



UNCUYO
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE CUYO



**FACULTAD
DE INGENIERÍA**

TRABAJO PRÁCTICO INTEGRADOR

“Dimensionamiento de un aprovechamiento hidráulico”

Aprovechamientos Hidráulicos

2025

GRUPO N°2:

- BRUNI, Melina – Legajo: 13.187
- BUENANUEVA, Santiago – Legajo: 13.183
- FERNANDEZ, Nicolás – Legajo: 13.067
- FERRARI GAIBAZZI, Juan Agustín – Legajo: 12.146

ÍNDICE

1.	Introducción	5
2.	Datos.....	6
3.	Saltos	9
3.1.	Saltos brutos.....	9
3.1.1.	Salto bruto máximo	9
3.1.2.	Salto bruto mínimo.....	9
3.2.	Pérdidas de carga	9
3.2.1.	Pérdidas de carga desde la obra de toma hasta la cámara espiral.....	9
3.2.2.	Energía cinética a la salida del tubo difusor	10
3.3.	Saltos netos	11
3.3.1.	Salto neto máximo	11
3.3.2.	Salto neto mínimo	11
4.	Galería a presión	12
4.1.	Dimensionamiento	12
5.	Obra de toma	17
5.1.	Ubicación planimétrica.....	17
5.2.	Ubicación altimétrica	17
5.3.	Dimensionamiento	17
5.3.1.	Diseño de la obra de toma	17
5.3.2.	Diseño de rejas	18
5.4.	Pérdidas de carga	21
5.4.1.	Pérdida de carga por aceleración de agua	21
5.4.2.	Pérdida de carga por rejas	21
5.4.3.	Pérdida de carga en recatas de compuertas.....	21
5.4.4.	Pérdida de carga total debido a singularidades.	22
5.5.	Sección de control	22
5.6.	Transiciones.....	22
6.	Chimenea de equilibrio	24
6.1.	Dimensionamiento	24

6.1.1.	Sección transversal.....	24
6.1.2.	Diámetro del estrechamiento	25
6.1.3.	Altura total	27
6.2.	Ubicación	27
7.	Tubería forzada	29
7.1.	Función	29
7.2.	Criterios de diseño	29
7.3.	Análisis económico	30
7.3.1.	Diámetro interno.....	30
7.3.2.	Velocidad	30
7.3.3.	Sobrepresión	30
7.3.4.	Presión dimensionante.....	31
7.3.5.	Espesor	31
7.3.6.	Diámetro externo	32
7.3.7.	Costo de excavación	32
7.3.8.	Costo de revestimiento de hormigón	32
7.3.9.	Costo de tubería de acero	32
7.3.10.	Costo de construcción	33
7.3.11.	Costo anual equivalente.....	33
7.3.12.	Pérdidas de carga	33
7.3.13.	Energía no generada por año	33
7.3.14.	Costo de energía perdida por año.....	34
7.3.15.	Costo final.....	34
7.4.	Condición de regulación.....	34
7.5.	Resumen de tubería forzada	35
8.	Actualización de saltos netos	37
9.	Selección de turbina	38
9.1.	Generalidades	38
9.2.	Tipo de turbina	38
9.3.	Velocidad sincrónica y número específico de revoluciones	39
9.4.	Altura de sumergencia	41

9.5.	Dimensionamiento del rodete	44
9.6.	Dimensionamiento de la cámara espiral.....	45
9.7.	Dimensionamiento del tubo de aspiración	46
9.8.	Verificación de la velocidad a la salida del tubo de aspiración	47
10.	Casa de máquinas.....	48
10.1.	Bifurcación.....	48
10.2.	Cono de entrada.....	48
10.3.	Válvula esférica	49
10.4.	Recatas a la salida del tubo difusor	49
10.5.	Dimensionamiento de la casa de máquinas.....	50
10.5.1.	Altura	50
10.5.2.	Dimensión paralela al aprovechamiento	51
10.5.3.	Dimensión perpendicular al aprovechamiento.....	52
11.	Conclusión	53
12.	Anexos	54
	Ábacos para el cálculo de $z_{\text{máx}}$ y z_{min}	54

1. INTRODUCCIÓN

El siguiente proyecto consiste en el predimensionamiento de los componentes principales de un aprovechamiento hidroeléctrico destinado a la generación de energía hidroeléctrica, partiendo de datos básicos necesarios para el cálculo.

2. DATOS

A continuación, se presentan los datos generales del proyecto, las hipótesis adoptadas y un esquema con la configuración del aprovechamiento indicando la geometría general y los componentes a ser diseñados.

Datos de proyecto			
Caudal total del aprovechamiento	Q	147	m³/s
Densidad del agua	δ	997	kg/m³
Temperatura del agua	Ta	15	°C
Aceleración de la gravedad	g	9.81	m/s²
Longitud de conducción	LG	4250	m
Pendiente Galería a Presión (adoptar)	iG	1 a 5	‰
Espesor relleno Galería a Presión	eGP	DG/20 a DG/15	m
Longitud de Tubería Forzada	LT	182	m
Pérdidas singulares (% de p. generalizadas)	Δh_s	10	%
Periodo de diseño	t	50	años
Tasa	r	10	%

Excavación			
Costo	CE	45	USD/m³

Energía			
Precio	PE	65	USD/kWh
Tiempo de cierre	tc	8	s

NIVELES

Niveles del Embalse			
Nivel de coronamiento	NC	1345.50	msnm
Nivel máximo maximorum	NMM	1343.00	msnm
Nivel máximo Normal	NMN	1338.50	msnm
Nivel normal	NN	1330.00	msnm
Nivel mínimo	Nm	1308.50	msnm
Nivel mínimo minimorum	Nmm	1265.00	msnm
Nivel de volumen muerto	NVM	1239.00	msnm
Nivel Eje Obra de Toma	NOT	1247.00	msnm
Nivel de Fondo del Embalse	NFE	1234.25	msnm

Niveles de Restitución			
1 unidad - Potencia 50 %	NRm	1205.35	msnm
1 unidad - Potencia 100 %	NRN	1205.70	msnm
2 unidades - Potencia 100 %	NRM	1206.15	msnm

Hormigón			
Coefficiente de Manning hormigón	nH	0.0135	/
Costo	CH	150	USD/m³

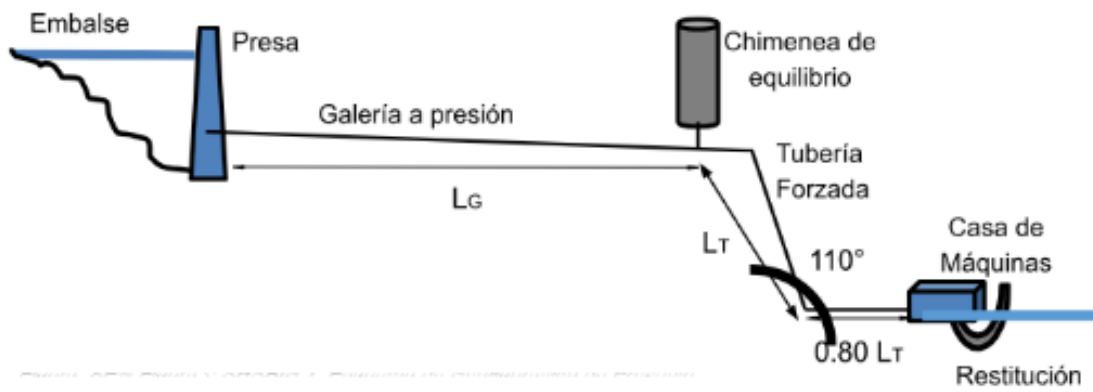
Acero ASTM A 537			
Coefficiente de Manning acero	nA	108	/
Costo	CA	10	USD/kg
Tensión rotura	Fu	3518	kg/cm²
Factor de seguridad	FS	2	/
Densidad	δA	7853	kg/m³

Obra de Toma			
Resguardo Volumen muerto	rvm	3	m
Resguardo Nmm	rnm	1	m
Variación altura de sumergencia			
Velocidad de pasaje de rejas	vpr	1	m/s
Velocidad de aproximación (Creager)	va	0.55	m/s
Altura máxima de la obra de toma	hmax	22.00	m
Altura de proyecto	hp	10	m

Características de la Central			
Tipo de turbina	Francis		
Cantidad de grupos	N°G	2	/
Velocidad máxima salida Tubo Difusor	vTD	2	m/s
Eficiencia hidráulica	ηH	945	/
Tiempo de operación	TO	2190	horas
Frecuencia de la red	f	50	Hz
Cota del eje de cámara espiral	CCE	1201.7	msnm

Hipótesis iniciales:

- Velocidad en la galería a presión $v, GP = 2.50 \text{ m/s}$
- Velocidad en la tubería forzada $v, TF = 6 \text{ m/s}$
- Velocidad a la salida del tubo difusor $v, TD = 2 \text{ m/s}$



3. SALTOS

3.1. SALTOS BRUTOS

El salto bruto se define como la diferencia entre el nivel del embalse y el nivel de restitución. A continuación, se presentan los saltos brutos máximos y mínimos para el caso en estudio.

3.1.1. SALTO BRUTO MÁXIMO

Es el salto resultante de la combinación entre el nivel de embalse máximo normal (NMN) y el nivel de restitución mínimo (NRm), es decir, con una unidad funcionando al 50%.

$$SBM = NMN - NRm = 1338.50m - 1205.35m = 133.15m$$

3.1.2. SALTO BRUTO MÍNIMO

Es el salto resultante de la combinación entre el nivel de reservorio mínimo (Nmm) y el nivel de restitución máximo normal (NRM), es decir, con todas las unidades funcionando al 100% de la potencia.

$$SBm = Nmm - NRM = 1265m - 1206.15m = 58.85m$$

3.2. PÉRDIDAS DE CARGA

De acuerdo con la Norma IEC, el salto neto se define como la diferencia entre el nivel del embalse y el nivel de restitución menos todas las pérdidas de carga incluidas desde la obra de toma hasta la entrada a la cámara espiral de la turbina y la energía cinética a la salida del tubo difusor

$$Hn = Ne - Nr - \Delta h, \text{conducto} - \Delta h, \text{salida tubo}$$

Donde:

- Ne : Nivel del embalse
- Nr : Nivel de restitución
- $\Delta h, \text{conducto}$: pérdidas de carga singulares y de fricción desde la obra de toma hasta la entrada a la cámara espiral de la turbina
- $\Delta h, \text{salida tubo}$: energía cinética a la salida del tubo difusor

3.2.1. PÉRDIDAS DE CARGA DESDE LA OBRA DE TOMA HASTA LA CÁMARA ESPIRAL

$$\Delta h, \text{fricción} = \frac{\eta^2 * v^2}{Rh^{\frac{4}{3}}} * L$$

$$\Delta h, \text{conducto} = \Delta h, \text{fricción} + \Delta h, \text{singulares} = 1.10 * \Delta h, \text{fricción}$$

Donde:

- η : Coeficiente de Manning del material. Para la galería a presión del hormigón y para la tubería forzada, el del acero
- v : la velocidad del flujo en el conducto. Se considera los siguientes valores a modo de hipótesis inicial

		[1-50%]	[2-100%]	
Velocidad Galería a Presión	Vgp	0.625	2.5	m/s
Velocidad Tubería Forzada	Vtf	1.5	6.0	m/s

- Rh : el radio hidráulico, en este caso $Rh = \frac{D}{4}$
- L : Longitud del conducto. Para el caso de la tubería forzada, la longitud indicada en la tabla de datos de entrada se multiplicó por 1,8 con el fin de considerar el tramo de tubería horizontal previo al ingreso a la casa de máquinas

El cálculo se hizo para las situaciones siguientes:

- Una unidad funcionando al 50%
- Dos unidades funcionando al 100%

Los resultados se presentan en la siguiente tabla

	Perdidas por Fricción (**) [m]		Perdidas por Fricción (+ singularidades) [m]	
	[1-50%]	[2-100%]	[1-50%]	[2-100%]
Galería a Presión	0.1082	1.7304	0.1190	1.9035
Tubería Forzada	0.0551	0.8814	0.0606	0.9696

Entonces Δh , *conducto* total, para las dos condiciones de funcionamiento es:

	Perdidas por Conducción (+ singularidades) [m]	
	[1-50%]	[2-100%]
Galería a Presión	0.180	2.873
Tubería Forzada		

3.2.2. ENERGÍA CINÉTICA A LA SALIDA DEL TUBO DIFUSOR

$$\Delta h_{TD} = \frac{v_{TD}^2}{2 * g}$$

Donde:

- g : aceleración de la gravedad
- v_{TD} : Es la velocidad a la salida del tubo difusor. Se considera los siguientes valores a modo de hipótesis inicial

		[1-50%]	[2-100%]	
Velocidad Salida Tubo Difusor	Vtd	1.0	2.0	m/s

Para las dos situaciones de funcionamiento, Δh_{TD} tiene los valores siguientes:

Perdidas Tubo Difusor [m]	
[1-50%]	[2-100%]
0.051	0.204

3.3. SALTOS NETOS

3.3.1. SALTO NETO MÁXIMO

El salto neto máximo surge de la combinación del salto bruto máximo y las pérdidas de carga mínimas

$$SNM = SBM - \Delta h, \text{conducto} (\min) - \Delta h, \text{salida tubo} (\min)$$

$$SNM = 133.15m - 0.180m - 0.051m = 132.92m$$

3.3.2. SALTO NETO MÍNIMO

El salto neto mínimo surge de la combinación del salto bruto mínimo y las pérdidas de carga máximas.

$$SNm = SBm - \Delta h, \text{conducto} (\max) - \Delta h, \text{salida tubo} (\max)$$

$$SNM = 58.85m - 2.873m - 0.204m = 55.77m$$

4. GALERÍA A PRESIÓN

La galería a presión es la conducción que une la obra de toma con la chimenea de equilibrio y luego con la tubería forzada. Mediante dicha conducción, la casa de máquinas puede ser instalada en una posición en la que se obtenga mayor salto para el aprovechamiento. Siempre y cuando el salto ganado retorne la inversión por lo tanto debe evaluarse, condiciones topográficas, geotécnicas geológicas y el costo del conducto vs potencia.

Teniendo en cuenta estas condiciones, se estudian y analizan distintas trazas para seleccionar la alternativa más conveniente teniendo en cuenta todos los factores, no solo el económico.

4.1. DIMENSIONAMIENTO

Se tiene como dato una galería a presión de 4250 m, de un solo tramo recto, revestida con hormigón estructural. Y un tiempo de operación anual de 2190 horas de 8760 horas del año, aprovechando su uso como central de regulación para cubrir los semi picos de la demanda energética. Así resulta un factor de planta de:

$$\text{Factor de planta} = \frac{2190 \text{ h}}{8760 \text{ h}} = 0,25$$

Se adopta como sección transversal una sección circular. Esto se debe a que dicha sección es hidráulicamente la más eficiente ya que a igual valor de área de la sección transversal, el círculo presenta el menor perímetro mojado frente a otras formas de sección transversal de igual área, lo que resulta en el radio hidráulico máximo. Esto permite tener pérdidas de cargas mínimas por fricción en la conducción.

En cuanto a velocidades, los valores extremos son:

$$v_{\max} = 6 \frac{\text{m}}{\text{s}} : \text{velocidad límite para evitar erosión de hormigón.}$$

$$v_{\min} = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}} : \text{velocidad límite para evitar deposición de sedimentos.}$$

Con estos datos podemos determinar el diámetro económico más conveniente, teniendo en cuenta las siguientes variables:

- Costo de construcción: corresponde al total de costos de excavación y revestimiento del hormigón del conducto.

$$C_t = C_{\text{excavación}} + C_{\text{revestimiento}} \quad [\$]$$

- Costo anual: el costo anual equivalente (CAE) es el costo por año de poseer y operar un activo durante su vida entera.

$$CAE = \frac{C_t \times r \times (1 + r)^T}{(1 + r)^T - 1}$$

- Costo de la energía no generada: corresponde a la pérdida de generación originada por pérdidas de carga en el conducto.

$$E = \frac{Q \times \Delta h \times \rho \times g \times \eta \times t}{1000} \left[\frac{kWh}{año} \right]$$

Dado que se tienen los valores extremos de las velocidades de flujo en galería, se calcula cada uno de los parámetros anteriores para valores de diámetros comprendidos entre $D_{\text{máx}}$ ($v_{\text{mín}}$) y $D_{\text{mín}}$ ($v_{\text{máx}}$), tomando una variación inicial de 1 m y refinando la misma a 0,1m y 0,01 m en la zona cercana al menor costo.

a) Diámetro interno

Considerando la ecuación de la continuidad y por geometría:

$$\frac{D_i^2 \times \pi}{4} = \Omega = \frac{Q}{v} \quad \Rightarrow \quad D_i = \sqrt{\frac{4 \times Q}{v \times \pi}}$$

b) Espesor de revestimiento

Se recomienda que el espesor de revestimiento de la galería a presión se encuentre entre 1/20 y 1/15 del diámetro interno de la misma. Se adopta

$$e = \frac{D_i}{18}$$

c) Diámetro externo

Es necesario para poder evaluar las excavaciones.

$$D_e = D_i + 2 \times e$$

d) Costo de excavación

El volumen de suelo a excavar se obtiene:

$$V_{exc} = \frac{D_e^2 \times \pi}{4} \times 1m$$

Considerando un precio unitario de excavación $P_{exc} = 45 \frac{U\$}{m^3}$ se procede a calcular el costo de excavación total:

$$C_{exc} = V_{exc} \times P_{exc}$$

e) Costo de revestimiento

El volumen de revestimiento se obtiene:

$$V_{rev} = e \times \pi \times D_e \times 1m$$

Considerando un precio unitario de hormigón $P_{H^o} = 150 \frac{U\$}{m^3}$ se procede a calcular el costo de revestimiento total:

$$C_{rev} = V_{rev} \times P_{H^o}$$

f) Costo de construcción

Corresponde al total de costos de excavación y revestimiento de hormigón del conducto.

$$C_t = C_{exc} + C_{rev}$$

g) Costo anual equivalente

El costo por año de poseer y operar un activo durante su vida entera.

$$CAE = \frac{C_t \times r \times (1 + r)^T}{(1 + r)^T - 1}$$

Para este proyecto se consideran los siguientes valores:

- r: tasa de interés anual, $r = 10\%$
- T: tiempo de análisis económico, $T = 50$ años

h) Pérdidas de carga generalizadas

Se utilizan las expresiones de Chèzy-Manning:

$$\Delta h_f = \frac{n^2 \times v_i^2 \times 1m}{(R_H)^{4/3}}$$

Siendo:

- n: coeficiente de Manning; para Hormigón $n = 0,0135$
- R_H : radio hidráulico; para sección circular $R_H = \frac{D_i}{4}$

i) Pérdidas de carga singulares

En esta etapa de predimensionamiento, se calcula como un porcentaje respecto de las pérdidas generalizadas determinadas mediante la fórmula de Chèzy-Manning.

$$\Delta h_s = 10\% \times \Delta h_f$$

j) Energía no generada por año

Corresponde a la pérdida de generación originada por las pérdidas de carga en el conducto.

$$E_p = \frac{Q \times \Delta h_t \times \rho \times g \times \eta \times t}{1000} \left[\frac{kWh}{año} \right]$$

Siendo:

- Q : caudal medio [m^3/s]
- Δh_f : pérdidas de cargas totales [m]
- ρ : densidad, para el agua $\rho = 997 \text{ kg}/m^3$
- η : eficiencia del aprovechamiento, para este proyecto $\eta = 0,945$
- t : tiempo medio de funcionamiento anual, $t = 2190 \text{ h}$

k) Costo de energía no generada por año

Considerando un precio unitario de la energía en el mercado, de $P_E = 0,065 \frac{U\$}{kWh}$ se puede calcular el costo de la pérdida de energía generada.

$$C_{ep} = E_p \times P_E$$

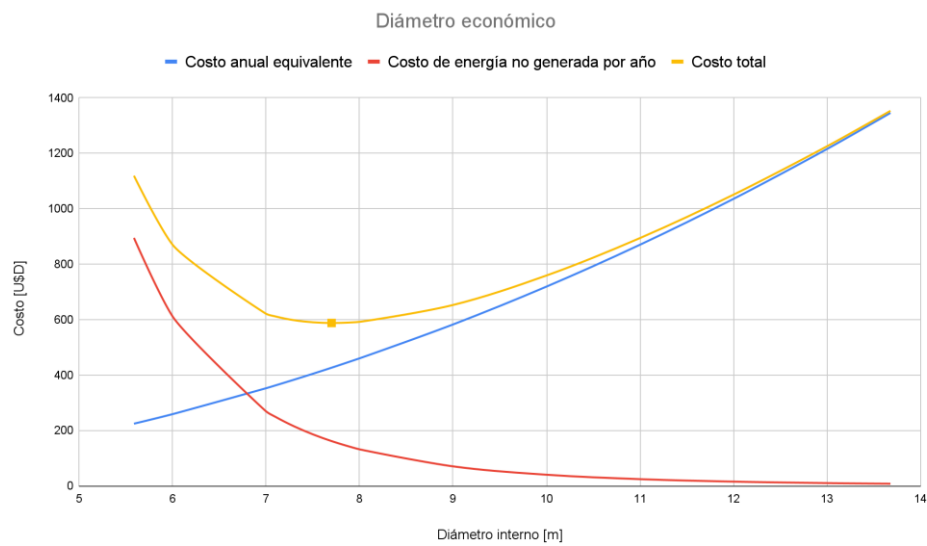
l) Costo final

Se calcula como la sumatoria del costo de construcción y el costo de la energía perdida, todo referenciado al primer año.

$$C_T = C_{ep} + C_t$$

Se presenta a continuación la planilla de cálculo utilizada para determinar el diámetro más conveniente, junto con las curvas de costos y energía perdida.

Di	V	e	De	Costo de construcción	Costo anual equivalente	Δh generalizadas	Δh singulares	Costo de energía no generada por año	Costo total
[m]	[m/s]	[m]	[m]	[USD]	[USD/año]	[m]	[m]	[USD/año]	[USD/año]
7,75	3,12	0,431	8,61	4.281	432	0,00073	0,00007	155,9	587,6
7,74	3,12	0,430	8,60	4.269	431	0,00074	0,00007	157,0	587,6
7,73	3,13	0,429	8,59	4.258	430	0,00074	0,00007	158,0	587,546
7,72	3,14	0,429	8,58	4.247	428	0,00075	0,00007	159,1	587,531
7,71	3,15	0,428	8,57	4.236	427	0,00075	0,00008	160,2	587,526
7,70	3,16	0,428	8,56	4.225	426	0,00076	0,00008	161,4	587,531
7,60	3,24	0,422	8,44	4.116	415	0,00081	0,00008	173,0	588,2
7,50	3,33	0,417	8,33	4.009	404	0,00087	0,00009	185,7	590,0
7,40	3,42	0,411	8,22	3.903	394	0,00094	0,00009	199,4	593,1
7,30	3,51	0,406	8,11	3.798	383	0,00101	0,00010	214,5	597,5



Por lo tanto, la tubería a presión resulta:

- Diámetro interno: $D_i = 7,7 \text{ m}$
- Diámetro externo: $D_e = 8,56 \text{ m}$
- Longitud tubería: $LG = 4250 \text{ m}$
- Espesor de hormigón estructural: $e = 0,43 \text{ m}$
- Velocidad media: $v = 3,157 \text{ m/s}$
- Costo mínimo: $C_{\min} = 587,531 \text{ U\$S/año}$
- Pérdidas de carga: $\Delta h_t = 3,5457 \text{ m}$

5. OBRA DE TOMA

La obra de toma permite tomar agua del embalse evitando el paso de materiales que puedan dañar la conducción o las turbinas. Su diseño no debe ser subestimado ya que puede ocasionar pérdidas de carga significativas al retener materiales, además debe ser de fácil mantenimiento y larga durabilidad, ya que repararlas puede implicar grandes costos como vaciar el embalse.

5.1. UBICACIÓN PLANIMÉTRICA

En planta, la obra de toma se ubica en las laderas del embalse lo suficientemente cercana para no perder salto, y alejada del vertedero para encontrarse fuera del flujo predominante durante las crecidas.

Además, debe analizarse el ángulo entre la embocadura de la toma y el eje del río para evaluar la posible aparición de contracciones de flujo, turbulencias, erosiones, depósito de sedimentos, etc.

5.2. UBICACIÓN ALTIMÉTRICA

En altura, se está condicionado tanto por encima como por debajo, para ubicarla.

El nivel de solera se establece, como mínimo a 1m sobre el nivel del embalse muerto. Esto permite que no se acumulen sedimentos y material de arrastre que bloqueen el ingreso del agua a la conducción.

El umbral se establece, como máximo, 2m por debajo del nivel mínimo minimorum, con el objetivo de asegurar la sumergencia y que no se generen vórtices de aire que ingresen a la galería.

Entonces, la altura total disponible para la obra de toma es:

$$\begin{aligned}A_{max} &= (Nmm - 2m) - (Nvm + 1m) \\A_{max} &= (1265 \text{ m} - 2m) - (1239 \text{ m} + 1m) \\A_{max} &= 23m\end{aligned}$$

5.3. DIMENSIONAMIENTO

5.3.1. DISEÑO DE LA OBRA DE TOMA

Los criterios utilizados son la velocidad de aproximación para determinar el área bruta necesaria y a la velocidad de pasaje entre rejillas para verificar el área neta, luego de deducir la superficie de rejillas.

Se toma una velocidad de aproximación (v_a) de 0,7 m/s (entre 0,3 y 0,8 m/s), con la finalidad de disminuir la recolección de impurezas y materiales de arrastre contra las rejillas, y de

minimizar las pérdidas de carga. La adopción de esta velocidad es aceptable bajo la hipótesis de que la obra de toma está alejada del vertedero y el embalse es alargado y profundo, lo que permite considerar que gran parte de los sedimentos se depositan lejos de la obra de toma.

A partir de esta velocidad y del caudal total del aprovechamiento, se calcula la superficie y el ancho necesario

$$Q = v * S$$

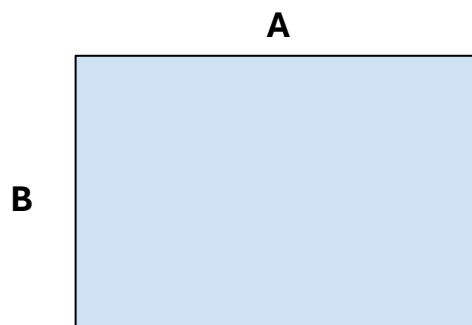
$$S = \frac{Q}{v} = 210 \text{ m}^2$$

Por cuestiones técnicas, se decide adoptar dimensiones de manera de que la obra de toma sea más ancha que alta.

Las dimensiones adoptadas son

$$A = 15\text{m}$$

$$B = 14\text{m}$$



La velocidad entre rejas debe ser menor o igual a 1 m/s. Esto se debe a que el escurrimiento entre rejas puede provocar vorticidades aguas debajo de la pletina. Estos vórtices cambian la distribución de presiones, provocando fuerzas laterales periódicas que ocasionan vibraciones sobre el cuerpo pudiendo llegar a la fatiga.

La verificación de esta velocidad se realiza considerando la sección neta de la toma, es decir, la sección bruta menos la sección ocupada por pletinas, pasadores, rigidizadores, vigas, columnas, tablero, etc. Que representa aproximadamente un 25% del área bruta.

5.3.2. DISEÑO DE REJAS

Debido a las dimensiones de la obra de toma, por razones constructivas y de operación se decidió dividirla en 3 paneles en la dirección horizontal y tres paneles en la dirección vertical.

Se instalan dos columnas de 40cm para dividir los paneles. En la dirección vertical, los paneles se apoyan uno sobre el otro, pero se coloca una viga de 30cm de alto aguas debajo de la reja.

De esta manera, obtenemos 9 paneles con las dimensiones siguientes:

$$a = 4,73m$$

$$b = 4,67m$$

Se utilizan pletinas rectangulares con un espesor de un 1 cm y con una separación de 9cm (10cm entre ejes de pletinas). Además, se adopta una profundidad de la pletina de 10 veces su espesor, es decir, 10 cm.

En cuanto a su longitud se recomienda que no sea mayor a 70 veces el espesor para evitar vibraciones y disminuir la longitud de pandeo, por lo que se colocan pasadores cada 62 cm.

Como marco de cada panel se utilizarán perfiles ángulos de alas iguales L 127 x 127 x 9,5mm.

Además, se colocan barras diagonales con el objetivo de rigidizar el panel. Tanto los rigidizadores como los pasadores se materializan con barras de 16mm de diámetro.

Se calcula el área ocupada por todos estos elementos y se determina el área neta de la toma:

Columnas	
Cantidad	2 u
A	0,4 m
B	14,00 m
Superficie total	11,2 m ²

Vigas	
Cantidad	2 u
A	14,20 m
B	0,3 m
Superficie total	8,52 m ²

Rejas						
	Espesor [m]	Longitud [m]	Cantidad	Separacion [m]	A unitaria [m ²]	Atotal [m ²]
Marco horizontal	0,127	4,73	0,33			0,20
Marco vertical	0,127	4,67	2			1,19
Pletinas	0,01	4,37	44	0,10	0,04	1,92
Pasadores	0,016	4,48	6	0,62	0,07	0,43
Diagonales	0,016	4,95	2			0,16
Superficie por panel [m ²]						3,90

$$A_{neta} = A_{bruta} - A_{rejas} - A_{columnas} - A_{vigas}$$

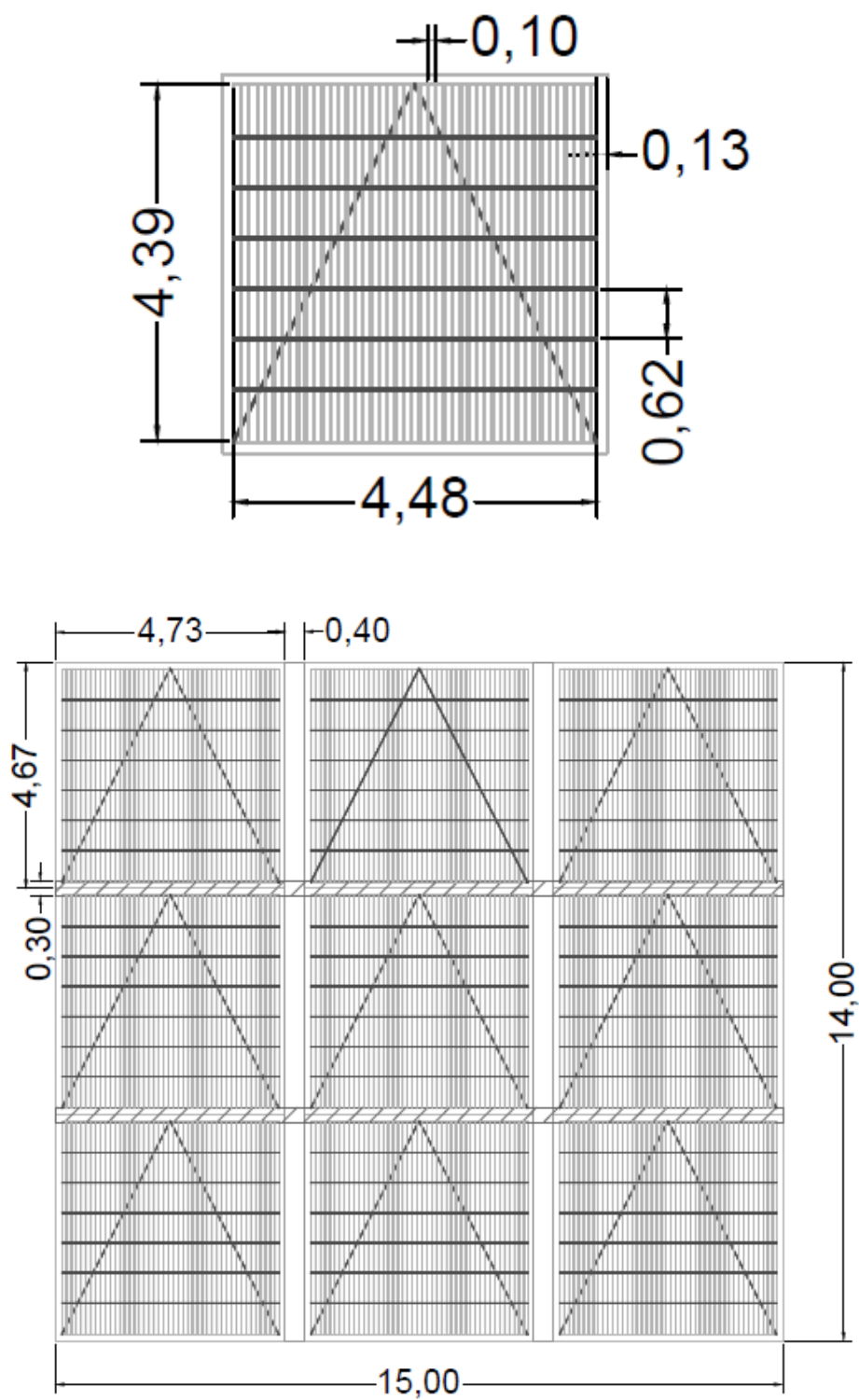
$$A_{neta} = 210 \text{ m}^2 - 3,90 \text{ m}^2 * 9 \text{ paneles} - 11,2 \text{ m}^2 - 8,52 \text{ m}^2$$

$$A_{neta} = 155,22 \text{ m}^2$$

Con lo que se obtiene una velocidad de pasaje entre rejas igual a:

$$v_{pr} = \frac{Q}{A_{neta}} = \frac{147 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{155,22 \text{ m}^2} = 0,947 \frac{\text{m}}{\text{s}} < 1 \frac{\text{m}}{\text{s}} \rightarrow \text{verifica}$$

El esquema resultante es el siguiente:



5.4. PÉRDIDAS DE CARGA**5.4.1. PÉRDIDA DE CARGA POR ACELERACIÓN DE AGUA**

$$\Delta h = \frac{\left(\frac{v_2^2 - v_1^2}{2} \right)}{2g}$$

Donde:

- v_1 : velocidad de aproximación
- v_2 : velocidad de pasaje entre rejillas

$$\Delta h = \frac{\left(\frac{0,947 \text{ m/s}^2 - 0,7 \text{ m/s}^2}{2} \right)}{2g} = 0,0104 \text{ m}$$

5.4.2. PÉRDIDA DE CARGA POR REJILLAS

$$\Delta h = \beta \times \sin(\alpha) \times \left(\frac{e}{d} \right)^2 \times \frac{v^2}{2g}$$

Donde:

- α : inclinación de las rejillas en relación con la posición horizontal
- e : espesor de pletinas
- d : separación de pletinas
- $\beta = 2,42$ para pletinas rectangulares
- v : velocidad del agua calculada para la proyección de la abertura sobre un plano vertical sin descontar las barras de la rejilla.

$$v = \frac{Q}{B \times \cos(\alpha) \times A} = \frac{147 \text{ m}^3/\text{s}}{14 \text{ m} \times \cos(0) \times 15 \text{ m}} = 0,7 \text{ m/s}$$

$$\Delta h = 2,42 \times \sin(90 - \alpha) \times \left(\frac{0,01 \text{ m}}{0,9 \text{ m}} \right)^2 \times \frac{(0,7 \text{ m/s})^2}{2(9,81 \text{ m/s}^2)} = 0,0007466 \text{ m}$$

5.4.3. PÉRDIDA DE CARGA EN REJILLAS DE COMPUERTAS

$$\Delta h = 0,02 \times \frac{v^2}{2g}$$

Donde:

- v : velocidad del flujo en la sección de control, la cual se adopta como un promedio entre la correspondiente a la velocidad de pasaje entre rejas (v_{pr}) y la de la galería a presión (v_{gp} ; esta última es calculada en la sección 5. GALERÍA A PRESIÓN)

$$v = \frac{v_{pr} + v_{gp}}{2} = \frac{0,947 \text{ m/s} + 3,157 \text{ m/s}}{2} = 2,052 \text{ m/s}$$

$$\Delta h = 0,02 \times \frac{(2,052 \text{ m/s})^2}{2 (9,81 \text{ m/s}^2)} = 0,00429 \text{ m}$$

5.4.4. PÉRDIDA DE CARGA TOTAL DEBIDO A SINGULARIDADES.

Se suman las pérdidas obtenidas en los ítems anteriores:

$$\Delta s = 0,0104 \text{ m} + 0,0007466 \text{ m} + 0,00429 \text{ m} = 0,0154 \text{ m}$$

5.5. SECCIÓN DE CONTROL

En la sección de control la velocidad debe ser la velocidad promedio entre la velocidad de pasaje entre rejas (v_{pr}) y la velocidad de la galería a presión (v_{gp}):

$$v_{sc} = \frac{v_{pr} + v_{gp}}{2} = \frac{0,947 \text{ m/s} + 3,157 \text{ m/s}}{2} = 2,05 \text{ m/s}$$

Con la ecuación de la continuidad, podemos calcular el área de esta:

$$A_{sc} = \frac{Q}{v_{sc}} = \frac{147 \text{ m}^3/\text{s}}{2,05 \text{ m/s}} = 71,64 \text{ m}^2$$

Para determinar el ancho de la compuerta en la sección de control, se dota el alto de la galería a presión ($D_i = h$; esta última es calculada en la sección 5. GALERÍA A PRESIÓN)

$$h \times a = A_{sc}$$

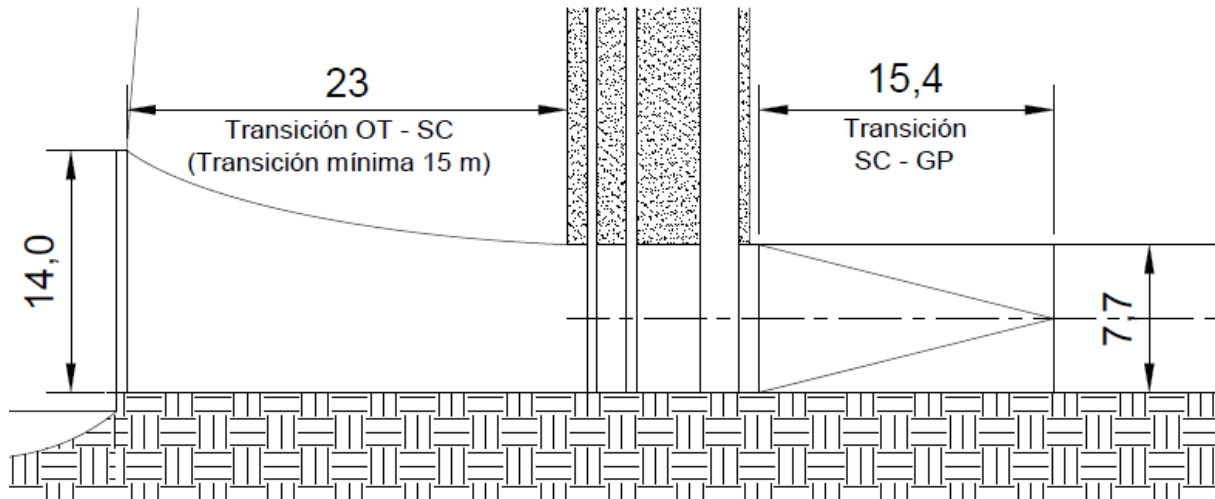
$$h = 7,7 \text{ m}$$

$$a = \frac{A_{sc}}{h} = \frac{71,64 \text{ m}^2}{7,7 \text{ m}} = 9,3 \text{ m}$$

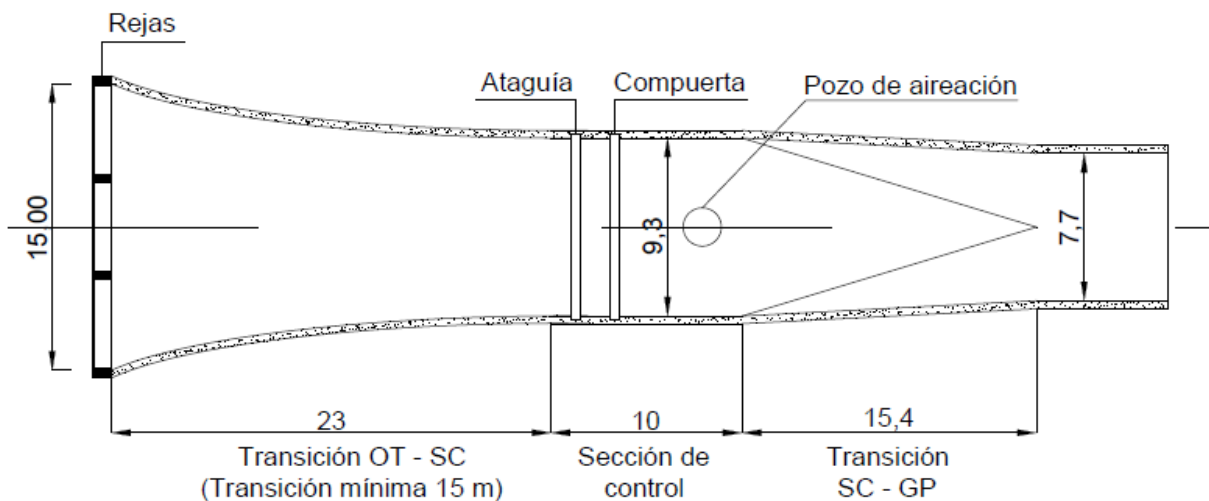
5.6. TRANSICIONES

Una vez definidas las secciones correspondientes a embocadura, sección de control y galería a presión, se deben realizar transiciones adecuadas entre ellas. Las mismas deben ser diseñadas de manera tal que el fluido se adapte al movimiento natural del agua para que no se generen vórtices y para que los filetes de corriente se alineen entre sí.

- **Transición en altimetría:** el fondo es el mismo para toda la obra. En la parte superior se debe realizar un abocinamiento siguiendo la forma de una elipse con radio mayor $a = 0,55.DGP$ y radio menor $b = 0,14.DGP$. Si estas dimensiones no alcanzan a cubrir la transición, se incrementan los dos radios de manera proporcional, para que se mantenga la forma de la elipse.



- **Transición en planta:** entre la reja y la sección de control se hace un abocinamiento a ambos lados, siguiendo la misma elipse con radio mayor $a = 0,55.DGP$ y radio menor $b = 0,14.DGP$ (o proporcional), abarcando un desarrollo en una longitud mínima de 15 m. Entre la sección de control (rectangular) y la galería de presión (circular), la transición es lineal, con un desarrollo en una longitud igual a $2 \cdot Dgp$, siendo Dgp el diámetro de la galería a presión.



6. CHIMENEA DE EQUILIBRIO

La chimenea de equilibrio o pozo de oscilación es una estructura complementaria en algunas centrales hidroeléctricas destinada a absorber las sobrepresiones y subpresiones causadas por el golpe de ariete.

6.1. DIMENSIONAMIENTO

Desde el punto de vista hidráulico el dimensionamiento consiste en determinar la sección transversal y altura de esta.

6.1.1. SECCIÓN TRANSVERSAL

Para calcularla se usa la fórmula de Thoma que nos permite obtener la sección transversal mínima. Se toma un 30% para evitar amplificación de las oscilaciones y asegurarse el amortiguamiento.

$$A_{sth} = 1,3 \times \frac{L \times A_{gp} \times v_{gp}^2}{h_o \times (H - h_o) \times 2 \times g}$$

Donde:

- L : longitud de la galería a presión desde la obra de toma hasta la chimenea de equilibrio [m].
- A_{gp} : sección transversal de la galería a presión [m²].
- v_{gp} : velocidad media de la galería a presión [m/s]
- h_o : pérdidas de carga desde la obra de toma hasta la chimenea de equilibrio [m].
- H : carga estática máxima [m].
- g : aceleración de la gravedad [m/s²].

Las pérdidas de carga son producto de las singularidades y de la fricción:

$$h_o = h_s + h_{gp} = 0,0154 \text{ m} + 3,5457 \text{ m} = 3,5611 \text{ m}$$

$$H = NMN - NRM = 1138,5 \text{ m} - 1205,35 \text{ m} = 133,15 \text{ m}$$

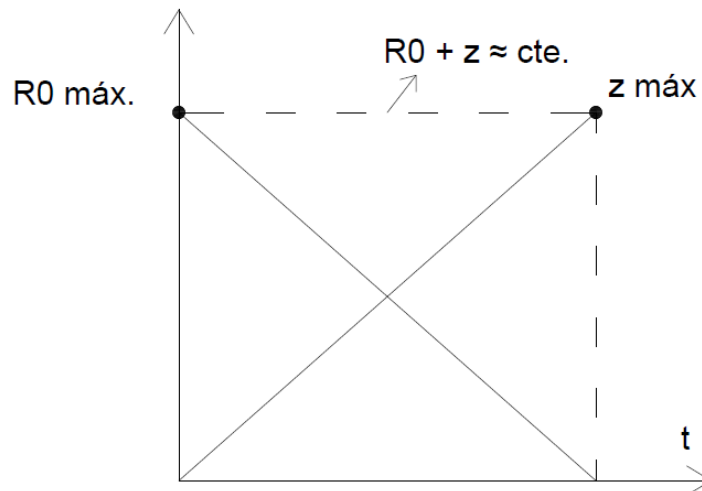
$$A_{gp} = \frac{\pi \times Di^2}{4} = \frac{\pi \times (7,7 \text{ m})^2}{4} = 46,57 \text{ m}^2$$

$$A_{sth} = 1,3 \times \frac{4250 \text{ m} \times 46,57 \text{ m}^2 \times (3,157 \text{ m/s})^2}{3,5611 \text{ m} \times (133,15 \text{ m} - 3,5611 \text{ m}) \times 2 \times 9,81 \text{ m/s}^2} = 283,17 \text{ m}^2$$

$$D_{ch} = \sqrt{\frac{A_{sth} \times 4}{\pi}} = \sqrt{\frac{283,17 \text{ m}^2 \times 4}{\pi}} = 18,99 \text{ m}$$

6.1.2. DIÁMETRO DEL ESTRECHAMIENTO

La sección de estrechamiento necesaria se determina a partir del “criterio balanceado”. El procedimiento es iterativo y consiste en obtener un diámetro de estrechamiento que permita igualar las pérdidas de carga en el estrangulamiento (R_0) con la máxima elevación del agua en la chimenea (z máx).



Para ello, en cada iteración se calcula R_0 de la siguiente manera:

➤ R_0 : las pérdidas de carga en el estrangulamiento se calculan como:

$$R_o = k \times \frac{v_{chim}^2}{2g}$$

$$k = \left[\frac{F}{m f} - 1 \right]^2 + \frac{1}{9}$$

- v_{chim} : velocidad del flujo en la chimenea de equilibrio [m/s]
- F : sección de la chimenea [m²].
- f : sección del estrangulamiento [m²].
- m : coeficiente de contracción, igual a 0.66

Por otro lado, las oscilaciones máximas y mínimas (z máx, z min) se obtienen a partir de ábacos, a los que se ingresa con los valores de r_o y p_o . Los ábacos están disponibles en el anexo.

➤ p_o : se define como pérdidas relativas de carga por fricción:

$$p_o = \frac{h_o}{z^o}$$

Donde:

- h_o : Pérdidas de carga desde la obra de toma hasta la chimenea de equilibrio [m].
- z^o : máxima oscilación en chimenea libre de fricción.

$$z^o = v_{gp} \times \sqrt{\frac{L \times A_{gp}}{g \times A_{ch}}} = 3,157 \text{ m/s} \times \sqrt{\frac{4250 \text{ m} \times 46,6 \text{ m}^2}{9,81 \text{ m/s}^2 \times 283,17 \text{ m}^2}} = 26,65 \text{ m}$$

Por lo tanto:

$$p_o = \frac{h_o}{z^o} = \frac{3,5611 \text{ m}}{26,65 \text{ m}} = 0,134 \text{ m}$$

➤ r_o : se define como pérdidas relativas por estrangulamiento:

$$r_o = \frac{R_o}{z^o}$$

Los resultados obtenidos se presentan a continuación

$$D_{estr}: 3.85 \text{ m}$$

$$A_{estr}: 11,64 \text{ m}^2$$

$$k = \left[\frac{F}{m f} - 1 \right]^2 + \frac{1}{9} = \left[\frac{283,17}{0,66 * 11,64} - 1 \right]^2 + \frac{1}{9} = 1285,7$$

$$v_{chim} = \frac{Qt}{A_{sth}} = \frac{147 \text{ m}^3/\text{s}}{283,17 \text{ m}^2} = 0,52 \text{ m/s}$$

$$R_o = k \times \frac{v_{chim}^2}{2g} = 1285,7 \times \frac{0,52^2}{2 * 9,81 \text{ m/s}^2} = 17,66 \text{ m}$$

$$r_o = \frac{R_o}{z^o} = \frac{17,66 \text{ m}}{26,65 \text{ m}} = 0,66$$

$$p_o = \frac{h_o}{z^o} = \frac{3,5611 \text{ m}}{26,65 \text{ m}} = 0,134 \text{ m}$$

A partir de r_o y p_o se ingresa a los ábacos y se obtiene:

$$\frac{z_{max}}{z_o} = 0,65 \rightarrow z_{max} = 26,65 \text{ m} * 0,65 = 17,32 \text{ m}$$

$$\frac{z_{min}}{z_o} = 0,75 \rightarrow z_{min} = 26,65 \text{ m} * 0,75 = 19,98 \text{ m}$$

Se obtiene entonces

$$z_{max} = 17.32 \text{ m}$$

$$R_o = 17,66 \text{ m}$$

6.1.3. ALTURA TOTAL

La altura depende del nivel mínimo y máximo del embalse y de las oscilaciones que provoca el golpe de ariete durante el cierre o admisión.

La altura de la chimenea de equilibrio (h_{ch}) se determina con la siguiente expresión:

$$h_{ch} = (NMN - Nmm) + z_{max} + z_{min} + r_s + r_i + h_e$$

Donde:

- NMN : nivel máximo normal de embalse [m]
- Nmm : nivel mínimo minimorum de embalse [m].
- z_{max} : altura de oscilación máxima en chimenea debido a golpe de ariete [m].
- z_{min} : altura de oscilación mínima de chimenea debido a golpe de ariete [m].
- r_s : revancha superior, se adopta 1,5 m
- r_i : revancha inferior, se adopta 1,5 m.
- h_e : altura de estrangulamiento, se adopta 1 m.

Por lo que se obtiene

$$h_{ch} = (1338,5 - 1265) + 17,32m + 19.98m + 1.5m + 1.5m + 1m = 115.30m$$

6.2. UBICACIÓN

Idealmente convendría ubicarla al lado del distribuidor o órganos de seguridad ya que los mismos producen variaciones de caudal y esto genera el golpe de ariete. Pero esto ocasiona una chimenea muy alta, por lo tanto, se busca un equilibrio técnico- económico. Para que la cota inferior de la chimenea de equilibrio coincida con la cota superior de la galería a presión se calcula la pendiente de la galería a presión:

$$Cota_{inf_{ch}} = NMN + z_{m\acute{a}x} + r_s - h_{ch} = 1338,5m + 17.32m + 1.5m - 115.30m$$

$$Cota_{inf_{ch}} = 1242.02msnm$$

La pendiente corregida de la galería a presión es, entonces:

$$i_{\text{‰}} = \frac{NOToma - (Cota_{sup_{gp}} - \frac{D_{gp}}{2})}{L}$$
$$= \frac{1247msnm - (1242.02msnm - \frac{7.70m}{2})}{4250 m}$$
$$i_{\text{‰}} = 2.08 \text{ ‰}$$

Por lo tanto, la chimenea tendrá las siguientes dimensiones:

- Diámetro chimenea: $d_{ch} = 19 m$
- Diámetro estrangulamiento: $d_e = 3.85 m$
- Altura chimenea: $h_{ch} = 115.30 m$

7. TUBERÍA FORZADA

7.1. FUNCIÓN

En los saltos de agua, las tuberías de presión tienen por objeto conducir el agua desde la cámara de carga o chimenea de equilibrio hasta las turbinas, para transformar la energía potencial de posición que posee el agua en energía potencial de presión. Deben ser capaces también de soportar las presiones de la conducción del agua y las sobrepresiones que puedan producirse debidas principalmente al golpe de ariete, muy perjudicial para estas instalaciones.

7.2. CRITERIOS DE DISEÑO

El dimensionamiento consiste en determinar la geometría de la sección transversal de la tubería y su diámetro. Al igual que en el caso de la galería a presión, resulta de un análisis técnico-económico. En este caso se dimensiona una conducción de acero sólo sometida a presión interior.

Como valores extremos para acotar el análisis se utilizan:

- Se debe buscar una convergencia de las líneas de corriente a lo largo de toda la conducción para evitar efectos no deseados, tales como despegues de los filetes líquidos, vibraciones, vórtices y pulsaciones de presión. Para lograr la convergencia de las líneas de corriente, la velocidad en la tubería forzada debe ser mayor que la velocidad en la galería a presión ($v_{TF} > v_{GP}$). En nuestro caso:

$$\text{Límite superior de diámetro tal que: } v_{min} > v_{gp} = 3,157 \text{ m/s}$$

- Siguiendo el criterio de la convergencia de líneas de corriente, el diámetro de la tubería forzada (D_{TF}) debería ser mayor al diámetro de la entrada a la cámara espiral (D_{CE}). En este caso se presenta un punto de encuentro entre dos caminos de diseño, ya que las dimensiones de la cámara espiral responden a la selección de la turbina hidráulica elegida por criterios de potencia, caudal, salto y eficiencia, entre otros.

$$\text{Límite inferior de diámetro tal que: } D_{TF} > D_{CE} = 3,157 \text{ m/s}$$

- Por otro lado, teniendo en cuenta consideraciones de erosión, se puede tomar como liberado el límite superior de velocidad en este aspecto. Como material de revestimiento de la tubería forzada se utiliza acero, el cual tiene una alta resistencia a las velocidades de arrastre que normalmente se desarrollan en esta conducción.

7.3. ANÁLISIS ECONÓMICO

7.3.1. DIÁMETRO INTERNO

Diámetro mínimo: debería ser mayor al diámetro de la entrada a la cámara espiral. Como en este caso todavía no se selecciona la máquina, se deja abierto el límite superior.

$$D_{TF} > D_{CE}$$

Diámetro máximo: adoptando la velocidad mínima dada por la Galería a Presión, se calcula el diámetro máximo mediante la ecuación de continuidad:

$$D_{max} = \sqrt{\frac{4 \times Q}{v_{gp} \times \pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 147 \text{ m}^3/\text{s}}{3,157 \text{ m/s} \times \pi}} = 7,70 \text{ m}$$

Diámetros intermedios: se toma un intervalo entre valores de diámetro de 0,10 m para una mayor exactitud del análisis económico.

7.3.2. VELOCIDAD

Para cada valor de diámetro interno, se calcula la velocidad de flujo en la tubería:

$$v = \frac{Q}{\omega} = \frac{Q \times 4}{D_i^2 \times \pi} \quad [\text{m/s}]$$

Donde:

- Q : caudal nominal [m^3/s]
- D_i : diámetro interno [m]

7.3.3. SOBREPRESIÓN

Se calcula con la fórmula de Michaud para cada velocidad de escurrimiento:

$$Sp = \frac{2 \times L' \times v}{t_c \times g} \quad [\text{m}]$$

Donde:

- L' [m] : longitud del recorrido que debe realizar la onda de sobrepresión. Se considera la longitud entre el nivel máximo de la chimenea de equilibrio hasta la entrada a la cámara espiral. En el proyecto esta longitud está compuesta por:

$$L' = H_{CH} + \frac{D_{GP}}{2} + \frac{D_{CH}}{2} + L_{tubería \text{ forzada}}$$

- t_c [s] : tiempo de cierre, se supone un cierre lento, que en general es el que se verifica para aprovechamientos hidráulicos. El cierre lento se verifica si se cumple la siguiente condición:

$$t_c > \frac{2 \times L}{a}$$

- Celeridad de la onda de presión: $a = 1000 \text{ m/s}$

Se estima en un principio y para un predimensionamiento:

$$t_c = 8 \text{ s}$$

7.3.4. PRESIÓN DIMENSIONANTE

Para cada valor de sobrepresión (Sp) se calcula la presión dimensionante (P_d):

$$P_d = N_{D \max} + Sp \text{ [m]}$$

El nivel dinámico máximo ($N_{D \max}$) se calcula con la siguiente forma:

$$N_{D \max} = N_{MNE} - \Delta h - N_{R \max Q}$$

Donde:

- N_{MNE} : nivel máximo estático en el embalse [m]
- Δh : pérdidas de carga entre la obra de toma y la chimenea de equilibrio [m]
- $N_{R \max Q}$: nivel de restitución con dos unidades funcionando - potencia 100% [m]

$$N_{D \max} = 1343 \text{ m} - 1206,15 \text{ m} - 3,56 \text{ m} = 133,29 \text{ m}$$

7.3.5. ESPESOR

Se calcula mediante el equilibrio de fuerzas interior ($P_d \times D_i$) y la resistencia del material ($2 \times e \times \sigma_{adm}$):

$$e = \frac{P_d \times D_i}{2 \times \sigma_{adm}}$$

Donde $\sigma_{adm} [kg/cm^2 = 10 \text{ mca}]$: tensión admisible de fluencia para acero. Para acero ASTM-A537:

$$\sigma_{adm} = \frac{F_y}{FS} = \frac{345 \text{ MPa}}{2} = \frac{3518 \text{ kg/cm}^2}{2} = 17590 \text{ mca}$$

$$\gamma_{acero} = 77008,5 \text{ N/m}^3 = 7853 \text{ kg/m}^3$$

Se debe verificar espesores mínimos para manipulación y montaje, y máximos para que sea válida la fórmula de pared delgada para e .

- **Espesor mínimo de manipulación:** en caso de que los espesores calculados por las condiciones de solicitación de la tubería sean menores a los espesores de manipulación, se deberán adoptar los siguientes valores:

$$e_{min\ 1} = \frac{D_i + 500}{400}$$

$$e_{min\ 2} \geq 6\ mm$$

- **Sobre espesor mínimo por corrosión:** 2 mm a no ser que se pida específicamente un valor más elevado.

7.3.6. DIÁMETRO EXTERNO

Se calcula considerando el diámetro interior y el espesor:

$$D_e = D_i + 2 \times e$$

7.3.7. COSTO DE EXCAVACIÓN

El volumen de suelo a excavar se obtiene:

$$V_{exc} = \frac{(D_e + 2 \times e_{H^\circ})^2 \times \pi}{4} \times 1\ m$$

- Espesor de hormigón de recubrimiento: $e_{H^\circ} = D_e/20$
- Longitud unitaria de tubería forzada: 1 m

Considerando un precio unitario de excavación $P_{exc} = 45 \frac{U\$}{m^3}$ y un factor de sobreexcavación de 12% se procede a calcular el costo de excavación total:

$$C_{exc} = V_{exc} \times P_{exc} \times 1,12\%$$

7.3.8. COSTO DE REVESTIMIENTO DE HORMIGÓN

El volumen de revestimiento se obtiene como:

$$V_{rev} = \frac{[(D_e + 2 \times e_{H^\circ})^2 - (D_e)^2] \times \pi}{4} \times 1\ m$$

Considerando un precio unitario de hormigón $P_{H^\circ} = 150 \frac{U\$}{m^3}$ se procede a calcular el costo de revestimiento total:

$$C_{rev} = V_{rev} \times P_{H^\circ}$$

7.3.9. COSTO DE TUBERÍA DE ACERO

El volumen de acero se obtiene como:

$$V_{AC^\circ} = \frac{[(D_e)^2 - (D_i)^2] \times \pi}{4} \times 1\ m$$

Considerando un precio unitario de acero $P_{AC^\circ} = 78530 \frac{US\$}{m^3}$ se procede a calcular el costo de revestimiento total:

$$C_{AC^\circ} = V_{AC^\circ} \times P_{AC^\circ}$$

7.3.10. COSTO DE CONSTRUCCIÓN

Corresponde al total de costos de excavación, revestimiento de hormigón del conducto y el acero que conforma la tubería:

$$C_t = C_{exc} + C_{rev} + C_{AC^\circ}$$

7.3.11. COSTO ANUAL EQUIVALENTE

El costo por año de poseer y operar un activo durante su vida entera.

$$CAE = \frac{C_t \times r \times (1 + r)^T}{(1 + r)^T - 1}$$

Para este proyecto se consideran los siguientes valores:

- r : tasa de interés anual, $r = 10\%$
- T : tiempo de análisis económico, $T = 50$ años

7.3.12. PÉRDIDAS DE CARGA

Pérdidas de carga generalizadas

Se utilizan las expresiones de Chèzy-Manning:

$$\Delta h_f = \frac{n^2 \times v_i^2 \times 1m}{(R_H)^{4/3}}$$

Siendo:

- n : coeficiente de Manning; para Acero $n = 0,0108$
- R_H : radio hidráulico; para sección circular $R_H = \frac{D_i}{4}$

Pérdidas de carga singulares

En esta etapa de predimensionamiento, se calcula como un porcentaje respecto de las pérdidas generalizadas determinadas mediante la fórmula de Chèzy-Manning.

$$\Delta h_s = 10\% \times \Delta h_f$$

7.3.13. ENERGÍA NO GENERADA POR AÑO

Corresponde a la pérdida de generación originada por las pérdidas de carga en el conducto.

$$E_p = \frac{Q \times \Delta h_t \times \rho \times g \times \eta \times t}{1000} \left[\frac{kWh}{año} \right]$$

Siendo:

- Q : caudal medio [m^3/s]
- Δh_t : pérdidas de cargas totales [m]
- ρ : densidad, para el agua $\rho = 997 \text{ kg}/m^3$
- η : eficiencia del aprovechamiento, para este proyecto $\eta = 0,945$
- t : tiempo medio de funcionamiento anual, $t = 2190 \text{ h}$

7.3.14. COSTO DE ENERGÍA PERDIDA POR AÑO

Considerando un precio unitario de la energía en el mercado, de $P_E = 0,065 \frac{\text{U\$S}}{\text{kWh}}$ se puede calcular el costo de la pérdida de energía generada.

$$C_{ep} = E_p \times P_E$$

7.3.15. COSTO FINAL

Se calcula como la sumatoria del costo de construcción y el costo de la energía perdida, todo referenciado al primer año.

$$C_T = C_{ep} + C_t$$

Se presenta a continuación la planilla de cálculo utilizada para la determinación del diámetro más conveniente junto con las curvas de costos y energía no generada.

7.4. CONDICIÓN DE REGULACIÓN

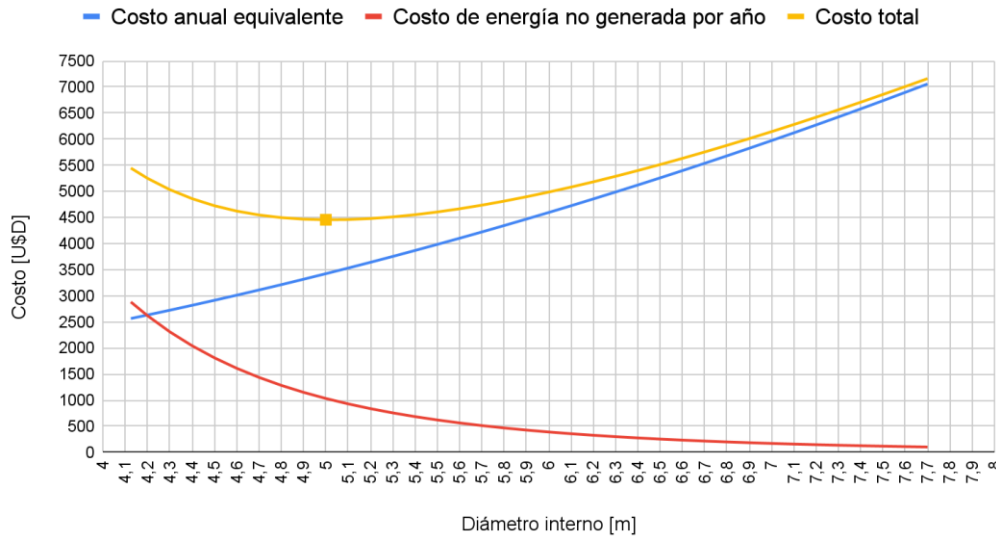
Para un correcto funcionamiento de la central y una buena regulación, se debe verificar que el golpe de ariete o sobrepresión respecto del salto neto debe ser:

$$Sp/H_{nM} < 40\%$$

Por requerimientos de proyecto relacionados con una mejor regulación de las turbinas, se adopta un tiempo de cierre mayor para poder reducir la sobrepresión en la tubería forzada.

Se elaboraron las siguientes planillas de Excel, tomando un intervalo de diámetros cada 0,1 m, entre 4,20 m y 7,70 m. El menor costo da un diámetro de 5,00 m.

Diámetro Económico



Dint	V	e	Dext	Costo anual equivalente	Δh generalizadas	Δh singulares	Costo de energía no generada por año	Costo total
[m]	[m/s]	[mm]	[m]	[USD/año]	[m]	[m]	[USD/año]	[USD/año]
4,12	11,00	23,61	4,17	2.565	0,01355	0,00135	2.882,0	5.446,7
4,20	10,61	23,79	4,25	2.632	0,01230	0,00123	2.617,7	5.250,0
4,30	10,12	24,03	4,35	2.724	0,01085	0,00109	2.308,9	5.033,0
4,40	9,67	24,28	4,45	2.818	0,00960	0,00096	2.042,5	4.860,3
4,50	9,24	24,53	4,55	2.914	0,00852	0,00085	1.811,8	4.725,4
4,60	8,85	24,79	4,65	3.011	0,00757	0,00076	1.611,4	4.622,9
4,70	8,47	25,06	4,75	3.111	0,00675	0,00068	1.436,8	4.548,2
4,80	8,12	25,33	4,85	3.213	0,00604	0,00060	1.284,2	4.497,5
4,90	7,80	25,60	4,95	3.317	0,00541	0,00054	1.150,4	4.467,8
5,00	7,49	25,88	5,05	3.423	0,00486	0,00049	1.032,9	4.456,3
5,10	7,20	26,16	5,15	3.531	0,00437	0,00044	929,4	4.460,8
5,20	6,92	26,45	5,25	3.642	0,00394	0,00039	838,0	4.479,5

7.5. RESUMEN DE TUBERÍA FORZADA

Por lo tanto, la tubería a presión resulta:

- Diámetro interno: $D_i = 5,00 \text{ m}$
- Diámetro externo: $D_e = 5,05 \text{ m}$
- Espesor de acero: $e = 25,88 \text{ mm}$

Verificación de espesor de manipuleo:

$$e = 25,88 \text{ mm} > e_{\min 1} = \frac{D_i + 500}{400} = \frac{5000 + 500}{400} = 13,75 \text{ mm} \quad \rightarrow \quad \text{VERIFICA}$$

$$e = 25,88 \text{ mm} > e_{\min 2} = 6 \text{ mm} \quad \rightarrow \quad \text{VERIFICA}$$

- Velocidad media: $v_{TF} = 7,49 \text{ m/s} > v_{GP} = 3,157 \text{ m/s} \quad \rightarrow \quad \text{VERIFICA}$
- Longitud tubería: $LTF = 182 \text{ m}$
- Costo mínimo: $C_{\min} = 4456,3 \text{ U\$S/año}$

- Sobrepresión: $Sp = 34,72 \text{ m}$

Verificación de condición de regulación:

$$Sp = 34,72 \text{ m} < 40\% \times H_{nM} = 0,4 \times 132,92 \text{ m} = 53,17 \text{ m} \quad \rightarrow \quad \textbf{VERIFICA}$$

8. ACTUALIZACIÓN DE SALTOS NETOS

A continuación, se procederá a recalcular los saltos netos utilizando los valores obtenidos en el dimensionamiento de la galería a presión, la obra de toma y la tubería forzada de 75.45m (ver final de 9.4.)

Las pérdidas totales en la obra de toma son de 0,0154 m. Las pérdidas de carga por conducción se calculan de la siguiente manera:

$$\Delta h, \text{fricción} = \frac{\eta^2 * v^2}{Rh^{\frac{4}{3}}} * L$$

$$\Delta h, \text{conducto} = \Delta h, \text{fricción} + \Delta h, \text{singulares} = 1.10 * \Delta h, \text{fricción}$$

Y las del tubo difusor

$$\Delta h_{TD} = \frac{v_{TD}^2}{2 * g}$$

Las nuevas pérdidas de carga por las conducciones son:

DATOS		
g	9,81	m/s ²
nH	0,0135	
nA	0,0108	
L GP	4250	m
L TF	75,45	m

		v [m/s]	Φ [m]	Δh [m]
Galería a presión	100%	3,16	7,70	3,2234
	25%	0,79		0,2015
Tubería forzada	100%	7,49	5,00	0,3663
	25%	1,87		0,0229
Tubo difusor	100%	2,04		0,2117
	25%	1,02		0,0529

Y los saltos netos obtenidos se presentan a continuación:

Saltos Netos		
Maximo	SNM [m]	132,86
Minimo	SNm [m]	55,03
Nominal	SNN [m]	93,95

9. SELECCIÓN DE TURBINA

El siguiente apartado tiene como objetivo realizar la selección y dimensionado de las turbinas hidráulicas a instalar en el aprovechamiento que se está proyectando.

9.1. GENERALIDADES

El aprovechamiento en estudio presenta las siguientes características fundamentales:

- Salto Neto: en esta etapa de predimensionamiento, se selecciona un Salto Neto Nominal igual al promedio del máximo y el mínimo

$$H_{NN} = \frac{H_{NMN} + H_{Nm}}{2} = \frac{132.86 \text{ m} + 55.03 \text{ m}}{2} = 93.9 \text{ m}$$

- Caudal por turbina:

$$Q_{turb} = \frac{Q}{\# \text{ de turbinas}} = \frac{147 \text{ m}^3/\text{s}}{2} = 73,5 \text{ m}^3/\text{s}$$

- Potencia hidráulica:

$$\begin{aligned} P_h &= \frac{Q \times H_{NN} \times \rho \times g \times \eta}{1000} \\ &= \frac{73,5 \text{ m}^3/\text{s} \times 93.9 \text{ m} \times 997 \text{ kg}/\text{m}^3 \times 9,81 \text{ m}/\text{s}^2 \times 0,945}{1000} \\ &= 63.6 \text{ MW} \end{aligned}$$

Lo primero que se hace es seleccionar el tipo de turbina. Luego se procede a la selección de la velocidad de rotación y, posteriormente, a su dimensionamiento. Como no se dispone información de ensayos de modelo, el proceso de selección que se utiliza para este aprovechamiento se basa en métodos estadísticos que vinculan las características de las turbinas en función del Salto Neto (H_n) y la Potencia generada (P). Dicho método es obra de De Siervo y De Leva, y fue desarrollado mediante una recopilación de información de las máquinas construidas en todo el mundo durante los años 1960-1975. Se obtuvieron como resultado líneas de tendencia a partir de las cuales se determinan las características y dimensiones de las turbinas que se quieren diseñar.

9.2. TIPO DE TURBINA

Los datos que, en principio, sirven para determinar el tipo de turbina que se utilizará son: el caudal y el salto neto del aprovechamiento. Así, a grandes rasgos, se puede decir que, para saltos elevados y caudales pequeños, se utilizan turbinas tipo Pelton; para saltos y caudales medios, se utilizan turbinas tipo Francis; y para saltos pequeños y caudales elevados, las turbinas tipo Kaplan son las más competitivas.

Se adoptan dos turbinas de tipo Francis, las cuales son las más competitivas para dichas características.

$$Q_{turb} = 73,5 \text{ m}^3/\text{s} ; H_{NN} = 93.9 \text{ m} ; P_h = 63.6 \text{ MW}$$

9.3. VELOCIDAD SINCRÓNICA Y NÚMERO ESPECÍFICO DE REVOLUCIONES

La **velocidad sincrónica (n)** es la velocidad de rotación del equipo turbogenerador, la cual deberá ajustarse para que sea sincrónica con la frecuencia de oscilación de la energía eléctrica $f = 50 \text{ Hz}$.

El **número específico de revoluciones (ns)** es el número de revoluciones que daría una turbina semejante a la que se trata de buscar y que entrega una potencia de 1 kW en un salto de 1 m. Esta velocidad específica, rige el estudio comparativo de la velocidad de las turbinas, y es la base para su clasificación. Así, dos turbinas de diferentes dimensiones serán hidráulicamente semejantes si su ns es igual.

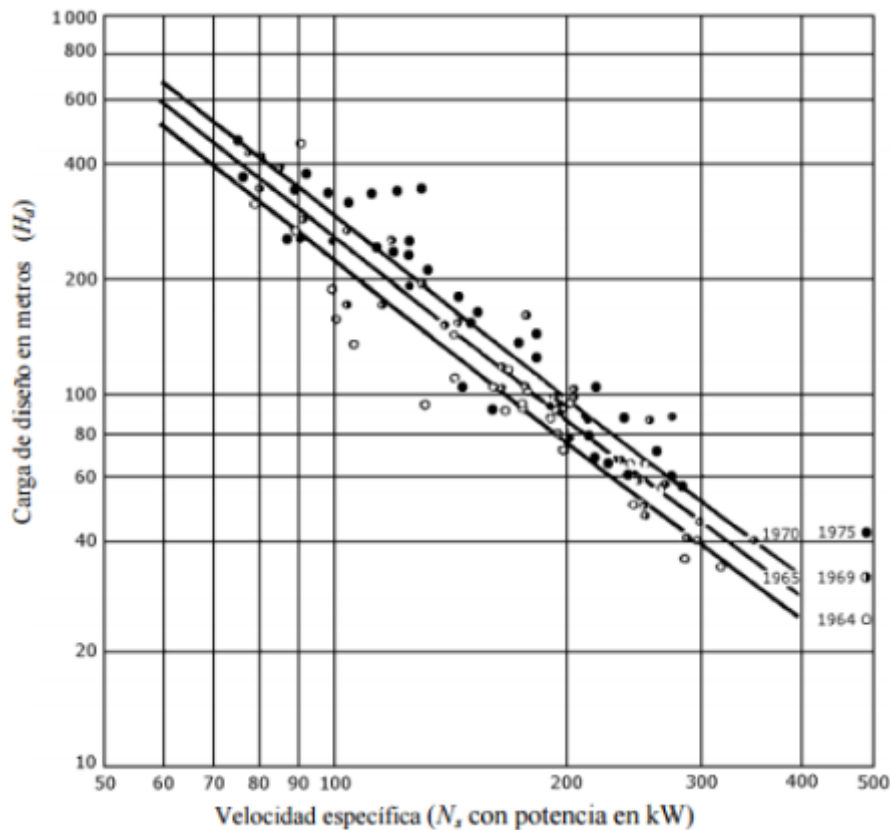
$$n_s = \frac{n \times \sqrt{P_h}}{H_n^{5/4}}$$

Donde:

- P_h : potencia hidráulica [kW]
- n_s : velocidad específica [rpm]
- n : velocidad sincrónica [rpm]
- H_n : salto neto [m]

En el método estadístico de selección, la información disponible sobre la velocidad específica en función del salto neto ha sido dividida en tres grupos, dependiendo del año de diseño de las mismas. Esto da tres curvas de regresión que se describen como:

1960 - 1964	$n_s = 2959 \cdot H_n^{-0,625}$
1965 - 1969	$n_s = 3250 \cdot H_n^{-0,625}$
1970 - 1975	$n_s = 3470 \cdot H_n^{-0,625}$



Se observa una tendencia con el correr de los años a incrementar el valor de n_s para un salto dado. Este incremento lleva a una reducción en las dimensiones de las unidades, y consecuentemente, a una reducción en los costos del equipamiento. Pero, este aumento de velocidades favorece la cavitación por lo tanto debe aumentarse la altura de sumergencia para dar mayor seguridad, lo que encarece la obra civil.

A los fines del cálculo, se utilizará la ley de correlación más actual disponible, es decir la que correspondiente a las turbinas diseñadas en el período 1970 - 1975. Entonces:

$$n_s = 3470 \times H_n^{-0,625} = 3470 \times (93.9 \text{ m})^{-0,625} = 204 \text{ rpm}$$

Con este valor se puede calcular la *velocidad sincrónica* (n) a través de la ecuación de velocidad específica (n_s):

$$n_s = \frac{n \times \sqrt{P_h}}{H_n^{5/4}} \Rightarrow n = \frac{n_s \times H_n^{5/4}}{\sqrt{P_h}} = \frac{204 \text{ rpm} \times (93.9 \text{ m})^{5/4}}{\sqrt{63573 \text{ kW}}} = 234.4 \text{ rpm}$$

Este valor de velocidad sincrónica, para poder asegurar una frecuencia de $f = 50 \text{ Hz}$ en la red eléctrica requiere una cantidad de pares de polos dada por:

$$npp = \frac{60 \times f}{n} = \frac{60 \times 50 \text{ Hz}}{234.4 \text{ rpm}} = 12,80 \Rightarrow \text{se adopta } 13$$

Una vez calculado el número de pares de polos, es necesario redefinir los valores hallados de velocidad sincrónica y el número específico de revoluciones:

$$13 = \frac{60 \times f}{n} \Rightarrow n = \frac{60 \times 50 \text{ Hz}}{13} = 230,8 \text{ rpm} \Rightarrow n_s = \frac{230,8 \text{ rpm} \times \sqrt{63573 \text{ kW}}}{(93.9 \text{ m})^{5/4}} \\ = 200.7 \text{ rpm}$$

9.4. ALTURA DE SUMERGENCIA

Cuando la presión absoluta del agua en un punto dentro de una conducción llega a disminuir a tal grado que alcanza un valor igual o menor a la presión de saturación que se tiene a la temperatura normal del agua, se puede presentar un cambio de estado líquido a gaseoso, cuyas burbujas al ser conducidas a secciones donde la presión es mayor, tienden a regresar a su estado líquido. Este cambio ocurre en forma violenta debido a que las burbujas se ven sometidas a grandes presiones que las obligan a implosionar, es decir el equivalente a explotar de forma inversa o hacia adentro.

Si éste fenómeno se produce junto o cerca de superficies rígidas, se ha comprobado que su impacto provoca cavidades similares a las que produciría el golpeteo constante con un martillo de punta aguda en las tuberías de metales o conducciones de hormigón, lo que en algunos casos llega a perforar dichas superficies incluyendo los álabes del rodete.

Para instalaciones de turbinas hidráulicas, el efecto de cavitación se da ya que en los álabes y al inicio del tubo difusor la variación de la presión se debe a la alteración de la magnitud o dirección de la velocidad del agua por acción de superficies de guía sobre la cual pasa el fluido. Como la presión absoluta puede tener un valor bajo en algún punto de las superficies de la máquina o de los conductos, y en esa sección no solo será máxima la velocidad local sino que el flujo tenderá a separarse de las paredes de las superficies que lo conducen, y es ahí donde se forman las burbujas de vapor, que son arrastradas por la corriente a secciones donde la presión absoluta es mayor, lo que provoca la condensación violenta de las burbujas, produciéndose impactos en el contorno, que son periódicos y producen un fenómeno vibratorio que aumenta la erosión del material por fatiga en forma de cavidades, que como ya se mencionó se conoce como cavitación.

Este fenómeno se puede controlar con un diseño hidrodinámico adecuado de la turbina, siempre y cuando ésta tenga una instalación apropiada, lo que se obtiene con una apropiada diferencia de niveles entre el eje del distribuidor y la descarga, evitando así presiones negativas y presiones absolutas tan bajas como las del vapor saturado, que dan lugar a la presencia de este fenómeno.

Para mantener el fenómeno de cavitación dentro de límites aceptables en la descarga de la turbina, la presión absoluta no debe ser menor a un valor determinado experimentalmente. Esto se expresa con la siguiente expresión para el **coeficiente de cavitación σ** :

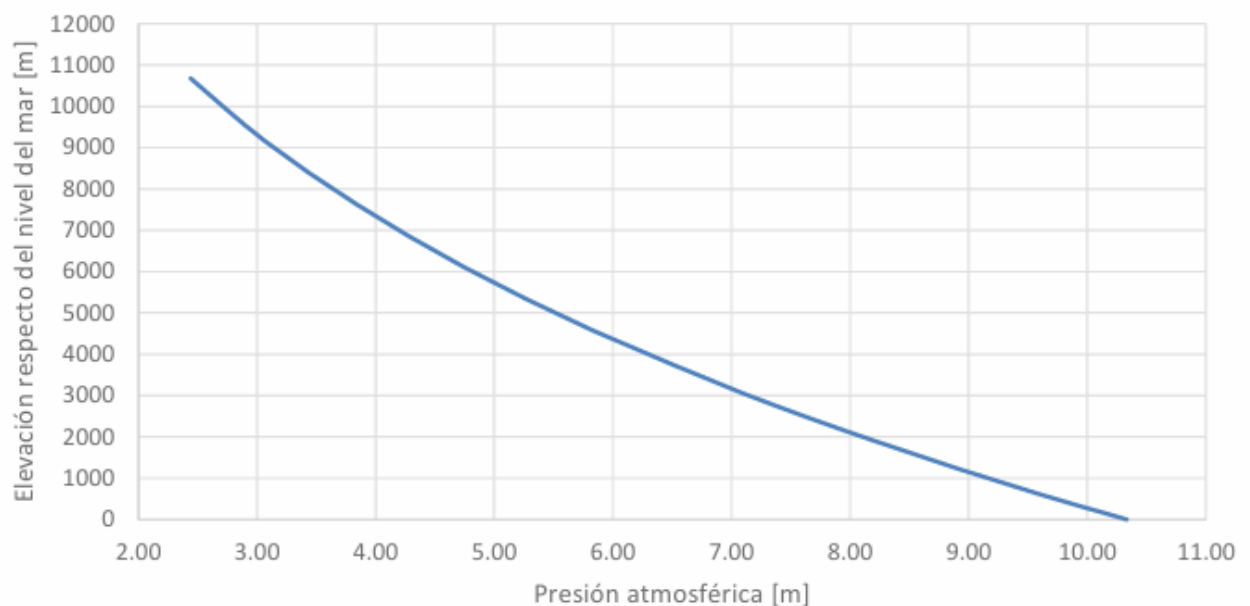
$$\sigma = \frac{(H_a - H_v - H_s)}{H_n}$$

Donde:

- H_a : presión atmosférica [m]
- H_v : presión de vapor de agua [m]
- H_n : salto neto [m]

Este coeficiente depende de la altura sobre el nivel del mar, de la temperatura del líquido y de la altura del eje del rodete con respecto al nivel de descarga.

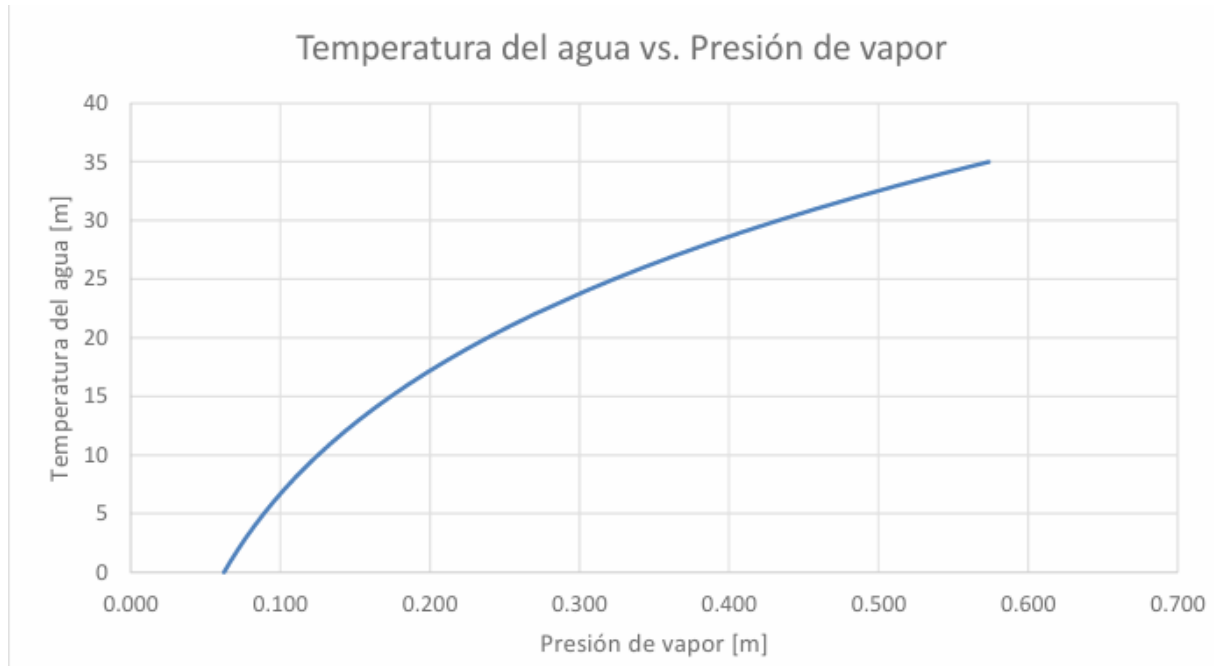
Altitud vs. Presión atmosférica



En función de la altura sobre el nivel del mar del emplazamiento de la central, adoptando para esta etapa como altitud el nivel de restitución promedio, se tiene:

$$Altitud = Nrp = \frac{NRm + NRM}{2} = \frac{1205,35 \text{ m} + 1206,15 \text{ m}}{2} = 1205,8 \text{ m}$$

Mediante interpolación se obtiene: $H_a = 0,86 \text{ atm} \times \frac{10,33 \text{ mca}}{1 \text{ atm}} = 8,93 \text{ mca}$



En función de la temperatura del agua, se considera para este caso $T = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$, se determina:

$$H_v = 0,17\text{ mca} = 12,8\text{ mmHg}$$

La información disponible de los diferentes aprovechamientos construidos ha permitido obtener una curva de regresión para el coeficiente de cavitación, dada por:

$$\sigma = 7,54 \times 10^{-5} \times n_s^{1,41} = 7,54 \times 10^{-5} \times (200,7\text{ rpm})^{1,41} = 0,13$$

Y recordando el valor del salto nominal: $H_n = 93,9\text{ msnm}$

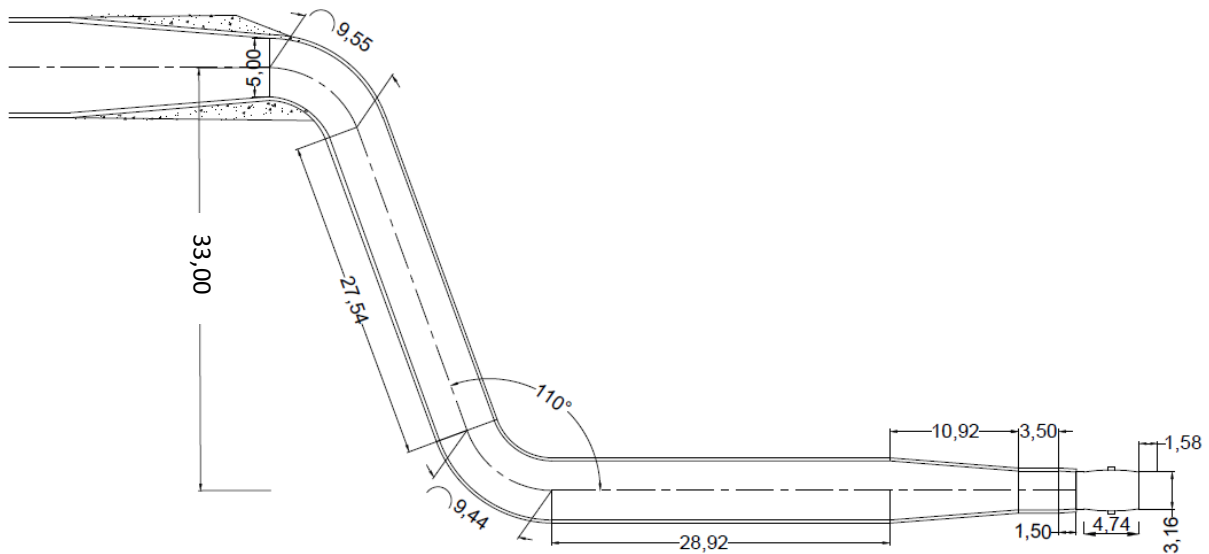
Entonces, considerando los valores antes calculados, procedemos al cálculo de la altura de sumergencia:

$$H_s = H_a - H_v - \sigma \times H_n = 8,93\text{ m} - 0,17\text{ m} - 0,13 \times 93,9\text{ m} = -3,65\text{ m}$$

Y el nivel de eje de turbina:

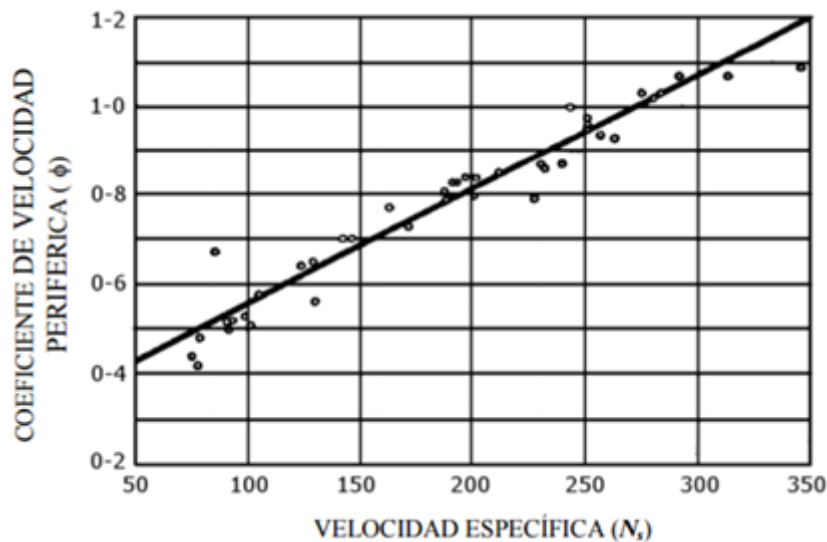
$$NET = NRN + H_s = 1205,7\text{ m} + (-3,65)\text{ m} = 1202,05\text{ msnm}$$

A partir del nivel del eje de la turbina, el nivel del eje de la obra de toma y la geometría de la galería a presión se obtiene que el desnivel a cubrir con la tubería forzada es de 33 m. No tiene sentido extender la tubería forzada si esto no permite ganar salto. Por lo tanto, la tubería forzada recalculada debería tener las dimensiones mostradas a continuación.



9.5. DIMENSIONAMIENTO DEL RODETE

Las leyes de semejanza aplicadas a turbinas hidráulicas muestran que, con el mismo número específico de revoluciones, el coeficiente de velocidad periférica k_u se mantiene constante. La razón de variación de velocidad periférica k_u con respecto a la velocidad específica n_s se muestra en el siguiente gráfico:



La función de interpolación es:

$$k_u = 0,31 \times 2,5 \times 10^{-3} \times n_s = 0,31 \times 2,5 \times 10^{-3} \times 200.7 \text{ rpm} = 0,81$$

Las dimensiones del rodete y sus respectivas expresiones de interpolación son las siguientes:

- Diámetro de descarga D_3 :

$$D_3 = \frac{84,5 \times k_u \times \sqrt{H_n}}{n} = 2,87 \text{ m}$$

- Diámetro de entrada D_1 :

$$\frac{D_1}{D_3} = 0,4 + \frac{94,5}{n_s} \Rightarrow D_1 = 2,50 \text{ m}$$

- Diámetro de salida D_2 :

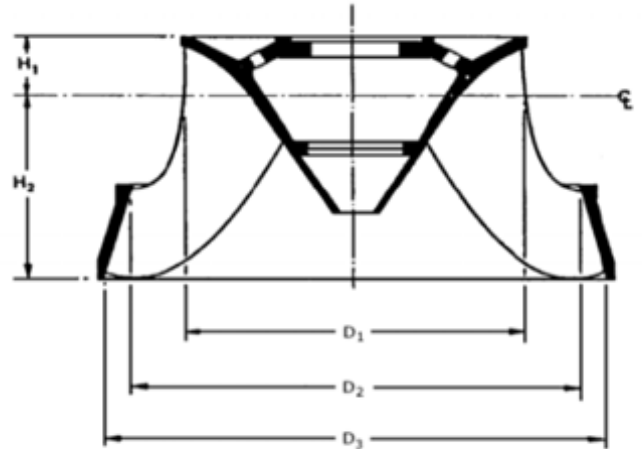
$$\frac{D_2}{D_3} = \frac{1}{0,96 \times 0,00038 \times n_s} \Rightarrow D_2 = 2,77 \text{ m}$$

- Altura H_1 desde el centro del rodete al borde superior del mismo:

$$\frac{H_1}{D_3} = 0,094 + 0,00025 \times n_s \Rightarrow H_1 = 0,41 \text{ m}$$

- Altura H_2 desde el centro del rodete al borde inferior del mismo, para $110 < n_s < 350$:

$$\frac{H_2}{D_3} = \frac{1}{3,16 - 0,0013 \times n_s} \Rightarrow H_2 = 0,99 \text{ m}$$



9.6. DIMENSIONAMIENTO DE LA CÁMARA ESPIRAL

Las principales dimensiones de la Cámara Espiral se ilustran en las siguientes imágenes y se obtienen mediante las siguientes funciones de interpolación:

$$\frac{A}{D_3} = 1,2 - \frac{19,56}{n_s} \Rightarrow A = 3,17 \text{ m}$$

$$\frac{B}{D_3} = 1,1 + \frac{54,80}{n_s} \Rightarrow B = 3,94 \text{ m}$$

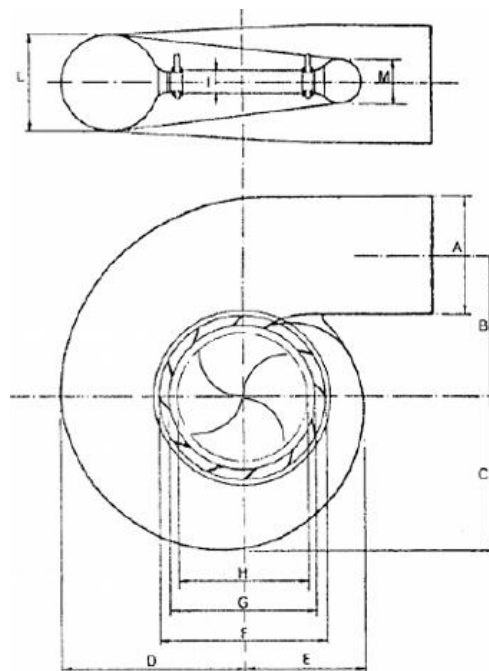
$$\frac{C}{D_3} = 1,32 + \frac{49,52}{n_s} \Rightarrow C = 4,49 \text{ m}$$

$$\frac{D}{D_3} = 1,5 + \frac{48,8}{n_s} \Rightarrow D = 5,00 \text{ m}$$

$$\frac{E}{D_3} = 0,98 + \frac{63,60}{n_s} \Rightarrow E = 3,72 \text{ m}$$

$$\frac{F}{D_3} = 1 + \frac{131,4}{n_s} \Rightarrow F = 4,75 \text{ m}$$

$$\frac{G}{D_3} = 0,89 + \frac{96,5}{n_s} \Rightarrow G = 3,94 \text{ m}$$



$$\frac{H}{D_3} = 0,79 + \frac{81,75}{n_s} \Rightarrow H = 3,44 \text{ m}$$

$$\frac{I}{D_3} = 0,1 + 0,00065 \times n_s \Rightarrow I = 0,66 \text{ m}$$

$$\frac{L}{D_3} = 0,88 + 0,00049 \times n_s \Rightarrow L = 2,81 \text{ m}$$

$$\frac{M}{D_3} = 0,6 + 0,000015 \times n_s \Rightarrow M = 1,73 \text{ m}$$

9.7. DIMENSIONAMIENTO DEL TUBO DE ASPIRACIÓN

El tamaño del tubo de aspiración está directamente determinado por el tamaño del rodete, ambos tienen en común el diámetro D_3 y la velocidad absoluta en la sección de entrada, la cual corresponde con la velocidad de descarga del rodete.

Las principales dimensiones se calculan con las siguientes leyes de regresión:

$$\frac{N}{D_3} = 1,54 + \frac{203,5}{n_s} \Rightarrow N = 7,33 \text{ m}$$

$$\frac{O}{D_3} = 0,83 + \frac{140,7}{n_s} \Rightarrow O = 4,40 \text{ m}$$

$$\frac{P}{D_3} = 1,37 - 0,00056 \times n_s \Rightarrow P = 3,61 \text{ m}$$

$$\frac{Q}{D_3} = 0,58 + \frac{22,6}{n_s} \Rightarrow Q = 2,00 \text{ m}$$

$$\frac{R}{D_3} = 1,6 - \frac{0,0013}{n_s} \Rightarrow R = 4,59 \text{ m}$$

$$\frac{S}{D_3} = \frac{n_s}{-9,28 + 0,25 \times n_s} \Rightarrow S = 14,09 \text{ m}$$

$$\frac{T}{D_3} = 1,5 + 0,00019 \times n_s \Rightarrow T = 4,42 \text{ m}$$

$$\frac{U}{D_3} = 0,51 - 0,0007 \times n_s \Rightarrow U = 1,06 \text{ m}$$

$$\frac{V}{D_3} = 1,1 + \frac{53,7}{n_s} \Rightarrow V = 3,93 \text{ m}$$

$$\frac{Z}{D_3} = 2,63 + \frac{33,8}{n_s} \Rightarrow Z = 8,03 \text{ m}$$

9.8. VERIFICACIÓN DE LA VELOCIDAD A LA SALIDA DEL TUBO DE ASPIRACIÓN

Ya con las dimensiones del tubo difusor se procede a calcular la velocidad a la salida de este para verificar la suposición realizada en el cálculo del salto neto.

$$\Omega_{bif} = 2 \times V \times R = 2 \times 3,95 \text{ m} \times 4,6 \text{ m} = 36,07 \text{ m}^2$$

$$v_{STD} = \frac{Q_{1 \text{ turbina}}}{\Omega_{bif}} = \frac{73,5 \text{ m}^3/\text{s}}{36,07 \text{ m}^2} = 2,03 \text{ m/s} \simeq 2 \text{ m/s}$$

En el cálculo del salto neto se supuso una velocidad de 2 m/s, por lo cual, a los efectos prácticos y debido a la buena aproximación, se considera que no debe realizarse un redimensionamiento.

10. CASA DE MÁQUINAS

10.1. BIFURCACIÓN

El primer elemento fundamental que se debe dimensionar es la bifurcación que realizará la conducción del agua desde la tubería forzada hasta cada una de las dos turbinas.

El criterio fundamental para su dimensionamiento es que la velocidad del fluido en la tubería de la bifurcación sea mayor que la velocidad del agua en la tubería forzada, para lograr la convergencia de los filetes de corriente. Por lo tanto, se adopta el criterio:

$$v_{bifurcación} \geq 1,1 \times v_{tubería\ forzada}$$

$$v_{bifurcación} = 1,1 \times 7,49\ m/s = 8,24\ m/s \rightarrow v_{bif} = 8,5\ m/s$$

Considerando que el caudal máximo que irá por cada turbina es de 73,5 m³/s, se calcula la sección transversal necesaria en la tubería de la bifurcación:

$$\Omega_{bif} = \frac{Q_{1\ turbina}}{v_{bif}} = \frac{73,5\ m^3/s}{8,5\ m/s} = 8,65\ m^2 \rightarrow D_{bif} = 3,32\ m$$

Se adopta un ángulo entre el eje de cada bifurcación y el eje de la tubería forzada de 30°.

Se recomienda que antes del cono de entrada por lo menos haya una longitud de tubería de (1 x D_{bif}) en forma planimétricamente recta, se adoptó una longitud recta de 3.5m.

10.2. CONO DE ENTRADA

Se realiza con la finalidad de materializar la transición desde la sección de la bifurcación a la sección de entrada a la cámara espiral de la turbina.

- La sección mayor se corresponde con la sección de la bifurcación, por lo tanto:

$$D_{mayor} = D_{bif} = 3,32\ m$$

- La sección menor se corresponde con la sección de entrada a la cámara espiral, por lo tanto:

$$D_{menor} = A = 3,16\ m$$

- La longitud del cono debe ser la que asegure una transición de 3°:

$$L_{cono} = \frac{(D_{mayor} - D_{menor})}{2 \times \tan(3^\circ)} = \frac{(3,32\ m - 3,16\ m)}{2 \times \tan(3^\circ)} = 1,49\ m$$

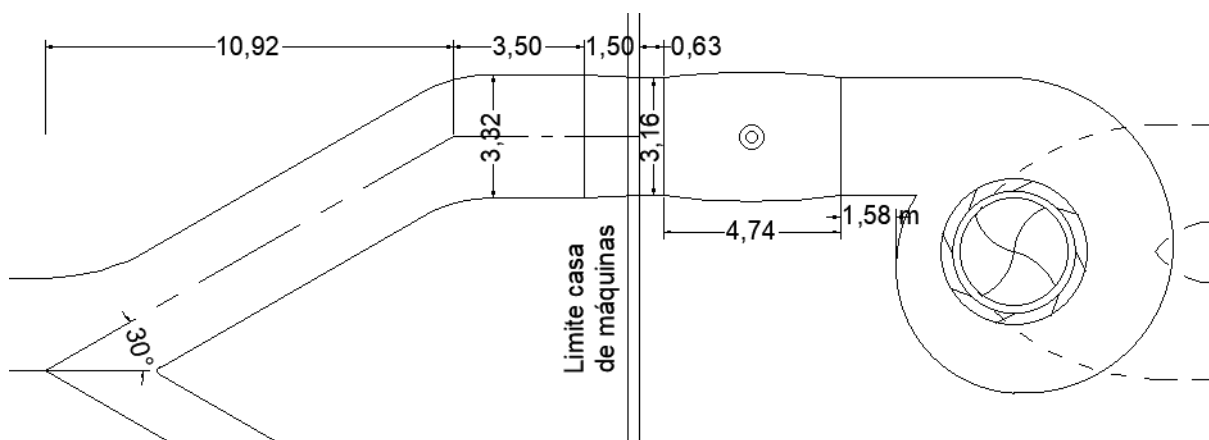
El cono de entrada es el último elemento que físicamente queda en el exterior de la casa de máquinas.

10.3. VÁLVULA ESFÉRICA

Es un elemento de seguridad que se dispone justo antes de la entrada a la cámara espiral. Es el primer elemento que debe quedar dentro de las instalaciones de la casa de máquinas.

Se tendrán en cuenta tres longitudes recomendadas:

- Entre la salida del cono y la entrada a la válvula esférica, se recomienda que haya una longitud de **($0,2 \times A = 0,63 \text{ m}$)** para que se alineen los filetes de corriente luego de la singularidad.
- La válvula esférica suele tener una longitud de **($1,50 \times A = 4,74 \text{ m}$)**.
- Entre la salida de la válvula y la entrada a la cámara espiral, se recomienda que haya una longitud de **($0,5 \times A = 0,5 \text{ m}$)**.



A partir de aquí ya se prosigue con las dimensiones obtenidas de la cámara espiral.

10.4. RECATAS A LA SALIDA DEL TUBO DIFUSOR

Dentro de las dimensiones calculadas para el tubo difusor, la de más importancia para la definición de la planimetría de la casa de máquinas es la longitud horizontal entre el eje de la turbina y la salida del tubo difusor **$S = 14,09 \text{ m}$** .

Luego de esta longitud prevista, debe dejarse una longitud adicional para la colocación de recatas para compuertas. Se prevé **$L_{ad} = 1 \text{ m}$** para tal fin.

Estas compuertas significarán el límite físico de la casa de máquinas, siendo este órgano el último comprendido dentro de ella.

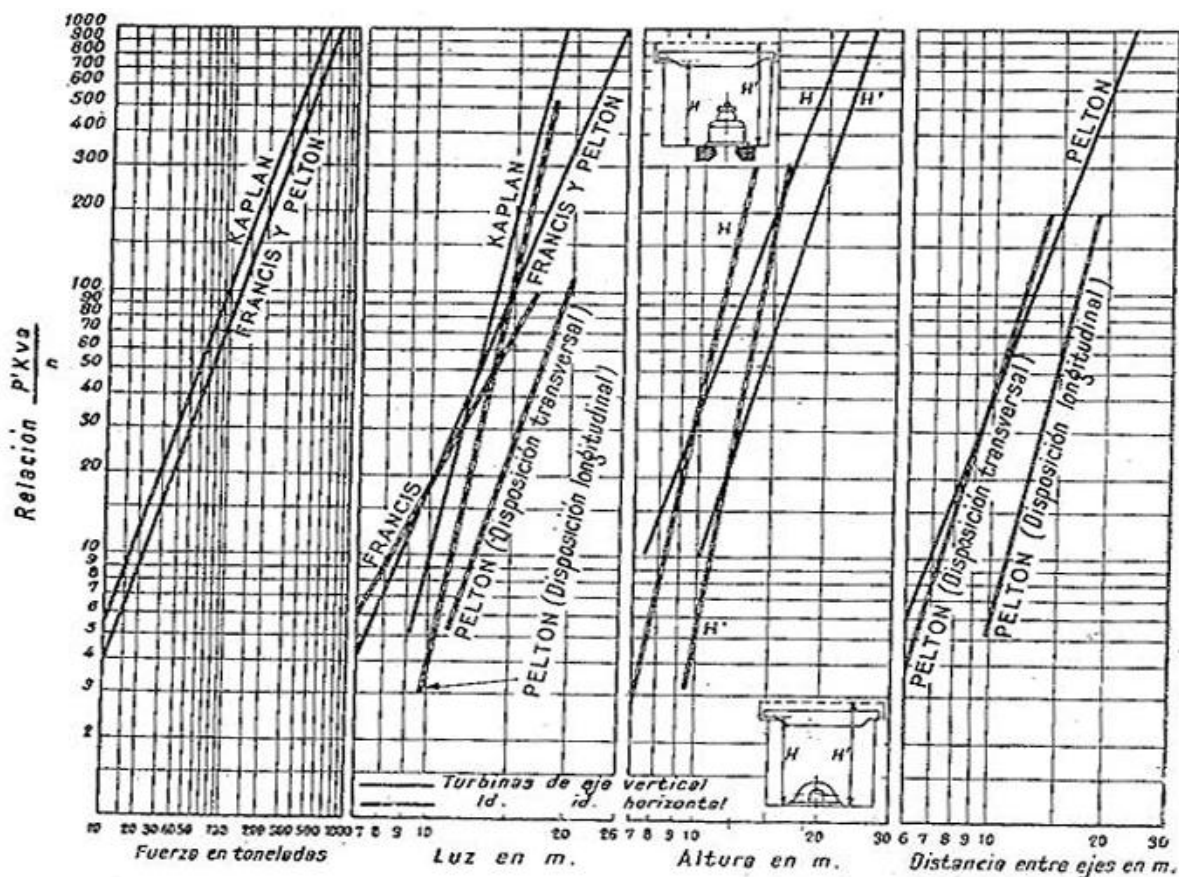
10.5. DIMENSIONAMIENTO DE LA CASA DE MÁQUINAS

10.5.1. ALTURA

Se recurre a los ábacos que presenta el autor Gómez Navarro en su libro, para realizar un predimensionamiento de las dimensiones de la casa de máquinas. En estos ábacos se ingresa con un factor adimensional que se define como:

$$\frac{P' [kVA]}{n} \text{ donde se define la potencia aparente } P' = \frac{P}{\cos(\phi)}$$

- El $\cos(\phi)$ es la relación entre la potencia activa y la potencia reactiva, y un valor habitual en el medio es $\cos(\phi) = 0,90$.



Entonces la relación adimensional del presente proyecto será:

$$P' = \frac{P}{\cos(\phi)} = \frac{63572,57 \text{ kW}}{0,90} = 70636,19 \text{ kVA}$$

La altura de la casa de máquinas va a estar condicionada principalmente por el puente grúa. Para ingresar al ábaco se calcula:

$$\frac{P'}{n} = \frac{70636 \text{ kVA}}{230,8 \text{ rpm}} = 306.09$$

- Carga del puente grúa:

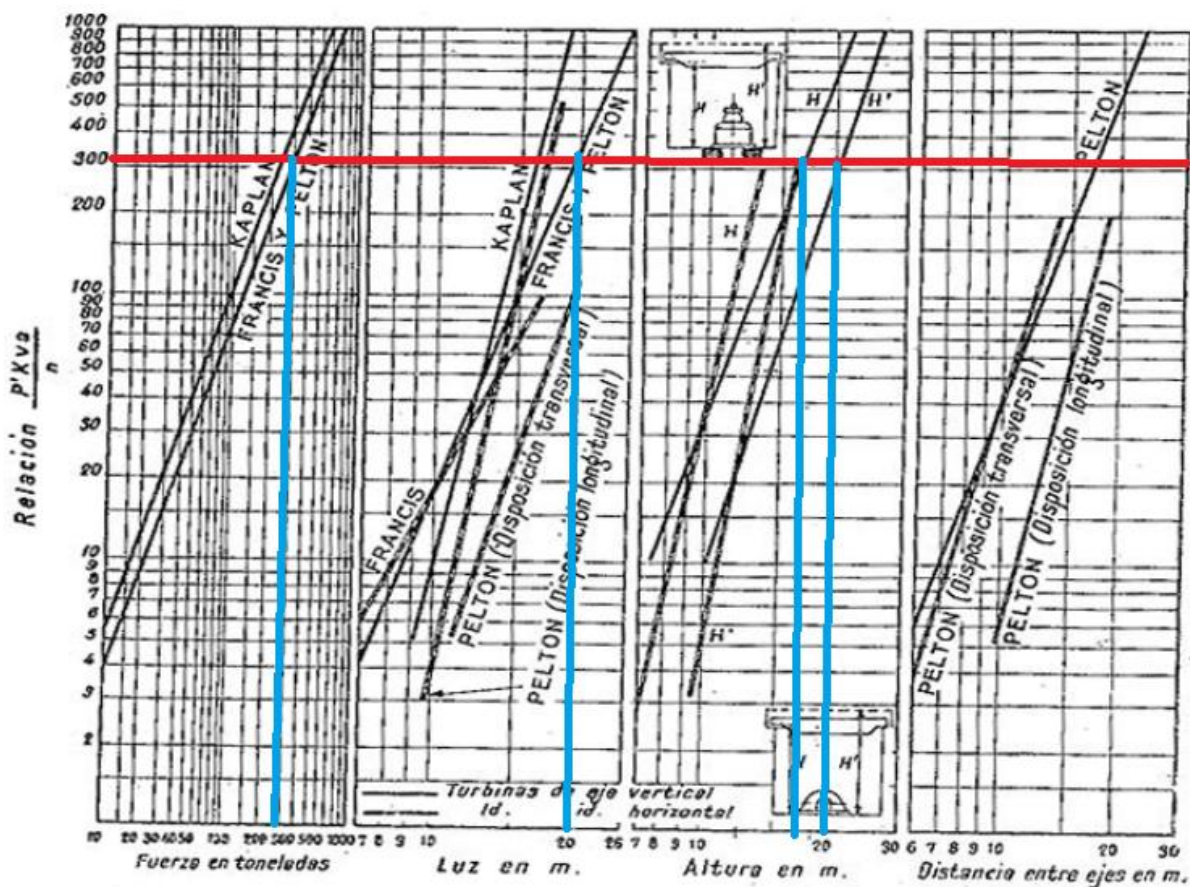
$$F_{PG} = 250 \text{ t}$$

- Luz de la casa de máquinas:

$$L = 20 \text{ m}$$

- Altura de la casa de máquinas:

$$H = 17 \text{ m} \text{ y } H' = 20 \text{ m}$$



10.5.2. DIMENSIÓN PARALELA AL APROVECHAMIENTO

Para definir las dimensiones de planta, se recurre a las dimensiones obtenidas de la cámara espiral, válvula esférica y el tubo difusor. En el costado derecho se deja un espacio de 2m entre la cámara espiral y el muro de la casa de máquinas. Entonces se obtiene la menor dimensión de la casa de máquinas, entre muros:

$$b_{int} = 2 \text{ m} + D + E + (0,5 + 1,5 + 0,2) \times A$$

$$b_{int} = 2 \text{ m} + 5,02 \text{ m} + 3,75 \text{ m} + (0,5 + 1,5 + 0,2) \times 3,16 \text{ m} = 17,73 \text{ m}$$

Luego se deja un balcón destinado al pórtico grúa de las ataguías del tubo difusor.

$$L_{\text{ balcón}} = S + Lad - 2 m - D$$

$$L_{\text{ balcón}} = 14.09 m + 1 m - 2 m - 5.00 m = 8.09 m$$

La dimensión total de la casa de máquinas en el sentido paralelo al aprovechamiento es, entonces:

$$b = b_{\text{int}} + l_{\text{ balcon}} = 17.69 m + 8.09 m = 25.8 m$$

10.5.3. DIMENSIÓN PERPENDICULAR AL APROVECHAMIENTO

Se debe tomar en cuenta las dimensiones de la cámara espiral, los pasillos que deben dejarse entre los grupos, y el espacio para montaje y reparación.

- **Ancho de la cámara espiral:** se obtiene a través de las dimensiones calculadas anteriormente.

$$b_{CE} = \frac{A}{2} + B + C = \frac{3,16 m}{2} + 3,96 m + 4,51 m = 10,06 m$$

- **Separación entre ejes de grupos:** se dejará un pasillo entre grupos turbogeneradores de 2,50 m.

$$S_{GTG} = b_{CE} + 4,5 m = 10,06 m + 4,5 m = 14,56 m$$

- **Espacio para montaje y reparación:** se debe proveer un espacio suficiente para que el puente grúa pueda dejar una máquina para reparar o tomarla para el montaje. En general se recomienda que el ancho sea de un 75 % de la separación entre grupos.

$$b' = S_{GTG} \times 0,75 = 14,56 m \times 0,75 = 10,42 m$$

- **Dimensión total:** se calcula en base a las dimensiones antes calculadas, teniendo en cuenta que se tendrán 2 grupos turbogeneradores.

$$B = 2,5 m + 4,5 m + 2 \times b_{CE} + b' = 2,5 m + 4,5 m + 2 \times 10,06 m + 10,42 m = 36 m$$

11. CONCLUSIÓN

En este informe se realizó el predimensionamiento de un aprovechamiento hidroeléctrico típico de una zona montañosa. La geometría general del sistema se determinó a partir de los datos topográficos y operativos iniciales, suponiendo ciertos valores, como las velocidades en las conducciones, sin los cuales no sería posible avanzar. Con los niveles de embalse y restitución y una estimación preliminar de pérdidas se determinaron los saltos brutos y netos máximos y mínimos, que sirvieron como base para el resto del diseño.

Luego se dimensionó la obra de toma según los criterios de velocidad de aproximación y velocidad máxima entre rejillas. La galería de presión se definió mediante el método del diámetro económico, que consiste en seleccionar el diámetro que minimiza el costo total del sistema (sumando los costos de construcción y los costos asociados a la energía perdida por fricción), verificando además que las velocidades se mantuvieran dentro de los límites recomendados y respetando el criterio general de que la velocidad del agua no debe disminuir a medida que uno se aleja de la toma, a fin de evitar vórtices que generen vibraciones y pérdidas de carga. La sección de control se aproximó adoptando una velocidad intermedia entre las dos anteriores.

La chimenea de equilibrio se dimensionó siguiendo la Sección mínima de Thoma incrementada en un 30% y aplicando el método balanceado. Finalmente, la tubería forzada se definió también mediante el criterio del diámetro económico, verificando adicionalmente su capacidad frente al golpe de ariete y las sobrepresiones resultantes.

El dimensionamiento de la turbina se realizó mediante el método estadístico de De Siervo y De Leva publicado en "Modern Trends in Selecting and Designing Francis Turbines". Al evaluar el nivel de sumergencia se detectó que la tubería forzada preliminar, de 182 m de longitud, resultaba excesivamente larga para el desnivel disponible entre la galería de presión y el eje de la turbina (33 m). Como extender la conducción sin obtener un mayor salto no tenía sentido, se decidió acortarla, recalcular los saltos netos y continuar el dimensionamiento con la nueva configuración. Finalmente, la sala de máquinas se dimensionó siguiendo las recomendaciones vistas en clase.

El trabajo fue muy productivo porque nos permitió ver en detalle todos los componentes de un aprovechamiento hidráulico y conocer su forma de dimensionamiento, algo fundamental para terminar de comprender el tema. Además, se complementa muy bien con el contenido teórico visto durante el semestre y permite integrar finalmente los conceptos de manera completa y ordenada.

