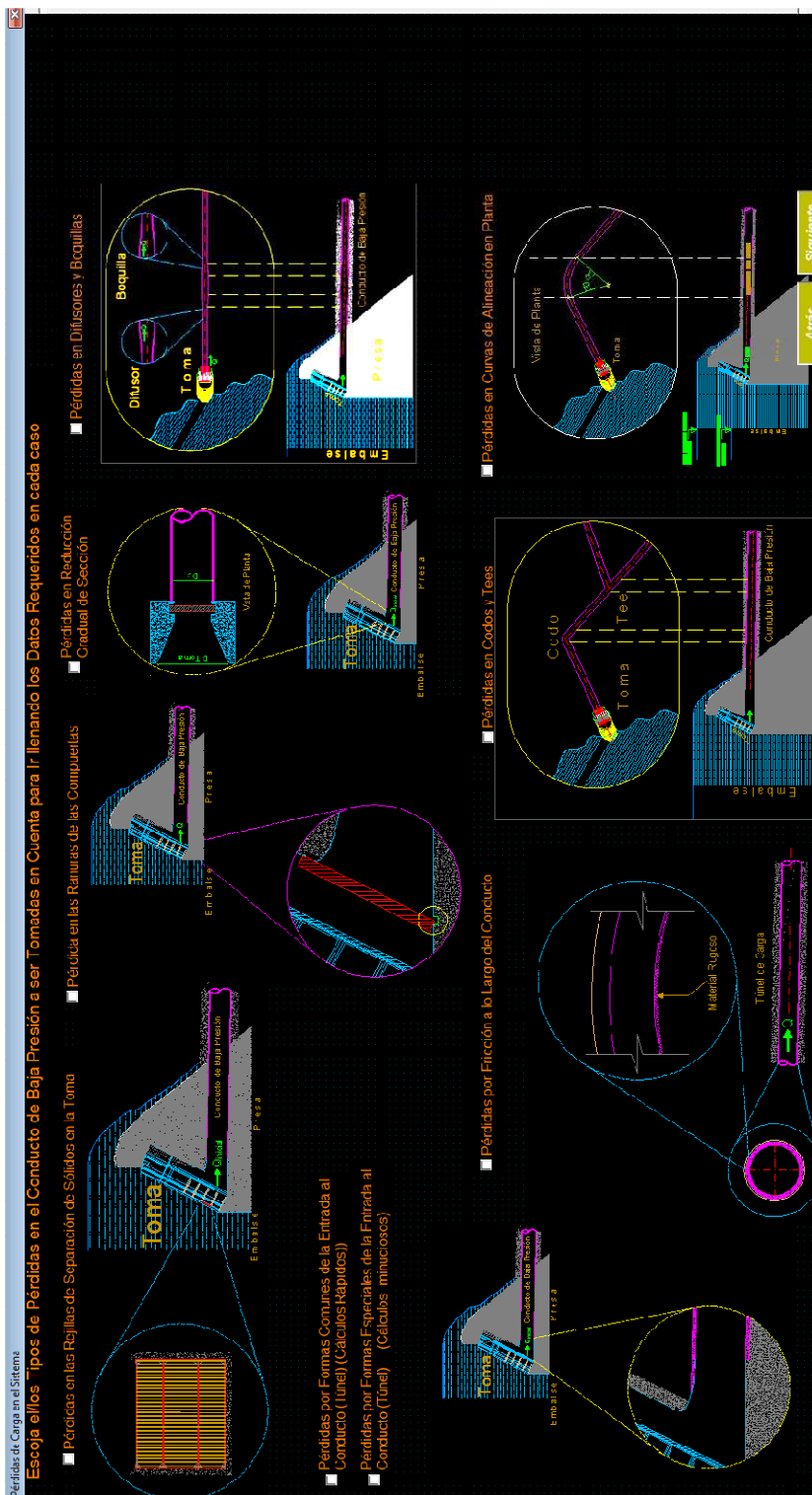
- Pérdidas en rejillas
- Pérdidas por formas comunes en la entrada
- Pérdidas por formas especiales en la entrada
- Pérdidas por fricción
- Pérdidas por difusores y boquillas
- Pérdidas por curvas en planta
- Pérdidas por codos y tees
- Pérdidas por reducción gradual de sección
- Pérdidas por ranuras en compuertas

En el gráfico de ranuras en compuertas se aprecia una ranura inferior en la vista en elevación, sin embargo, este gráfico solamente es explicativo ya que en el programa las pérdidas por ranura podrán ser laterales.

Una vez que se haya elegido todos los tipos de pérdida que se requieran se debe dar un clic en el botón "SIGUIENTE", con el cual se traslada a la siguiente ventana.

Las subsecuentes ventanas que se abran corresponderán solamente a los tipos de pérdidas seleccionados, sin embargo, a continuación se presenta una descripción de cada una de las ventanas y su funcionamiento.

Figura 5.10. Ventana de selección del tipo de pérdida de carga en el sistema.



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez.

## 5.7.PÉRDIDAS DE REJILLAS

Las rejillas se colocan en la entrada a la conducción con la finalidad de poder retener la mayor cantidad de sólidos en suspensión en el flujo.

Debido al gran tamaño de las rejillas que deben cubrir el túnel de carga, en este programa se ha diseñado a estas rejillas en forma de ventanas que están sostenidas por vigas y columnas.

Los barrotes de las rejillas en la práctica pueden ser de diferentes formas, su sección transversal, razón por la cual aquí se presentan siete diferentes formas de la sección transversal, con lo cual el coeficiente de pérdida variará, siendo las formas aerodinámicas, las que produzcan las menores pérdidas.

Los datos que se deben ingresar en esta ventana son los siguientes:

- Alto de cada rejilla
- Ancho de cada rejilla
- Separación entre barrotes
- Ancho de los barrotes
- Sección transversal de los barrotes de las rejillas
- Ángulo de inclinación de la rejilla
- Los valores que se calculan automáticamente son los siguientes
- Caudal por cada rejilla
- Número de barrotes por rejilla
- Área neta total de las rejillas
- Velocidad de agua por las rejillas
- Coeficiente de pérdida de carga  $k$
- Pérdida total en las rejillas

Una vez que se haya ingresado todos los datos de la geometría de los barrotes de las rejillas, se debe dar un clic en el botón “SIGUIENTE”, con el cual se traslada a la siguiente ventana.

Figura 5.11. Ventana para ingreso de datos para rejillas.

Pérdida en la Rejilla de Separación de Sólidos

**Ubicación y Esquema de una Rejilla de Separación de Sólidos en la Toma**

**En Función de los Esquemas y Parámetros, llene los Datos:**

H: Alto de Cada Rejilla  m

B: Ancho de Cada Rejilla  m

Número de Rejillas en la Toma  (n)

Cantidad por Cada Rejilla  m<sup>3</sup>s

s: Separación entre Barreros  m

A: Ancho de los Barreros  m

Número de Barreros por Rejilla  (número)

Área Total de Rejilla (Anchura)  m<sup>2</sup>

Velocidad de Agua por las Rejillas =  m/s

Sección de los Barreros de las Rejillas

Coefficiente de forma de barrotes C1 =

Ángulo de inclinación de la Reja  °

Coefficiente de Pérdida de Carga K =  (perdida/rejilla) m

**Identificación de Carga en las Rejillas de Separación de Sólidos en la Toma**

Diagrama: **Toma** (Embalsado) - **Canal** - **Canal de Baja Presión**

Diagrama: **Vista Frontal de una Rejilla** (H, B) - **Sección de los Barreros** (s)

Diagrama: **Inclinación de las Rejillas** (C1, K)

# de Sección: ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩

Forma:  $C1 = 2.22$   $C2 = 1.93$   $C3 = 1.67$   $C4 = 1.33$   $C5 = 1.07$   $C6 = 0.72$   $C7 = 0.72$   $C8 = 1.70$

Coeficientes en función de la Forma de Sección de los Barreros (C1)

Atrás Siguiente

Darío Calderón, Diego Enríquez.

## 5.8.PERDIDAS EN ENTRADAS

Al elegir este tipo de pérdida se muestra en la ventana seis diferentes formas, las cuales muestran las geometrías más comunes de entrada.

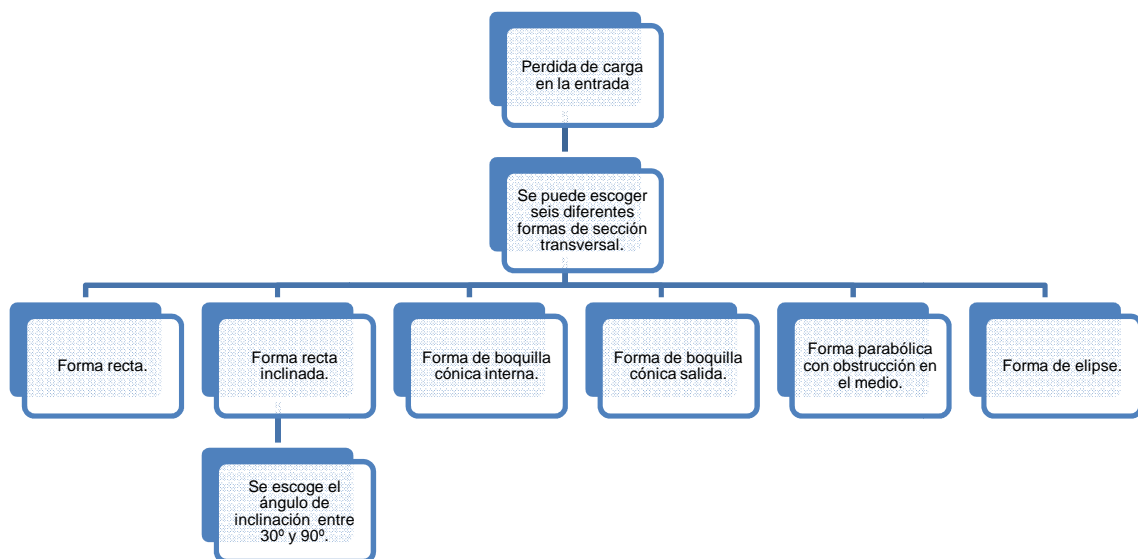
En la parte superior izquierda de la pantalla, se muestra una gráfica, en la que se puede ver claramente cómo es que se debe de considerar este tipo de pérdida.

Seguida de esta grafica aparecen los datos anteriores, así como algunos valores calculados automáticamente, los cuales sirven para tener una idea de los parámetros que se usarán en el cálculo de pérdidas por entrada.

Debajo de estos parámetros aparece la sección de datos, en donde el usuario dependiendo de la geometría de la sección transversal en la entrada, deberá elegir, entre los seis casos presentados. Debido a que no todas las rejillas en las obras de toma son perpendiculares se ha presentado un cuadro en el cual se puede escoger el ángulo de inclinación de las mismas.

Al ingresar todos los datos requeridos, el valor de la pérdida de carga debido a la forma de entrada, aparece en la parte inferior izquierda.

**Cuadro 5.2.** Cuadro para el ingreso de datos en entradas



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

Una vez que se haya ingresado todos los datos de la geometría de las entradas comunes, se debe dar un clic en el botón "SIGUIENTE", con el cual se traslada a la próxima ventana.



Figura 5.12. Ventana para el ingreso de datos en entradas comunes.

El software para Formas Comunes de la Entrada al Conductor (Cálculo de Pérdidas)

**Esquema de la Entrada al Conductor de Baja Presión:**

**6 Posibles Formas de Entradas Comunes:**

- 1 Forma Recta  $k = 0,5$
- 2 Forma Recta Inclinada  $k = 1,0$
- 3 Forma de Boga Cónica Interna  $k = 0,15 - 0,25$
- 4 Forma de Foguilla Cónica salida  $k = 0,5$
- 5 Forma Parabólica con Obstrucción en medio  $k = 0,05 - 0,10$
- 6 Forma de Elipsoide  $k = 0,04 - 0,10$

**Parámetros Fijos Anteriormente:**

Número del Conductor = (Anterior) m  
 Área Medida del Conductor = (Anterior) m<sup>2</sup>  
 Gravedad para el Sólido = (Anterior) ms<sup>2</sup>  
 Velocidad de Agua en Conductor = (Anterior) ms

**En Función de los Esquemas y Parámetros, llene los Datos:**

Forma en Vista Lateral de la Entrada al Túnel

Inclinación de Tabla de Entrada (Para la Forma Recta, Inclínala (Cálculo de Momento))

Coefficiente de Pérdida de Carga por la forma de entrada (K)

Pérdida Total de Carga por la Forma de la Entrada al Conductor de Baja Carga =  m (pérdida)

**Formas Comunes (Vista Lateral) de la Entrada al Conductor**

**Atrás** **Siguiente**

FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez.

## 5.9.ENTRADAS ESPECIALES

Al elegir la opción de entradas especiales en la parte superior izquierda de la ventana aparecen dos pestañas, de las cuales la de la izquierda muestra una lista con las dieciocho formas a escoger, más una extra en la cual el usuario es quien puede ingresar manualmente el coeficiente de pérdida  $k$ . En esta ventana solo se puede escoger una de todas las opciones, además, para poder elegir qué tipo de forma desea el usuario se da la opción que al pasar el cursor por encima de cada una de las opciones en la lista, en la parte derecha de la pantalla aparece un gráfico que detalla la forma respectiva.

En esta pestaña se da la opción de poder regresar mediante el botón “ATRÁS”.

Para continuar se debe de dar clic en la pestaña de la derecha. En esta pestaña todos los cuadros de texto para ingreso de datos no escogidos aparecerán de color plomo, mientras que los que se escogió aparecen de color negro. Adicionalmente los cuadros de texto para ingreso de datos no escogidos estarán protegidos, de tal manera que no se podrá digitar ningún valor sobre los mismos.

En esta pestaña en la parte central se encuentra un gráfico representativo de la ubicación de las entradas. Debajo de éste gráfico se mostrará la forma de entrada escogida, para así poder ingresar los datos de mejor manera, ya que en el gráfico se detalla cada dato necesario.

Los datos necesarios para los diferentes casos son los siguientes:

- Caso 1 y 2:
  - Longitud sobresalida ( $b$ )
  - Espesor de tubería ( $d$ )
  - Relación  $b/D$ : Aquí se debe de escoger el valor más próximo al valor  $b/D$  real
- Caso 3:
  - Alto del orificio de entrada ( $l$ )

- Ancho del orificio de entrada (a)
- Ángulo de inclinación del conducto
- Relación  $l/a$ : Aquí se debe de escoger el valor más próximo al valor  $l/a$  real
- Casos 4, 5 y 6:
  - Radio de curvatura de la boquilla
- Caso 7:
  - Profundidad de sección inicial (l)
  - Ángulo de abertura de cono
  - Relación  $l/D$ : Aquí se debe de escoger el valor más próximo al valor  $l/D$  real
- Caso 8:
  - Profundidad de sección inicial (l)
  - Ángulo de abertura de cono
  - Relación  $l/D$ : Aquí se debe de escoger el valor más próximo al valor  $l/D$  real
- Caso 9:
  - Área de orificios entre persianas
  - Separación entre paletas (b)
- Casos 10 y 11:
  - Área de los orificios
- Casos 12 y 13:
  - Ancho de orificio

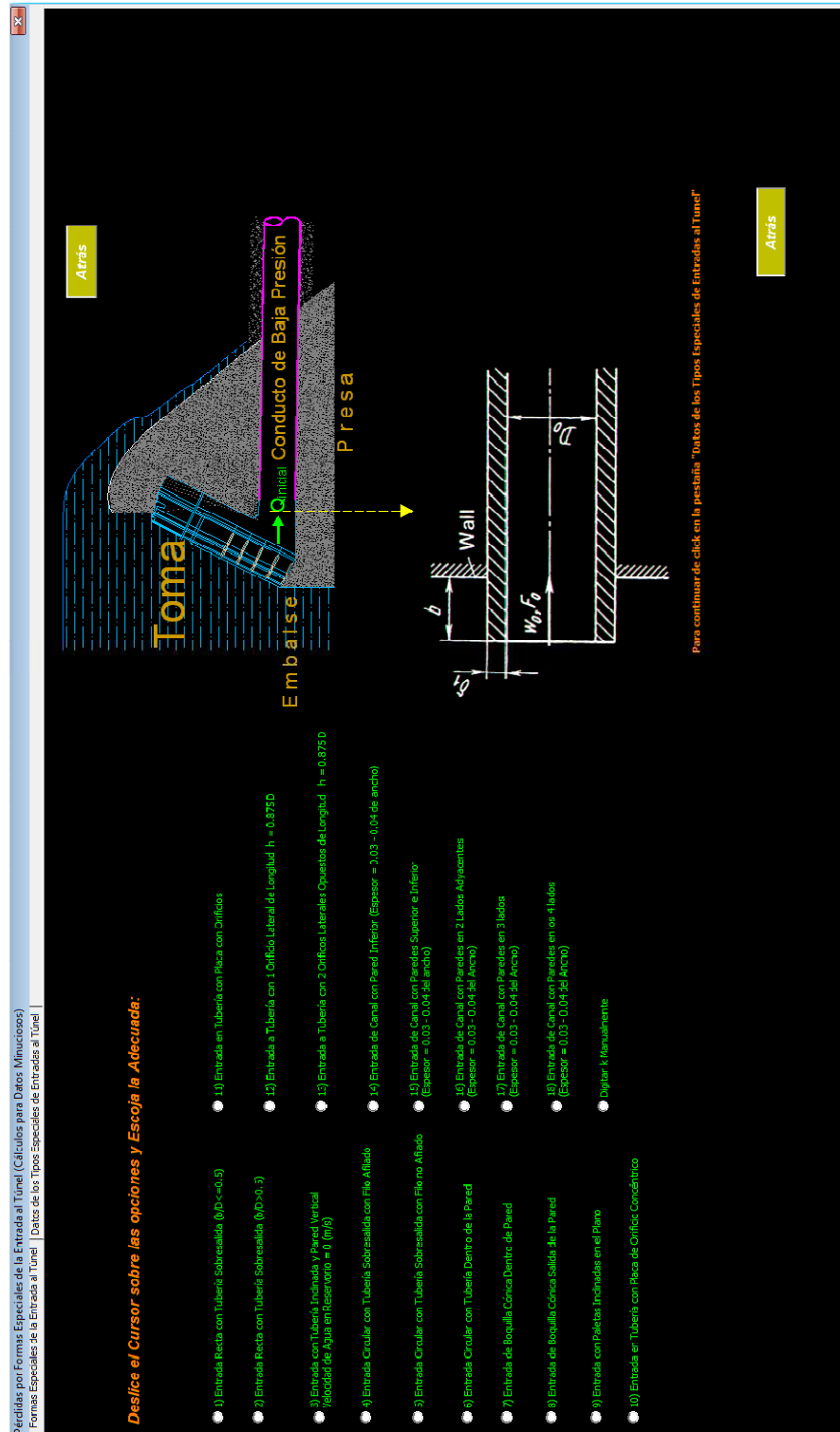
- Casos 14, 15, 16, 17 y 18:
  - Espesor del canal de entrada

Si en alguno de los diferentes casos, se pide alto y ancho de la conducción, pero la geometría de la conducción es circular, entonces se debe de dar dimensiones tales que su área sea igual a la de la geometría original.

En la parte inferior derecha de esta ventana se encuentra los cuadros de texto donde aparecen los valores del coeficiente de pérdida  $k$  y la pérdida de carga final.

Una vez que se haya ingresado todos los datos para los casos de pérdidas por entradas especiales, se debe dar un clic en el botón "SIGUIENTE", con el cual se traslada a la siguiente ventana.

Figura 5.13. Ventana para la selección de la entrada especial.



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez.

Figura 5.14. Ventana para el ingreso de datos de entradas especiales.

Pérdidas por Formas Especiales de la Entrada al Túnel (Cálculo para Datos Mutuos)   
 Formas Especiales de la Entrada al Túnel Datos de los Tipos Especiales de Entradas al Túnel

**Llene los Datos de Acuerdo a la Forma Escogida.**

**DATOS PARA CASO 1 y/o CASO 2**

Longitud sobresaliente  $b =$   m

Espesor de tubería  $e =$   m

$dD =$   (0/1)

$nD =$   (0/1)

Escoja el valor más próximo al calculador de BD  entre estos c1 y c

**DATOS PARA CASO 3**

Área del Orificio de Entrada  $a =$   m<sup>2</sup>

Ángulo del Orificio de Entrada  $\theta =$   (gr)

Relación  $b/a =$

Ángulo de apertura constante  $\alpha =$

Escoja el valor más próximo al calculador de BD  entre estos c1 y

**DATOS PARA CASO 8**

Profundidad de Sección Inicial  $m =$

Ángulo de Abertura de Cono  $\theta =$   (gr)

Escoja el valor más próximo al calculador de BD  entre estos c1 y c17

**DATOS PARA CASO 9**

Área o ancho entre perlas  $m^2 =$

Separación entre perlas  $m =$

f (Área Crítica/Área Total) =  (f)

**DATOS PARA CASOS 10 y 11**

Área de la Crifala  $m^2 =$

f (Área Crifala/Área Total) =  (f)

**DATOS PARA CASOS 12 y/o 13**

Altura de Orificio  $h =$   m (h=0.375D)

Ancho de Orificio  $b =$   m

f (Área Orificio/Área Total) =  (f)

**DATOS PARA CASO 14, 15, 16, 17, y/o 18**

Espesor del Cural de Entrada  $e =$   m

Excentricidad  $e =$   (0.03 \* e b = 0.04)

**DATOS PARA CASO 7**

Profundidad de Sección Inicial  $m =$

Ángulo de Abertura de Cono  $\theta =$   (gr)

Escoja el valor más próximo al calculador de BD  entre estos c17 y c17

D. Diámetro del Conducto =  m

Coeficiente de Pérdida de Carga  $K =$

Pérdida de Carga en la Entrada  $H =$   m

**Siguiente**

FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez.

## 5.10. PÉRDIDAS POR RANURAS

Al elegir la opción de pérdida de carga por ranuras aparecen en la ventana los datos generales ingresados anteriormente y que son necesarios para los cálculos de esta opción:

- Diámetro del conducto
- Velocidad en la conducción

Los datos necesarios que se deben de ingresar son los siguientes:

- Ancho de cada ranura (b)
- Coeficiente de pérdida en cada ranura (k): Se da la opción de escoger entre una lista de valores que van desde 0.05 a 0.10
- Número de compuertas

Para poder determinar un valor de coeficiente de pérdida k se debe de verificar que se cumpla con ambas de las siguientes condiciones:

- La relación ancho ranura – diámetro  $b/D$ , sea mayor a uno (1)
- La velocidad sea mayor a 2m/s

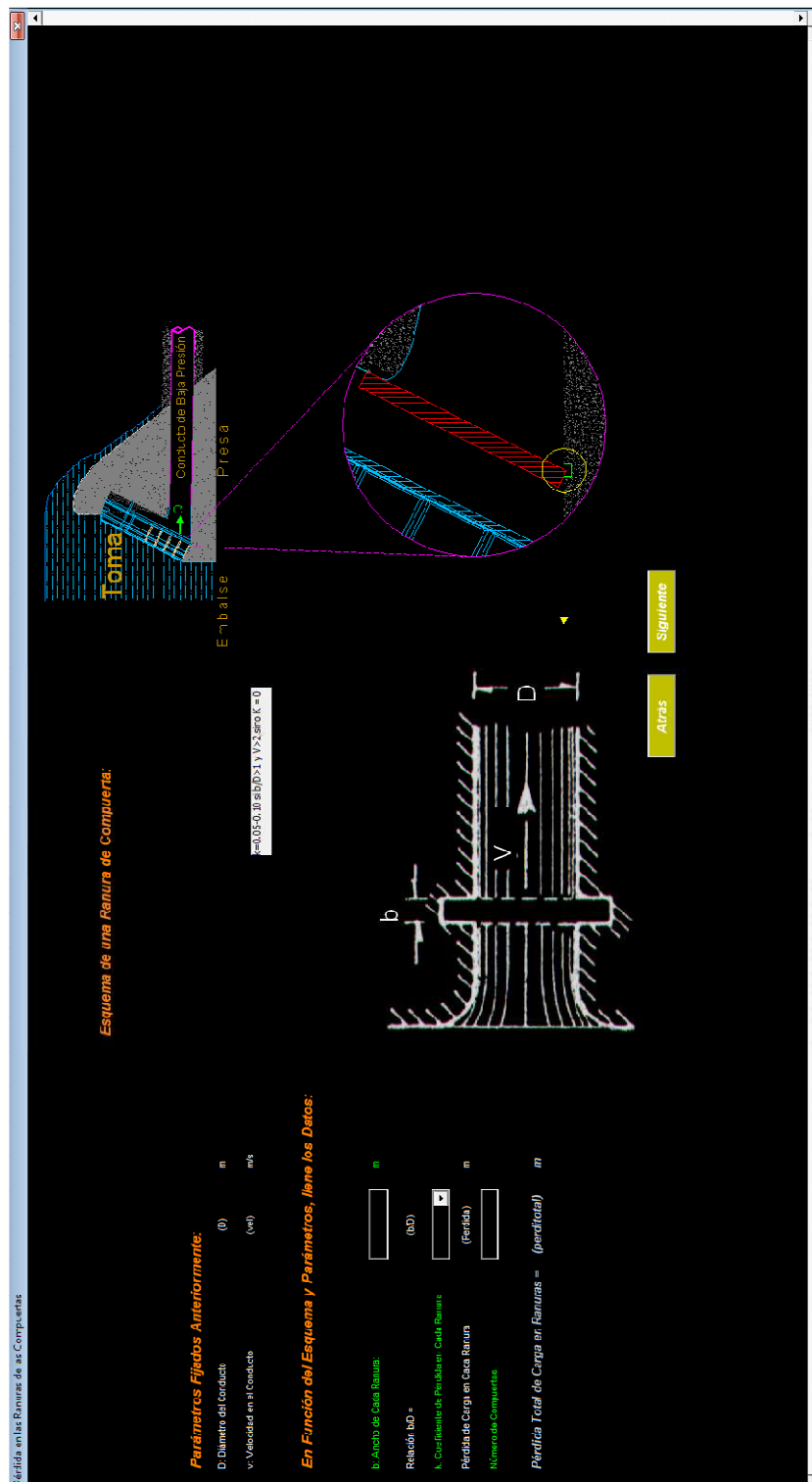
Si alguna de las condiciones anteriores o ambas no se cumplen, entonces las pérdidas en las ranuras serán tan pequeñas que el coeficiente de pérdida k será igual a cero y no existirán pérdidas de carga.

En la parte central de la pantalla aparece una imagen donde se puede apreciar tanto la ubicación de las ranuras, así como un detalle de la misma.

En la parte inferior derecha se presentan los botones de “REGRESO” y de “AVANCE”, los cuales podrán ser usados en cualquier momento.

Una vez que se haya ingresado todos los datos para las pérdidas de carga por ranuras se debe dar un clic en el botón “SIGUIENTE”, con el cual se traslada a la siguiente ventana.

Figura 5.15. Ventana para el ingreso de datos de ranuras.



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez.



## 5.11. PÉRDIDAS POR CODOS Y TEES

Al elegir la opción de pérdidas por codos y tees aparece una ventana donde se aprecia que en la parte superior derecha existen seis pestañas, las cuales sirven para ubicar los diferentes tipos de pérdida k una vez escogidos en la primera pestaña.

El programa posee una base de datos de treinta y cuatro derivaciones, de las cuales doce son codos, dieciséis son derivaciones tipo “Y” y las seis restantes son derivaciones tipo “T”. Todas las derivaciones estarán dispuestas en las cinco pestañas finales

El procedimiento que se debe de realizar en esta sección de derivaciones es el siguiente:

1. En la pestaña 1 se debe de elegir la o las derivaciones requeridas, para lo cual el usuario se ayudará con las imágenes que aparecerán en el centro de la pantalla.
2. Escoger la pestaña 2 y observar las opciones de derivaciones que se haya elegido las cuales estarán abiertas para el ingreso de datos.
3. Para el ingreso de datos a lado de cada tipo de derivación se encuentra una imagen explicativa, la cual sirve de ayuda al usuario para llenar estos cuadros de datos.
4. Una vez que se haya llenado los datos de la o las diferentes derivaciones de la pestaña 2 se procede a seleccionar la pestaña 3.
5. En la pestaña 3 observar las opciones de derivaciones que se haya elegido, las cuales estarán abiertas para el ingreso de datos.
6. Si existen derivaciones abiertas para el ingreso de datos llenar los datos requeridos, caso contrario elegir la siguiente pestaña.
7. Escoger la pestaña 4 y observar las opciones de derivaciones que se haya elegido, las cuales estarán abiertas para el ingreso de datos.

8. Si existen derivaciones abiertas para el ingreso de datos llenar los datos requeridos, caso contrario elegir la siguiente pestaña.
9. Escoger la pestaña 5 y observar las opciones de derivaciones que se haya elegido, las cuales estarán abiertas para el ingreso de datos.
10. Si existen derivaciones abiertas para el ingreso de datos llenar los datos requeridos, caso contrario se debe de dar un clic en el botón de *siguiente*.

De las cinco pestañas para ingreso de datos las dos primeras serán para ingresar los datos de codos y las tres siguientes pestañas serán para ingresar los datos de derivaciones tipo “Y” y “T”. En cada una de las cinco pestañas aparece el botón “SIGUIENTE”, el cual sirve para poder trasladarse hacia la siguiente ventana que contenga otro tipo de pérdida de carga, sin embargo, si se dio un clic equivocadamente sobre el botón “SIGUIENTE”, en la próxima ventana habrá un botón “ATRÁS” con el cual se podrá volver y llenar los datos que no fueron ingresados.

De las seis pestañas el contenido de cada una se presenta a continuación:

Pestaña 1: Formas de las derivaciones.

En la pestaña 1 aparece la lista de todas las formas de las diferentes derivaciones que se pueden escoger. De todas estas formas se puede escoger una sola, como varias opciones, dependiendo de la configuración del sistema de conducción.

En la parte central de la pantalla aparece una imagen de la forma de derivación, la cual va cambiando a medida que se pase por encima de cada una de las opciones en la lista el cursor, con lo cual el usuario podrá ver cuál es la derivación que más le convenga.

Para ésta opción de derivaciones el usuario puede escoger entre las siguientes treinta y cuatro derivaciones:

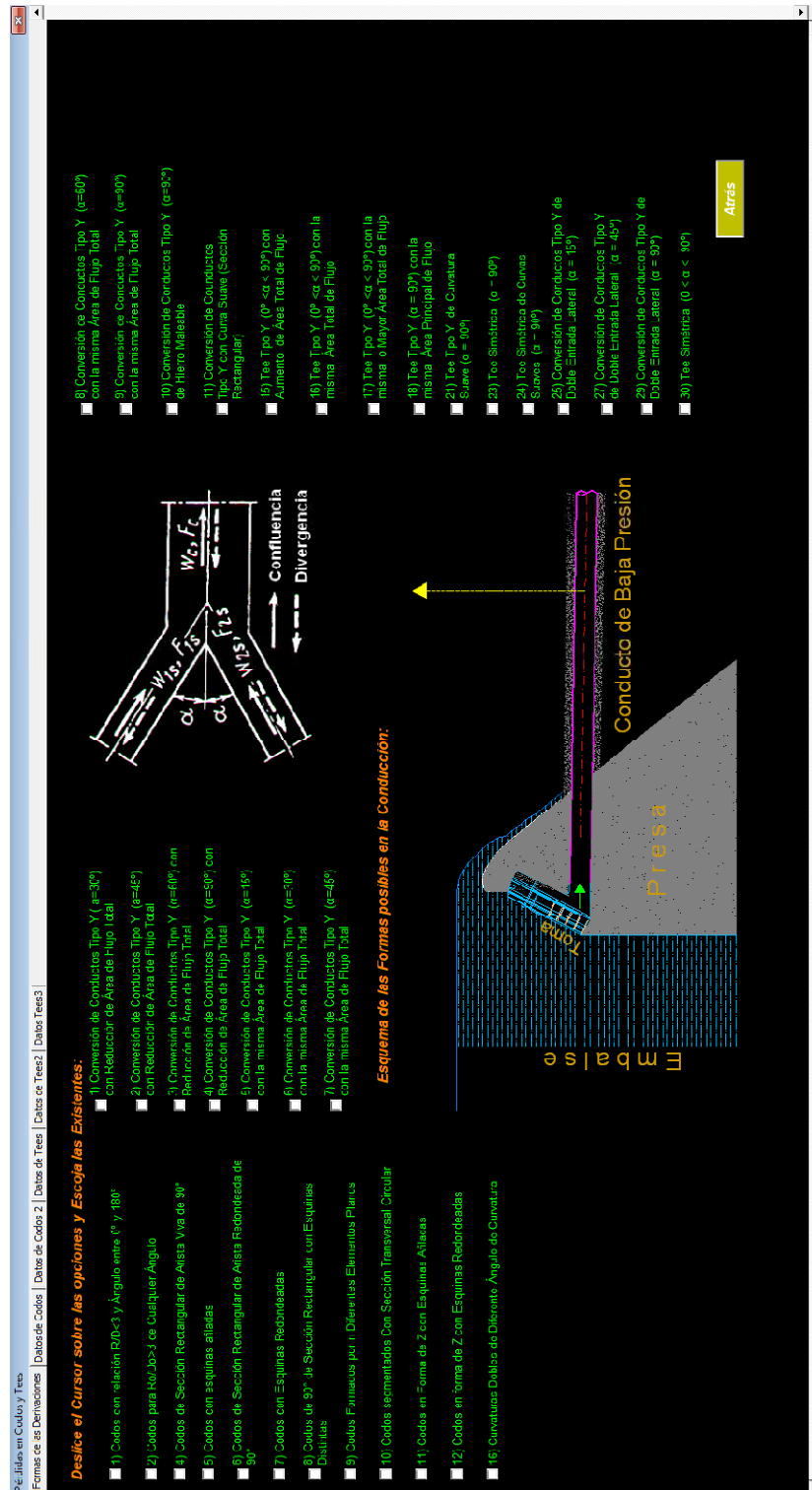
- Codos con relación  $R/D < 3$  y Ángulo entre  $0^\circ$  y  $180^\circ$
- Codos para  $R_o/D_o > 3$  de Cualquier Ángulo
- Codos de Sección Rectangular de Arista Viva de  $90^\circ$

- Codos con esquinas afiladas
- Codos de Sección Rectangular de Arista Redondeada de  $90^\circ$
- Codos con Esquinas Redondeadas
- Codos de  $90^\circ$  de Sección Rectangular con Esquinas D istintas
- Codos Formados por n Diferentes Elementos Planos
- Codos segmentados Con Sección Transversal Circular
- Codos en Forma de Z con Esquinas Afiladas
- Codos en forma de Z con Esquinas Redondeadas
- Curvaturas Dobles de Diferente Ángulo de Curvatura
- Conversión de Conductos Tipo Y ( $\alpha=30^\circ$ ) con Reducción de Área de Flujo Total
- Conversión de Conductos Tipo Y ( $\alpha =45^\circ$ ) con Reducción de Área de Flujo Total
- Conversión de Conductos Tipo Y ( $\alpha =60^\circ$ ) con Reducción de Área de Flujo Total
- Conversión de Conductos Tipo Y ( $\alpha =90^\circ$ ) con Reducción de Área de Flujo Total
- Conversión de Conductos Tipo Y ( $\alpha =15^\circ$ ) con la misma Área de Flujo Total
- Conversión de Conductos Tipo Y ( $\alpha =30^\circ$ ) con la misma Área de Flujo Total
- Conversión de Conductos Tipo Y ( $\alpha =45^\circ$ ) con la misma Área de Flujo Total
- Conversión de Conductos Tipo Y ( $\alpha =60^\circ$ ) con la misma Área de Flujo Total

- Conversión de Conductos Tipo Y ( $\alpha = 90^\circ$ ) con la misma Área de Flujo Total
- Conversión de Conductos Tipo Y ( $\alpha = 90^\circ$ ) de Hierro Maleable
- Conversión de Conductos Tipo Y con Curva Suave (Sección Rectangular)
- Tee Tipo Y ( $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ ) con Aumento de Área Total de Flujo
- Tee Tipo Y ( $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ ) con la misma Área Total de Flujo
- Tee Tipo Y ( $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ ) con la misma o Mayor Área Total de Flujo
- Tee Tipo Y ( $\alpha = 90^\circ$ ) con la misma Área Principal de Flujo
- Tee Tipo Y de Curvatura Suave ( $\alpha = 90^\circ$ )
- Tee Simétrica ( $\alpha = 90^\circ$ )
- Tee Simétrica de Curvas Suaves ( $\alpha = 90^\circ$ )
- Conversión de Conductos Tipo Y de Doble Entrada Lateral ( $\alpha = 15^\circ$ )
- Conversión de Conductos Tipo Y de Doble Entrada Lateral ( $\alpha = 45^\circ$ )
- Conversión de Conductos Tipo Y de Doble Entrada Lateral ( $\alpha = 90^\circ$ )
- Tee Simétrica ( $0 < \alpha < 90^\circ$ )

En la parte inferior derecha de la pantalla aparece el botón “ATRÁS”, con el cual se podrá regresar hacia la ventana anterior.

Figura 5.16. Ventana para la selección de codos y tees.



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez.

Pestaña 2: Datos de codos.

Esta pestaña está destinada para el ingreso de datos de codos. Aquí se encuentran siete tipos de codos, cada uno de los cuales posee cuadros de llenado de datos, cuadros de valores calculados automáticamente y una imagen explicativa de cada tipo de codo y sus datos requeridos.

Los datos necesarios para los siete tipos de codos son los siguientes:

1. Codos con relación  $R/D < 3$  y Ángulo entre  $0^\circ$  y  $180^\circ$ .
  - Ángulo de apertura
  - Radio de giro interno
  - Ancho de tubería
  - Alto de tubería

Este caso de codo puede ser usado tanto para conducciones circulares, así como rectangulares, por lo que si se trata de una conducción circular se debe de ingresar el ancho de la tubería igual al alto de la tubería igual al diámetro de la conducción.

2. Codos para  $R_o/D_o > 3$  de Cualquier Ángulo.
  - Ángulo de apertura
  - Radio de giro interno
  - Alto de la tubería
  - Relación radio de giro – Diámetro de la conducción  $R/D$ : Aquí se debe de escoger el valor más próximo al valor  $R/D$  real

Este caso de codo puede ser usado tanto para conducciones circulares, así como cuadradas, por lo que si se trata de una conducción cuadrada solamente se debe de ingresar el valor del ancho de la conducción. La casilla para ingresar el ancho en una conducción cuadrada es la misma para ingresar el diámetro de una conducción circular.

### 3. Codos de Sección Rectangular de Arista Viva de 90°:

- Longitud total de codo ( $l_o$ )
- Diámetro de codo ( $D$ )
- Ancho de codo a la entrada ( $b_o$ )
- Ancho de codo a la salida ( $b_1$ )
- Alto de codo ( $a_o$ )
- Relación alto – ancho  $a_o/b_o$ : Aquí se debe de escoger el valor más próximo al valor  $a_o/b_o$  real

Este tipo de codo es solamente para conducciones rectangulares y en el dato que dice diámetro, se trata del diámetro hidráulico, el cual se podrá determinar con la siguiente relación, ya que la conducción siempre estará llena, es decir a presión. A demás este tipo de codo considera posible que el ancho en la salida sea diferente al ancho en la entrada, pero con la misma altura.

$$A_1 = a_o * b_o$$

$$D_h = \sqrt{\frac{4 * A_1}{\pi}}$$

### 4. Codos con esquinas afiladas.

- Ángulo de apertura
- Ancho de la conducción
- Alto de la conducción

### 5. Codos de Sección Rectangular de Arista Redondeada de 90°

- Ángulo de apertura
- Ancho inicial de la conducción ( $b_o$ )
- Alto de la conducción ( $a_o$ )

- Ancho final de la conducción
- Radio de curvatura
- Relación alto – ancho  $a_0/b_0$ : Aquí se debe de escoger el valor más próximo al valor  $a_0/b_0$  real

Este tipo de codo es solamente para conducciones rectangulares y este tipo de codo considera posible que el ancho en la salida sea diferente al ancho en la entrada, pero con la misma altura.

#### 6. Codos con Esquinas Redondeadas.

- Ángulo de apertura
- Ancho de la conducción
- Alto de la conducción

Este caso de codo puede ser usado tanto para conducciones circulares, así como rectangulares, por lo que si se trata de una conducción circular se debe de ingresar el ancho de la tubería igual al alto de la tubería igual al diámetro de la conducción.

#### 7. Codos de 90° de Sección Rectangular con Esquinas Distintas.

- a. Codo 90° (esquina interna redonda y externa afilada)
  - Alto de la conducción
  - Ancho de la conducción
  - Radio interno de giro
- b. Codo 90° (esquina interna redonda y externa inclinada 45°)
  - Alto de la conducción
  - Ancho de la conducción
- c. Codo con esquina interna inclinada 45° y externa afilada



- Alto de la conducción
  - Ancho de la conducción
  - Longitud de la esquina
- d. Codo (esquina interna con 2 inclinaciones de  $30^\circ$  y externa fila)
- Alto de la conducción
  - Ancho de la conducción
- e. Codo (esquina interna con 2 inclinaciones de  $30^\circ$ , externa  $30^\circ$ )
- Alto de la conducción
  - Ancho de la conducción
- f. Codo  $90^\circ$  (sección rectangular con Geometría Aerodinámica Interior)
- Alto de la conducción
  - Ancho de la conducción
  - Radio interno de giro
  - Radio externo de giro

Este tipo de codos son solamente para geometría rectangular.

En la parte inferior derecha de la ventana se encuentra ubicado el botón de "SIGUIENTE", con el cual se puede desplazar hacia el siguiente tipo de pérdida de carga.

Figura 5.17. Ventana número 1 para el ingreso de datos de codos

Peñón en Codos y Test | Datos de Codos 2 | Datos de "ees" | Datos de "tees" | Datos de "tees"

**Llene los Datos de Acuerdo a la Forma Escogida:**

**1) Codos con relación RodDo y Ángulo entre  $\theta = 1, 160^\circ$**

Ángulo de Apertura

R: Radio de Giro interno = m

Para Tuberías Circulares  $ao = bo = Do$

ai(Do): Ancho de la Tubería = m

bi(Do): Alto de la Tubería = m

K: Coeficiente de Pérdida = (K)

H: Pérdida de Carga = (H)

**2) Codos con relación RodDo y Ángulo Cualquiera**

Ángulo de Apertura

R: Radio de Giro interno = m

Para Tuberías Circulares  $ao = bi = Do$

ai(Do): Ancho de la Tubería = m

Relación RodDo Calculada = (ao/Do)

Esquema "A" auto más aproximado al Calculado

K: Coeficiente de Pérdida = (K)

H: Pérdida de Carga = (H)

**3) Codos de Sección Rectangular de Arista Viva de  $90^\circ$**

Longitud Total de Codo = m

D: Diámetro de Codo = m

Por Ángulo de Codo a la Entrada

bi: Ancho de Codo a la Entrada = m

ai: Ancho de Codo a la Salida = m

ao: Alto de Codo = m

Relación RodDo Calculada = (ao/Do)

Esquema "B" auto más aproximado al Calculado

K: Coeficiente de Pérdida = (K)

H: Pérdida de Carga = (H)

**4) Codos de Sección Rectangular de Arista Viva de  $90^\circ$**

Ángulo de Apertura

ai(Do): Ancho de la Tubería = m

bi(Do): Ancho de la Tubería = m

K: Coeficiente de Pérdida = (K)

H: Pérdida de Carga = (H)

**5) Codos con Esquinas Afiladas**

Ángulo de Apertura

ai(Do): Ancho de la Tubería = m

bi(Do): Ancho de la Tubería = m

K: Coeficiente de Pérdida = (K)

H: Pérdida de Carga = (H)

**6) Codos con Esquinas Redondeadas**

Ángulo de Apertura

ao: Alto de la Tubería = m

bi: Ancho Inicial de la Tubería = m

bi: Ancho Final de la Tubería = m

r: Radio de Curvatura del Esp. = m

Relación r/boom Calculada = (r/boom)

Esquema "A" auto más aproximado al Calculado

H: Pérdida de Carga = (H)

**7) Codos con Esquinas Redondeadas**

Ángulo de Apertura

r: Radio de Curvatura del Esp. = m

Para Tuberías Circulares  $ao = bo = Do$

ai(Do): Ancho de la Tubería = m

bi(Do): Ancho de la Tubería = m

K: Coeficiente de Pérdida = (K)

H: Pérdida de Carga = (H)

**8) Codos de  $90^\circ$  de Sección Rectangular con Esquinas Disminuas**

o: Codo  $90^\circ$  (esquina interna redondeada y externa afilada) = m

b: Codo  $90^\circ$  (esquina interna afilada y externa redondeada) = m

c: Codo con esquina interna redondeada  $45^\circ$  y externa afilada = m

d: Codo (esquina interna con 2 inclinaciones de  $30^\circ$  y externa filab) = m

e: Codo (esquina interna con 2 inclinaciones de  $30^\circ$  y externa  $90^\circ$ ) = m

f: Codo  $90^\circ$  (esquina redondeada con Esquinas Acodadas) = m

ao: Alto de la Tubería = m

bo: Ancho de la Tubería = m

m: Radio del Esp. = m

r1: Radio del Esp. = m

r2: Largo de Esquina = m

**Siguiente**

FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez.

### Pestaña 3: Datos de codos 2.

Esta pestaña está destinada para el ingreso de datos de codos. Aquí se encuentran cinco tipos de codos, cada uno de los cuales posee cuadros de llenado de datos, cuadros de valores calculados automáticamente y una imagen explicativa de cada tipo de codo y sus datos requeridos.

Los datos necesarios para los cinco tipos de codos son los siguientes:

#### 1. Codos Formados por n Diferentes Elementos Planos

- a. Codo de  $45^\circ$  de 3 elementos
- b. Codo de  $60^\circ$  de 3 elementos
- c. Codo de  $60^\circ$  de 4 elementos
- d. Codo de  $90^\circ$  de 3 elementos con ángulos de  $30^\circ$  y  $60^\circ$

Este tipo de codos puede ser usado tanto para una geometría circular, así como para una geometría rectangular.

#### 2. Codos segmentados Con Sección Transversal Circular

- a. Codo de  $90^\circ$  de 5 elementos de  $22,5^\circ$  cada uno
  - Radio de curvatura
  - Longitud de cada elemento
  - Diámetro interno
- b. Codo de  $90^\circ$  de 4 elementos de  $30^\circ$  cada uno
  - Radio de curvatura
  - Longitud de cada elemento
  - Diámetro interno
- c. Codo de  $90^\circ$  de 3 elementos de  $45^\circ$  cada uno
  - Radio de curvatura

- Longitud de cada elemento
- Diámetro interno

### 3. Codos en Forma de Z con Esquinas Afiladas

#### a. Codo Z de 90° Sección transversal rectangular

- Alto de la conducción
- Ancho de la conducción
- Longitud de cada elemento
- Longitud del codo
- Diámetro interno
- Radio de curvatura

#### b. Codos de 90° con sección transversal rectangular

- Alto de la conducción
- Ancho de la conducción
- Longitud de cada elemento
- Longitud del codo
- Diámetro interno
- Radio de curvatura

#### c. Codos de 30° c/u con sección transversal Circular

- Alto de la conducción
- Ancho de la conducción
- Longitud de cada elemento
- Longitud del codo

- Diámetro interno
- Radio de curvatura

#### 4. Codos en forma de Z con Esquinas Redondeadas

##### a. Codos de Cualquier Apertura Situados en el Mismo Plano

- Ángulo de apertura
- Radio de curvatura
- Alto de la conducción
- Ancho de la conducción

##### b. Codos de Cualquier Apertura Situados en Planos Perpendiculares

- Ángulo de apertura
- Radio de curvatura
- Alto de la conducción
- Ancho de la conducción

#### 5. Curvaturas Dobles de Diferente Ángulo de Curvatura

##### a. Codos de Cualquier Apertura Situados en el Mismo Plano

- Ángulo de apertura
- Radio de curvatura
- Longitud de cada elemento
- Alto de la conducción
- Ancho de la conducción

En la parte inferior derecha de la ventana se encuentra ubicado el botón “SIGUIENTE”, con el cual se puede desplazar hacia el siguiente tipo de pérdida de carga.

Figura 5.18. Ventana número 2 para el ingreso de datos de codos.

Perdas en Codo y Tee  
 Formas de las Derivaciones: Datos de Codo, Datos de Codo y Tee, Datos de Tee, Datos de Tee y Tee

**9) Codos Formados por n Diferentes Elementos Planos**

- a) Codo de 45° de 3 elementos
- b) Codo de 60° de 3 elementos
- c) Codo de 90° de 3 elementos

Datos para Caso 9: a, b, c  
 Ancho de Curvatura: [input type="text"] m  
 Longitud cada elemento: [input type="text"] m  
 Diámetro interno: [input type="text"] m  
 Coeficiente de Pérdida = [input type="text"] (K)  
 Pérdida de Carga = [input type="text"] (h)

**10) Codos Formados por n Diferentes Elementos Redondeados**

- a) 2 Codos de Cualesquiera Situados en Planos Perpendiculares
- b) 2 Codos de Cualesquiera Situados en Planos Perpendiculares

Para Tuberías Circulares  $so = so = lo$   
 Ancho de Abertura: [input type="text"] m  
 Radio de Curvatura: [input type="text"] m  
 Coeficiente de Pérdida = [input type="text"] (K)  
 Pérdida de Carga = [input type="text"] (h)

**11) Codos en Forma de Z con Esquinas Afiliadas**

- a) Codo de 90° con sección transversal rectangular
- b) Codo de 90° con sección transversal rectangular

Ancho de Sección: [input type="text"] m  
 Ancho de Sección: [input type="text"] m  
 Longitud cada elemento: [input type="text"] m  
 Longitud del Codo: [input type="text"] m  
 Diámetro interno: [input type="text"] m  
 Radio de Curvatura: [input type="text"] m  
 Coeficiente de Pérdida = [input type="text"] (K)  
 Pérdida de Carga = [input type="text"] (h)

**12) Codos en Forma de S con Esquinas Redondeadas**

- a) 2 Codos de Cualesquiera Situados en Planos Perpendiculares
- b) 2 Codos de Cualesquiera Situados en Planos Perpendiculares

Ancho de Abertura: [input type="text"] m  
 Radio de Curvatura: [input type="text"] m  
 Coeficiente de Pérdida = [input type="text"] (K)  
 Pérdida de Carga = [input type="text"] (h)

**13) Codos en Forma de S con Esquinas Redondeadas**

- a) 2 Codos de Cualesquiera Situados en el mismo Plano
- b) 2 Codos de Cualesquiera Situados en Planos Perpendiculares

Ancho de Abertura: [input type="text"] m  
 Radio de Curvatura: [input type="text"] m  
 Coeficiente de Pérdida = [input type="text"] (K)  
 Pérdida de Carga = [input type="text"] (h)

**14) Codos en Forma de S con Esquinas Redondeadas**

- a) 2 Codos de Cualesquiera Situados en el mismo Plano
- b) 2 Codos de Cualesquiera Situados en Planos Perpendiculares

Ancho de Abertura: [input type="text"] m  
 Radio de Curvatura: [input type="text"] m  
 Coeficiente de Pérdida = [input type="text"] (K)  
 Pérdida de Carga = [input type="text"] (h)

Siguiente

FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez.

Pestaña 4: Datos de tees.

Esta pestaña está destinada para el ingreso de datos de tees. Aquí se encuentran nueve tipos de tees, cada uno de las cuales posee cuadros de llenado de datos, cuadros de valores calculados automáticamente y una imagen explicativa de cada tipo de tee y sus datos requeridos.

Los datos necesarios para los nueve tipos de tees son los siguientes:

1. Conversión de Conductos Tipo Y ( $\alpha=30^\circ$ ) con Reducción de Área de Flujo Total

- Caudal de desviación lateral
- Diámetro de entrada lateral
- Diámetro final a la salida
- Relación de áreas  $A_s/A_c$ : Aquí se debe de escoger el valor más próximo al valor  $A_s/A_c$  real

Los valores de áreas se calculan automáticamente al ingresar los datos anteriormente mencionados.

2. Conversión de Conductos Tipo Y ( $\alpha =45^\circ$ ) con Reducción de Área de Flujo Total

- Caudal de desviación lateral
- Diámetro de entrada lateral
- Diámetro final a la salida
- Relación de áreas  $A_s/A_c$ : Aquí se debe de escoger el valor más próximo al valor  $A_s/A_c$  real

Los valores de áreas se calculan automáticamente al ingresar los datos anteriormente mencionados.

### 3. Conversión de Conductos Tipo Y ( $\alpha = 60^\circ$ ) con Reducción de Área de Flujo Total

- Caudal de desviación lateral
- Diámetro de entrada lateral
- Diámetro final a la salida
- Relación de áreas  $A_s/A_c$ : Aquí se debe de escoger el valor más próximo al valor  $A_s/A_c$  real

Los valores de áreas se calculan automáticamente al ingresar los datos anteriormente mencionados.

### 4. Conversión de Conductos Tipo Y ( $\alpha = 90^\circ$ ) con Reducción de Área de Flujo Total

- Caudal de desviación lateral
- Diámetro de entrada lateral
- Diámetro final a la salida
- Relación de áreas  $A_s/A_c$ : Aquí se debe de escoger el valor más próximo al valor  $A_s/A_c$  real

Los valores de áreas se calculan automáticamente al ingresar los datos anteriormente mencionados.

### 5. Conversión de Conductos Tipo Y ( $\alpha = 15^\circ$ ) con la misma Área de Flujo Total

- Caudal de desviación lateral
- Diámetro de entrada lateral
- Diámetro final a la salida
- Relación de áreas  $A_s/A_c$ : Aquí se debe de escoger el valor más próximo al valor  $A_s/A_c$  real



Los valores de áreas se calculan automáticamente al ingresar los datos anteriormente mencionados.

6. Conversión de Conductos Tipo Y ( $\alpha = 30^\circ$ ) con la misma Área de Flujo Total

- Caudal de desviación lateral
- Diámetro de entrada lateral
- Diámetro final a la salida
- Relación de áreas  $A_s/A_c$ : Aquí se debe de escoger el valor más próximo al valor  $A_s/A_c$  real

Los valores de áreas se calculan automáticamente al ingresar los datos anteriormente mencionados.

7. Conversión de Conductos Tipo Y ( $\alpha = 45^\circ$ ) con la misma Área de Flujo Total

- Caudal de desviación lateral
- Diámetro de entrada lateral
- Diámetro final a la salida
- Relación de áreas  $A_s/A_c$ : Aquí se debe de escoger el valor más próximo al valor  $A_s/A_c$  real

Los valores de áreas se calculan automáticamente al ingresar los datos anteriormente mencionados.

8. Conversión de Conductos Tipo Y ( $\alpha = 60^\circ$ ) con la misma Área de Flujo Total

- Caudal de desviación lateral
- Diámetro de entrada lateral
- Diámetro final a la salida

- Relación de áreas  $A_s/A_c$ : Aquí se debe de escoger el valor más próximo al valor  $A_s/A_c$  real

Los valores de áreas se calculan automáticamente al ingresar los datos anteriormente mencionados.

#### 9. Conversión de Conductos Tipo Y ( $\alpha = 90^\circ$ ) con la misma Área de Flujo Total

- Caudal de desviación lateral
- Diámetro de entrada lateral
- Diámetro final a la salida
- Relación de áreas  $A_s/A_c$ : Aquí se debe de escoger el valor más próximo al valor  $A_s/A_c$  real

Los valores de áreas se calculan automáticamente al ingresar los datos anteriormente mencionados.

En la parte inferior derecha de la ventana se encuentra ubicado el botón "SIGUIENTE", con el cual se puede desplazar hacia el siguiente tipo de pérdida de carga.

Figura 5.19. Ventana número 1 para el ingreso de datos de tees.

Reflexión en Codes y Tees | Datos de Codos 2 | Datos de Tees | Datos de Tees 2 | Datos de Tees 3

---

**1) Conversión de Conductos Tipo Y (a=30°) con Reducción de Área de Flujos Total**

Da: Caudal de Entrada Lateral [m³/s]

Ds: Diámetro de Entrada Lateral [m]

Dc: Diámetro Final a la Salida [m]

Relación ASAC Calculada = [ASAC]

Escriba el valor más próximo al calculado de ASAC: [ ]

K: Coeficiente de Pérdida = [ ]

H: Pérdida de Carga = [m]

**2) Conversión de Conductos Tipo Y (a=45°) con Reducción de Área de Flujos Total**

Da: Caudal de Entrada Lateral [m³/s]

Ds: Diámetro de Entrada Lateral [m]

Dc: Diámetro Final a la Salida [m]

Relación ASAC Calculada = [ASAC]

Escriba el valor más próximo al calculado de ASAC: [ ]

K: Coeficiente de Pérdida = [ ]

H: Pérdida de Carga = [m]

**3) Conversión de Conductos Tipo Y (a=60°) con Reducción de Área de Flujos Total**

Da: Caudal de Entrada Lateral [m³/s]

Ds: Diámetro de Entrada Lateral [m]

Dc: Diámetro Final a la Salida [m]

Relación ASAC Calculada = [ASAC]

Escriba el valor más próximo al calculado de ASAC: [ ]

K: Coeficiente de Pérdida = [ ]

H: Pérdida de Carga = [m]

**4) Conversión de Conductos Tipo Y (a=30°) con Reducción de Área de Flujos Total**

Da: Caudal de Entrada Lateral [m³/s]

Ds: Diámetro de Entrada Lateral [m]

Dc: Diámetro Final a la Salida [m]

Relación ASAC Calculada = [ASAC]

Escriba el valor más próximo al calculado de ASAC: [ ]

K: Coeficiente de Pérdida = [ ]

H: Pérdida de Carga = [m]

**5) Conversión de Conductos Tipo Y (a=45°) con Reducción de Área de Flujos Total**

Da: Caudal de Entrada Lateral [m³/s]

Ds: Diámetro de Entrada Lateral [m]

Dc: Diámetro Final a la Salida [m]

Relación ASAC Calculada = [ASAC]

Escriba el valor más próximo al calculado de ASAC: [ ]

K: Coeficiente de Pérdida = [ ]

H: Pérdida de Carga = [m]

**6) Conversión de Conductos Tipo Y (a=60°) con Reducción de Área de Flujos Total**

Da: Caudal de Entrada Lateral [m³/s]

Ds: Diámetro de Entrada Lateral [m]

Dc: Diámetro Final a la Salida [m]

Relación ASAC Calculada = [ASAC]

Escriba el valor más próximo al calculado de ASAC: [ ]

K: Coeficiente de Pérdida = [ ]

H: Pérdida de Carga = [m]

**7) Conversión de Conductos Tipo Y (a=45°) con la misma Área de Flujos Total**

Da: Caudal de Entrada Lateral [m³/s]

Ds: Diámetro de Entrada Lateral [m]

Dc: Diámetro Final a la Salida [m]

Relación ASAC Calculada = [ASAC]

Escriba el valor más próximo al calculado de ASAC: [ ]

K: Coeficiente de Pérdida = [ ]

H: Pérdida de Carga = [m]

**8) Conversión de Conductos Tipo Y (a=30°) con la misma Área de Flujos Total**

Da: Caudal de Entrada Lateral [m³/s]

Ds: Diámetro de Entrada Lateral [m]

Dc: Diámetro Final a la Salida [m]

Relación ASAC Calculada = [ASAC]

Escriba el valor más próximo al calculado de ASAC: [ ]

K: Coeficiente de Pérdida = [ ]

H: Pérdida de Carga = [m]

**9) Conversión de Conductos Tipo Y (a=45°) con la misma Área de Flujos Total**

Da: Caudal de Entrada Lateral [m³/s]

Ds: Diámetro de Entrada Lateral [m]

Dc: Diámetro Final a la Salida [m]

Relación ASAC Calculada = [ASAC]

Escriba el valor más próximo al calculado de ASAC: [ ]

K: Coeficiente de Pérdida = [ ]

H: Pérdida de Carga = [m]

**10) Conversión de Conductos Tipo Y (a=60°) con la misma Área de Flujos Total**

Da: Caudal de Entrada Lateral [m³/s]

Ds: Diámetro de Entrada Lateral [m]

Dc: Diámetro Final a la Salida [m]

Relación ASAC Calculada = [ASAC]

Escriba el valor más próximo al calculado de ASAC: [ ]

K: Coeficiente de Pérdida = [ ]

H: Pérdida de Carga = [m]

**Siguiente**

FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez.

## Pestaña 5: Datos de tees 2.

Esta pestaña está destinada para el ingreso de datos de tees. Aquí se encuentran nueve tipos de tees, cada uno de las cuales posee cuadros de llenado de datos, cuadros de valores calculados automáticamente y una imagen explicativa de cada tipo de tee y sus datos requeridos.

Los datos necesarios para los nueve tipos de tees son los siguientes:

### 1. Conversión de Conductos Tipo Y ( $\alpha = 90^\circ$ ) de Hierro Maleable

- Caudal de desviación lateral
- Diámetro de entrada lateral
- Diámetro final a la salida
- Relación de áreas  $A_s/A_c$ : Aquí se debe de escoger el valor más próximo al valor  $A_s/A_c$  real

Los valores de áreas se calculan automáticamente al ingresar los datos anteriormente mencionados.

### 2. Conversión de Conductos Tipo Y con Curva Suave (Sección Rectangular)

- Caudal de desviación lateral
- Diámetro de entrada lateral
- Diámetro final a la salida
- Relación de áreas  $A_s/A_c$ : Aquí se debe de escoger el valor más próximo al valor  $A_s/A_c$  real

Los valores de áreas se calculan automáticamente al ingresar los datos anteriormente mencionados.

### 3. Tee Tipo Y ( $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ ) con Aumento de Área Total de Flujo

- Caudal de desviación lateral

- Diámetro de entrada lateral
- Ángulo de desviación lateral

4. Tee Tipo Y ( $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ ) con la misma Área Total de Flujo.

- Caudal de desviación lateral
- Diámetro de entrada lateral
- Ángulo de desviación lateral

5. Tee Tipo Y ( $15^\circ < \alpha < 90^\circ$ ) con la misma o Mayor Área Total de Flujo.

- Caudal de desviación lateral
- Diámetro de entrada lateral
- Relación de áreas  $A_s/A_c$ : Aquí se debe de escoger el valor más próximo al valor  $A_s/A_c$  real

Los valores de áreas se calculan automáticamente al ingresar los datos anteriormente mencionados.

6. Tee Tipo Y ( $\alpha = 90^\circ$ ) con la misma Área Principal de Flujo

- Caudal de desviación lateral
- Diámetro de entrada lateral
- Relación de áreas  $A_s/A_c$ : Aquí se debe de escoger el valor más próximo al valor  $A_s/A_c$  real

Los valores de áreas se calculan automáticamente al ingresar los datos anteriormente mencionados.

7. Tee Tipo Y de Curvatura Suave ( $\alpha = 90^\circ$ )

- Caudal de desviación lateral
- Alto de tubería
- Ancho inicial
- Ancho de desviación lateral
- Ancho final
- Relación de áreas  $A_s/A_c$ : Aquí se debe de escoger el valor más próximo al valor  $A_s/A_c$  real

Los valores de áreas se calculan automáticamente al ingresar los datos anteriormente mencionados.

#### 8. Tee Simétrica ( $\alpha = 90^\circ$ )

- Caudales laterales
- Diámetro de desviación lateral
- Relación de áreas  $A_s/A_c$ : Aquí se debe de escoger el valor más próximo al valor  $A_s/A_c$  real

Los valores de áreas se calculan automáticamente al ingresar los datos anteriormente mencionados.

#### 9. Tee Simétrica de Curvas Suaves ( $\alpha = 90^\circ$ )

- Diámetro de desviación frontal
- Radio de curvatura de la desviación

Este tipo de geometría se supone simétrico.

En la parte inferior derecha de la ventana se encuentra ubicado el botón de "SIGUIENTE", con el cual se puede desplazar hacia el siguiente tipo de pérdida de carga.

Figura 5.20. Ventana número 2 para el ingreso de datos de tees.

The screenshot displays a software interface for calculating tee losses, organized into a grid of 12 calculation panels. Each panel includes a diagram of a specific tee configuration and a set of input fields for user-defined parameters.

- Panel 1 (Top Left):** Diagram of a Tee Type Y with a curved branch. Inputs include:  $Q_1$  (Caudal Desviación Lateral),  $Q_2$  (Caudal de Desviación Lateral),  $Q_3$  (Caudal de Entrada Lateral),  $D_1$  (Diámetro Final a la Salida),  $D_2$  (Diámetro de Desviación Lateral),  $\alpha$  (Ángulo de Desviación Lateral),  $K$  (Coeficiente de Pérdida), and  $H$  (Pérdida de Carga).
- Panel 2 (Top Middle):** Diagram of a Tee Type Y with a straight branch. Inputs include:  $Q_1$  (Caudal Desviación Lateral),  $Q_2$  (Caudal de Desviación Lateral),  $Q_3$  (Caudal de Entrada Lateral),  $D_1$  (Diámetro Final a la Salida),  $D_2$  (Diámetro de Desviación Lateral),  $\alpha$  (Ángulo de Desviación Lateral),  $K$  (Coeficiente de Pérdida), and  $H$  (Pérdida de Carga).
- Panel 3 (Top Right):** Diagram of a Tee Type Y with a curved branch. Inputs include:  $Q_1$  (Caudal Desviación Lateral),  $Q_2$  (Caudal de Desviación Lateral),  $Q_3$  (Caudal de Entrada Lateral),  $D_1$  (Diámetro Final a la Salida),  $D_2$  (Diámetro de Desviación Lateral),  $\alpha$  (Ángulo de Desviación Lateral),  $K$  (Coeficiente de Pérdida), and  $H$  (Pérdida de Carga).
- Panel 4 (Middle Left):** Diagram of a Tee Type Y with a straight branch. Inputs include:  $Q_1$  (Caudal Desviación Lateral),  $Q_2$  (Caudal de Desviación Lateral),  $Q_3$  (Caudal de Entrada Lateral),  $D_1$  (Diámetro Final a la Salida),  $D_2$  (Diámetro de Desviación Lateral),  $\alpha$  (Ángulo de Desviación Lateral),  $K$  (Coeficiente de Pérdida), and  $H$  (Pérdida de Carga).
- Panel 5 (Middle Middle):** Diagram of a Tee Type Y with a straight branch. Inputs include:  $Q_1$  (Caudal Desviación Lateral),  $Q_2$  (Caudal de Desviación Lateral),  $Q_3$  (Caudal de Entrada Lateral),  $D_1$  (Diámetro Final a la Salida),  $D_2$  (Diámetro de Desviación Lateral),  $\alpha$  (Ángulo de Desviación Lateral),  $K$  (Coeficiente de Pérdida), and  $H$  (Pérdida de Carga).
- Panel 6 (Middle Right):** Diagram of a Tee Type Y with a straight branch. Inputs include:  $Q_1$  (Caudal Desviación Lateral),  $Q_2$  (Caudal de Desviación Lateral),  $Q_3$  (Caudal de Entrada Lateral),  $D_1$  (Diámetro Final a la Salida),  $D_2$  (Diámetro de Desviación Lateral),  $\alpha$  (Ángulo de Desviación Lateral),  $K$  (Coeficiente de Pérdida), and  $H$  (Pérdida de Carga).
- Panel 7 (Bottom Left):** Diagram of a Tee Type Y with a curved branch. Inputs include:  $Q_1$  (Caudal Desviación Lateral),  $Q_2$  (Caudal de Desviación Lateral),  $Q_3$  (Caudal de Entrada Lateral),  $D_1$  (Diámetro Final a la Salida),  $D_2$  (Diámetro de Desviación Lateral),  $\alpha$  (Ángulo de Desviación Lateral),  $K$  (Coeficiente de Pérdida), and  $H$  (Pérdida de Carga).
- Panel 8 (Bottom Middle):** Diagram of a Tee Type Y with a straight branch. Inputs include:  $Q_1$  (Caudal Desviación Lateral),  $Q_2$  (Caudal de Desviación Lateral),  $Q_3$  (Caudal de Entrada Lateral),  $D_1$  (Diámetro Final a la Salida),  $D_2$  (Diámetro de Desviación Lateral),  $\alpha$  (Ángulo de Desviación Lateral),  $K$  (Coeficiente de Pérdida), and  $H$  (Pérdida de Carga).
- Panel 9 (Bottom Right):** Diagram of a Tee Type Y with a straight branch. Inputs include:  $Q_1$  (Caudal Desviación Lateral),  $Q_2$  (Caudal de Desviación Lateral),  $Q_3$  (Caudal de Entrada Lateral),  $D_1$  (Diámetro Final a la Salida),  $D_2$  (Diámetro de Desviación Lateral),  $\alpha$  (Ángulo de Desviación Lateral),  $K$  (Coeficiente de Pérdida), and  $H$  (Pérdida de Carga).

Each panel also includes a 'Siguiente' button and a 'Relación AS/Ac Calculada' field. The diagrams illustrate various flow configurations and loss coefficients (K) for different tee types and branch orientations.

FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez.

### Pestaña 5: Datos de tees 3.

Esta pestaña está destinada para el ingreso de datos de tees. Aquí se encuentran cuatro tipos de tees, cada uno de las cuales posee cuadros de llenado de datos, cuadros de valores calculados automáticamente y una imagen explicativa de cada tipo de tee y sus datos requeridos.

Los datos necesarios para los cuatro tipos de tees son los siguientes:

#### 1. Conversión de Conductos Tipo Y de Doble Entrada Lateral ( $\alpha = 15^\circ$ )

- Caudal de entrada lateral
- Diámetro de entrada lateral
- Relación de caudales  $Q_{1s}/Q_{2s}$ : Aquí se debe de escoger el valor más próximo al valor  $Q_{1s}/Q_{2s}$  real

Relación de áreas  $F_s/F_c$ : Aquí se debe de escoger el valor más próximo al valor  $A_s/A_c$  real.

Los valores de áreas y caudales se calculan automáticamente al ingresar los datos anteriormente mencionados.

#### 2. Conversión de Conductos Tipo Y de Doble Entrada Lateral ( $\alpha = 45^\circ$ )

- Caudal de entrada lateral
- Diámetro de entrada lateral
- Relación de caudales  $Q_{1s}/Q_{2s}$ : Aquí se debe de escoger el valor más próximo al valor  $Q_{1s}/Q_{2s}$  real
- Relación de áreas  $F_s/F_c$ : Aquí se debe de escoger el valor más próximo al valor  $A_s/A_c$  real

Los valores de áreas y caudales se calculan automáticamente al ingresar los datos anteriormente mencionados.

#### 3. Conversión de Conductos Tipo Y de Doble Entrada Lateral ( $\alpha = 90^\circ$ )



- Caudal de entrada lateral
- Diámetro de entrada lateral
- Relación de caudales  $Q_{1s}/Q_{2s}$ : Aquí se debe de escoger el valor más próximo al valor  $Q_{1s}/Q_{2s}$  real
- Relación de áreas  $F_s/F_c$ : Aquí se debe de escoger el valor más próximo al valor  $F_s/F_c$  real

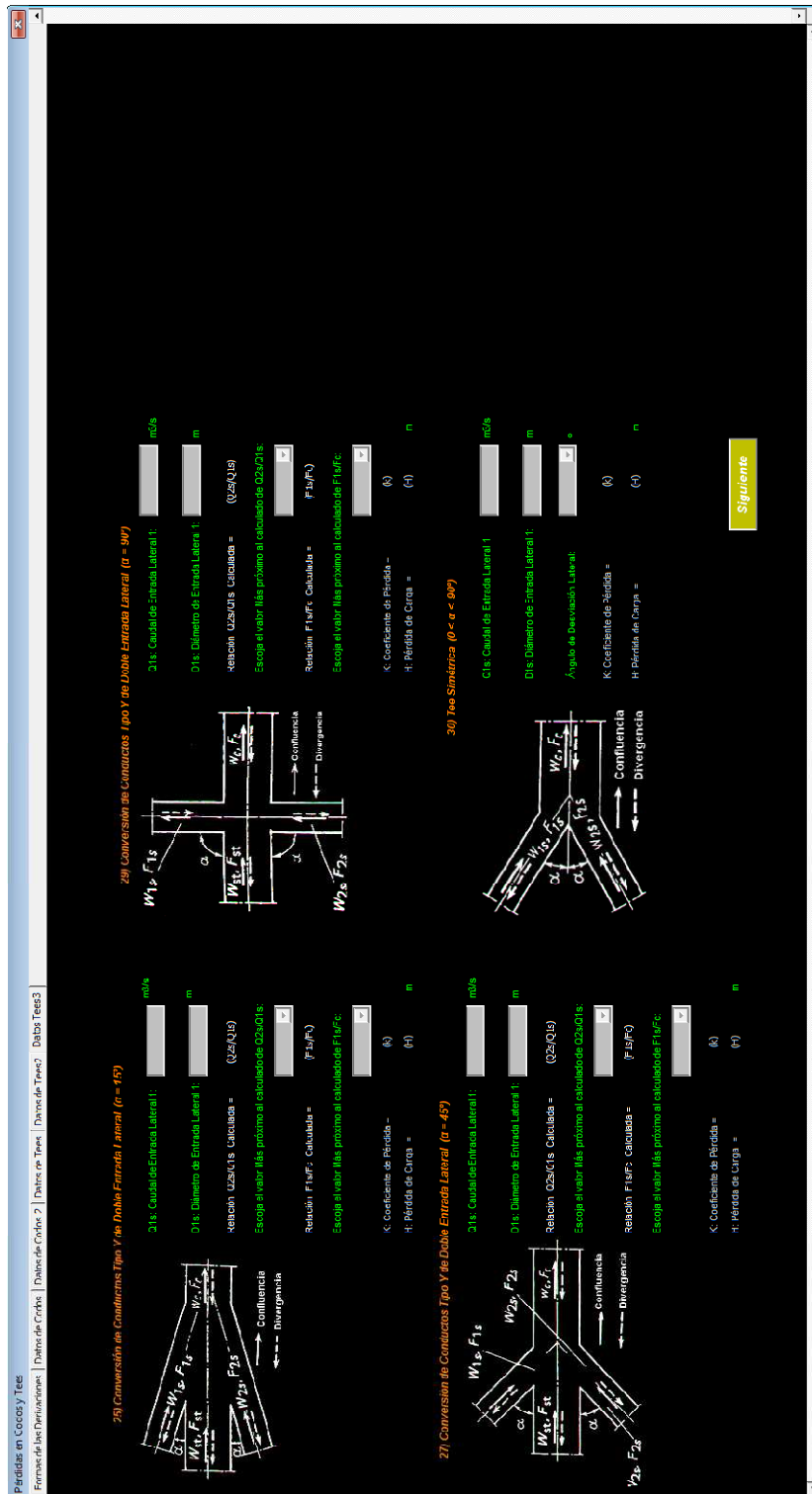
Los valores de áreas y caudales se calculan automáticamente al ingresar los datos anteriormente mencionados.

#### 4. Tee Simétrica ( $0 < \alpha < 90^\circ$ )

- Caudal de entrada lateral
- Diámetro de entrada lateral
- Ángulo de desviación lateral

En la parte inferior derecha de la ventana se encuentra ubicado el botón "SIGUIENTE", con el cual se puede desplazar hacia el siguiente tipo de pérdida de carga.

Figura 5.21. Ventana número 3 para el ingreso de datos de tees.



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez.

## 5.12. PÉRDIDAS POR BOQUILLAS Y DIFUSORES

Esta ventana destinada a obtener las pérdidas por boquillas y difusores cuenta con ocho diferentes tipos, de los cuales cinco son difusores y los restantes tres son boquillas.

Los difusores pueden ser usados para encontrar la pérdida de carga, debido al orificio restringido en maniobras de operación de cierre de las válvulas.

Por otro lado las boquillas pueden ser usadas para encontrar las pérdidas de carga, debido al orificio restringido en maniobras de operación de apertura de las válvulas.

El procedimiento que se debe de realizar en esta sección es el siguiente:

1. Al salir la ventana de boquillas y difusores, aparecen las diferentes opciones con su respectiva imagen explicativa.
2. Se debe escoger de entre las nueve opciones, la pérdida de carga requerida para el orificio restringido.
3. Digitar los datos requeridos para el tipo de pérdida seleccionado.
4. Al ingresar los datos se puede apreciar la pérdida de carga en el orificio restringido.
5. Dar clic en el botón "SIGUIENTE".

Para la opción de difusores el usuario puede escoger entre las siguientes cinco elecciones:

- Difusor de Sección Circular de Paredes Rectas
- Difusor con Paredes Curvas (Sección Mayor es Circular)
- Difusor de Sección Circular con Grada en la Pared
- Difusor de Sección Rectangular con Grada en la Pared
- Difusor de Sección Rectangular con Grada en la Pared (en un Plano)

Para la opción de boquillas el usuario puede escoger entre las siguientes tres elecciones:

- Boquilla de Sección Circular (Con Ángulo de Reducción Gradual entre  $5^\circ$  y  $40^\circ$ )
- Boquilla de Sección Circular con Grada en la Pared
- Pieza de Transición con Cambio Repentino de Sección

Los datos necesarios para los ocho casos son los siguientes:

1. Difusor de Sección Circular de Paredes Rectas

- Diámetro menor del difusor
- Diámetro mayor del difusor
- Ángulo de ampliación del difusor
- Relación de áreas  $A_1/A_0$ : Aquí se debe de escoger el valor más próximo al valor  $A_1/A_0$  real

Los valores de áreas se calculan automáticamente al ingresar los datos anteriormente mencionados.

2. Difusor con Paredes Curvas (Sección Mayor es Circular)

a. Difusor de Sección Menor Circular

- Diámetro menor del difusor
- Diámetro mayor del difusor
- Ancho menor del difusor
- Longitud del difusor

b. Difusor de Sección Menor Rectangular

- Diámetro menor del difusor

- Diámetro mayor del difusor
- Ancho menor del difusor
- Longitud del difusor

### 3. Difusor de Sección Circular con Grada en la Pared

- Diámetro menor del difusor
- Diámetro mayor del difusor
- Longitud del difusor
- Relación de áreas  $A_2/A_0$ : Aquí se debe de escoger el valor más próximo al valor  $A_2/A_0$  real

Los valores de áreas se calculan automáticamente al ingresar los datos anteriormente mencionados.

### 4. Difusor de Sección Rectangular con Grada en la Pared

- Ancho menor del difusor
- Alto menor del difusor
- Ancho mayor del difusor
- Alto mayor del difusor
- Longitud del difusor
- Relación de áreas  $A_2/A_0$ : Aquí se debe de escoger el valor más próximo al valor  $A_2/A_0$  real

Los valores de áreas se calculan automáticamente al ingresar los datos anteriormente mencionados.

### 5. Difusor de Sección Rectangular con Grada en la Pared (en un Plano)

- Alto de difusor

- Ancho menor del difusor
- Ancho mayor del difusor
- Longitud del difusor
- Relación de áreas  $A_2/A_0$ : Aquí se debe de escoger el valor más próximo al valor  $A_2/A_0$  real

Los valores de áreas se calculan automáticamente al ingresar los datos anteriormente mencionados.

6. Boquilla de Sección Circular (Con Ángulo de Reducción Gradual entre  $5^\circ$  y  $40^\circ$ )

- Ancho menor del difusor
- Longitud del difusor
- Ángulo de reducción gradual
- Relación  $l/D_0$ : Aquí se debe de escoger el valor más próximo al valor  $l/D_0$  real

7. Boquilla de Sección Circular con Grada en la Pared.

a. Paredes rectas de ángulo entre  $0^\circ$  y  $180^\circ$

- Diámetro menor del difusor
- Diámetro mayor del difusor
- Ángulo de reducción gradual
- Relación de áreas  $A_2/A_0$ : Aquí se debe de escoger el valor más próximo al valor  $A_2/A_0$  real

Los valores de áreas se calculan automáticamente al ingresar los datos anteriormente mencionados.

b. Paredes Curvas de la Transición

- Diámetro menor del difusor
- Diámetro mayor del difusor
- Relación de áreas  $A_2/A_0$ : Aquí se debe de escoger el valor más próximo al valor  $A_2/A_0$  real
- Radio de curvatura

Los valores de áreas se calculan automáticamente al ingresar los datos anteriormente mencionados.

c. Paredes de transición rectas y fin curvo

- Diámetro menor del difusor
- Diámetro mayor del difusor
- Relación de áreas  $A_2/A_0$ : Aquí se debe de escoger el valor más próximo al valor  $A_2/A_0$  real
- Radio de curvatura

Los valores de áreas se calculan automáticamente al ingresar los datos anteriormente mencionados.

8. Pieza de Transición con Cambio Repentino de Sección

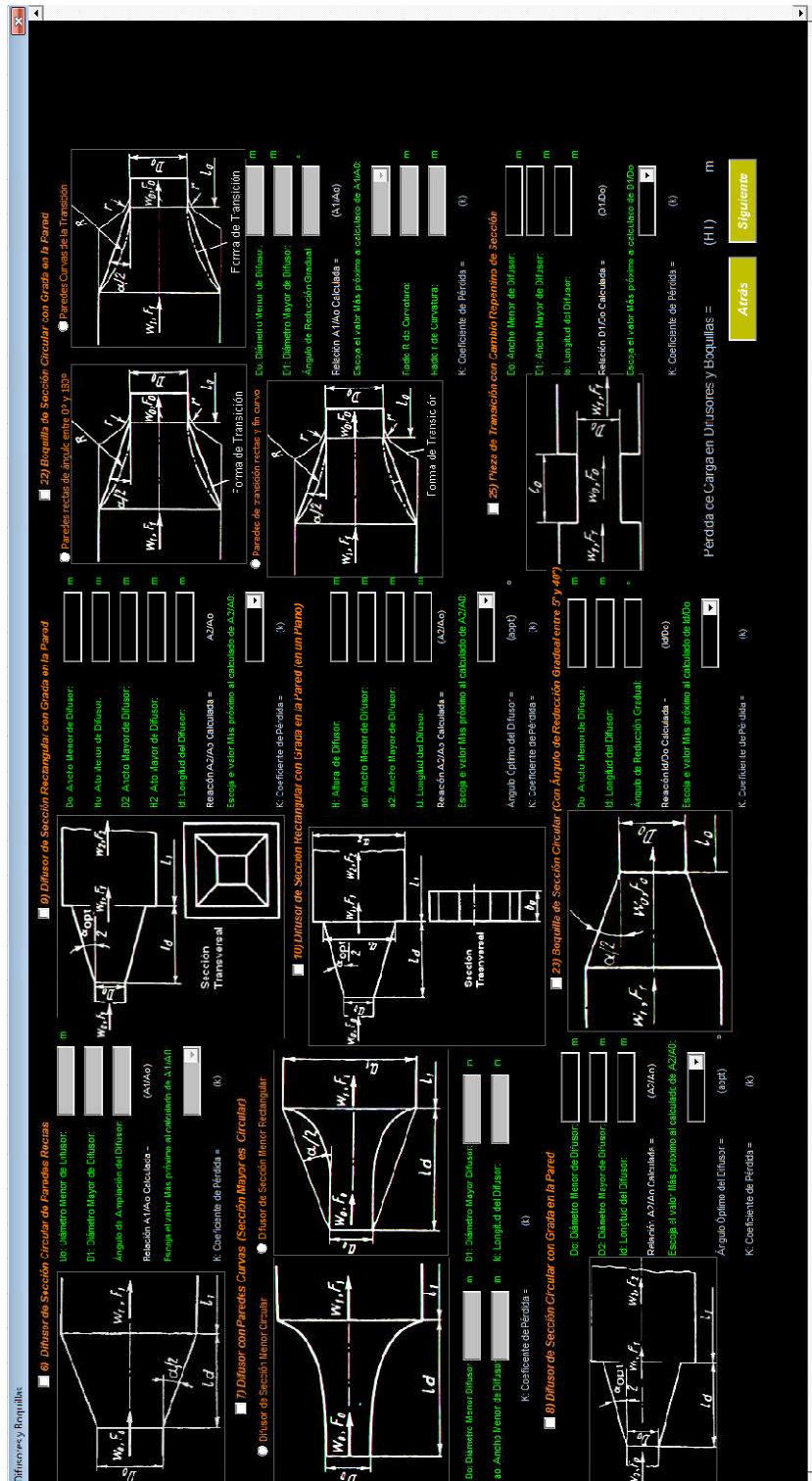
- Ancho menor del difusor
- Ancho mayor del difusor
- Longitud del difusor
- Relación de diámetros  $D_1/D_0$ : Aquí se debe de escoger el valor más próximo al valor  $D_1/D_0$  real

Una vez que se ingresan los datos de la opción escogida aparece en la parte inferior derecha el valor de la pérdida de carga producida en el orificio restringido.

En la parte inferior derecha de la ventana se encuentra ubicado el botón “SIGUIENTE”, con el cual se puede desplazar hacia el siguiente tipo de pérdida de carga.



Figura 5.22. Ventana para el ingreso de datos de difusores y boquillas.



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez.

### 5.13. PÉRDIDA DE CARGA POR CURVATURAS

Al ingresar a la ventana de pérdidas de carga por curvatura se aprecia en la parte izquierda de la ventana la sección para ingreso de datos, mientras que a la derecha de la ventana se encuentra un gráfico explicativo sobre este tipo de pérdida.

El usuario puede elegir hasta cuatro opciones de curvaturas con diferente geometría en una conducción y hasta cinco curvaturas con una misma geometría.

Por ejemplo, si en la conducción se tiene dos curvaturas con una misma geometría se debe de escoger “CURVA #1” y en los datos escoger en “NÚMERO DE CURVAS #1” el valor 2.

Para el ingreso de las variables necesarias para el cálculo de pérdidas de carga en cada curvatura se debe de ingresar los siguientes datos:

- Radio de curvatura
- Ángulo de giro
- Número de curvas

El procedimiento que se debe de realizar en esta sección es el siguiente:

1. Escoger el número de curvas con diferente geometría en la lista ubicada en la parte superior izquierda.
2. Según el número de curvaturas con diferente geometría elegidas ingresar los datos.
3. Observar en la parte inferior derecha el valor total de la pérdida de carga debido al rozamiento en la conducción.
4. Dar clic en el botón “SIGUIENTE”.

En la parte inferior derecha de la ventana se encuentra ubicado el botón “SIGUIENTE”, con el cual se puede desplazar hacia el siguiente tipo de pérdida de carga. Caso contrario dar clic en el botón “ATRÁS” para regresar a la ventana anterior

Figura 5.23. Ventana para el ingreso de datos de curvaturas.

Esquema de las Curvas de Alineación

Visla de Planta

Tom a

Ángulo

R20

Ángulo

Curva

7.143.3

Nivel Máximo de Operación del Embarcadero

Nivel Máximo de Operación del Frigorífico

Pérdida Total de Curva Localizada en Curvas de Alineación (HT) m

Antes

Siguiente

Dámetro del Trazo (D)

Curva # 1

Radio de Curvatura (R1) m

Relación (R1/D) (1)

Ángulo de Giro (G1) (G1)

Coefficiente de Fricción (revestimiento ISO) C1 (C1)

Coefficiente de Corrección para el Ángulo de giro (COR1) (COR1)

Pérdida de Curva Localizada en Curva 1 (H1) (H1)

Número de Curvas # 1 (1)

Pérdida Total de Curva Localizada en Curvas Tipo (HT) (HT)

Curva # 2

Radio de Curvatura (R2) m

Relación (R2/D) (2)

Ángulo de Giro (G2) (G2)

Coefficiente de Fricción (revestimiento ISO) C2 (C2)

Coefficiente de Corrección para el Ángulo de giro (COR2) (COR2)

Pérdida de Curva Localizada en Curva 2 (H2) (H2)

Número de Curvas # 2 (2)

Pérdida Total de Curva Localizada en Curvas Tipo (HT) (HT)

Curva # 3

Radio de Curvatura (R3) m

Relación (R3/D) (3)

Ángulo de Giro (G3) (G3)

Coefficiente de Fricción (revestimiento ISO) C3 (C3)

Coefficiente de Corrección para el Ángulo de giro (COR3) (COR3)

Pérdida de Curva Localizada en Curva 3 (H3) (H3)

Número de Curvas # 3 (3)

Pérdida Total de Curva Localizada en Curvas Tipo (HT) (HT)

Curva # 4

Radio de Curvatura (R4) m

Relación (R4/D) (4)

Ángulo de Giro (G4) (G4)

Coefficiente de Fricción (revestimiento ISO) C4 (C4)

Coefficiente de Corrección para el Ángulo de giro (COR4) (COR4)

Pérdida de Curva Localizada en Curva 4 (H4) (H4)

Número de Curvas # 4 (4)

Pérdida Total de Curva Localizada en Curvas Tipo (HT) (HT)

Pérdida Total de Curva Localizada en Curvas de Alineación (HT) m

Antes

Siguiente

FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez.

## 5.14. PÉRDIDA DE CARGA POR TRANSICIÓN

Este tipo de pérdida de carga se trata sobre el cambio que se produce generalmente en la entrada al túnel de carga, la cual une a las rejillas con la conducción.

La configuración de esta ventana es la siguiente:

En la parte izquierda de la ventana aparece la zona en la cual se debe de llenar los datos necesarios, aquí también aparece el resultado de la pérdida de carga debido a la transición. En la parte derecha de la ventana se aprecia un esquema de la transición en el cual el usuario se puede guiar para ingresar los datos.

Para el ingreso de las variables necesarias para el cálculo de pérdidas de carga por transición se debe de ingresar los siguientes datos:

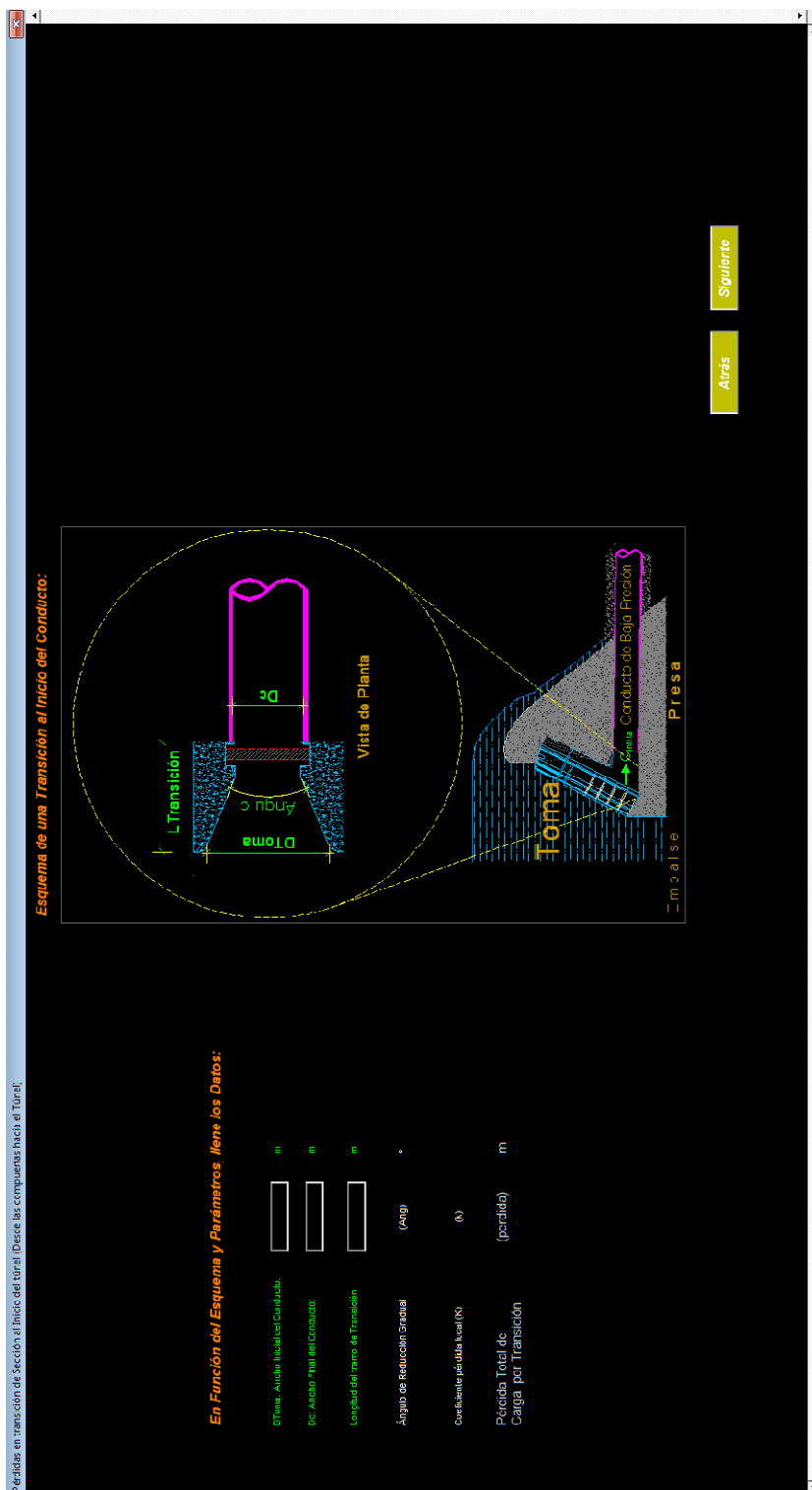
- Ancho inicial del conducto
- Ancho final del conducto
- Longitud del tramo en transición

El procedimiento que se debe de realizar en esta sección es el siguiente:

1. Observar el esquema para de esa manera conocer los datos que se deben de ingresar.
2. Llenar los datos necesarios.
3. Observar en la parte inferior izquierda de la ventana la pérdida de carga generada por la transición.
4. Dar clic en el botón “SIGUIENTE”.

En la parte inferior derecha de la ventana se encuentra ubicado el botón “SIGUIENTE”, con el cual se puede desplazar hacia la siguiente ventana. Caso contrario dar clic en el botón “ATRÁS” para regresar a la ventana anterior.

Figura 5.24. Ventana para el ingreso de datos de transiciones.



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez.

### 5.15. PERDIDAS DE CARGA POR FRICCIÓN

En la ventana correspondiente al cálculo de pérdidas por fricción en la conducción, se tiene cinco opciones de material, de las cuales tres son materiales únicos, la cuarta alternativa es una mezcla de materiales y la quinta opción es un material asignado por el usuario.

Para el cálculo de la pérdida de carga por fricción y del factor de fricción “ $f$ ”, se utilizó la fórmula de DarcyWeisbach adaptándola de tal manera que se pueda utilizar en ella el coeficiente de fricción de Manning ( $n$ ), con lo cual las fórmulas finales son:

Fórmula de la pérdida de Carga de Darcy-Weisbach:

$$h_f = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g} \quad (5.1)$$

Donde:

- $hf$ : Pérdida de carga
- $f$ : Factor de fricción
- $L$ : Longitud de la conducción
- $D$ : Diámetro de la conducción
- $v$ : Velocidad del flujo dentro de la conducción
- $g$ : Aceleración de la gravedad

Para ello se deduce la fórmula del factor de fricción de Darcy-Weisbach adaptada para utilizar en ella el coeficiente de fricción de Manning ( $n$ ):

$$h_f = 10.3n^2 * \frac{Q^2}{D^{5.33}} * L \quad 29 \quad (5.2)$$

$$h_f = 10.3n^2 * \frac{Q^2}{D^{16/3}} * L$$

Sabiendo que el Caudal es producto de Velocidad y área:  $Q = v * A$

---

<sup>29</sup>USBR, Diseño de presas pequeñas, editorial Continental, , 1982, pag 478, México

Y que el área de una sección circular es  $A = \frac{\pi * D^2}{4}$ ,

Entonces:  $Q^2 = \frac{v^2 \pi^2 D^4}{16}$ , que al remplazarla en la expresión de  $h_f$  se obtiene:

$$h_f = 10.3n^2 * \frac{v^2 * \pi^2 * D^4}{16 * D^{16/3}} * L$$

$$h_f = 10.3n^2 * \frac{v^2 * \pi^2}{16 * D^{4/3}} * L$$

$$h_f = 6.35n^2 * \frac{v^2}{D^{4/3}} * L$$

$$h_f = 6.35 * \frac{n^2}{D^{1/3}} * \frac{L}{D} * v^2$$

Multiplicando y dividiendo para  $2g$

$$h_f = 124.5 * \frac{n^2}{D^{1/3}} * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g}$$

$$\text{Por lo tanto: } f = 124.5 \frac{n^2}{D^{1/3}} \quad (5.3)$$

Donde:

f: Factor de fricción que se calcula en el programa con la expresión (5.3)

n: Coeficiente de pérdida por fricción de Manning.

D: Diámetro de la conducción

Los coeficientes de fricción a escoger serán los siguientes:

1. Hormigón estándar (n= 0.014)
2. Acero (n= 0.011)
3. Hormigón lanzado/Shotcrete (n = 0.022)
4. Superficie mixta (n ponderado)

5. Coeficiente asignado por el usuario bajo su criterio.

La opción de superficies mixtas permite una combinación de los materiales hormigón, acero y shotcrete a lo largo del túnel.

El procedimiento que se debe de realizar en esta sección es el siguiente:

1. Escoger una de las cinco opciones para el coeficiente de rozamiento según el material de la conducción.
2. Si se elige la opción de superficies mixtas ingresar el porcentaje de cada material a lo largo del túnel de carga.
3. Se observa las propiedades de la conducción y la pérdida de carga por fricción.
4. Dar clic en el botón "SIGUIENTE".

En la parte inferior derecha de la ventana se encuentra ubicado el botón "SIGUIENTE", con el cual se puede desplazar hacia el siguiente tipo de pérdida de carga. Caso contrario dar clic en el botón "ATRÁS" para regresar a la ventana anterior.



Figura 5.25. Ventana para la selección del tipo de material de la conducción.

**Posibles Superficies Internas del Túnel**

**Hormigón Estándar**

**Acero**

**Escoja la Superficie Interna del Túnel:**

Perímetro de la Sección del Túnel = (p) m

Diámetro del Túnel = (diamtunnel) m


Longitud del Túnel = (longitudtunnel) m


Coefficiente de fricción = (f) m/s


Velocidad en el túnel = (veltunnel) m

Coefficiente de Rugosidad (n) de Manning = (n) m

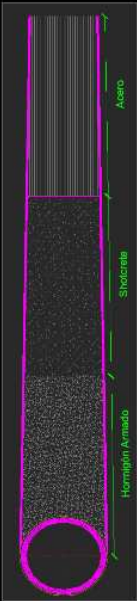
Pérdida de Carga Total por Fricción en el Túnel = (perdida) m

**Hormigón Estándar**  
  
 n = 0.014

**Acero**  
  
 n = 0.011

**Hormigón Lanzado (Shotcrete)**  
  
 n = 0.022

**Longitud de Tubería de Superficies Mixtas**



Porcentaje de la Longitud Recubierta por Hormigón: % = pH m

Porcentaje de la Longitud Recubierta por Acero: % = pA m

Porcentaje del Perímetro Recubierto por Shotcrete: % (Sh) = pS m

**Otro Coeficiente de Rozamiento**

Coefficiente de Rugosidad (n) de Manning =

**Atrás**

FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez.

## **5.16. RESUMEN DE PÉRDIDAS DE CARGA EN EL SISTEMA**

La ventana de resumen de pérdidas de carga en el sistema nos presenta de manera detallada el tipo de pérdida de carga que hay en el sistema y a lado de la misma aparece el valor de la pérdida.

Los tipos de pérdidas de carga detallados son los siguientes:

- Pérdidas en la Rejilla de Separación de Sólidos
- Pérdidas por la Forma en Vista lateral de la Entrada al Túnel
- Pérdidas por Formas Especiales de la Entrada al Túnel
- Pérdida en las Ranuras de las Compuertas
- Pérdidas en transición de Sección al Inicio del túnel (Desde las compuertas hacia el Túnel)
- Pérdidas por Fricción a lo Largo del Túnel
- Pérdidas en Difusores y Boquillas
- Pérdidas en Codos y/o Tees
- Pérdidas en Curvas de Alineación del túnel

Para una mejor comprensión de las pérdidas producidas en los diferentes tramos de la conducción las pérdidas de carga anteriormente mencionadas se resumen en los siguientes enunciados:

- Pérdidas Localizadas Totales en la Entrada del Túnel
- Pérdidas Totales por Fricción a lo Largo del Túnel
- Pérdidas Localizadas Totales a lo largo del Túnel
- Pérdidas de Carga por Velocidad a lo largo del Túnel

Finalmente todas las pérdidas de carga producidas en el sistema aparecen como una pérdida total.

En la parte inferior derecha de la ventana se encuentra ubicado el botón “SIGUIENTE”, con el cual se puede desplazar hacia la siguiente ventana. Caso contrario dar clic en el botón “ATRÁS” para regresar a la ventana anterior.

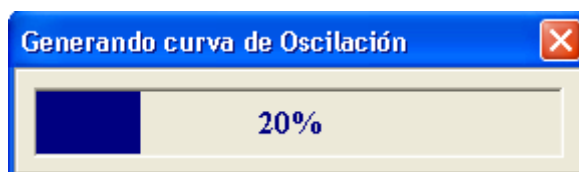
### 5.17. GENERACIÓN DE GRÁFICOS

Una vez que se haya dado clic en el botón “SIGUIENTE” en la ventana de “RESUMEN DE PÉRDIDAS DE CARGA EN EL SISTEMA” y según la opción que se haya escogido en la ventana de “INGRESO DE DATOS INICIALES”, ya sea “Cierre” ó “Apertura”, automáticamente aparecerá la ventana con el tipo de gráfico que corresponda a la maniobra seleccionada.

Se debe de tener en cuenta que después de dar el clic en el botón “SIGUIENTE” el programa comenzará a realizar los cálculos necesarios para obtener las oscilaciones de agua dentro de la chimenea de equilibrio, razón por la cual aparecerá una ventana de avance en los cálculos realizados, la misma que indicará el progreso en porcentaje.

El tiempo que el programa se demora en realizar los cálculos para determinar los niveles de agua dentro de la chimenea de equilibrio en el tiempo estipulado previamente, variará de acuerdo a los datos ingresados, siendo un tiempo de doce segundos un promedio en el cual aparecerá la gráfica, sin embargo se debe de tener en cuenta que el tiempo que se demore el programa en realizar los cálculos para generar la gráfica dependerá de los datos ingresados inicialmente.

**Figura 5.26.** Ventana de avance de generación de la gráfica.



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez.

Las ventanas de gráficos tanto para cierre, como para apertura constan de los siguientes elementos que serán el resultado del programa:

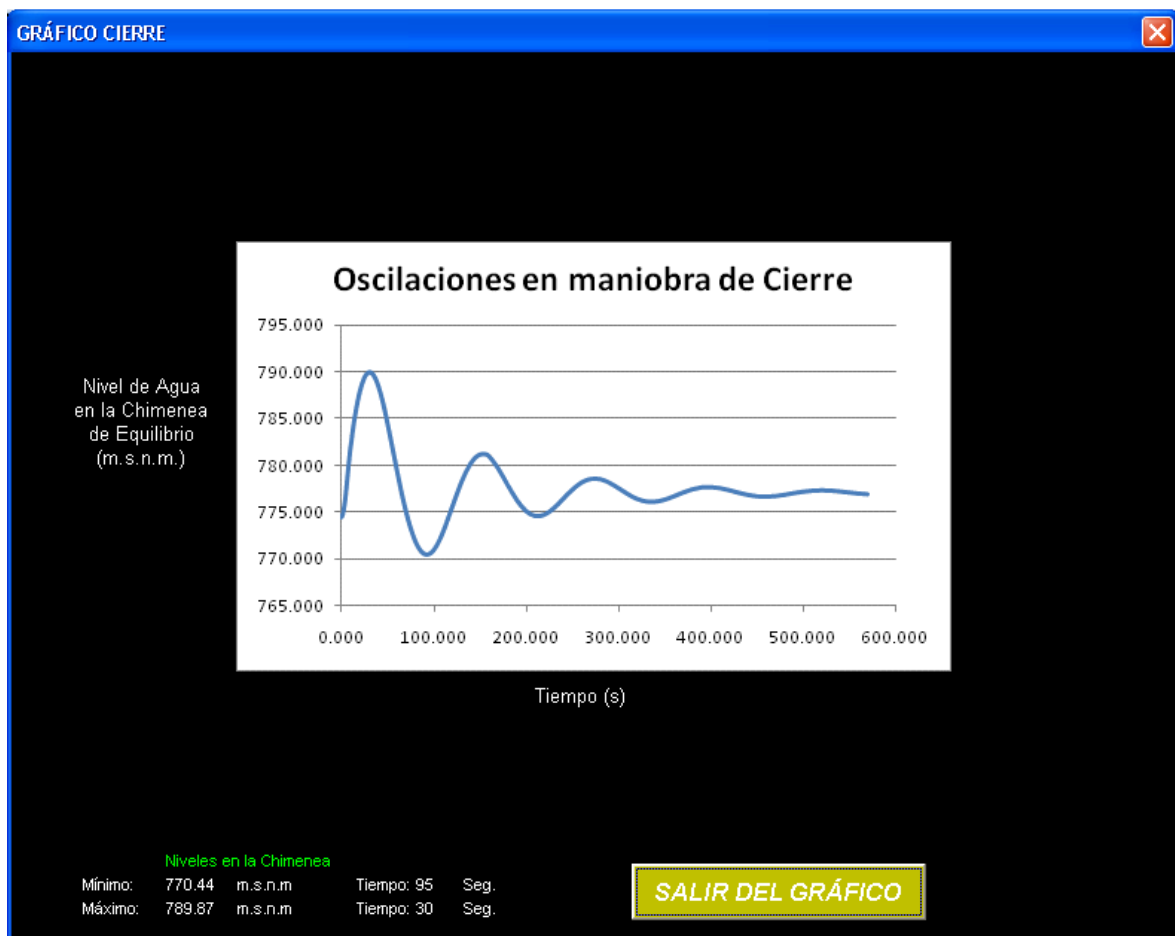
- Gráfica del nivel de las oscilaciones de agua producidas en la chimenea de equilibrio. La gráfica será una curva de dispersión con curva suave, en la cual el eje de las abscisas indicará el tiempo en que se produce el fenómeno en segundos (s). En el eje de las ordenadas se indicará el nivel de agua dentro de la chimenea de equilibrio en metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m)
- Niveles máximos y mínimos de agua dentro de la chimenea de equilibrio producidos en la maniobra seleccionada
- Tiempo en que se producirán los niveles máximos y mínimos de agua dentro de la chimenea de equilibrio

**Figura 5.27.** Ventana para el gráfico de las oscilaciones de agua dentro de la chimenea de equilibrio en maniobras de apertura.



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez.

**Figura 5.28.** Ventana para el gráfico de las oscilaciones de agua dentro de la chimenea de equilibrio en maniobras de cierre.



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez.

Al tener el resultado de las oscilaciones de agua dentro de la chimenea de equilibrio el usuario podrá interpretar la curva y así determinar si las oscilaciones de agua se mantienen dentro de la estructura así como del tiempo en que se producen los picos.

Al dar clic en el botón “SALIR DEL GRÁFICO” el usuario saldrá de la aplicación que se estaba modelando y podrá otra vez volver a ingresar al programa para realizar nuevos diseños con otras variantes.

## **CAPITULO 6.**

### **EJEMPLO DE APLICACIÓN**

#### **6.1.INTRODUCCIÓN**

El siguiente ejemplo de aplicación del programa “OSCILACIONES DE MASA EN UNA CHIMENEA DE EQUILIBRIO” analiza el sistema Obra de toma – Chimenea de equilibrio de una central hidroeléctrica en donde se obtienen las pérdidas de carga tanto localizadas, como por fricción y junto con los datos generales como caudal, niveles de operación, dimensiones de la chimenea de equilibrio, cotas, etc., se resuelve las oscilaciones del nivel de agua dentro de la chimenea de equilibrio.

#### **6.2.OBJETIVO**

El ejemplo de aplicación tiene como finalidad mostrar al usuario la forma de utilizar el programa, siendo el ejemplo netamente didáctico y las estructuras que conforman el sistema hidráulico tienen dimensiones con una alta correspondencia a las obras de centrales hidroeléctricas que se tienen en el país.

#### **6.3.APLICACIÓN**

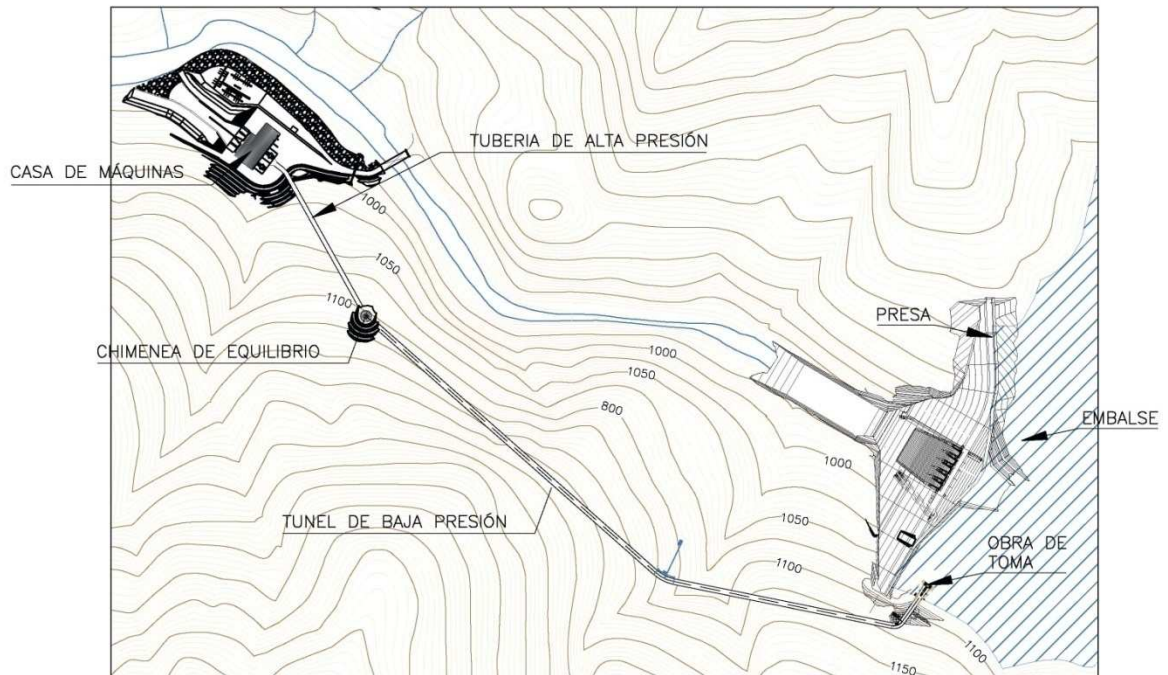
##### **6.3.1. ENUNCIADO**

Una central hidroeléctrica que turбина un caudal de diseño de  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  con dos turbinas Francis consta de las siguientes obras complementarias:

- Embalse
- Obra de toma
- Túnel de carga (baja presión)
- Chimenea de equilibrio

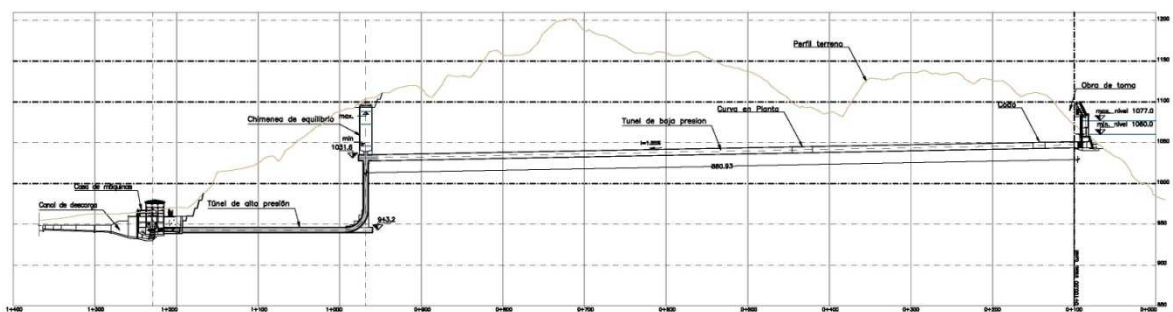
- Tubería de presión
- Casa de máquinas

**Figura 6.1.** Vista en planta de la configuración del sistema de conducción



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez.

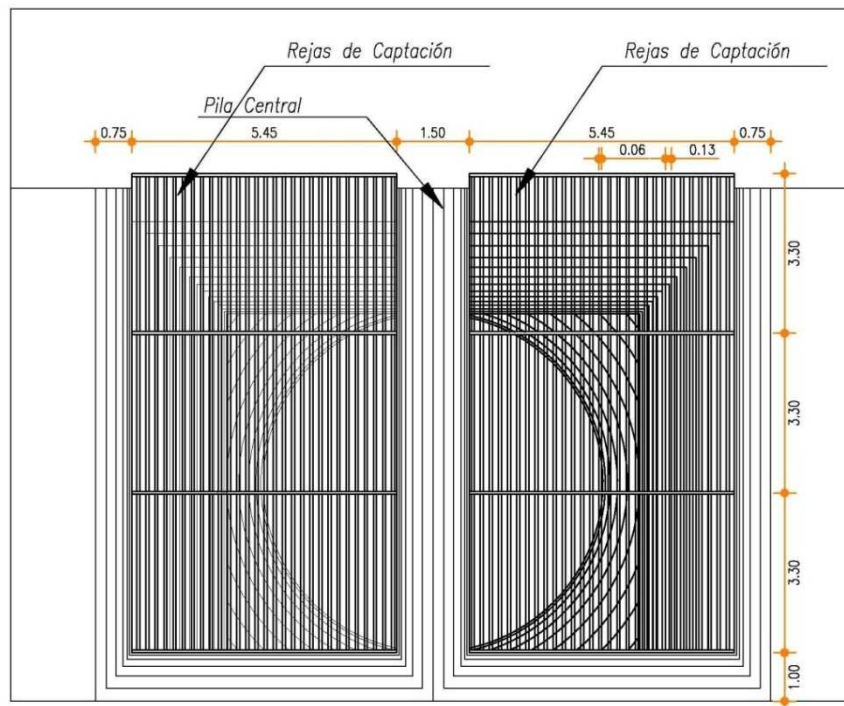
**Figura 6.2.** Perfil de la configuración del sistema de conducción



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez.

La obra de toma se encuentra ubicada en la cota 1043 m.s.n.m. y está constituida por una geometría en planta como se observa en la siguiente figura la cual se trata de una entrada de forma parabólica con una obstrucción en el medio.

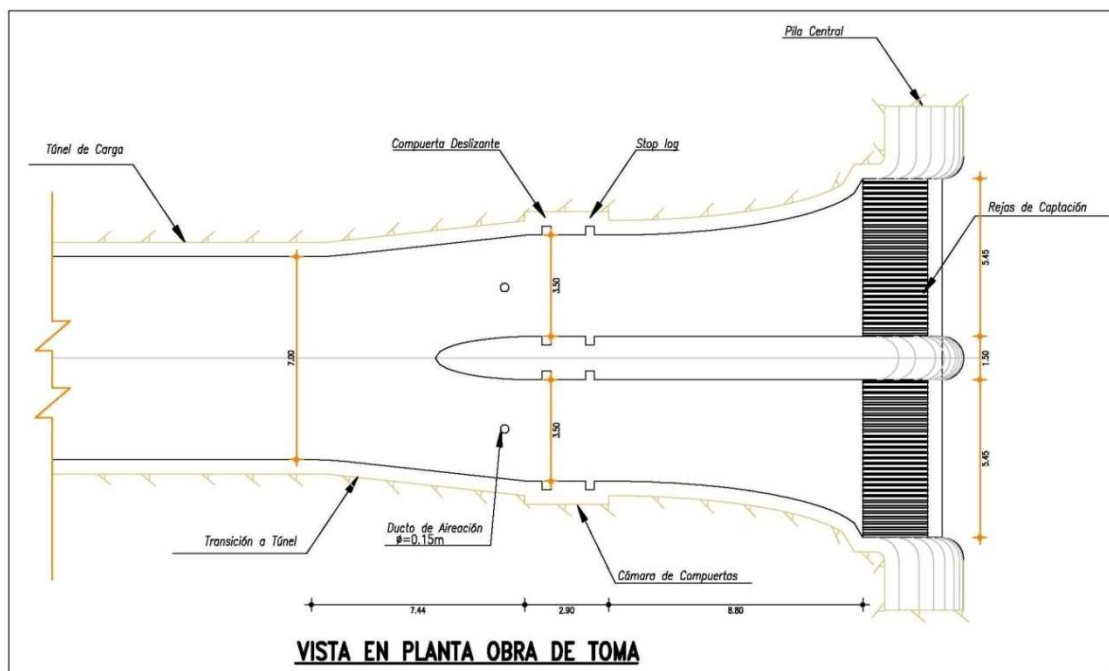
**Figura 6.3.** Vista frontal de la obra de toma



**VISTA FRONTAL DE LA OBRA DE TOMA**

FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez.

**Figura 6.4.** Vista en planta de la obra de toma

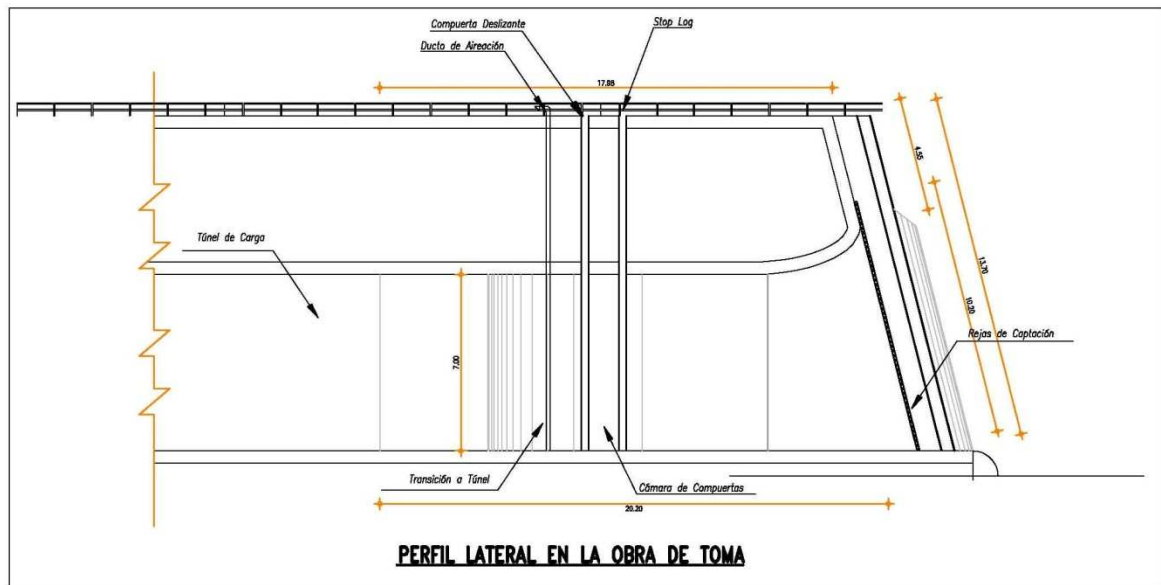


**VISTA EN PLANTA OBRA DE TOMA**

FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez.



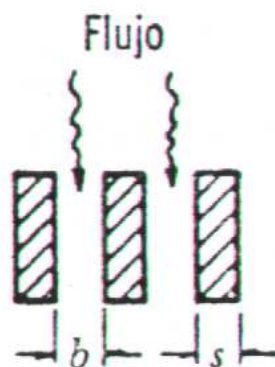
**Figura 6.5.** Vista lateral de la obra de toma



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez.

En el ingreso de la obra de toma se encuentran un sistema de seis rejillas cada una con dimensiones 5.45m de ancho por 3.30m de alto, en cada rejilla se encuentran barrotos de forma rectangular con un espesor (s) de 0.06m y una separación de barrotos (b) de 0.13m, los cuales se encuentran con una inclinación de  $76^\circ$  con respecto a la horizontal.

**Figura 6.6.** Forma de la sección transversal de los barrotos de las rejillas

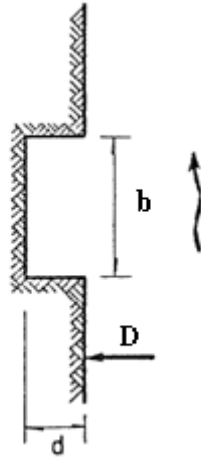


FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez.

Seguido de la entrada parabólica con obstrucción en el medio se encuentra una ranura de 0.3m de alto (d) y 0.30m de ancho (b) la misma que servirá para el ingreso de un Stop log a continuación se encuentra otra ranura donde se ubicará

la compuerta principal para el cierre de la conducción con dimensiones similares a las del stop log.

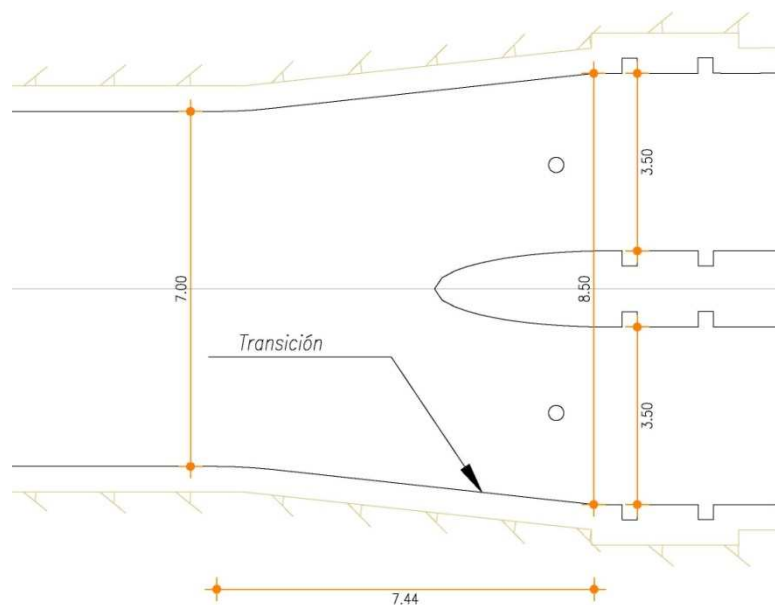
**Figura 6.7.** Forma de las ranuras para compuerta y stop log



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez.

Seguido de las ranuras se encuentra una transición hacia la entrada del túnel de carga desde un ancho de 8.50m hasta un ancho de 7.00m con una longitud del tramo de transición de 7.44m como se muestra en la figura.

**Figura 6.8.** Transición de la entrada hacia el túnel de carga

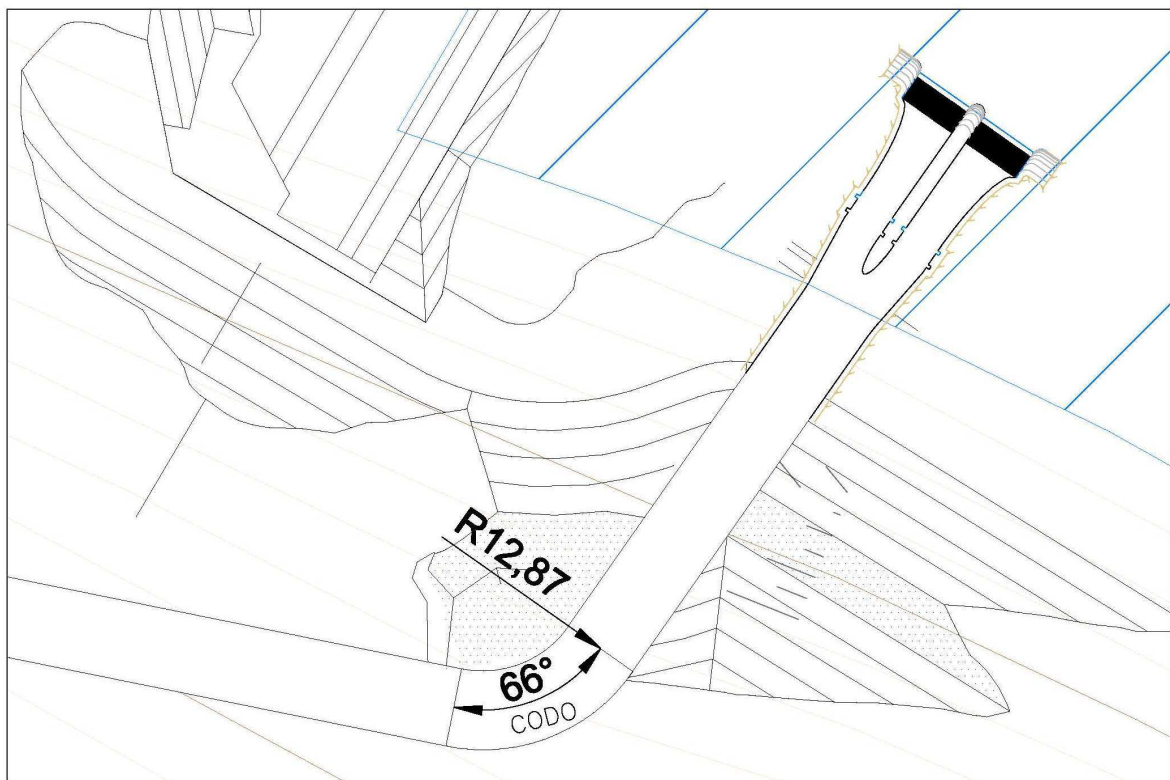


FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez.

Una vez que termina la obra de toma, empieza el túnel de carga con una longitud de 860.93 m, el cual está compuesto por una geometría circular de 7.00m de diámetro con un recubrimiento de hormigón con acabado liso en el 50% de la longitud y el otro 50% con acero.

A una distancia de 37m se encuentra ubicado un codo en planta con una geometría tal que tiene un radio de 12.87m y un ángulo de apertura de  $66^\circ$ .

**Figura 6.9.** Vista en planta del codo



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez.

Una vez que termina el codo empieza una recta de 286.25m y al final de ésta se encuentra una curva en planta con un radio de 50m y un ángulo de apertura de  $30^\circ$ .

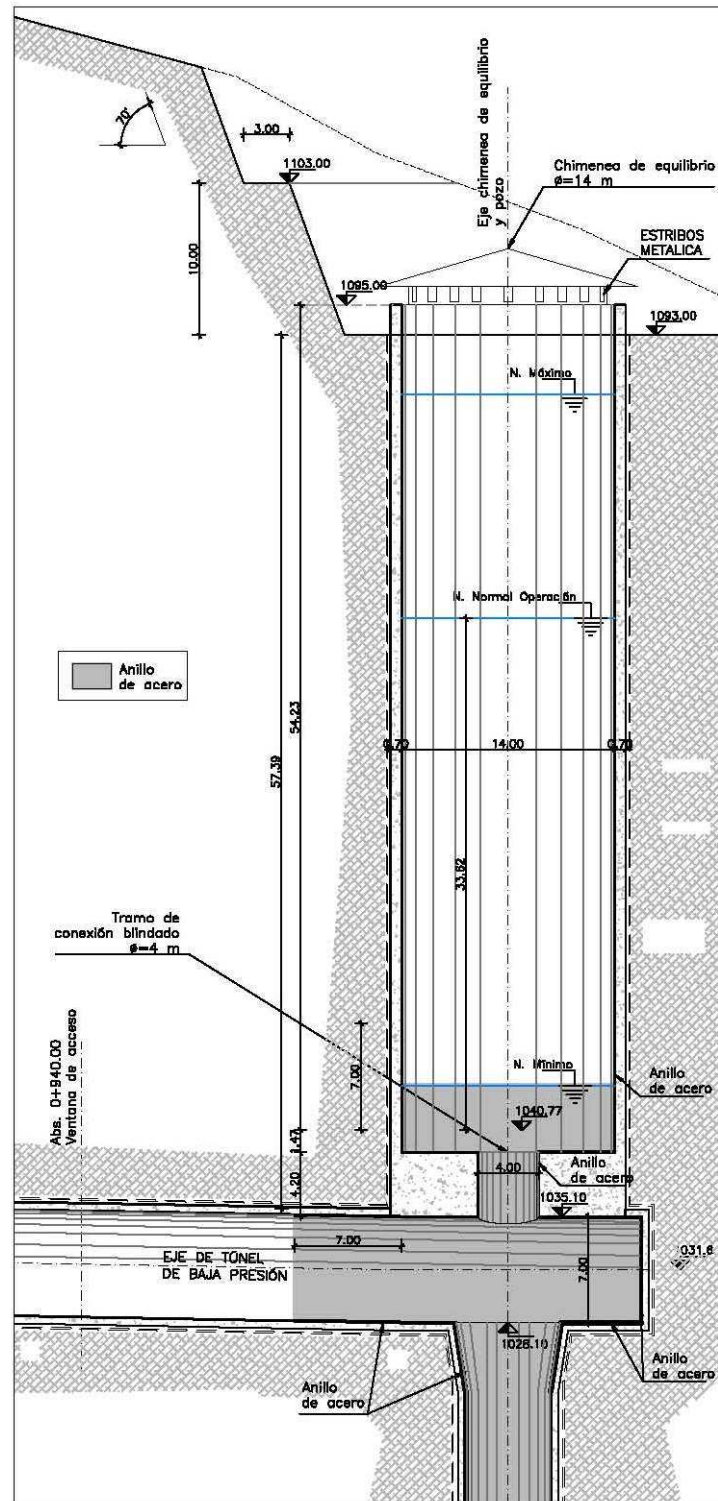
**Figura 6.10.** Vista en planta de la curva



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez.

Al terminar la curva horizontal empieza una recta de 496.54m la cual termina justo por debajo de la chimenea de equilibrio. El eje del túnel de carga justo debajo de la chimenea de equilibrio se encuentra en la cota 1031.6 m.s.n.m.

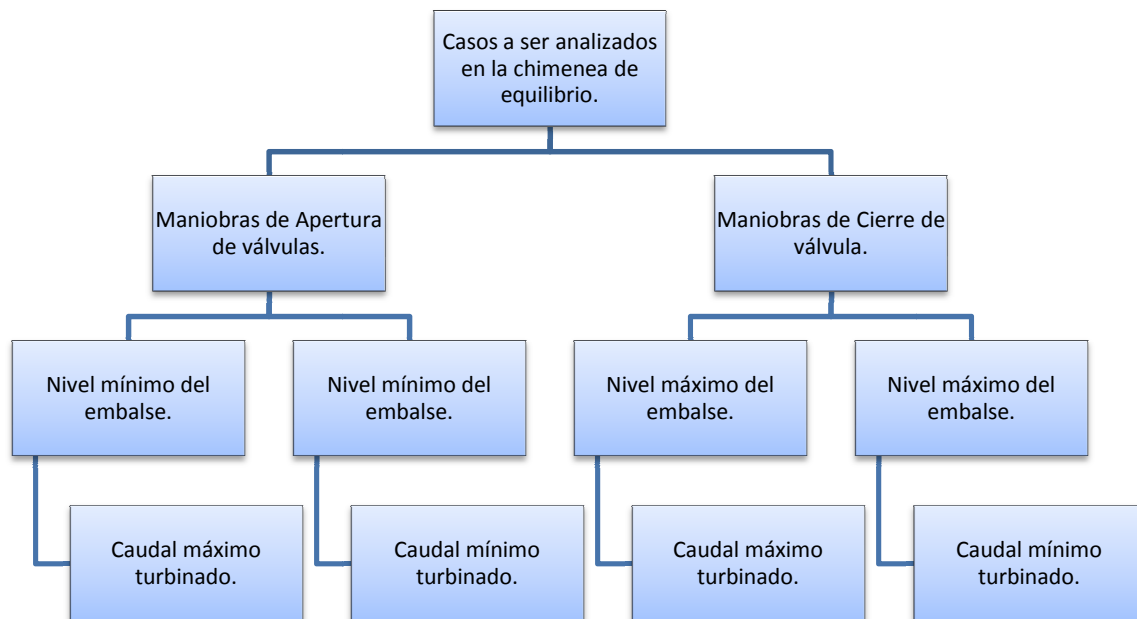
Figura 6.11. Chimenea de equilibrio



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez.

Con estos datos se desea conocer los niveles máximos y mínimos posibles dentro de la chimenea de equilibrio, para lo cual se harán las siguientes maniobras de operación:

**Cuadro 6.1.** Maniobras de operación en las válvulas de las turbinas de una central hidroeléctrica



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

**Cuadro 6.2.** Datos de las maniobras de operación

	Operación 1	Operación 2	Operación 3	Operación 4
<b>Maniobra</b>	Cierre	Cierre	Apertura	Apertura
<b>Nivel en el embalse (msnm)</b>	1077	1077	1060	1060
<b>Caudal turbinado (m<sup>3</sup>/s)</b>	100	50	100	50

FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

### 6.3.2. RESOLUCIÓN

A continuación se presenta el procedimiento para una maniobra de cierre de válvulas con el máximo caudal turbinado y con el embalse lleno en el nivel máximo. Para las otras maniobras solo se presentará un cuadro de resultados.

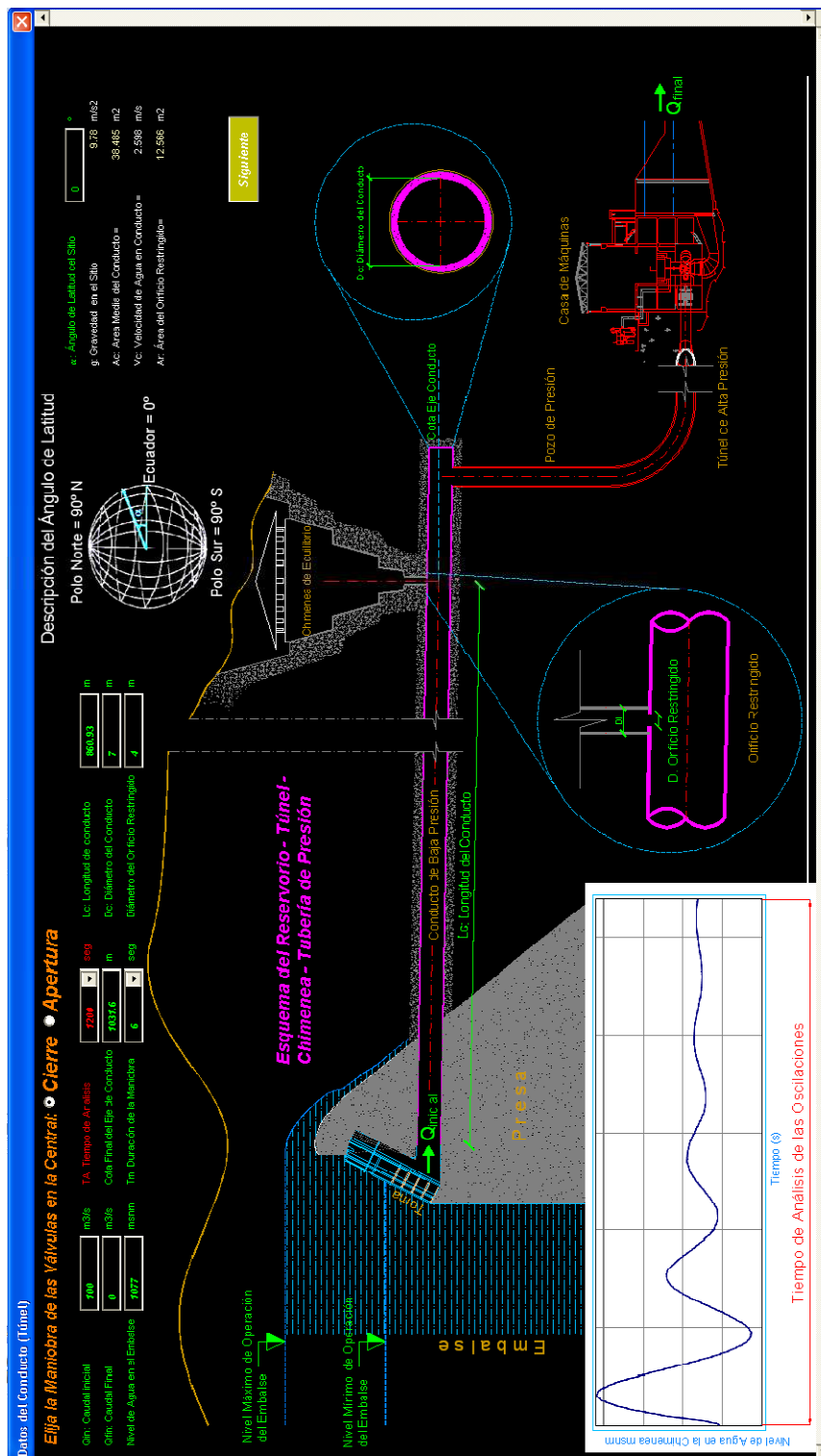
Primeramente se ingresa al programa “OSCILACIONES DE MASA EN UNA CHIMENEA DE EQUILIBRIO” y se activan las macros que por defecto Microsoft Office Excel 2007 deshabilita, una vez que se ha realizado esto se da un clic en “INGRESAR AL PROGRAMA” con lo cual se ingresa a la primera ventana donde se deben ingresar los datos generales que a continuación se presentan:

- Maniobra: Cierre
- Caudal inicial.  $100 \text{ m}^3/\text{s}$
- Caudal final:  $0 \text{ m}^3/\text{s}$
- Nivel de agua en el embalse: 1077 msnm
- Tiempo de análisis: 1200 s
- Cota final del eje de conducto. 1031.6 msnm
- Duración de la maniobra: 6 s
- Longitud del conducto: 860.93 m
- Diámetro del conducto: 7 m
- Diámetro del orificio restringido: 4 m
- Ángulo de latitud del sitio:  $0^\circ$

Al ingresar estos datos el programa calcula y muestra los siguientes valores:

- Gravedad en el sitio:  $9.78 \text{ m/s}^2$
- Área media del conducto:  $38.485 \text{ m}^2$
- Velocidad de agua en el conducto:  $2.598 \text{ m/s}$
- Área del orificio restringido:  $12.566 \text{ m}^2$

Figura 6.12. Datos del conducto.



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez.



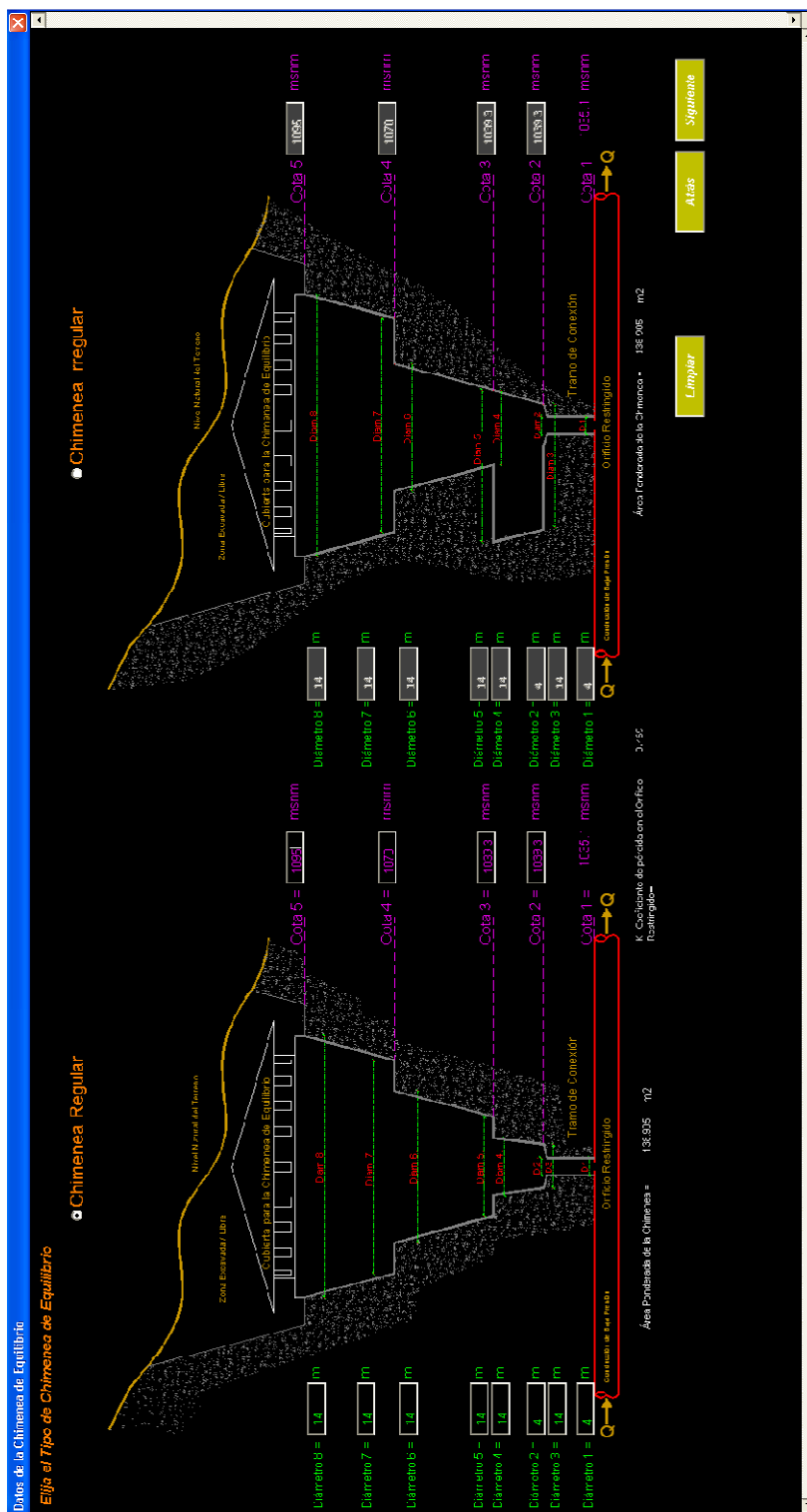
Se procede a dar clic en el botón “SIGUIENTE”, con lo cual aparece la siguiente ventana, donde se ingresarán los datos de la chimenea de equilibrio, que se presentan a continuación:

- Tipo de chimenea: Regular
- Diámetro 8: 14 m
- Diámetro 7: 14 m
- Diámetro 6: 14 m
- Diámetro 5: 14 m
- Diámetro 4: 14 m
- Diámetro 3: 14 m
- Diámetro 2: 14 m
- Diámetro 1: 4 m
- Cota 2: 1040 msnm
- Cota 3: 1060 msnm
- Cota 4: 1080 msnm
- Cota 5: 1095 msnm

Al ingresar estos datos el programa calcula automáticamente y muestra los siguientes valores:

- Área ponderada de la chimenea de equilibrio: 145.075 m<sup>2</sup>
- Coeficiente de pérdida de carga del orificio restringido: 0.469

Figura 6.13. Datos de la chimenea de equilibrio.

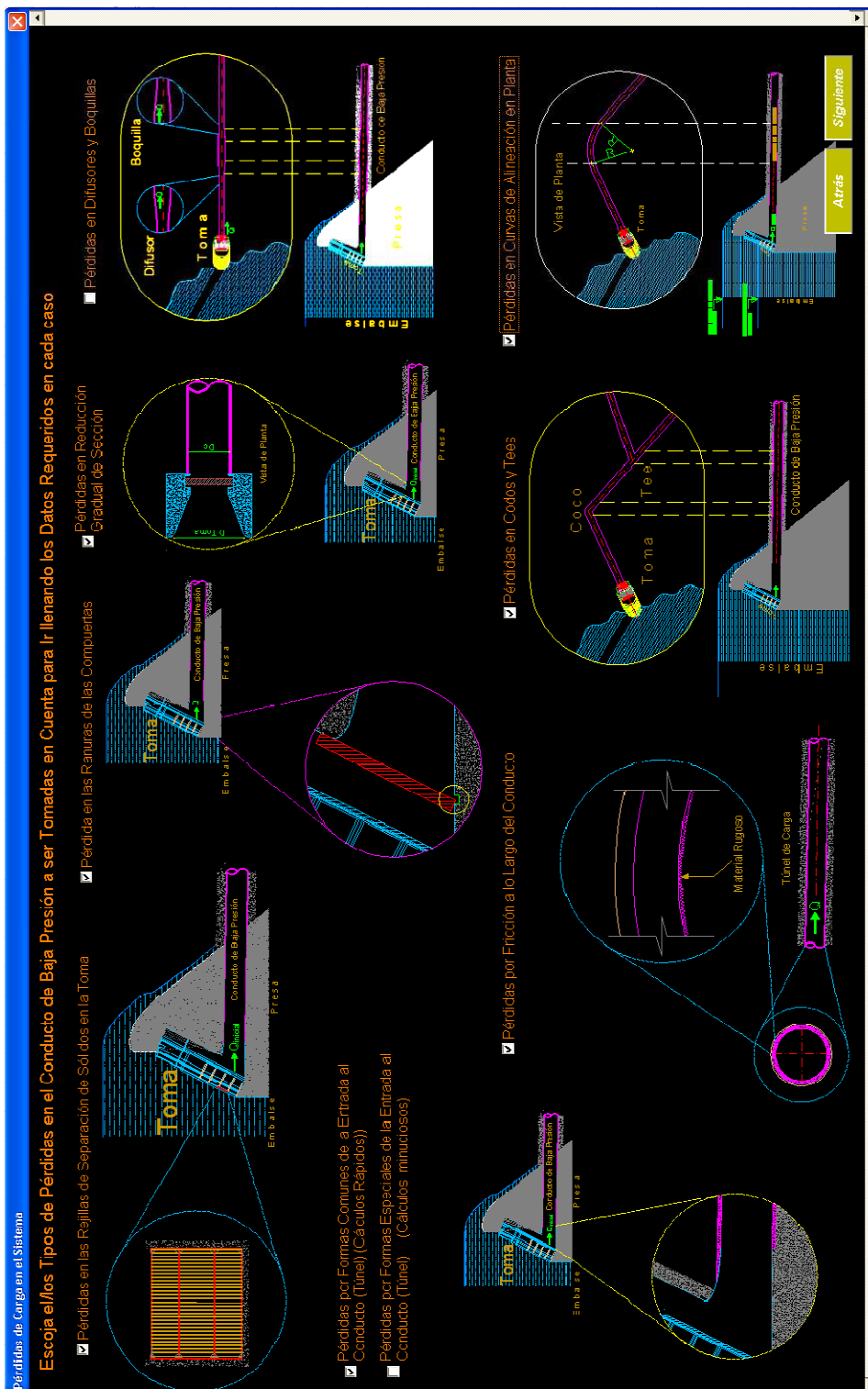


FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez.

A continuación se da clic en el botón “SIGUIENTE” y aparece la ventana para elegir los tipos de pérdida de carga que requiere la conducción del proyecto hidroeléctrico. Las variables escogidas para pérdidas que existen en la conducción son las siguientes:

- Pérdidas en las rejillas de separación de sólidos en la toma
- Pérdidas por formas comunes de la entrada al conducto (túnel) /cálculos rápidos)
- Pérdidas en las ranuras de las compuertas
- Pérdidas por fricción a lo largo del conducto
- Pérdidas en reducción gradual de sección
- Pérdidas en codos y tees
- Pérdidas en curvas de alineación en planta

Figura 6.14. Elección de pérdidas de carga



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez.

Una vez que se escoge todas las clases de pérdidas que habrá en la conducción se da un clic en “SIGUIENTE”, con lo cual aparece la primera ventana de pérdidas en la conducción que es la de “PÉRDIDAS EN LAS REJILLAS DE SEPARACIÓN DE SÓLIDOS EN LA TOMA” y los datos a ingresar serán los presentados a continuación:

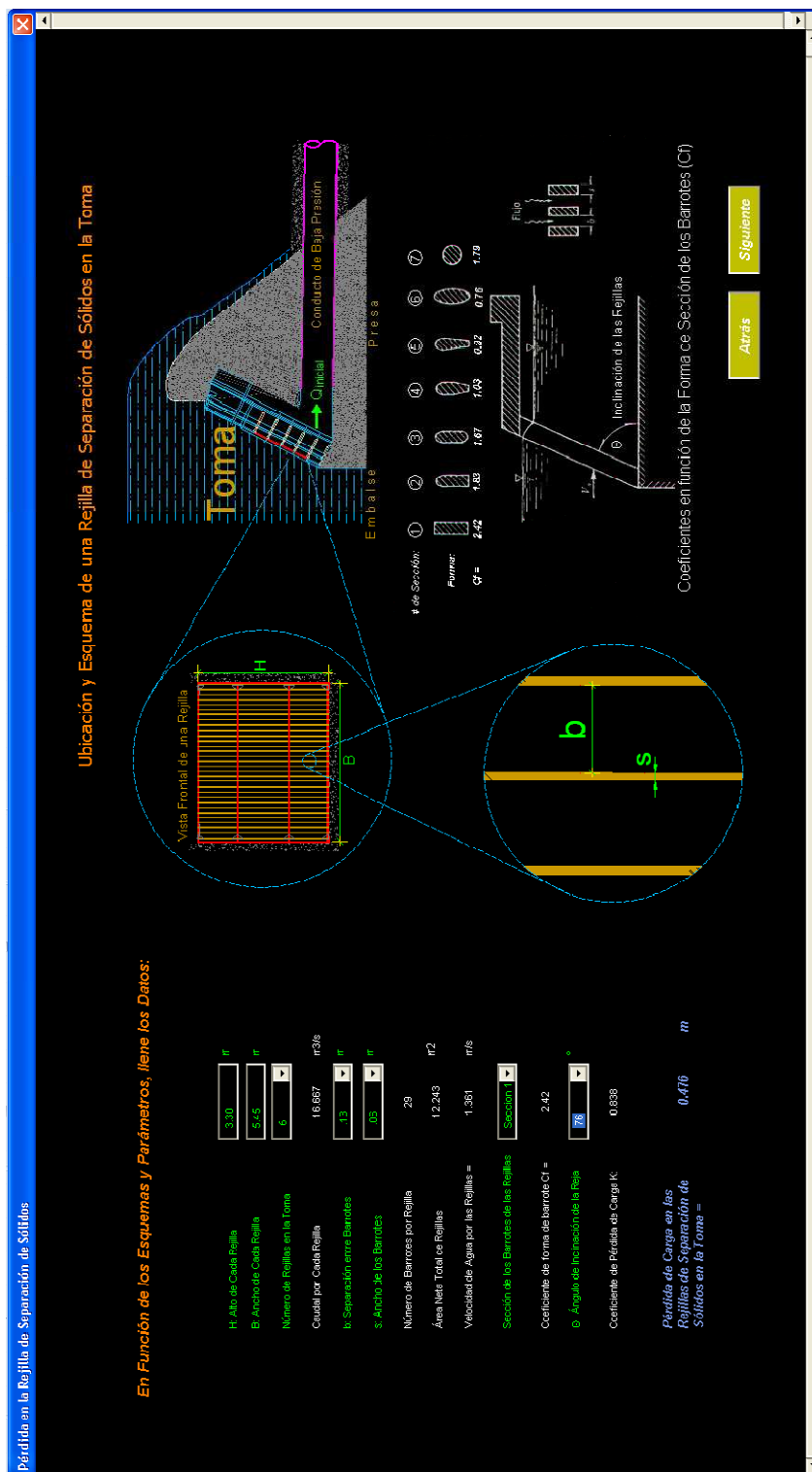
- Alto de cada rejilla: 3.30 m
- Ancho de cada rejilla: 5.45 m
- Número de rejillas en la toma: 6
- Separación entre barrotes: 0.13 m
- Ancho de los barrotes: 0.06 m
- Sección de los barrotes de las rejillas: Sección 1
- Ángulo de inclinación de la reja: 76°

Al ingresar estos datos se observa que el programa calcula los valores de:

- Caudal por cada rejilla: 16.667 m<sup>3</sup>/s
- Número de barrotes por cada rejilla: 29
- Área neta total de rejillas: 12.243 m<sup>2</sup>
- Velocidad de agua por las rejillas: 1.361m/s
- Coeficiente de forma de barrote: 2.42
- Coeficiente de pérdida de carga: 0.838
- Pérdida de carga en las rejillas de separación de sólidos en la toma: 0.476 m

Con estos valores que el programa muestra se aprecia que la velocidad se encuentra dentro de rangos normales y se aprecia que la pérdida de carga por éste elemento es normal.

Figura 6.15. Pérdidas en las rejillas de separación de sólidos en la toma.



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez.

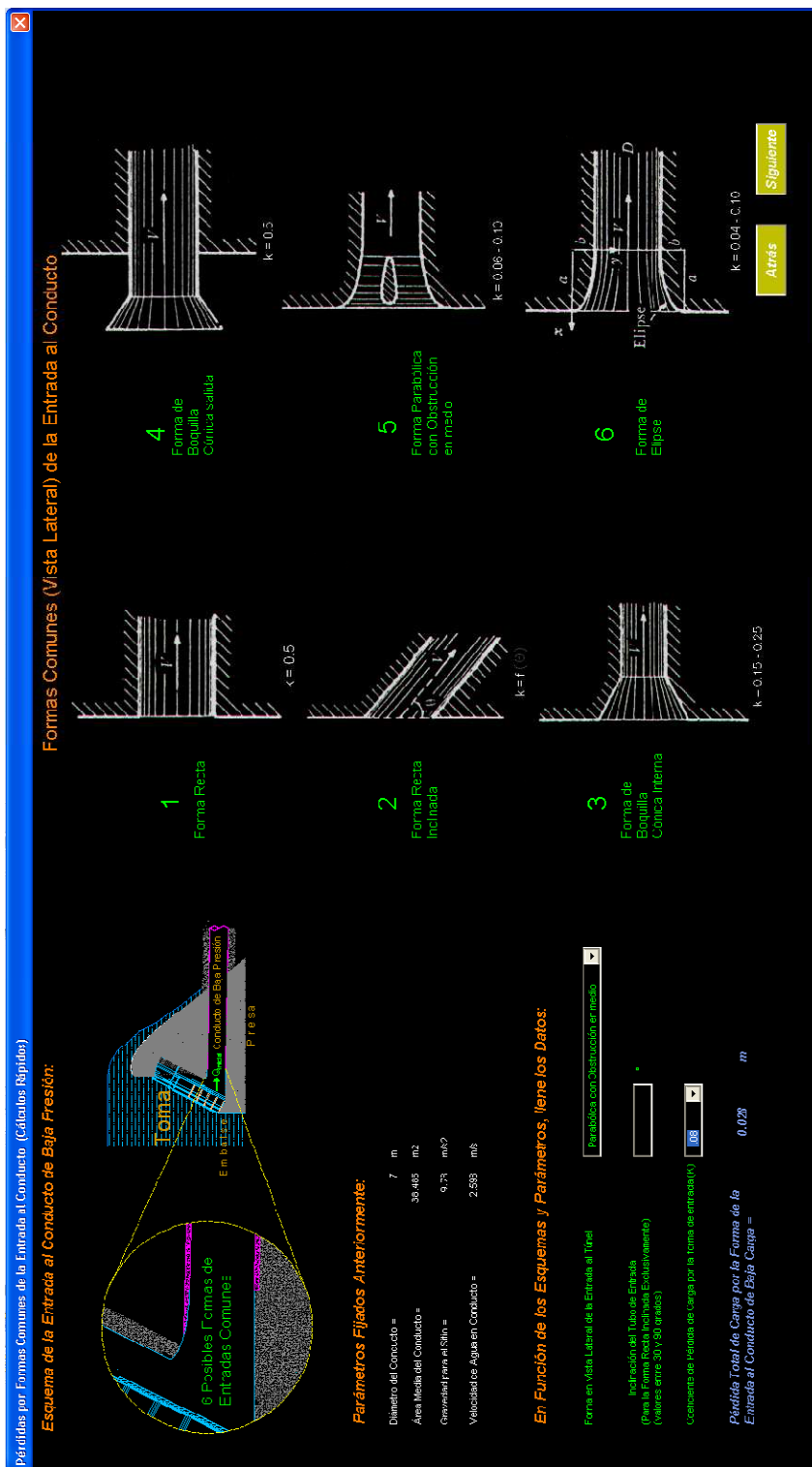
Se procede a dar clic en el botón “SIGUIENTE” y aparece la siguiente ventana de pérdidas en la conducción “PÉRDIDAS POR FORMAS COMUNES DE LA ENTRADA AL CONDUCTO” y los datos a ingresar serán los presentados a continuación:

- Forma en vista lateral de la entrada al túnel: Forma parabólica con obstrucción en medio
- Coeficiente de pérdida de carga por la forma de entrada: 0.08

Con estos datos se obtiene la pérdida de carga debido a la forma de entrada y el programa calcula y muestra los siguientes valores así como valores anteriormente fijados:

- Diámetro del conducto: 7 m
- Área media del conducto: 38.485 m<sup>2</sup>
- Gravedad para el sitio: 9.78 m/s<sup>2</sup>
- Velocidad de agua en conducto: 2.598 m/s
- Pérdida total de carga por la forma de la entrada al conducto de baja carga: 0.028 m

Figura 6.16. Pérdidas por formas comunes de la entrada al conducto.



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez.



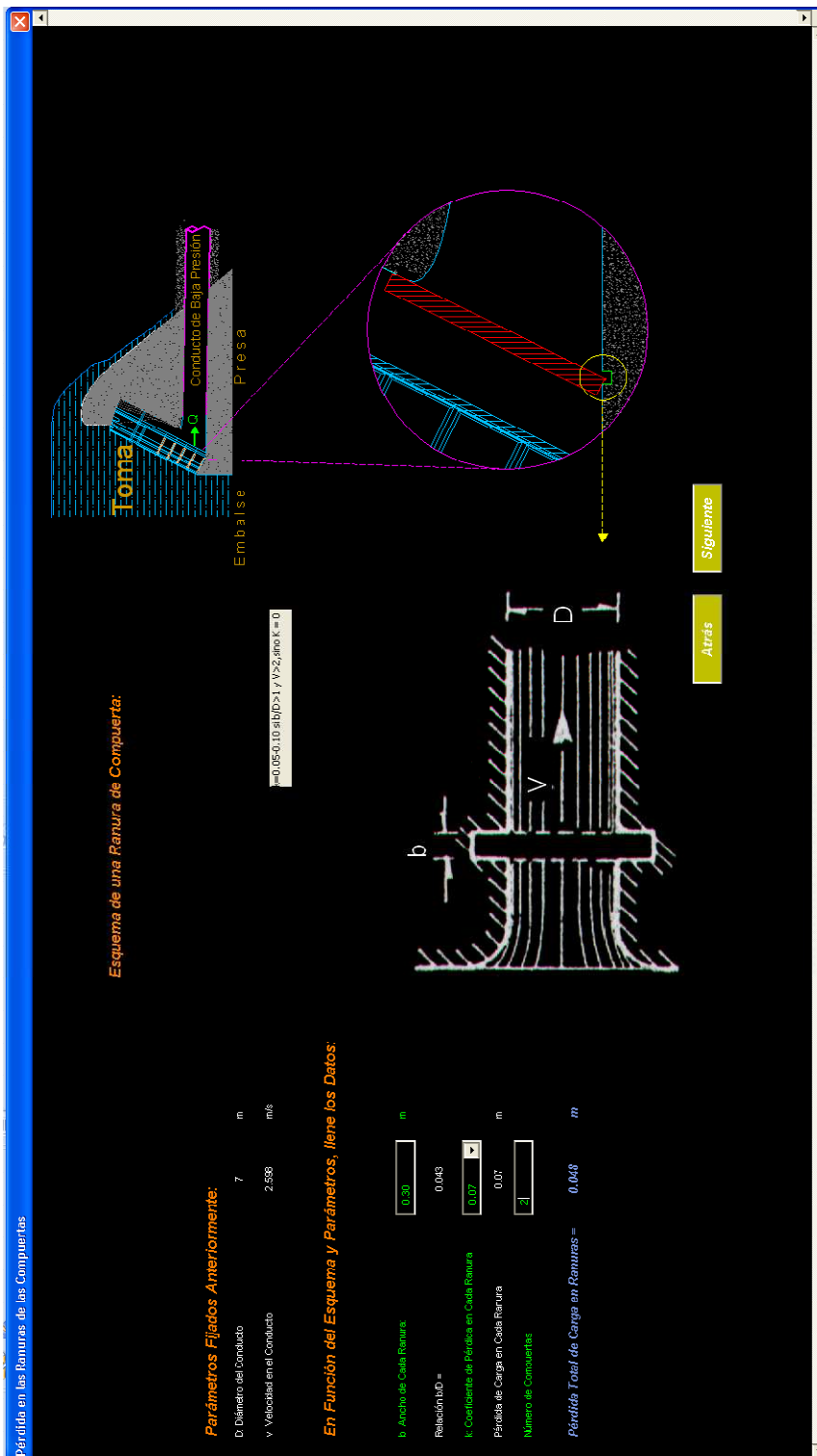
Una vez terminada esta ventana se procede a dar clic en el botón “SIGUIENTE” con lo cual aparece la siguiente ventana de pérdidas en la conducción “PÉRDIDA EN LAS RANURAS DE LAS COMPUERTAS” y los datos a ingresar serán los presentados a continuación:

- Ancho de cada ranura: 0.3 m
- Coeficiente de pérdida en cada ranura: 0.07
- Número de compuertas: 2

Al ingresar los datos anteriormente mencionados el programa calcula y muestra los siguientes valores así como valores anteriormente fijados:

- Diámetro del conducto: 7 m
- Velocidad en el conducto: 2.598 m/s
- Relación ancho ranura-diámetro: 0.043
- Pérdida de carga en cada ranura: 0.07
- Pérdida total de carga en ranuras: 0.048 m

Figura 6.17. Pérdida en las ranuras de las compuertas.



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez.

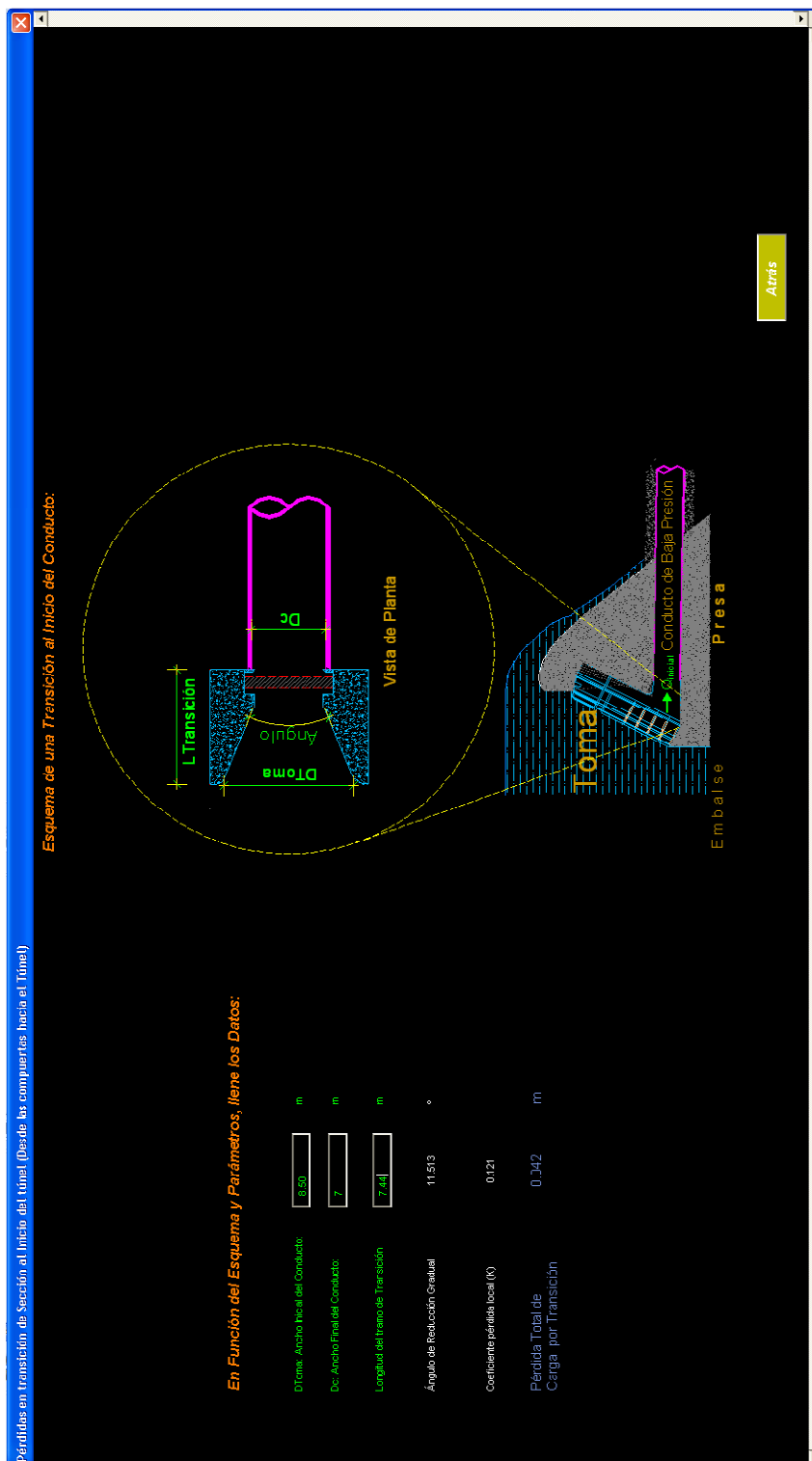
Una vez terminada esta ventana se procede a dar un clic en el botón “SIGUIENTE” y así se muestra la siguiente ventana de pérdidas de carga en la conducción “PÉRDIDAS EN TRANSICIÓN DE SECCIÓN AL INICIO DEL TÚNEL” y los datos a ingresar serán los presentados a continuación:

- Ancho inicial del conducto: 8.50 m
- Ancho final del conducto: 7.00 m
- Longitud del tramo de transición: 7.44 m

Al ingresar los datos anteriormente mencionados el programa calcula y muestra los siguientes valores así como valores anteriormente fijados:

- Ángulo de reducción gradual:  $11.513^{\circ}$
- Coeficiente de pérdida local: 0.121
- Pérdida total de carga por transición: 0.042 m

Figura 6.18. Pérdidas en transición de sección al inicio del túnel.



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez.

Una vez terminada esta ventana se procede a dar un clic en el botón “SIGUIENTE” y así se muestra la siguiente ventana de pérdidas de carga en la conducción “PÉRDIDAS DE CARGA POR FRICCIÓN EN EL TÚNEL”, en donde se escoge el material que recubrirá la conducción y los datos a ingresar serán:

- Tipo de material de recubrimiento del túnel: Mixto (Hormigón – Acero)
- Porcentaje de la longitud del túnel de carga recubierto por hormigón: 50 %
- Porcentaje de la longitud del túnel de carga recubierto por acero: 50 %


Al ingresar los datos anteriormente mencionados el programa calcula y muestra los siguientes valores así como valores anteriormente fijados:

- D: Diámetro del túnel: 7 m
- L: Longitud del túnel: 860.93 m
- f: Coeficiente de fricción: 0.01
- v: Velocidad en el túnel: 2.598 m/s
- n: Coeficiente de rugosidad de Manning: 0.012
- $\Delta H$ : Pérdida de carga total por fricción en el túnel: 0.432 m

Figura 6.19. Pérdidas de carga por fricción en el túnel.


**Posibles Superficies Internas del Túnel**

● **Hormigón Estándar**




$n = 0.014$

● **Hormigón Lanzado (Shotcrete)**



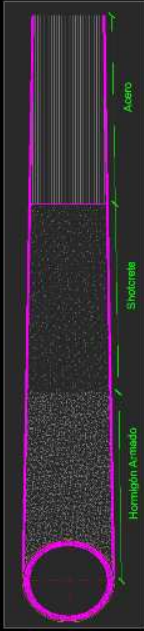
$n = 0.022$

● **Acero**



$n = 0.011$

● **Longitud de Tubería de Superficies Mixtas**



**Escoja la Superficie Interna del Túnel:**

Perímetro de la Sección del Túnel =	21.991	m
Diámetro del túnel =	7	m
Longitud del Túnel =	860.93	m
Coefficiente de fricción =	0.011	
Velocidad en el túnel =	2.598	m/s
Coefficiente de Rugosidad (n) de Manning =	0.012	
Pérdida de Carga Total por Fricción en el Túnel =	0.432	m

Porcentaje de la Longitud Recubierta por Hormigón:  % = 430.465 m

Porcentaje de la Longitud Recubierta por Acero:  % = 430.465 m

Porcentaje del Perímetro Recubierto por Shotcrete:  % = 0 m

**Otro Coeficiente de Rozamiento**

Coefficiente de Rugosidad (n) de Manning =

FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez.

Una vez terminada esta ventana se procede a dar un clic en el botón “SIGUIENTE” y así se muestra la siguiente ventana de pérdidas de carga en la conducción “PÉRDIDAS EN CODOS Y TEES” y los datos a ingresar serán los presentados a continuación:

- Ángulo de apertura: 66°
- Radio de giro interno: 12.87 m
- Ancho de la tubería: 7 m
- Alto de la tubería: 7 m

Al ingresar los datos anteriormente mencionados el programa calcula y muestra los siguientes valores:

- Coeficiente de pérdida: 0.127
- Pérdida de carga: 0.044 m

Figura 6.20. Pérdidas en codos y tees.

**Pérdidas en Codos y Tees**

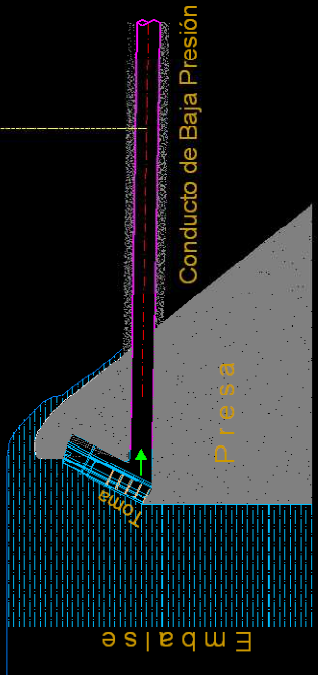
Firmas de las Derivaciones | Datos de Codos 2 | Datos de Tees 2 | Datos de Tees3 | Datos de Tees3

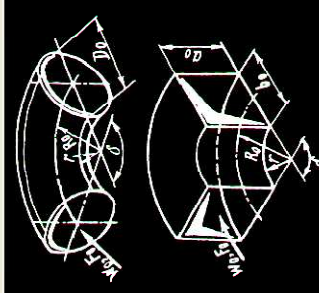
**Deslice el Cursor sobre las opciones y Escija las Existentes:**

- 1) Codos con relación R/D < 3 y Ángulo entre 0° y 180°
- 2) Codos para Red/Doc3 de Cualquier Ángulo
- 4) Codos de Sacoir Rectangular de Arista Viva de 90°
- 5) Codos con esquinas afiladas
- 6) Codos de Sacoir Rectangular de Arista Redondeada de 90°
- 7) Codos con Esquinas Redondeadas
- 8) Codos de 90° de Sección Rectangular con Esquinas Distintas
- 9) Codos Forrados con n Diferentes Emerinas Planas
- 10) Codos segmentados Con Sección Transversal Circular
- 11) Codos en Forma de Z con Esquinas Afiladas
- 12) Codos en forma de Z con Esquinas Redondeadas
- 15) Curvaturas Dobles de Diferente Ángulo de Curvatura

- 1) Conversión de Conductos Tipo Y ( $\alpha=30^\circ$ ) con Reducción de Área de Flujo Total
- 2) Conversión de Conductos Tipo Y ( $\alpha=45^\circ$ ) con Reducción de Área de Flujo Total
- 3) Conversión de Conductos Tipo Y ( $\alpha=60^\circ$ ) con Reducción de Área de Flujo Total
- 4) Conversión de Conductos Tipo Y ( $\alpha=90^\circ$ ) con Reducción de Área de Flujo Total
- 5) Conversión de Conductos Tipo Y ( $\alpha=15^\circ$ ) con la misma Área de Flujo Total
- 6) Conversión de Conductos Tipo Y ( $\alpha=30^\circ$ ) con la misma Área de Flujo Total
- 7) Conversión de Conductos Tipo Y ( $\alpha=45^\circ$ ) con la misma Área de Flujo Total

**Esquema de las Formas posibles en la Conducción:**





- 8) Conversión de Conductos Tipo Y ( $\alpha=30^\circ$ ) con la misma Área de Flujo Total
- 9) Conversión de Conductos Tipo Y ( $\alpha=30^\circ$ ) con la misma Área de Flujo Total
- 10) Conversión de Conductos Tipo Y ( $\alpha=30^\circ$ ) de Hierro Maleable
- 11) Conversión de Conductos Tipo Y con Curva Suave (Sección Rectangular)
- 15) Tee Tipo Y ( $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ ) con Aumento de Área Total de Flujo
- 16) Tee Tipo Y ( $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ ) con la misma Área Total de Flujo
- 17) Tee Tipo Y ( $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ ) con la misma o Mayor Área Total de Flujo
- 18) Tee Tipo Y ( $\alpha = 90^\circ$ ) con la misma Área Principal de Flujo
- 21) Tee Tipo Y de Curvatura Suave ( $\alpha = 90^\circ$ )
- 23) Tee Simétrica ( $\alpha = 90^\circ$ )
- 24) Tee Simétrica de Curvas Suaves ( $\alpha = 90^\circ$ )
- 25) Conversión de Conductos Tipo Y de Doble Entrada Lateral ( $\beta = 15^\circ$ )
- 27) Conversión de Conductos Tipo Y de Doble Entrada Lateral ( $\alpha = 45^\circ$ )
- 29) Conversión de Conductos Tipo Y de Doble Entrada Lateral ( $\beta = 90^\circ$ )
- 30) Tee Simétrica ( $0 < \alpha < 90^\circ$ )

Atrás

FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez.



Figura 6.21. Pérdidas en codos y tees, datos.

**Pérdidas en Codos y Tees**

Datos de Codos 2 | Datos de Tees 2 | Datos de Tees3 | Datos de Tees3

**Llene los Datos de Acuerdo a la Forma Escogida:**

**1) Codos con relación  $R_0/D_0 < 3$  y Ángulo entre  $0^\circ$  y  $180^\circ$**

Ángulo de Apertura =   $^\circ$

Para Tubos Circulares  $a_0 = b_0 = D_0$

$a_0(D_0)$ : Alto de la Tubería =  m

$b_0(D_0)$ : Ancho de la Tubería =  m

K: Coeficiente de Pérdida =  (l)

H: Pérdida de Carga =  m

**2) Codos con relación  $R_0/D_0 > 3$  y Ángulo Cualquiera**

Ángulo de Apertura =   $^\circ$

Para Tubos Circulares  $a_0 = b_0 = D_0$

$a_0(D_0)$ : Alto de la Tubería =  m

$b_0(D_0)$ : Ancho de la Tubería =  m

Relación  $R_0/D_0$  Calculada =  (l)

Escoja el Valor sobre más aproximado al Calculado:

K: Coeficiente de Pérdida =  (l)

H: Pérdida de Carga =  m

**3) Codos de Sección Rectangular de Arista Viva de  $90^\circ$**

K: Longitud Total de Codo =  m

D: Diámetro hidráulico de Codo =  m

$b_0$ : Ancho de Codo a la Entrada =  m

$H_1$ : Ancho de Codo a la Salida =  m

$a_0$ : Alto de Codo =  m

Relación sobre Calculada =  (l)

Escoja el Valor sobre más aproximado al Calculado:

K: Coeficiente de Pérdida =  (l)

H: Pérdida de Carga =  m

**4) Codos de Sección Rectangular de Arista Viva de  $90^\circ$**

K: Coeficiente de Pérdida =  (l)

H: Pérdida de Carga =  m

**5) Codos con Esquinas Abiertas**

Ángulo de Apertura =   $^\circ$

$a_0(D_0)$ : Alto de la Tubería =  m

$b_0(D_0)$ : Ancho de la Tubería =  m

K: Coeficiente de Pérdida =  (l)

H: Pérdida de Carga =  m

**6) Codos de Sección Rectangular de Arista Redondeada de  $90^\circ$**

Ángulo de Apertura =   $^\circ$

$a_0$ : Alto de la Tubería =  m

$b_0$ : Ancho de la Tubería =  m

$r$ : Radio de Curvatura del Eje =  m

Relación  $r/D_0$  Calculada =  (l)

Escoja el Valor sobre más aproximado al Calculado:

K: Coeficiente de Pérdida =  (l)

H: Pérdida de Carga =  m

**7) Codos con Esquinas Redondeadas**

Ángulo de Apertura =   $^\circ$

$r$ : Radio de Curvatura del Eje =  m

Para Tubos Circulares  $a_0 = b_0 = D_0$

$a_0(D_0)$ : Alto de la Tubería =  m

$b_0(D_0)$ : Ancho de la Tubería =  m

K: Coeficiente de Pérdida =  (l)

H: Pérdida de Carga =  m

**8) Codos de  $90^\circ$  de Sección Rectangular con Esquinas Distintas**

Ángulo de Apertura =   $^\circ$

$a_0$ : Alto de la Tubería =  m

$b_0$ : Ancho de la Tubería =  m

K: Coeficiente de Pérdida =  (l)

H: Pérdida de Carga =  m

**9) Codos de  $90^\circ$  de Sección Rectangular con Esquinas Distintas**

Ángulo de Apertura =   $^\circ$

$a_0$ : Alto de la Tubería =  m

$b_0$ : Ancho de la Tubería =  m

K: Coeficiente de Pérdida =  (l)

H: Pérdida de Carga =  m

**10) Codo con esquina interna inclinada  $45^\circ$  y externa  $135^\circ$**

Ángulo de Apertura =   $^\circ$

$a_0$ : Alto de la Tubería =  m

$b_0$ : Ancho de la Tubería =  m

K: Coeficiente de Pérdida =  (l)

H: Pérdida de Carga =  m

**11) Codo con esquina interna inclinada  $45^\circ$  y externa  $135^\circ$**

Ángulo de Apertura =   $^\circ$

$a_0$ : Alto de la Tubería =  m

$b_0$ : Ancho de la Tubería =  m

K: Coeficiente de Pérdida =  (l)

H: Pérdida de Carga =  m

**12) Codo (esquina interna con 2 inclinaciones de  $30^\circ$  y externa  $110^\circ$ )**

Ángulo de Apertura =   $^\circ$

$a_0$ : Alto de la Tubería =  m

$b_0$ : Ancho de la Tubería =  m

K: Coeficiente de Pérdida =  (l)

H: Pérdida de Carga =  m

**13) Codo  $90^\circ$  (sección rectangular con Geometría Aerodinámica)**

Ángulo de Apertura =   $^\circ$

$a_0$ : Alto de la Tubería =  m

$b_0$ : Ancho de la Tubería =  m

K: Coeficiente de Pérdida =  (l)

H: Pérdida de Carga =  m

**Siguiente**

FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez.

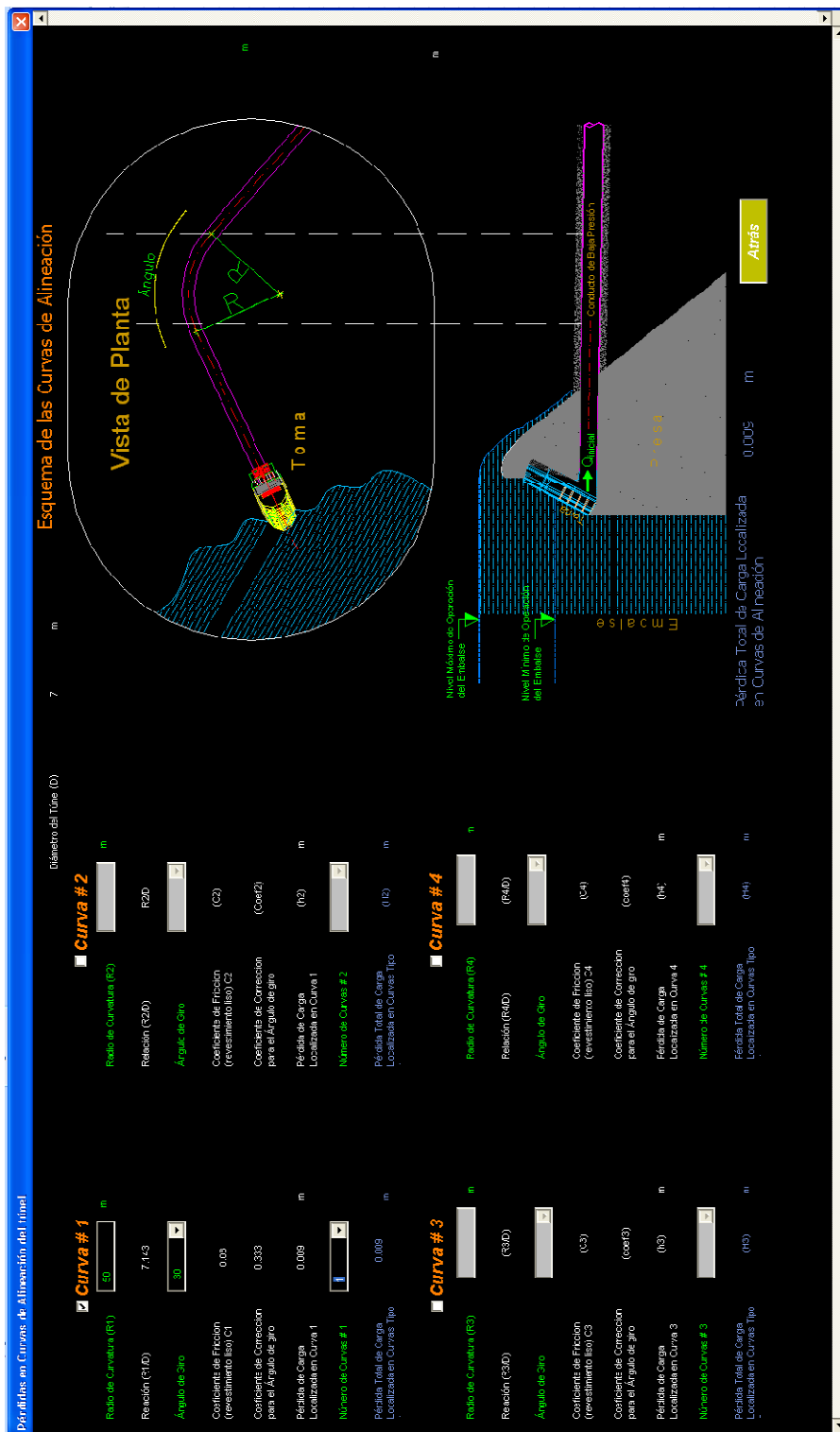
Una vez terminada esta ventana se procede a dar un clic en el botón “SIGUIENTE” y así se muestra la siguiente ventana de pérdidas de carga en la conducción “PÉRDIDAS EN CURVAS DE ALINEACIÓN DEL TÚNEL”, debido a que solo existe una sola curva se escoge simplemente “CURVA 1” y se ingresan los siguientes datos:

- Radio de curvatura: 50
- Ángulo de giro: 30°
- Número de curvas: 1

Al ingresar los datos anteriormente mencionados el programa calcula y muestra los siguientes valores:

- Relación radio de curvatura – diámetro: 7.143
- Coeficiente de fricción: 0.08
- Coeficiente de corrección para el ángulo de giro: 0.333
- Pérdida de carga localizada en curva: 0.009
- Pérdida total de carga localizada en curvas tipo: 0.009 m

Figura 6.22. Pérdidas en curvas de alineación del túnel.

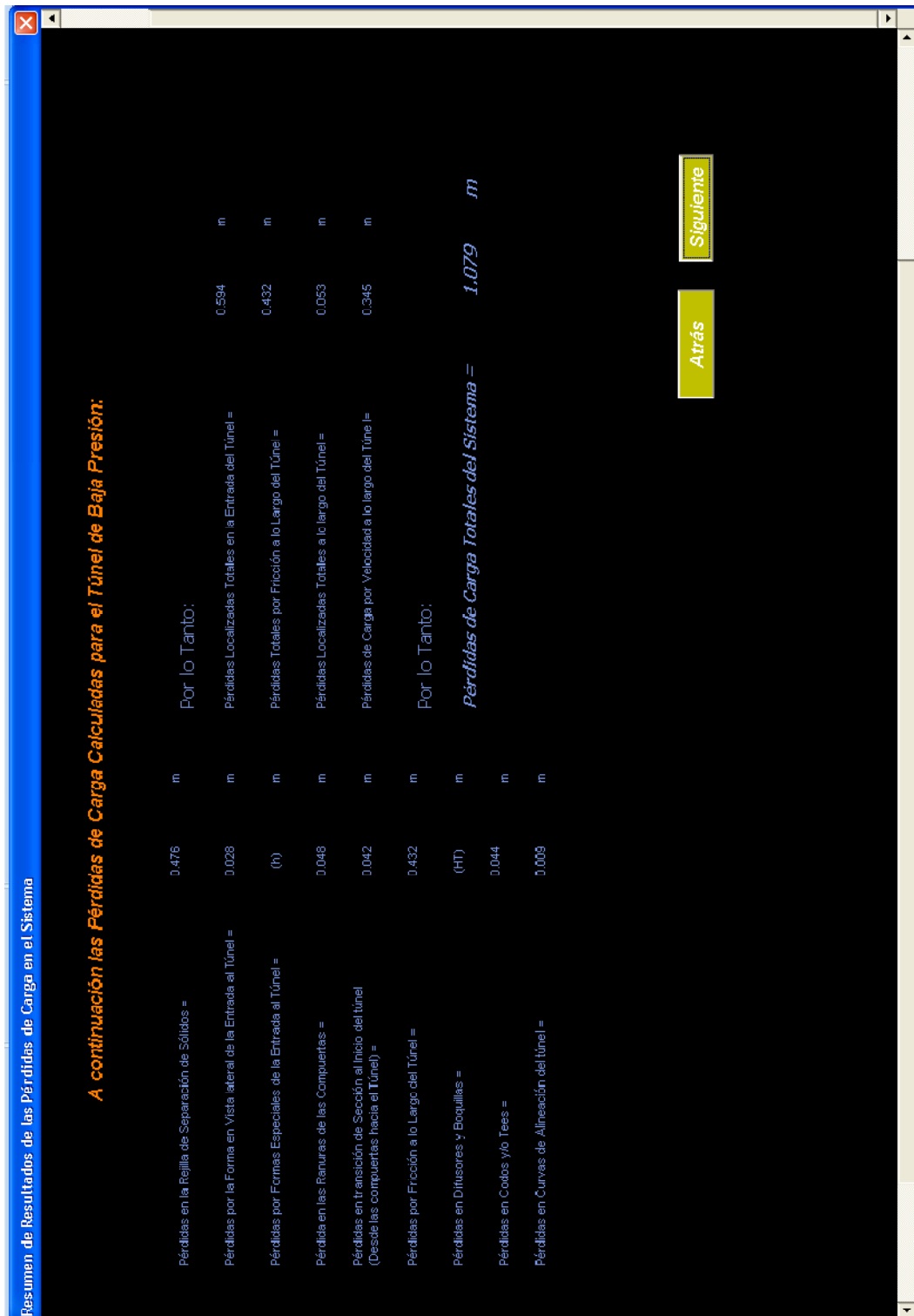


FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez.

Una vez terminada esta ventana se procede a dar un clic en el botón “SIGUIENTE” y aparece la ventana “RESUMEN DE RESULTADOS DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA EN EL SISTEMA” que es donde se muestran cada una de las pérdidas de carga localizadas así como las pérdidas por fricción y al final la pérdida de carga total en el sistema de conducción, siendo estos los resultados:

- Pérdidas en las rejillas de separación de sólidos: 0.476 m
- Pérdidas por la forma de entrada al túnel: 0.028 m
- Pérdidas en las ranuras de las compuertas: 0.048 m
- Pérdidas en transición de sección al inicio del túnel: 0.042 m
- Pérdidas en codos y/o tees: 0.044 m
- Pérdidas en curvas de alineación del túnel: 0.009 m
- Pérdidas localizadas totales en la entrada del túnel: 0.594 m
- Pérdidas totales por fricción a lo largo del túnel: 0.432 m
- Pérdidas localizadas totales a lo largo del túnel: 0.053 m
- Pérdidas de carga por velocidad a lo largo del túnel: 0.345 m
- Pérdidas de carga totales del sistema: 1.079 m

Figura 6.23. Resumen de resultados de las pérdidas de carga en el sistema.



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez.

Una vez que el usuario vea los resultados de las pérdidas de carga en el sistema obra de toma – chimenea de equilibrio se da un clic en el botón “SIGUIENTE”, de esta manera el programa comienza a realizar los cálculos necesarios y después de unos pocos segundos aparece la última ventana en la que se aprecia la gráfica para la maniobra de Cierre, así como los niveles de oscilación máxima y mínima y los tiempos en los que se producen.

Los niveles máximo y mínimo y el tiempo en que ocurren estas oscilaciones dentro de la chimenea de equilibrio son los siguientes:

- Nivel de oscilación máxima: 1085.32 msnm
- Tiempo en que ocurre la oscilación máxima: 30 s
- Nivel de oscilación mínima: 1072.18 msnm
- Tiempo en que ocurre la oscilación máxima: 90 s

**Figura 6.24.** Gráfico de las oscilaciones de agua dentro de la chimenea de equilibrio para una maniobra de cierre, nivel máximo en el embalse y máximo caudal turbinado.



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez.

Los cálculos realizados para las cuatro maniobras de operación demuestran que los niveles máximos y mínimos que se producen dentro de la chimenea de equilibrio se encuentran dentro de la estructura y con un rango de seguridad admisible.

A continuación se presentan los resultados de las pérdidas de carga localizadas y pérdidas de carga por fricción, niveles de oscilación dentro de la chimenea y el tiempo en que se producen estos niveles en las cuatro maniobras de operación:

**Cuadro 6.3.** Resultados de las cuatro maniobras de operación.

	Operación 1	Operación 2	Operación 3	Operación 4
Pérdidas en las rejillas de separación de sólidos (m)	0.476	0.119	0.476	0.119
Pérdidas por la forma de entrada al túnel (m)	0.028	0.007	0.028	0.007
Pérdidas en las ranuras de las compuertas (m)	0.048	0.012	0.048	0.012
Pérdidas en transición de sección al inicio del túnel (m)	0.042	0.01	0.042	0.01
Pérdidas por fricción a lo largo del túnel (m)	0.432	0.108	0.432	0.108
Pérdidas en codos y/o tees (m)	0.044	0.011	0.044	0.011
Pérdidas en curvas de alineación del túnel (m)	0.009	0.002	0.009	0.002
Pérdida total en el sistema (m)	1.079	0.269	1.079	0.269
Nivel de oscilación máxima (msnm)	1085.32	1081.76	1062.64	1062.48
Tiempo en que ocurre la oscilación máxima (s)	30	30	90	90
Nivel de oscilación mínima (msnm)	1072.18	1073.84	1050.67	1055.02
Tiempo en que ocurre la oscilación mínima (s)	90	90	30	30

Para los niveles mínimos se debe de tomar en cuenta el nivel de sumergencia que debe de existir para evitar problemas de entrada de aire a la tubería de presión con lo cual se evitará daños por cavitación, para lo cual se ha calculado el nivel mínimo de sumergencia.

$$h = 10 * \frac{v^2}{2g} \quad 30 \quad (6.1)$$

$$h = 10 * \frac{2.598^2}{2 * 9.81}$$

$$h = 3.44 \text{ m}$$

<sup>30</sup> GÓMEZ J.L., Salto de agua y presas de embalse, 1964; Madrid.



$$h = 0.5D \left( \frac{v}{\sqrt{2D}} \right)^{0.55} \quad 31 \quad (6.2)$$

$$h = 0.5 * 7 \left( \frac{2.598}{\sqrt{2 * 7}} \right)^{0.55}$$

$$h = 2.86 \text{ m}$$

De las dos fórmulas utilizadas utilizamos la ecuación (6.1) la cual se la toma por el lado de la seguridad del proyecto, con esta fórmula se aprecia que la sumergencia mínima queda garantizada debido a que el nivel mínimo de agua dentro de la chimenea de equilibrio de 1050.67 msnm se encuentra 15.57 metros sobre la clave del túnel en la cota 1035.1 msnm.

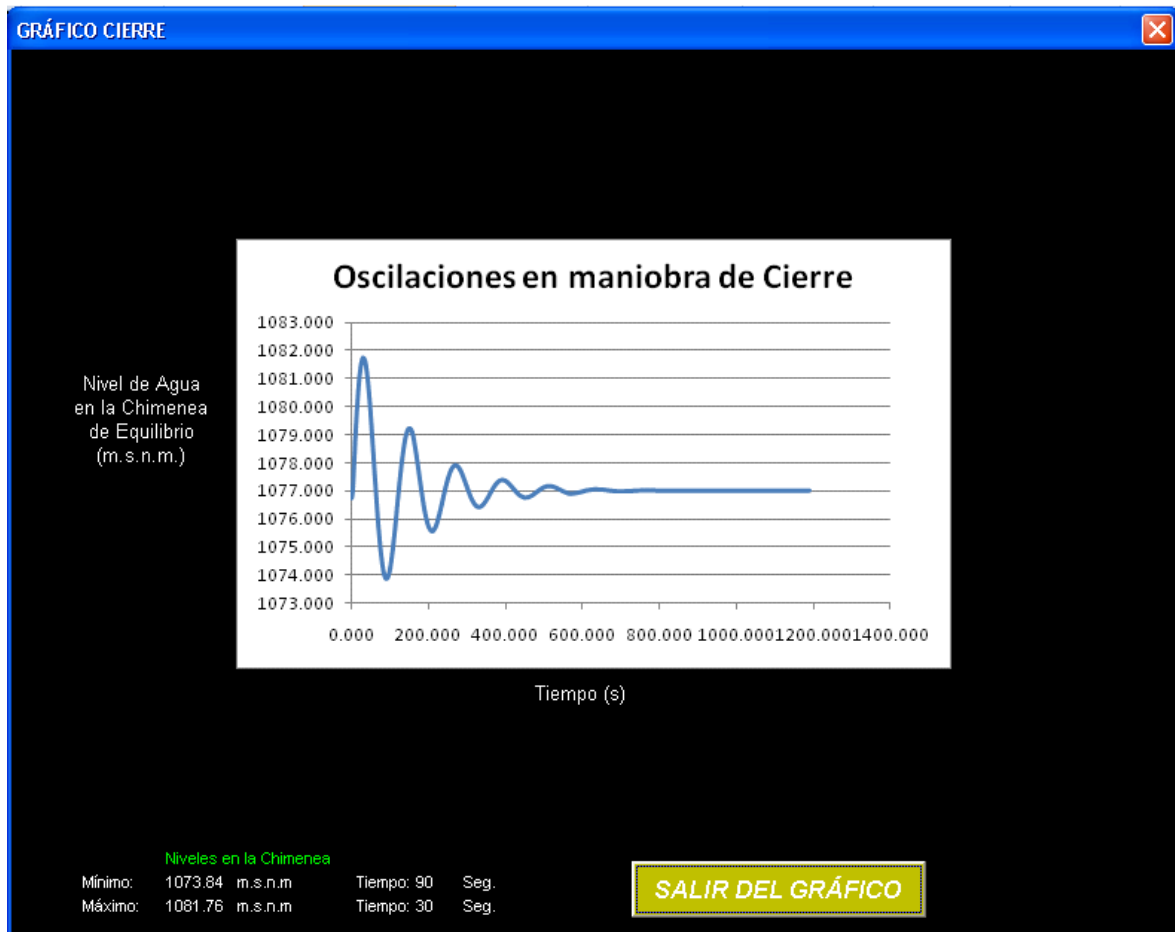
**Figura 6.25.** Gráfico de las oscilaciones de agua dentro de la chimenea de equilibrio para una maniobra de apertura, nivel mínimo en el embalse y máximo caudal turbinado



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

<sup>31</sup>FOKEEV V.S., Formación de vórtices en centrales eléctricas, 1964; Moscú.

**Figura 6.26.** Gráfico de las oscilaciones de agua dentro de la chimenea de equilibrio para una maniobra de cierre, nivel máximo en el embalse y mínimo caudal turbinado



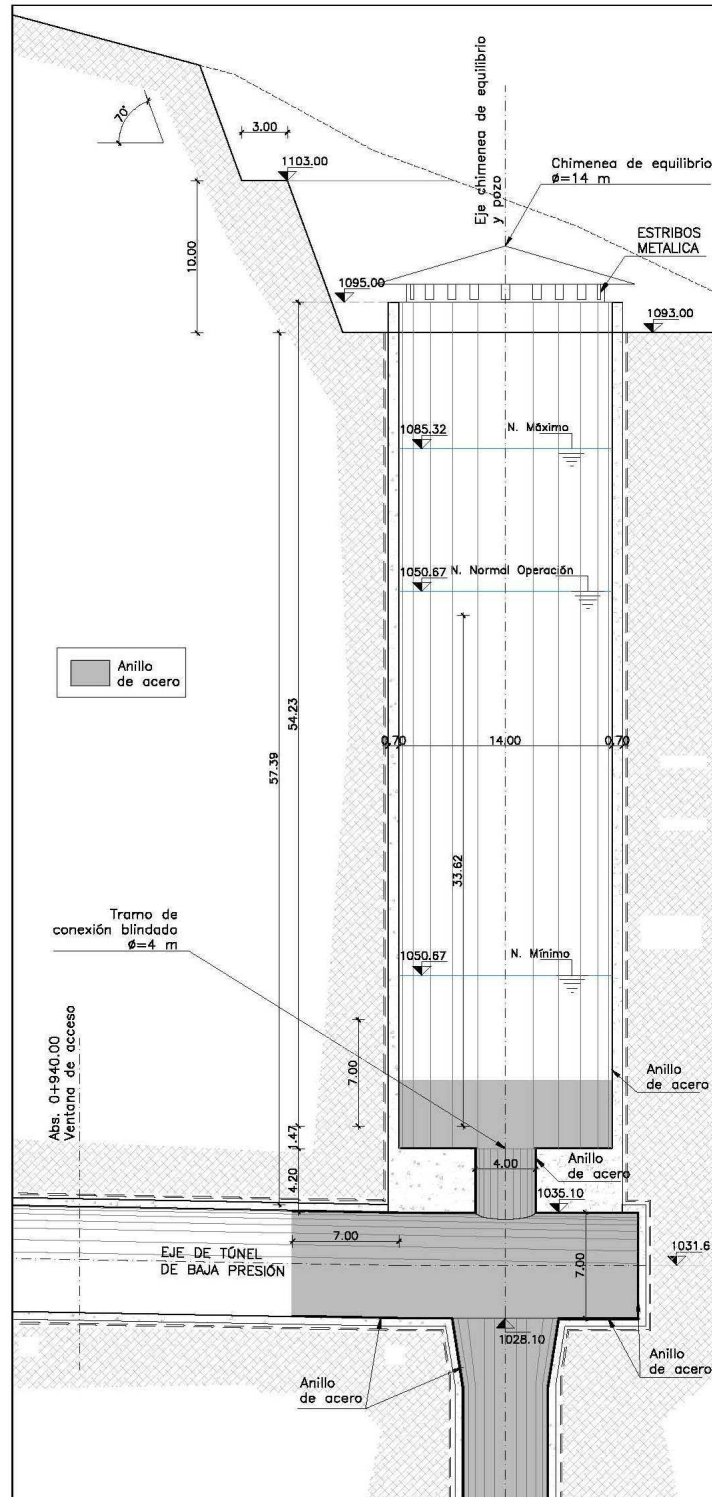
FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

**Figura 6.27.** Gráfico de las oscilaciones de agua dentro de la chimenea de equilibrio para una maniobra de apertura, nivel mínimo en el embalse y mínimo caudal turbinado



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez

Figura 6.28. Nivel máximo y mínimo dentro de la chimenea de equilibrio



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez.

## CAPITULO 7.

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 7.1.FLUJO NO PERMANENTE Y GOLPE DE ARIETE

- El flujo que se produce cuando opera una válvula al final de la tubería de presión tiene características variables con respecto al tiempo, al cual se lo denomina flujo transitorio.
- Los flujos transitorios se clasifican de acuerdo al lapso de tiempo en que ocurre la variación con respecto al tiempo, hay tres clases que son: flujo transitorio lento, flujo transitorio rápido y flujo transitorio muy rápido. Son denominados de esa manera debido a la variación de sus condiciones y características iniciales.
- El flujo transitorio muy rápido se lo define como golpe de ariete y es el fenómeno que se produce cuando las variaciones de las condiciones y características iniciales son muy significativas, lo cual provoca una sobrepresión que puede poner en riesgo a todo el sistema hidráulico.
- El golpe de ariete producido en una tubería debido al cierre ó apertura de válvulas se genera en un ciclo cuya magnitud es igual al cociente entre la longitud del tramo y la celeridad de onda  $t=L/a$ .
- Cuando la velocidad del flujo en la tubería se hace cero, la presión obtiene su valor máximo.
- La celeridad de onda es la velocidad con que viaja la sobrepresión generada, la cual depende de la geometría y propiedades elásticas del material de la tubería así como de las propiedades elásticas del fluido.
- Una operación de apertura ó cierre se considera rápida si el tiempo de ejecución de la maniobra es menor a  $\frac{2L}{a}$ , que es el tiempo que se demora

la onda en ir desde la válvula hasta el embalse y volver de nuevo a la ubicación de la válvula.

- Una operación de apertura ó cierre se considera lenta si el tiempo de ejecución de la maniobra es mayor a  $\frac{2L}{a}$ , que es el tiempo que se demora la onda en ir desde la válvula hasta el embalse y volver de nuevo a la ubicación de la válvula.
- Para el cálculo de la sobrepresión máxima en operaciones de control lentas, se utiliza la ecuación de Michaud.
- Para el cálculo de la sobrepresión máxima en operaciones de control rápidas, se utiliza la ecuación de Allievi.
- El modelo rígido se lo utiliza para resolver los flujos transitorios rápidos en donde se genera variación en la presión pero sin tener cambios significativos en la tubería.
- El modelo elástico se lo utiliza para resolver los flujos transitorios muy rápidos ó también llamados golpe de ariete en donde las variaciones en la presión si producen cambios significativos en la tubería.

## 7.2.ECUACIONES FUNDAMENTALES

- Una chimenea de equilibrio, llamada también pozo piezométrico, cámara de oscilaciones o embalse artificial, está diseñada para reducir o eliminar los efectos de transitorios indeseables en todo el tramo de conducción que se ubica aguas arriba de la misma. En una central hidroeléctrica, este tramo se lo conoce como el túnel de baja presión, que no resistiría las variaciones de presión producidas. Adicionalmente permite el control de cambios de presión excesivos, separación de la columna de agua o sobre velocidad en las turbinas.

- Las chimeneas de equilibrio son generalmente tuberías de gran diámetro ubicadas verticalmente, sin embargo existen otras configuraciones, como las chimeneas inclinadas.
- Para el dimensionamiento de las chimeneas de equilibrio, se debe tomar por seguridad, una distancia con un coeficiente de seguridad del 15% de la disminución de la mínima oscilación en su parte inferior y un coeficiente del 10% del aumento de la máxima oscilación.
- La sobrepresión máxima es la presión en la base de la chimenea o carga de agua dentro de la misma que iguala a la presión creada por el trasciente hidráulico a modo de golpe de ariete.
- La sobrepresión máxima es disipada por la presencia de la chimenea de equilibrio. Si este elemento no existe la sobrepresión afectaría al túnel de baja presión, que debería ser diseñado para resistir este efecto, afectando así el costo del proyecto.
- El amortiguamiento de las oscilaciones del nivel de agua dentro de la chimenea de equilibrio se debe principalmente al flujo que se produce dentro de la tubería de baja presión que conecta al agua del embalse con la de la chimenea.
- Otros métodos principales por medio de los cuales se pueden atenuar los efectos del golpe de ariete son: el incremento del diámetro de la tubería de alta presión, incrementando la inercia (dimensiones) del generador, disminuyendo el tiempo de maniobra de operación de las válvulas.
- Para la implementación de una chimenea de equilibrio en una central hidroeléctrica es recomendable sujetarse al criterio de elección del sitio ideal propuesto en el inciso 3.12.4.
- Las principales ventajas que ofrece un diseño que incluye una chimenea de equilibrio son: mantener un balance de la energía en la conducción, disminuir la amplitud de las fluctuaciones de presión, lograr que la

influencia del golpe de ariete se restrinja únicamente a la longitud correspondiente a la tubería de alta presión, disminuir el costo de construcción total de la central evitando un diseño estructural robusto del túnel de baja presión, mejorar las características de regulación de la planta, almacenar y proveer agua en casos de cierre y apertura de válvulas respectivamente.

- Varias son las configuraciones que pueden tomar las chimeneas de equilibrio, dependiendo de las características, limitaciones topográficas y de desnivel del lugar donde vayan a ser construidas o excavadas; que van desde simples formas cilíndricas de diámetro constante, hasta formas específicas de secciones especiales y diámetros variables a lo largo de todo el eje vertical e inclusive chimeneas hidroneumáticas o de cámaras de aire para amortiguar las oscilaciones.
- El análisis de las oscilaciones para chimeneas de equilibrio simples puede ser realizado con el uso de ábacos; de no ser así, se deberá contar con la ayuda de un software de cálculo computacional.
- Los tipos de chimeneas de equilibrio son: simples, con orificio restringido, compuestas, de oscilación diferencial y neumáticas.
- Las chimeneas simples tienen dimensiones muy grandes ya que requieren un gran volumen, por lo que se vuelven muy caras y no son muy utilizadas.
- Un requisito fundamental para las chimeneas de equilibrio es que el nivel del terreno en la zona de la chimenea esté lo suficientemente alto como para soportar la oscilación máxima.
- Las chimeneas de equilibrio con orificio restringido son chimeneas simples, a las cuales se les añade un orificio o estrangulamiento en la parte inferior, con lo cual se consigue una mayor pérdida de carga localizada, reduciendo las amplitudes de oscilación en comparación a una chimenea simple. Es una optimización de las chimeneas simples que ofrece mayores ventajas constructivas.



- El tamaño del orificio restringido define la pérdida de energía: entre más pequeño sea el diámetro del orificio, mayor será la pérdida producida. En función de esta idea aparentemente una reducción máxima de su diámetro podría ser ideal, sin embargo un diámetro muy pequeño no permitiría el ingreso del agua hacia ésta o definiría muy altas velocidades del flujo en el orificio, llegando a ser ineficiente para controlar los trascientes.
- Una alternativa muy común en el diseño de centrales hidroeléctricas corresponde a las chimeneas de equilibrio compuestas o de sección variable, especialmente cuando las chimeneas de equilibrio simples o con orificio restringido, debido a las características topográficas y geológicas propias del terreno, no logran evitar un posible desbordamiento del agua el momento de producirse la máxima oscilación superior, o una succión al producirse la mínima oscilación.
- Las chimeneas de equilibrio diferenciales tienen su nombre debido a la diferencia de niveles y velocidades de movimiento del agua entre la chimenea principal y el tubo central haciendo más efectivas las funciones de suministro y almacenamiento del líquido dentro de la misma.
- Las únicas chimeneas de equilibrio que no tienen contacto con la atmósfera son las neumáticas, que se encuentran cerradas y únicamente llenas con un volumen de aire que se comprime en casos en que el nivel de agua aumente en la chimenea y se lo descomprime en casos que éste disminuya.
- La ubicación de una chimenea de equilibrio es al extremo del túnel de baja presión. Sin embargo, existen otras formas de localización menos comunes como: varias chimeneas en el túnel de baja presión, una Chimenea aguas abajo de las turbinas (para contraregulación o sumergencia de la descarga), una chimenea antes y otra después de las turbinas, una sola chimenea para dos embalses diferentes de una misma central.
- El programa propuesto para el cálculo de niveles máximo y mínimo de una chimenea de equilibrio plantea algunas hipótesis respecto a las

características del flujo y de la estructura del túnel de baja presión. El usuario debe entenderlas con la finalidad de establecer las limitaciones del análisis y resultados obtenidos.

- Los parámetros tomados en cuenta en la formulación de las ecuaciones fundamentales para la modelación de las oscilaciones en las chimeneas de equilibrio, se los puede observar en los esquemas gráficos explicativos mostrados en el capítulo correspondiente.
- El diseñador de la central, como parte de todas las especificaciones que debe entregar a los operadores de ésta, debe indicar el tiempo adecuado de ejecución de maniobras en función de una sobrepresión máxima admisible por parte del túnel de baja presión, despejando de la ecuación de Michaud como se ha indicado en el inciso correspondiente y así evitar tiempos demasiado rápidos de ejecución de maniobras que generen sobrepresiones inadmisibles en la tubería de presión.
- Para la deducción de la Ecuación Dinámica o ecuación de cantidad de movimiento de las masas se realiza un análisis del golpe de ariete asumiéndolo como constante, además que se analiza el fenómeno transitorio de flujo como dos sucesos separados: Golpe de Ariete y Aceleración de Masas.
- Las ecuaciones dinámicas de chimeneas de equilibrio simples y con orificio restringido tienen una diferencia fundamental, que radica en que ésta última contiene el término  $H_0$  (Carga sobre el Orificio Restringido), mientras que, la primera no lo tiene.
- El criterio más elemental para el dimensionamiento de una Chimenea de Equilibrio está relacionado con su estabilidad, es decir que sus oscilaciones se amortigüen en un tiempo razonable y no se incrementen con el tiempo.
- Las oscilaciones del agua dentro de una chimenea de equilibrio serán estables si su área transversal es mayor a un valor mínimo llamado el Área de Thoma. Por seguridad como área de diseño se propone un coeficiente

de seguridad de 1.25 en chimeneas con orificio restringido y 1.50 para chimeneas simples, con respecto al área de Thoma calculada.

- La fórmula de Thoma continúa con una sustancial vigencia para el dimensionamiento de chimeneas de equilibrio debido a que en posteriores análisis no se han obtenido modificaciones mayores.
- El diseño balanceado de una chimenea de equilibrio consiste en estimar un diámetro del orificio restringido (o en su defecto del orificio de entrada para chimeneas simples) cuyo valor sea tal, que se consiga una igualdad entre la sobrepresión máxima y la pérdida de carga por el estrangulamiento al pie de la chimenea. En pre diseño, para obtener una primera aproximación de la máxima sobrepresión que se producirá en la chimenea de equilibrio, es útil el uso de los ábacos de Parmakian, cuya forma de utilización se la explica en el inciso correspondiente.
- En ocasiones no se puede diseñar la chimenea de equilibrio para una condición balanceada, pues la sobrepresión que se produce es extremadamente alta en relación a las pérdidas de carga en el orificio restringido, entonces el diámetro del orificio restringido se verá limitado a una dimensión, tal que, en éste la velocidad máxima de circulación del flujo sea inferior a la velocidad límite antes de la cavitación.
- La chimenea de equilibrio es una tubería de mucho mayor diámetro que el del túnel de baja presión, es decir que la relación entre sus áreas transversales debe ser lo más grande posible (alrededor de 16 veces ó mayor para que solo se transmita un 10% de la onda a la chimenea de equilibrio) pero sin que resulte antieconómica su excavación y construcción.
- Como criterios de diseño debe considerarse que a mayor longitud del túnel de baja presión, o mayor velocidad del agua en su interior y/o menor sea el tiempo de maniobra de válvulas, mayor será el efecto del golpe de ariete.

- El nivel inicial o normal de operación en la chimenea de equilibrio es aquel que se tiene cuando se está operando la central con las válvulas abiertas y sin ninguna maniobra previa.

### **7.3.OPTIMIZACIÓN DEL PROGRAMA**

- Se analizó, revisó y optimizó la programación básica que contiene únicamente 4 hojas elaboradas en Microsoft Excel, sin instrucciones ni indicaciones para el usuario.
- La optimización realizada consiste en un cambio del entorno y de la interfaz que maneja el usuario, logrando que la aplicación se realice a través de pantallas interactivas, de fácil uso, ordenadas, gráficas, precisas, con claras indicaciones de las restricciones existentes, en un entorno de Microsoft Visual Basic.
- Se ha facilitado el ingreso de datos y la visualización e interpretación de resultados en forma progresiva, ordenada y automáticamente.
- Como parte de la ayuda que se brinda al usuario, se han digitalizado tablas, ábacos y gráficos, insertando comentarios de advertencia, restricciones de ciertos tipos de datos. En los formularios se esquematizan estructuras con gráficos fáciles de entender para facilidad de aplicación de ábacos.
- El programa realizado cuenta con 60 hojas de cálculo en Microsoft Excel integradas dentro de un entorno de usuario de Microsoft Visual Basic para la introducción y cálculo de las pérdidas de carga en toda la conducción antes de la chimenea de Equilibrio. La base de datos creada para el cálculo de las pérdidas tiene un sustento teórico garantizado.
- El programa permite que el usuario detecte errores con ayuda de mensajes.

- Para las operaciones de cierre de válvulas el caudal inicial siempre debe de ser mayor al caudal final. Para las operaciones de apertura de válvulas el caudal final debe ser mayor al caudal inicial. El usuario será advertido por el programa de cometer algún error o equivocación.
- Se ha incluido en el programa la opción de calcular la aceleración de la gravedad en función del ángulo de latitud según la ubicación del proyecto en el planeta.
- Las pérdidas de carga producidas por el orificio restringido serán calculadas automáticamente una vez que se ingresen los datos de la pantalla inicial, hasta el dato de diámetro de orificio restringido.
- En todos los datos de todas las pantallas se impide el ingreso de datos con signo negativo, caracteres que no sean números así como se impide que posibles resultados negativos sean procesados dentro de las respuestas finales (a consecuencia de la introducción de datos absurdos). Asimismo en todos los casos se han ubicado las unidades de medición de los parámetros, datos y resultados a lo largo de todo el programa.
- Todos los datos que se ingresarán en el programa se los debe hacer en base al sistema internacional de unidades.
- Para el ingreso de los datos, se ha establecido una forma ordenada y lógica.
- Se ha incluido una ayuda para la introducción de datos dando rangos de valores. Esto favorece el carácter didáctico de la programación. En las pantallas principales se ha incluido un sistema automático que identifica si faltan datos e informa al usuario las casillas donde no se tienen datos.
- Los botones “ATRÁS” y “SIGUIENTE” tienen utilidad en caso que el usuario necesite realizar rectificaciones o modificaciones en sus datos, grupo de datos o estructuras en donde se perderá carga, así como en los datos iniciales de la central o de la chimenea. Los datos introducidos previamente en otras pantallas no se borran.

- El programa cuenta con la posibilidad de cálculo de 34 diferentes formas de conexión, desvío o división del conducto que se pueden presentar a lo largo del túnel de baja presión. Están organizadas en categorías de codos, Tees, Yees y conversiones.
- Se han digitalizado todas las curvas de variación de coeficientes y se ha introducido una ayuda para la selección del valor específico.
- El programa cuenta con la posibilidad de cálculo de 8 diferentes formas de reducción o ampliación de la sección del túnel de baja presión. Están organizadas en categorías de boquillas, difusores y cambios repentinos de sección.
- El criterio del usuario siempre será de vital importancia en el manejo del programa, pues deberá introducir datos coherentes para obtener los resultados esperados sin mayores inconvenientes.
- El programa brinda 5 posibilidades para el coeficiente de rozamiento en el cálculo de las pérdidas de carga por fricción, 3 materiales diferentes: acero, hormigón liso y hormigón lanzado o Shotcrete; una superficie mixta de 2 ó 3 materiales o en su defecto la posibilidad de que el usuario introduzca el coeficiente de rozamiento de Manning que crea adecuado.
- En el caso de ser una superficie mixta, el usuario únicamente debe introducir los porcentajes del perímetro correspondientes a cada material y el programa hará los cálculos ponderados respectivos.
- El usuario tiene la ventaja de poder observar antes de correr el programa, un resumen de las pérdidas de carga producidas en el sistema de aducción desde el embalse hasta la chimenea de equilibrio y regresar a cada una de las pantallas de cálculo en caso de alguna revisión o corrección.

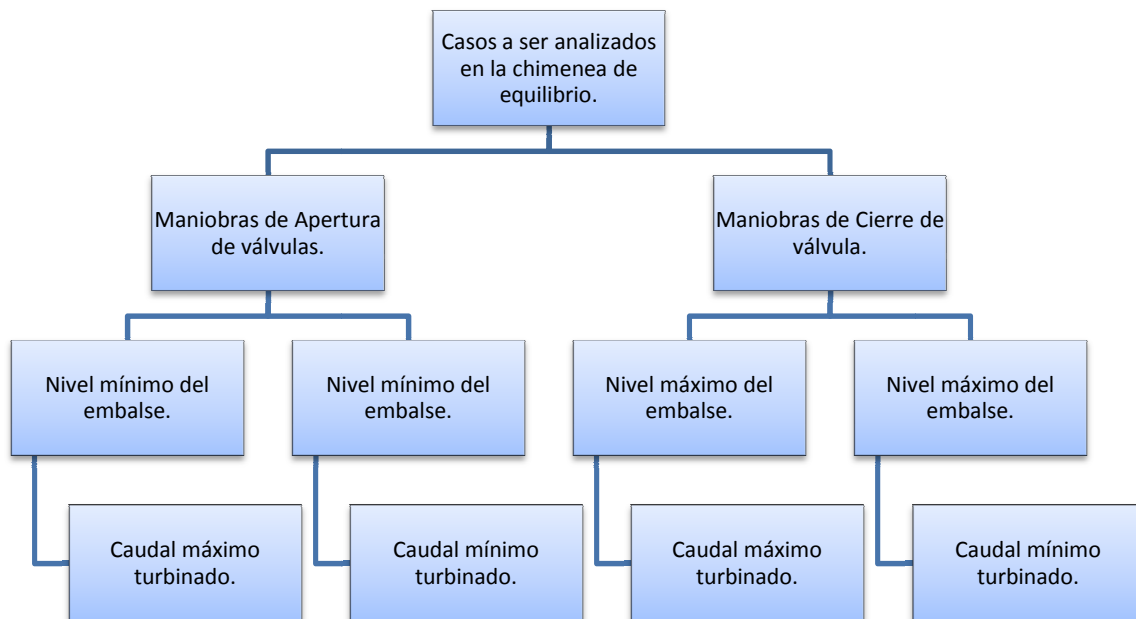
#### **7.4.MANUAL DE USUARIO**

- El programa sirve para el cálculo de las oscilaciones del nivel de agua en chimeneas de equilibrio de todos los tipos descritos, excepto para chimeneas diferenciales y neumáticas.
- En todas las casillas de datos del programa, los números decimales deberán ser ingresados separando los enteros de los decimales por puntos (.) y no por comas (,).
- Cada vez que se inicie la ejecución del programa se deben activar las macros relacionados al editor de Microsoft Visual Basic que por defecto Microsoft Office Excel deshabilita, de lo contrario no se activarán los botones de cálculo de éste.
- El método de análisis utilizado para determinar las oscilaciones de agua dentro de la chimenea de equilibrio considera la suma de pérdidas en el tramo comprendido entre el embalse y la chimenea de equilibrio.
- El programa no realiza ningún cálculo basado en datos de las dimensiones, material y geometría del túnel de alta presión; razón por la cual no se pide al usuario especificarlos.
- El programa está limitado a la introducción de chimeneas de equilibrio que varían desde una simple de diámetro constante hasta chimeneas de 4 secciones de diámetros variables (8 diámetros) a lo largo del eje vertical en 5 distintas cotas.
- El primer pico en las oscilaciones será el de mayor magnitud, es decir será el máximo para maniobras de cierre y será el mínimo para maniobras de apertura.
- El nivel mínimo del embalse es la menor cota con de agua que se podrá tener reservada para que se cumpla con el nivel muerto de sedimentos calculado y que la obra de toma tenga la sumergencia necesaria y evitar el ingreso de aire hacia ésta. Si el embalse no llega a tener esta cota mínima de agua, no se podrá operar la central.

- El nivel máximo del embalse es la mayor cota de agua que se podrá tener reservada, ya que si llega una mayor cantidad de agua a éste, será derramada hacia el vertedero de excesos de la presa, como es el caso de avenidas pluviométricas extraordinarias.
- El caudal mínimo turbinado corresponde a la mínima cantidad de agua con la que podrá operar una sola turbina de la central, teniendo una baja eficiencia de operación.
- El caudal máximo turbinado corresponde a la máxima cantidad de agua con la que podrán operar todas las turbinas de la central, lo cual no necesariamente implica que sea el caudal óptimo de operación de éstas, por lo que su valor en muchos casos es superior.
- La chimenea de equilibrio deberá de garantizar que el agua nunca supere su altura total ya que el objetivo es que la chimenea retenga los rechazos de carga dentro de su estructura.
- Para determinar los niveles de agua extremos (máximo maximorum y mínimo minimorum) dentro de la chimenea de equilibrio se recomienda realizar las maniobras de operación indicadas en el Cuadro 7.1.



**Cuadro 7.1.** Maniobras de operación en las válvulas de las turbinas de una central hidroeléctrica.



FUENTE: Darío Calderón, Diego Enríquez.

- De entre los 4 valores obtenidos simulando las maniobras anteriormente mencionadas, frecuentemente se tiene que el nivel mínimo minimorum registrado en la chimenea de equilibrio corresponde a la maniobra de apertura de válvulas teniendo el nivel mínimo en el embalse y con el máximo caudal posible turbinado; mientras que el nivel máximo maximorum registrado en la chimenea de equilibrio corresponde a la maniobra de cierre de válvulas teniendo el nivel máximo en el embalse y con el máximo caudal posible turbinado. Sin embargo el usuario será el encargado de discernir entre los resultados que arroje el programa y bajo su criterio determinar los niveles extremos del agua en las maniobras posibles de operación de la central.
- Si el usuario desea tener una mejor comprensión de los cálculos de pérdidas de carga localizadas y sus respectivos coeficientes, se recomienda revisar la bibliografía principal utilizada: IDELCHIK I., Handbook of Hydraulic Resistance, Hemisphere Publishing Corporation;

1986; New York; 2<sup>o</sup> edición, en donde se hallan la mayoría de ábacos, tablas, gráficas y figuras con las cuales se ha diseñado éste programa.

- El programa, como todo software de cálculo, únicamente procesa los datos que se introduzcan de una manera rápida y precisa, arrojando resultados numéricos que deben ser entendidos y lógicos; a ningún momento será un reemplazo del buen criterio que maneje el usuario en la calidad, veracidad y utilidad de estos. Razón por la cual, si se lo utiliza en un campo profesional más avanzado y no solo en el ámbito académico, se recomienda que el usuario tenga una experiencia previa en el cálculo con hojas de cálculo similares.
- En maniobras de apertura el nivel de agua dentro de la chimenea de equilibrio siempre deberá ser superior al nivel mínimo de la estructura y deberá de existir un nivel de profundidad mínimo que garantice que no entrará aire lo que provocaría cavitación.
- El programa no realiza un diseño balanceado para el diámetro del orificio restringido, por lo que el usuario deberá de ingresar el diámetro del orificio restringido una vez que se ha realizado el diseño balanceado previamente y por separado.

#### 7.4.1. PÉRDIDAS POR FRICCIÓN

- Para el cálculo de la pérdida de carga por fricción y del factor de fricción “ $f$ ”, se utilizó la fórmula de Manning adaptándola a la fórmula de DarcyWeisbach, con lo cual las fórmulas finales son:

Fórmula de la pérdida de Carga de Darcy-Weisbach: 
$$h_f = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g}$$

Fórmula del factor de fricción de Darcy-Weisbach adaptada para el coeficiente de fricción de Manning (n): 
$$f = 124.5 \frac{n^2}{D^{1/3}}$$

- El uso de esta fórmula en la que se usa el coeficiente “n” de Manning se debe a que la dispersión de valores del “n” no tiene tanta dispersión, como sucede con la rugosidad absoluta.
- Por simplicidad y debido a que el diámetro de la conducción siempre tendrá dimensiones considerables en relación a las rugosidades absolutas, se utilizó la fórmula anteriormente mencionada que corresponde a superficies hidráulicamente lisas.
- El coeficiente “n” de Manning sugerido para hormigón igual a 0.014 se basó en la referencia bibliográfica: CHOW Ven Te, Hidráulica de canales abiertos, pág. 108.
- El coeficiente “n” de Manning sugerido para acero igual a 0.011 se basó en la referencia bibliográfica: SOTELO Gilberto, Hidráulica general, pág. 295.
- El coeficiente “n” de Manning sugerido para hormigón lanzado igual a 0.022 se basó en la referencia bibliográfica: CHOW Ven Te, Hidráulica de canales abiertos, pág. 109.
- Si la geometría transversal del túnel de carga es diferente a la geometría circular común, el usuario deberá obtener un diámetro equivalente (a partir del área equivalente) para poder ingresar ese dato en el programa. Lo mismo sucede para algunos casos de pérdidas localizadas en el túnel de baja presión, aunque en algunos otros se tiene la opción de introducir los datos reales y no los equivalentes, de una geometría no circular.
- Únicamente se permite la introducción de datos para una geometría circular de la chimenea de equilibrio en todas las casillas de datos. Si el usuario tiene en alguna parte de la chimenea una geometría diferente, deberá hallar un diámetro equivalente para introducirlo en el programa y recibir resultados aproximados a los reales.
- El programa puede estimar las pérdidas por fricción en el túnel de baja presión para tres diferentes materiales de superficie (acero, hormigón y

hormigón lanzado o Shotcrete) además de la posibilidad de introducir un coeficiente de fricción de Manning diferente o estimar un coeficiente ponderado para secciones del túnel con distintas longitudes recubiertas por distintos materiales. Sin embargo el programa no tiene la opción de estimar un coeficiente de fricción ponderado para un perímetro compuesto por varios materiales. En tal caso el usuario deberá realizar a parte un promedio ponderado de dicho coeficiente e introducirlo en el programa.

- El programa tiene la limitación de poder calcular las pérdidas por fricción en el túnel de baja presión únicamente ingresando los coeficientes de fricción de Manning, más no existe la posibilidad de ingresar rugosidades absolutas o relativas como en el caso de las pérdidas calculadas con la fórmula de Darcy-Weisbach.

#### **7.4.2. PÉRDIDAS LOCALIZADAS**

- En las pérdidas en rejillas el programa estima el número de barrotes que deberá tener cada rejilla en función de las dimensiones de cada barrote y el espaciamiento entre estos. El número obtenido sin embargo puede diferir en 1 barrote al número real de barrotes que se tengan en la realidad, pues el programa redondea al inmediato superior el valor obtenido. Esto sin embargo es de poca importancia en relación a la pérdida que se producirá en el resto de barrotes que por lo general es un número alto.
- El programa está diseñado para calcular las pérdidas en rejillas (desde 1 hasta 50) y todas iguales. Se limita a un solo tipo de rejillas pues es lo más común que se tiene en las tomas y si se desea introducir diferentes tipos de rejillas, es necesario que el usuario haga un estimado de un tipo de rejilla promedio de tal manera que se obtengan pérdidas equivalentes.
- Si las rejillas de entrada no son de forma rectangular o cuadrada, el usuario deberá hallar un área rectangular equivalente para que el programa le calcule sus pérdidas.

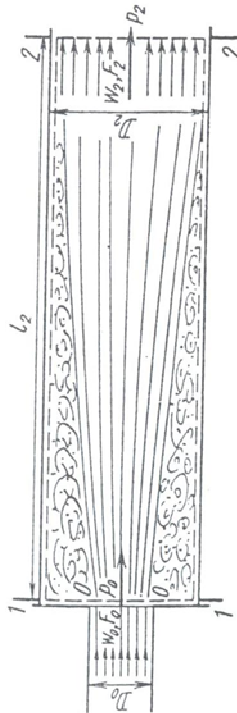
- Las pérdidas en la forma de entrada a la tubería de baja presión (tanto las de cálculos rápidos como las de cálculos minuciosos) están enfocadas para un corte en vista frontal, mientras que las pérdidas por reducción gradual de la sección están enfocadas para un corte en vista de planta. Sin embargo el usuario puede hacer un uso indistinto de estas formas de entrada para sus cálculos a conveniencia propia.
- En cuanto a las pérdidas de carga localizadas en ranuras de compuertas, el programa está limitado al cálculo para formas rectangulares de las ranuras, que es lo más común en compuertas y stop logs de cierre provisional para mantenimiento.
- La transición gradual para la cual se hace el cálculo de las pérdidas a la entrada del túnel de baja presión, es recta. Si se desea calcular las pérdidas para una forma no recta, se sugiere hacerlo con una de las formas de entrada de datos minuciosos propuesta con anterioridad a esta hoja.
- En caso que exista una bifurcación del túnel de baja presión, como es lógico, los diámetros de las tuberías derivadas serán menores al diámetro del túnel inicial. Este cambio de sección no es posible modelarlo en el programa en cuestión de los caudales y geometría variables, pues interpreta que el túnel tiene una sección constante en toda su longitud, con un caudal inicial y final sin aumentos o disminuciones, aunque el programa es capaz de calcular las pérdidas de carga en bifurcaciones, como se ha indicado anteriormente.
- En caso que exista una conversión o tubo de llegada hacia el túnel de baja presión, como es lógico, el diámetro de la tubería que continúa es mayor al diámetro del túnel inicial, es decir que si existe un túnel de menor dimensión que provenga de otro lugar y se una en algún punto al túnel de carga el túnel adicional que se acople al túnel de carga será de menor dimensión al túnel de carga. Este cambio de sección no es posible modelarlo en el programa en cuestión de los caudales y geometría variables, pues interpreta que el túnel tiene una sección constante en toda

su longitud, con un caudal inicial y final sin aumentos o disminuciones, aunque el programa es capaz de calcular las pérdidas de carga en conversiones, como se ha indicado anteriormente.

- Una limitación del programa es que el usuario debe elegir en ciertos casos del cálculo de pérdidas localizadas, entre varias curvas representadas por un valor característico en listas, es decir que el programa no itera entre curvas un valor exacto, mientras que calcula en función de una ecuación característica el valor exacto de la ordenada cuando se haya ingresado el valor de la abscisa correspondiente. En fin, estará a elección del usuario el determinar la curva más aproximada, en base a un cálculo de ayuda que le brinda el programa una vez ingresados los datos necesarios.
- La versatilidad de cálculo del programa aumenta en cualquiera de los casos de estimación de pérdidas (localizadas y por fricción) si el usuario hace un uso adecuado de la opción de poder ingresar un valor del coeficiente  $k$  (en el caso de pérdidas localizadas) y del  $n$  de Manning (en el caso de pérdidas por fricción).
- Se han limitado en algunos casos la posibilidad que el usuario ingrese datos más detallados de la geometría, sobre todo de las secciones no circulares de las estructuras en el túnel de baja presión y se ha optado por indicar al usuario que introduzca algunos de estos datos como si fuese únicamente una geometría circular, debido a la similitud en los valores que se obtienen y la poca probabilidad de tener secciones no circulares o tipo baúl.
- Las pérdidas calculadas para curvas de alineación en planta del túnel de baja presión están limitadas para radios de curvatura únicos y constantes, en caso de tener curvaturas con varios radios, se recomienda tomarlas como curvas separadas e ingresarlas como curvas diferentes, ya que el programa tiene la capacidad para 4 tipos de curvas diferentes y un máximo de 20 en total.

- Para la determinación del coeficiente de pérdida debido al orificio restringido, solo se estableció una geometría tal que la expansión en el diámetro sea abrupta. Como se observa en la Figura 7.1

**Figura 7.1.** Geometría del orificio restringido.



Fuente: Idelchik, I.E.(1986). Handbook of Hydraulic Resistance. 2th. Edition. Berlin, Deutschland. Hemisphere Publishing Corporation Springer-Verlag.

## 7.5.EJEMPLO DE APLICACIÓN

- Para las maniobras realizadas en el ejemplo se concluye que las dimensiones de la chimenea de equilibrio son adecuadas para el sistema ya que el agua debido a las oscilaciones nunca va a estar encima de su nivel máximo o debajo de su nivel mínimo.
- El nivel máximo de agua dentro de la chimenea de equilibrio se dará debido a una operación de maniobra de cierre cuando las dos turbinas estén operando y cuando el nivel en el embalse sea el máximo de operación.

- El nivel mínimo de agua dentro de la chimenea de equilibrio se dará debido a una operación de maniobra de apertura, cuando las dos turbinas estén operando y cuando el nivel en el embalse sea el mínimo de operación.
- En operaciones de maniobras de cierre el pico máximo en las oscilaciones será el primero y posteriormente las oscilaciones se irán amortiguando hasta que éstas paren.
- En operaciones de maniobras de apertura el pico mínimo en las oscilaciones será el primero y posteriormente las oscilaciones se irán amortiguando hasta que éstas paren.
- Las pérdidas de carga negativas tienen un significado físico, el cual no quiere decir que la carga aumenta, sino que por lo general esto ocurre en bifurcaciones o tees y lo que pasa es que las bifurcaciones no siempre llevan el mismo caudal, por lo tanto cuando se unen los caudales cierto lugar de la tubería o túnel va a confluir mas caudal que en otro.
- Después de algunas pruebas con el programa se concluyen algunas relaciones entre las formas de las estructuras hidráulicas y las pérdidas que en estas se producen:
  - Los mejores tipos de estructuras de entre lasteesy/o yees son las que tienen ángulos agudos, es decir que: si comparamos una estructura de estas que posee un ángulo recto de noventa grados con una de ángulo agudo, la estructura que menos pérdidas presentará es la que tiene el ángulo agudo debido a que el choque que sufrirá el flujo (ya sea al confluir o derivarse) será menos brusco entre más pequeño sea el ángulo existente entre los ejes de circulación de ambos flujos.
  - En estructuras de cambio de dirección del flujo, tales como codos y curvas en planta, se presentarán mayores pérdidas entre mayor sea el ángulo en el que se desarrolla la curvatura y entre menor sea el radio de giro de estas estructuras.



- En todas las estructuras, entre mayor sea el caudal que se maneja, entre menores sean las dimensiones de la sección transversal y entre mayor sea la velocidad de circulación de flujo: mayores serán las pérdidas que se tendrán en ellas.
- Las pérdidas serán menores en estructuras que posean curvas suavizadas, es decir que estructuras que presentan ángulos internos entre sus paredes: entre menores sean los valores de dichos ángulos, mayores serán las pérdidas. De esta manera, aquellas estructuras que en teoría no posean un ángulo entre sus paredes internas, como es el caso de estructuras con paredes curvas, se tendrán menores pérdidas que en aquellas que presentan dichos ángulos.
- Partiendo de la idea anterior: codos, tees, bifurcaciones, yees, difusores, boquillas, formas de entrada y el resto de estructuras que posean esquinas redondeadas presentarán menores pérdidas que aquellas de esquinas afiladas o anguladas.
- Se tendrán menores pérdidas en aquellas estructuras que posean una forma hidrodinámica. Esto se puede comprobar fácilmente por citar un ejemplo, en las formas de las secciones transversales de los barrotes de las rejillas de la toma hacia el túnel de baja presión, en donde formas aerodinámicas producen menores pérdidas que en formas de sección rectangular u otra poco hidrodinámica.
- En transiciones de una sección transversal de circulación de agua, entre más pequeño sea el ángulo de transición, entre más corta ésta sea: se tendrán menores pérdidas de carga localizadas.
- En difusores y boquillas se tienen mayores pérdidas de carga entre mayor sea la diferencia de dimensiones (diámetro o ancho y altura) comparando la inicial y final.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abreu José, Guarga Rafael, Joaquín Izquierdo, (1994). Transitorios y oscilaciones en sistemas hidráulicos a presión. Primera edición. Montevideo-Uruguay. La Encuadernadora.
- Bureau of Reclamation of the United States Department of the Interior. (1987). Design of Small Dams. 3th. Edition. Department of Interior. United States of America.
- Chaudhry Hanif. (1987). Applied hydraulic transients. 2° edición. New York-U.S.A. Van Nostrand Reinhold Company.
- Comisión Federal de Electricidad. (1981). Cámaras de Oscilación. Volumen 5. México D.F., México. Manual de Diseño de Obras Civiles.
- Comisión Federal de Electricidad. (1981). Golpe de Ariete. Volumen 6. México D.F., México. Manual de Diseño de Obras Civiles.
- Creager, William. Justin, Joel. (1950). Hydroelectric Handbook. 2<sup>nd</sup> Edition. New York, United States of America. John Wiley Editions
- Featherstone, R.E. (1995). Civil Engineering Hydraulics. 3th. Edition. Oxford, England. Blackwell Science.
- FOKEEV V.S. (1964). Formación de vórtices en centrales eléctricas. Moscú.
- García, José P. (2003). Manual de Visual Basic para Excel. 1era Edición. Valencia, España. Universidad Politécnica de Valencia.
- GÓMEZ J.L. (1964). Saltos de agua y presas de embalse. Madrid.
- Idelchik, I.E. (1986). Handbook of Hydraulic Resistance. 2th. Edition. Berlin, Deutschland. Hemisphere Publishing Corporation Springer-Verlag.

- Kalauzi, G.A. (1991). Memorandum No 1 Recommendations for Hydraulics Transients Studies. Osaka, Japan. PressureTunnels and Penstocks in HydroelectricProjects.
- Karney, Bryan W. (2004). Hydraulics of Pressurized Flow. Toronto, Canada. Hydraulic Design Handbook, Chapter 2.
- Martin, Samuel. (2004). Hydraulic Transient Design for Pipeline Systems. Atlanta, United States of America. Hydraulic Design Handbook, Chapter 12.
- Mataix, Claudio. (1986). Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas. 2da Edición. Madrid, España. Ediciones del Castillo.
- Mays, Larry W. (2004). Hydraulic Design for Energy Generation. Chicago, United States of America. HydraulicDesignHandbook, Chapter 2.
- Mays, Larry W. (2004). Hydraulic Design for Energy Generation. Chicago, United States of America. HydraulicDesignHandbook, Chapter 8.
- Mays, Larry W. (2004). Hydraulic Design for Energy Generation. Chicago, United States of America. HydraulicDesignHandbook, Chapter 12.
- Parmakian, John. (1963). Waterhammer Analysis. Denver, USA. Dover Publications.
- Sotelo, Gilberto. (1997). Hidráulica General. 1era Edición. México D.F., México. Limusa.
- Streeter, Víctor L. (1970). Mecánica de los Fluidos. 4ta Edición. México D.F., México. McGraw-Hill.