



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
Universidad Politécnica de Valencia*



ANEJO 9: CÁLCULOS

Proyecto de Obra Civil para Aprovechamiento Hidroeléctrico en el río Cabriel en el T.M. CASAS IBAÑEZ (ALBACETE)

Grado en Ingeniería de Obras Públicas

Curso académico 2013-2014

Fecha presentación Julio 2014

Alumno:

Parte desarrollada:

Alejandro Romaguera Meseguer

Desarrollo de la central hidroeléctrica



ÍNDICE

8. ANEJO DE CÁLCULOS.

8.1. CANAL DE TRANSICIÓN

8.2. CÁLCULOS DE LA CENTRAL.



8. ANEJO DE CÁLCULOS.

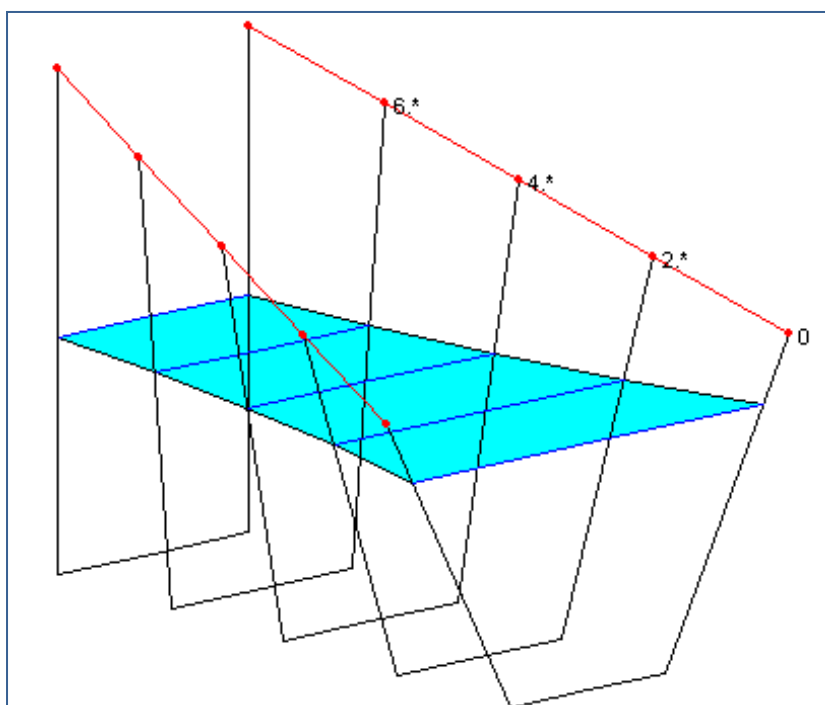
8.1. Canal de transición

Obra de toma

La obra de toma continúa con un canal de sección rectangular. Dado que nuestro canal es de sección trapezoidal, se ha visto necesario realizar una transición de canal. Ésta transición tendrá 10 metros de longitud. Los datos de cada una de las secciones (rectangular y trapezoidal) se muestran a continuación, y junto con ellos se representa (calculada en HEC-RAS) la dicha transición en 3D.

Sección Rectangular	
Ancho	3.7 m
Alto	3.9 m

Sección Trapezoidal	
Ancho superior	7.8 m
Ancho inferior	3 m
Alto	2.4 m
Talud	1H:1V



Los resultados correspondientes al cálculo se muestran a continuación

River Sta	Profile	Q Total (m ³ /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
8	PF 1	15.00	0.00	1.83		2.08	0.001240	2.22	6.76	3.70	0.52
6.*	PF 1	15.00	0.00	1.84		2.07	0.001053	2.12	7.06	4.15	0.52
4.*	PF 1	15.00	0.00	1.86		2.06	0.000857	1.99	7.54	4.77	0.50
2.*	PF 1	15.00	0.00	1.88		2.05	0.000668	1.81	8.27	5.62	0.48
0	PF 1	15.00	0.00	1.90	1.18	2.03	0.000500	1.60	9.36	6.81	0.44

Los cambios que se puede apreciar en la transición para un mismo caudal es el aumento de la sección (**6,76 → 9,36 m²**), lo que implica una cierta reducción de velocidad del agua (**2,2 → 1,6 m/s**), y con lo cual un aumento del calado (**1,83 → 1,9 m**). A partir de esa sección el canal continúa en su sección trapezoidal definida anteriormente, fluyendo en régimen uniforme con la aproximación al calado normal 1,9 m.



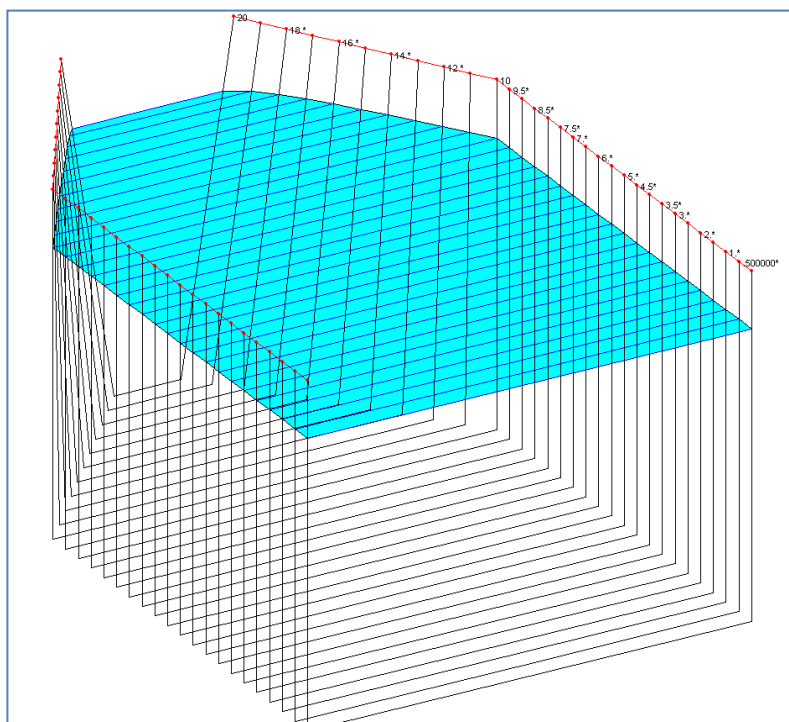
OBRA CIVIL DE UN APROVECHAMIENTO HIDROELÉCTRICO



Al final del canal, antes de entrar en la cámara de carga se ha planteado otro cambio de sección para una mayor facilidad de manejo del caudal. También se ha utilizado el HEC-RAS para representar y calcular dicha variación:

Sección Trapezoidal	
Ancho superior	7.8 m
Ancho inferior	3 m
Alto	2.4 m
Talud	1H:1V

Sección Rectangular	
Acho	7 m
Alto	2.4 m



A continuación se proporcionan resultados obtenidos del cálculo de la transición de la sección

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m ³ /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
1	20	PF 1	15.00	0.10	2.00		2.14	0.000503	1.61	9.34	6.81	0.44
1	19.*	PF 1	15.00	0.10	2.05		2.12	0.000235	1.19	12.55	8.20	0.31
1	18.*	PF 1	15.00	0.10	2.06		2.11	0.000136	0.96	15.66	9.54	0.24
1	17.*	PF 1	15.00	0.10	2.07		2.11	0.000088	0.80	18.74	10.87	0.19
1	16.*	PF 1	15.00	0.10	2.08		2.10	0.000062	0.69	21.79	12.18	0.16
1	15.*	PF 1	15.00	0.10	2.08		2.10	0.000045	0.60	24.83	13.49	0.14
1	14.*	PF 1	15.00	0.09	2.09		2.10	0.000035	0.54	27.87	14.79	0.13
1	13.*	PF 1	15.00	0.09	2.09		2.10	0.000028	0.49	30.90	16.10	0.11
1	12.*	PF 1	15.00	0.09	2.09		2.10	0.000023	0.44	33.94	17.40	0.10
1	11.*	PF 1	15.00	0.09	2.09		2.10	0.000019	0.41	36.97	18.70	0.09
1	10	PF 1	15.00	0.09	2.09		2.10	0.000016	0.37	40.01	20.00	0.08
1	9.5*	PF 1	15.00	0.09	2.09		2.10	0.000016	0.37	40.01	20.00	0.08
1	9.*	PF 1	15.00	0.09	2.09		2.10	0.000016	0.37	40.01	20.00	0.08
1	8.5*	PF 1	15.00	0.09	2.09		2.10	0.000016	0.37	40.02	20.00	0.08
1	8.*	PF 1	15.00	0.09	2.09		2.10	0.000016	0.37	40.02	20.00	0.08
1	7.5*	PF 1	15.00	0.09	2.09		2.10	0.000016	0.37	40.02	20.00	0.08
1	7.*	PF 1	15.00	0.09	2.09		2.10	0.000016	0.37	40.02	20.00	0.08
1	6.5*	PF 1	15.00	0.09	2.09		2.10	0.000016	0.37	40.04	20.00	0.08
1	6.*	PF 1	15.00	0.09	2.09		2.10	0.000016	0.37	40.04	20.00	0.08
1	5.5*	PF 1	15.00	0.09	2.09		2.10	0.000016	0.37	40.04	20.00	0.08
1	5.*	PF 1	15.00	0.09	2.09		2.10	0.000016	0.37	40.04	20.00	0.08
1	4.5*	PF 1	15.00	0.09	2.09		2.10	0.000016	0.37	40.07	20.00	0.08
1	4.*	PF 1	15.00	0.09	2.09		2.10	0.000016	0.37	40.06	20.00	0.08
1	3.5*	PF 1	15.00	0.09	2.09		2.10	0.000016	0.37	40.06	20.00	0.08
1	3.*	PF 1	15.00	0.09	2.09		2.10	0.000016	0.37	40.06	20.00	0.08
1	2.5*	PF 1	15.00	0.09	2.09		2.10	0.000016	0.37	40.08	20.00	0.08
1	2.*	PF 1	15.00	0.09	2.09		2.10	0.000016	0.37	40.08	20.00	0.08
1	1.5*	PF 1	15.00	0.09	2.09		2.10	0.000016	0.37	40.08	20.00	0.08
1	1.*	PF 1	15.00	0.09	2.09		2.10	0.000016	0.37	40.08	20.00	0.08
1	.500000*	PF 1	15.00	0.09	2.09		2.10	0.000016	0.37	40.10	20.00	0.08
1	0	PF 1	15.00	0.09	2.09	0.47	2.10	0.000016	0.37	40.10	20.00	0.08



Se ha calculado la cámara de carga de manera que haya un aumento de sección con el fin de reducir la velocidad lo máximo posible. Según los datos obtenidos con el programa, se puede decir que se produce una reducción de velocidad ($1,6 \rightarrow 0,37$ m/s) y un aumento lógico de la sección mojada ($9,35 \rightarrow 40,10$ m²). Además se produce un aumento del calado de ($1,90 \rightarrow 1,99$ m)

*(W.S. Elevation es la altura de energía del agua incluida la cota de la solera, que en los cálculos se ha tomado con 0,1 m. Es decir, el calado $y = \text{W.S. Elevation} - 0,1 = 2,00 - 1 = 1,9$ m).

8.1. CÁLCULOS DE LA CENTRAL.

Primero, una vez obtenemos los datos del caudal que llega a la cámara de carga, damos unas dimensiones para tener una velocidad lo suficientemente baja para no tener cavitación en la tubería forzada. Tal y como hemos podido ver en el aparatado anterior, el cálculo se ha realizado con el programa HEC-RAS, la velocidad con la que el agua llega a la tubería forzada es de 0.37 m/s. Valor que damos como aceptable para el funcionamiento de la obra. Por lo tanto, la cámara de carga tendrá unas dimensiones de $20 \times 20 \times 2,5$ m³.

Segundo, realizamos el cálculo de un aliviadero en la cámara de carga, para los días de lluvia, toda el agua que recoge el canal a cielo abierto o la excedencia de agua que tengamos en la cámara de carga. Lo único que calculamos es la anchura del aliviadero para que tenga suficiente capacidad para verter el agua excedente en la cámara de carga. El aliviadero será de 15 m de ancho y de 0.3 m de altura, para que pueda desaguar el excedente de agua hasta 30 m³/s, es decir, de unos 15 m³/s.

Además la cámara de carga, será de hormigón en masa de unos 10 cm para evitar la erosión que pueda producirse en el lecho, mientras el canal del aliviadero será de hormigón en masa con un espesor de unos 10 cm.

Una vez hemos finalizado con los cálculos de la cámara de carga, calculamos el diámetro que tiene la tubería forzada.

Tal y como hemos podido comprobar con el programa TURNBPRO, la mayor eficiencia en las turbinas se alcanza con un caudal de aproximadamente 9 m³/s. Pero, nosotros vamos a dimensionar para un caudal de 15 m³/s, porque es el caudal que nos llega a la cámara de carga.

Por lo tanto, tal y como podemos ver en la imagen de la derecha, sabiendo que el caudal que debe pasar es de 15 m³/s, podemos averiguar el diámetro de la tubería conociendo a la vez la velocidad que tenemos en la tubería, debemos limitarla para que no se produzca cavitación.

Entonces, para un caudal de 15 m³/s tenemos un diámetro de 2.75 m y un velocidad aproximada de 2.5 m/s, menor que la restricción que pone en el CEDEX, ya que, según el CEDEX debemos restringir la velocidad a 2.5 m/s para un caudal de 15 m³/s para no tener problemas de cavitación.

Conduccion forzada		
diametro	2.75	m
r	1.375	m
tecta	180	3.142
Longitud tubería	40	m
y	2.75	
S	5.940	m2
Pm	8.639	m
Rh	0.785	m
n	0.013	
l	0.4	m/m
v	2.510	m/s
Q	14.91	m3/s
h	3.071	
Perdida carga	0.070	m



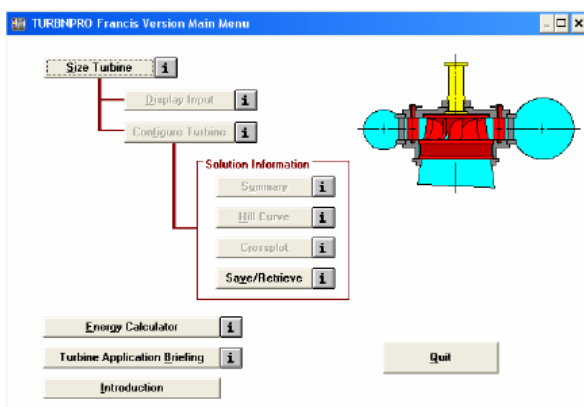
Una vez calculados la cámara de carga y la tubería forzada con sus respectivas limitaciones, pasamos a calcular el tipo de turbina, y la elección de donde la vamos a colocar dentro de la central, es decir, por arriba, a la misma cota o por debajo de la cota del río.

Hay que destacar, que antes de la turbina colocamos una válvula de mariposa para controlar el caudal, sobretodo, en épocas de mantenimiento de la turbina para poder llevar un mantenimiento adecuado del mismo. La válvula de mariposa será del mismo diámetro de la tubería, aproximadamente de unos 2.75 m.

Primero elegimos el lugar de emplazamiento de la central, situada en el margen izquierda del cauce. Al tener espacio suficiente para construir nuestra central no condiciona que elegimos de eje vertical o horizontal. Por lo tanto, en este aspecto nos daría igual una solución que otra.

La capacidad portante del terreno donde se cimentará la estructura es poca al tratarse de arcillas y areniscas, por lo que no aguantara la carga concentrada sobre una zona de la losa de cimentación. Por lo tanto, al no ser ventajosa para colocar una turbina de eje vertical, nos da lo mismo una turbina de eje vertical que horizontal.

Un grupo turbina-alternador de 4.2 MW es un grupo ya de unas dimensiones relativamente grandes dentro de lo que son los grupos que componen las minicentrales, por lo que convendría colocar el eje vertical, tal y como veremos a continuación.



A continuación, con el programa “TURBNPRO” calculamos el tipo de turbina. La introducción de datos en el programa es muy sencilla dada la interfaz gráfica, el único inconveniente que puede tener este programa es que la introducción de las unidades se hace en sistema anglosajón. He aquí a la derecha la interfaz gráfica del programa que muestra el menú principal.

Seguidamente introducimos los valores y calculamos el tipo de turbina con los valores del salto bruto, el salto neto, el salto mínimo neto, la temperatura y la frecuencia en medidas anglosajonas tal y como podemos observar en la imagen de la derecha.

Field	Value	Unit	Limit
Rated Discharge	529.65	cfs	Limits
Net Head at rated discharge	93.644	feet	Limits
Site Gross Head	101.68	feet	Limits
Site Elevation	1325.12	feet	Limits
Water Temperature	68	degrees F	Limits
Desired setting to tailwater	0	feet	Limits
Efficiency Priority at max output	0	(0 to 10)	Limits
Ratio of rated head to best eff head	1	(0.7 to 1.0)	Limits
System Frequency	50	Hz	Limits
Minimum Net Head	90.364	feet	Limits



OBRA CIVIL DE UN APROVECHAMIENTO HIDROELÉCTRICO



Axial/Propeller Configure Turbine Routine

1) Unit Arrangement:
☐ Tubular ☐ Pit / Bulb, Horiz. Axis ☒ Radial, Vertical Axis

2) Unit Orientation: Upstream Orientation: Intake Type:
☐ Horizontal ☐ Pit Type ☒ Spiral Case
☐ Vertical ☐ Bulb Type ☐ Semi-Spiral Case
☐ Flume

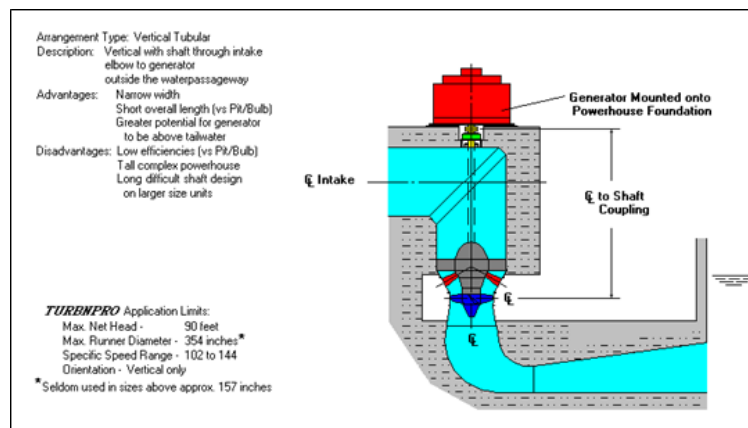
3) Turbine Regulation Type:
☒ Kaplan
☐ Adjustable Blade/Fixed Vane
☐ Adjustable Gate/Fixed Blade

Comments:
Due to the high net head only a Radial arrangement is possible
The specific speed of the size selected is too low for a Pit/Bulb arrangement
Due to the high net head only a Spiral Case intake is possible

Una vez introducidos los datos, le decimos al programa el tipo de turbina que queremos, como el salto es menor a 60 m elegimos la turbina Kaplan que es ideal para nuestro proyecto. Además de elegir que la turbina sea de eje vertical y tenga cámara espiral, tal y como podemos observar en la imagen de la izquierda.

Hay que destacar, que nos da igual entre elegir una turbina de eje horizontal que vertical, ya que, no tenemos restricción de sitio, elegimos de eje vertical porque nos viene mejor para turbinar el caudal, es la elección que he tomado y además la central es de menores dimensiones.

Por lo tanto, con los datos introducidos en el programa, solo sale un tipo de solución que es una turbina Kaplan de eje vertical que es con la que mayor eficiencia tenemos, para un caudal de $15 \text{ m}^3/\text{s}$. Tal y como podemos observar en la imagen de la derecha.



Con estos datos, ya hemos creado la turbina, ahora ya estamos en disposición de elegir que opción es mejor de todas las que nos ofrece el programa.

Turbine Solution Possibilities

Solution Number	Runner Diameter Inches	Runner Diameter Millimeters	Unit Speed rpm	Specific Speed NS	Centerline Setting feet
1	47.2	1199	600.0	132	13.3
2	52.0	1322	500.0	110	23.1
3	56.9	1444	428.6	94	27.0
0	0.0	0	0.0	0	0.0
0	0.0	0	0.0	0	0.0
0	0.0	0	0.0	0	0.0
0	0.0	0	0.0	0	0.0
0	0.0	0	0.0	0	0.0
0	0.0	0	0.0	0	0.0
0	0.0	0	0.0	0	0.0

Preliminary Output: **4260 KW**

Enter Size Selection:



OBRA CIVIL DE UN APROVECHAMIENTO HIDROELÉCTRICO



Cogeremos la opción dos ya que presenta un mejor funcionamiento que la primera opción con un mayor rendimiento, pero los puntos de funcionamiento están demasiado alejados, por lo tanto, por iteración, cambiamos los valores hasta llegar a la conclusión, que para que no se produzca cavitación en la turbina debemos tener el eje de la turbina a una cota de 402 m, es decir, solamente un metro por debajo de la cota del río que es de 405 m. Tal y como podemos observar en la imagen, el grupo turbina-alternador es de 4.2 MW.

Tal y como podemos observar en las siguientes imágenes, el programa te da todos los valores necesarios y resultados que necesitas conocer de la turbina.

TURENPRO - AXIAL/PROPELLER TURBINE SOLUTION SUMMARY				
Solution File Name: No File Name				
TURBINE SIZING CRITERIA				
Rated Discharge:	529.7 cfs	/	15.0 m ³ /s	
Net Head at Rated Discharge:	100.2 feet	/	30.5 meters	
Gross Head:	108.2 feet	/	33.0 meters	
Site Elevation:	1319 feet	/	402 meters	
Water Temperature:	68 Degrees F	/	20 Degrees C	
Sinking to Tailwater:	0.0 feet	/	0.0 meters	
Efficiency Priority:	0			
Rated Head/Best Eff Head:	1.000			
System Frequency:	50 Hz			
Minimum Net Head:	90.4 feet	/	27.5 meters	
AXIAL/PROPELLER TURBINE SOLUTION DATA				
Arrangement:	VERTICAL RADIAL			
Unit Regulation Capability:	KAPLAN			
Intake Type:	SPIRAL CASE			
Draft Tube Type:	ELBOW			
Runner Diameter:	60.9 inches	/	1546 mm	
Unit Speed:	375.0 rpm			
Specific Speed under Rated Net Head -	(English)		(Metric)	
At 100% Turbine Output:	87.8		334.6	
At Best Efficiency Condition:	70.2		267.8	
Best Efficiency Net Head:	100.2 feet	/	30.5 meters	
SOLUTION PERFORMANCE DATA				
At Rated Net Head of:	100.2 feet	/	30.5 meters	
% of Rated Discharge	Output (KW)	Efficiency (%)	cfs	m ³ /s
100	4105	91.3	529.7	15.0
* 62.5	2630	93.6	331.0	9.4
75	3144	93.3	397.2	11.3
50	2091	93.0	264.8	7.5
25	1000	89.0	132.4	3.8
* - Best Efficiency Condition at Rated Net Head				
At Maximum Net Head of:	100.2 feet	/	30.5 meters	
Sigma Allowable	Max. Output (KW)	Efficiency (%)	cfs	m ³ /s
0.315	4063	91.4	523.6	14.8
At Minimum Net Head of:	90.4 feet	/	27.5 meters	
Sigma Allowable	Max. Output (KW)	Efficiency (%)	cfs	m ³ /s
0.348	3594	91.3	514.4	14.6

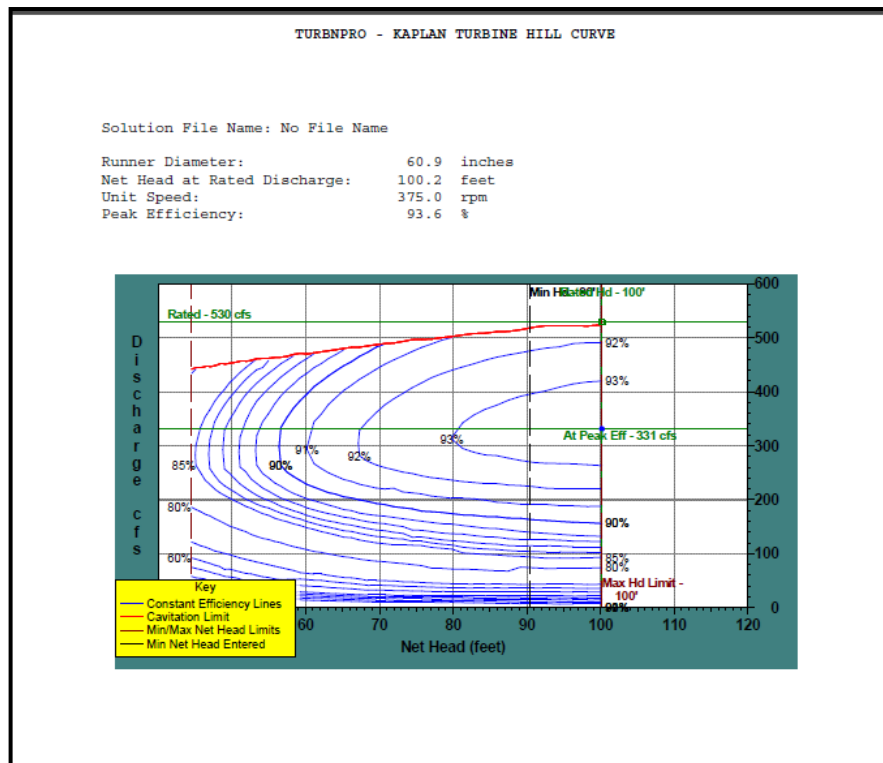
TURENPRO - AXIAL/PROPELLER TURBINE SOLUTION SUMMARY				
Solution File Name: No File Name				
MISCELLANEOUS DATA				
Runner Hub Diameter:	26.8 inches	/	680.1 mm	
Maximum Runaway Speed (at Max. Net Head):	902 rpm			
Turbine Discharge at:				
Runaway Speed (at Rated Net Head & 100% gate):	1126 cfs	/	32 m ³ /s	
Site's Atmospheric Pressure minus Vapor Pressure:	31.6 feet	/	9.6 meters	
Sigma Allowable (at 100% Output & Rated Net Head):	0.321			
Sigma Plant (at 100% Output & Rated Net Head):	0.315			
Maximum Hydraulic Thrust (at Max. Net Head):	12714 lbs	/	5779 kg	
Reverse Hydraulic Thrust (at Max. Net Head):	15002 lbs	/	6819 kg	
Approximate Runner and Shaft Weight:	6279 lbs	/	2854 kg	
Vel. at Draft Tube Exit (at Rated Head & Discharge):	6.6 fps	/	2.0 m/s	
DIMENSIONAL DATA				
Intake Type:	SPIRAL CASE			
Inlet Diameter:	72.0 inches	/	1829 mm	
Inlet Offset:	79.6 inches	/	2021 mm	
Centerline to Inlet:	94.4 inches	/	2397 mm	
Outside Radius A:	115.6 inches	/	2935 mm	
Outside Radius B:	107.8 inches	/	2738 mm	
Outside Radius C:	95.1 inches	/	2416 mm	
Outside Radius D:	80.5 inches	/	2044 mm	
Draft Tube Type:	ELBOW			
Centerline to Invert:	127.8 inches	/	3246 mm	
Shaft Axis to Exit Length:	325.0 inches	/	8254 mm	
Exit Width:	171.6 inches	/	4359 mm	
Exit Height:	66.9 inches	/	1700 mm	
Miscellaneous:				
Wicket Gate Height:	19.6 inches	/	498 mm	
Wicket Gate Circle Diameter:	73.0 inches	/	1855 mm	
Runner Centerline to				
Shaft Coupling:	125.3 inches	/	3182 mm	
Turbine Shaft Diameter:	10.7 inches	/	272 mm	
Runner Centerline to				
Distributor Centerline:	25.6 inches	/	649 mm	
**** All information listed above is typical only. Detailed characteristics will vary based on turbine manufacturer's actual designs.				

Seguidamente calculamos las curvas de rendimientos de nuestra turbina.

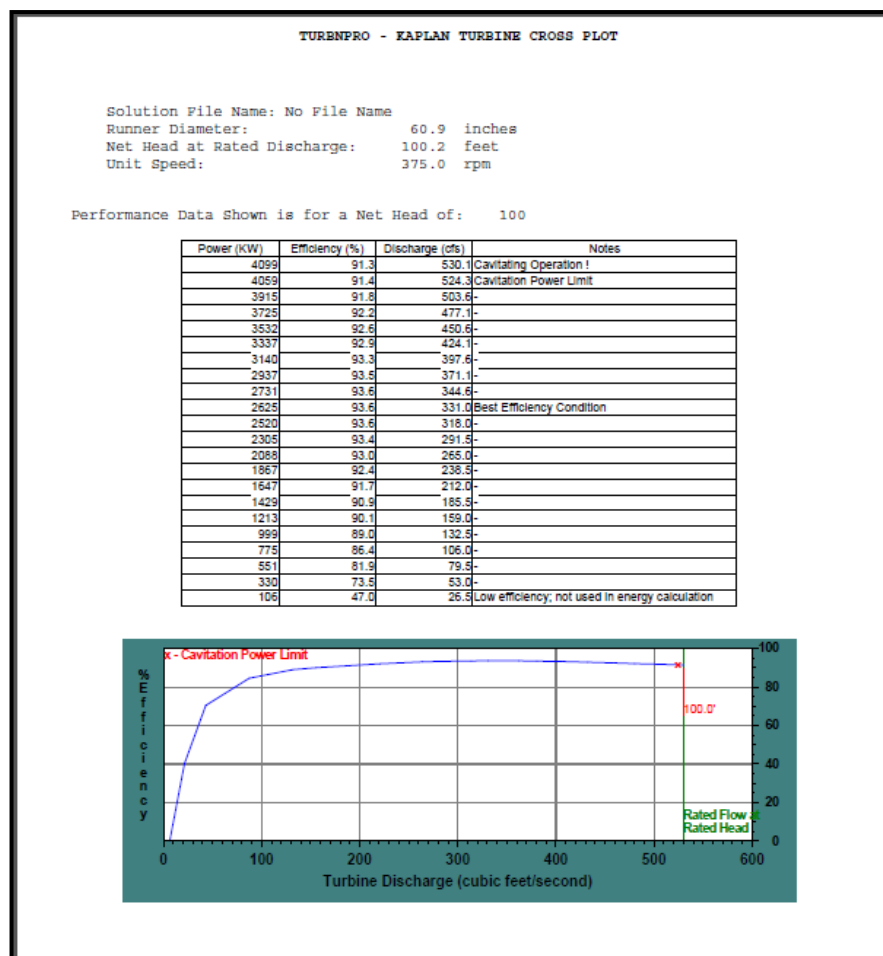
Podemos observar que el punto de funcionamiento óptimo está alrededor de 9 m³/s. Con un rendimiento o eficiencia del 93 %, es bastante bueno, aunque aún sería mejorable, si colocáramos dos tuberías de menor diámetro en vez de una, además, en épocas de mantenimiento la central podría seguir en uso, de esta manera, en épocas de mantenimiento no podemos utilizar la central. Tal y como vemos en la siguiente imagen, hemos tenido que reducir las distancias porque la turbina estaba colocada demasiado baja, por lo tanto, teníamos más salto pero estábamos sobredimensionando la central.



OBRA CIVIL DE UN APROVECHAMIENTO HIDROELÉCTRICO



El programa también te permite calcular la curva de eficiencia para una determinada altura, por lo tanto, nuestra altura de diseño es de 27.5 metros con una eficiencia del 93.6 %, con lo que obtenemos la siguiente gráfica.





Lo que podemos apreciar en la gráfica es que para la altura neta en la cual hemos predimensionado el aprovechamiento el caudal que mayor rendimiento le da a la máquina es de 331cfs, es decir, alrededor de unos $9 \text{ m}^3/\text{s}$.

Valorando los resultados obtenidos, podemos comentar el mayor rendimiento de la turbina se obtiene con un nivel de carga del 93 % con un caudal de $10 \text{ m}^3/\text{s}$.

La turbina elegida está diseñada para una solo tubería, por lo tanto, el rendimiento y el funcionamiento no son los óptimos, la mejor opción sería realizar dos tuberías.

Una vez calculado la parte hidráulica e industrial, deberíamos calcular la parte constructiva de la obra, es decir, como vamos a realizar y con qué materiales el edificio de la central.

Como no tenemos tiempo, la central será de paredes de hormigón armado de 15 cm de espesor, con un techo tipo sándwich, para evitar que la escorrentía de lluvia pueda estropear los aparatos industriales. La opción de colocar hormigón armado en las paredes es para tener una mayor resistencia frente a heladas, viento, lluvia o otros problemas que puedan ocurrir cerca de la central.

8.2.