



Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería de
Caminos y Puertos
y de Ingeniería
de Minas

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos y
Puertos y de Ingeniería de Minas

“Desarrollo de maniobras para el
cálculo de transitorios y pérdidas de
carga en instalaciones hidráulicas
con el código SIMSEN”

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA DE RECURSOS MINERALES Y ENERGÍA



Universidad
Politécnica
de Cartagena

Autor: Javier Contreras Espada

Director: Dr. Blas Zamora Parra

Codirector: Dr. Jesús Contreras Espada

Empresa
colaboradora: **ANDRITZ**
Hydro

Cartagena, 25 de Julio del 2017

Dedicado a mis amigos y a mi familia por su apoyo y paciencia.

Dedicado a mi director, el doctor Blas Zamora Parra, quien siempre vio mi capacidad cuando la mayoría veían años perdidos.

Dedicado a mí hermano, el doctor Jesús Contreras Espada, por la posibilidad que me brindó.

“El caos es orden aún por descifrar”

Tabla de Contenidos

1-	Introducción y Objetivos	- 1 -
1.1-	Motivación del estudio	- 1 -
1.2-	Andritz AG (Andritz Actiengesellschaft).....	- 2 -
1.3-	Introducción.....	- 2 -
1.4-	Objetivos	- 4 -
2-	Fenómenos hidráulicos transitorios.....	- 5 -
2.1-	La hidráulica de presión a lo largo de la historia	- 5 -
2.2-	El estado actual de la Ingeniería Hidráulica	- 7 -
2.3-	Importancia del estudio de los transitorios.....	- 8 -
2.4-	Tipos de transitorios. Necesidad de su análisis y control	- 9 -
2.5-	Fenómenos transitorios en conducciones.....	- 11 -
2.6-	Ecuaciones del movimiento con compresibilidad despreciable.....	- 13 -
	Ecuaciones del movimiento. Condiciones iniciales y de contorno	- 13 -
	Ejemplo de aplicación: movimiento oscilatorio en un tubo en forma de U	- 14 -
2.7-	Procesos de apertura. Aceleración de la corriente en un tubo.....	- 14 -
3-	Estudio particular del Golpe de Ariete.....	- 19 -
3.1-	Situaciones en las que se puede dar un golpe de ariete	- 19 -
3.2-	Ecuaciones del movimiento con compresibilidad apreciable	- 20 -
3.3-	Salto de presión	- 21 -
3.4-	Velocidad de propagación de la onda	- 22 -
3.5-	Descripción del golpe de ariete	- 24 -
3.6-	Cálculo práctico del golpe de ariete. Tipos de cierre.....	- 26 -
3.7-	Influencia del tiempo de cierre.....	- 27 -
3.8-	Métodos de resolución de las ecuaciones del golpe de ariete	- 29 -
	Ecuación de continuidad	- 29 -
	Ecuación de la conservación de la cantidad de movimiento o de momentum.....	- 30 -
	Método de las características	- 31 -
	Analogía eléctrica.....	- 35 -

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

4-	Código SIMSEN	- 39 -
4.1-	Introducción	- 39 -
4.2-	Unidades de Simsen	- 40 -
	Reservoir (depósito):	- 42 -
	Pipes (tuberías):	- 42 -
	Tanques	- 44 -
	Turbinas	- 45 -
	Valve (Válvulas):	- 47 -
	Bloque PROG.	- 47 -
	FPOINTS	- 47 -
	REG (Reguladores PID)	- 48 -
	UDLIMIT	- 49 -
4.2-	Entradas y salidas	- 50 -
4.3-	Tutoriales de Simsen	- 51 -
	Waterhammer	- 51 -
	Mass Oscillation	- 53 -
	Emergency Shutdown	- 55 -
4.4-	Modificación del caso del primer tutorial de Golpe de ariete	- 57 -
	Caso original	- 57 -
	Version modificada	- 59 -
5-	Caso de estudio 1: Rechazo de carga (Load Rejection)	- 63 -
5.1-	UDLIMIT: Simplificación de su configuración (Tf, Tg, Th, Yh).	- 66 -
5.2-	Modificación del paso de tiempo. (DT=1)	- 69 -
6-	Caso de estudio 2: Arranque de una turbina	- 71 -
6.1-	Load Start	- 71 -
	- Modelo	- 71 -
	- Bloques	- 72 -
	- Resultados	- 72 -
6.2-	Turbine Start	- 73 -
	- Modelo	- 73 -
	- Bloques	- 73 -

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

- Resultados.....	- 74 -
7- Caso de Estudio 3: Estudio de golpe de ariete sobre diferentes maniobras de cierre en una turbina Pelton	- 75 -
7.1- Cierre Normal.....	- 75 -
- Modelo	- 75 -
- Results.....	- 76 -
7.2- Cierre escalonado	- 76 -
- Resultados.....	- 76 -
7.3- Cierre amortiguado.....	- 79 -
- Resultados.....	- 79 -
7.4- Surge Shaft (chimenea de equilibrio o tanque de compensación)	- 81 -
- Resultados.....	- 81 -
4.5- Comparativa de resultados.....	- 82 -
8- Caso de estudio 4: maniobra de apertura y cierre	- 85 -
8.1- Modelo.....	- 85 -
8.2- Variable Tiempo de apertura y cierre (Tr)	- 86 -
8.3- Análisis de los bloques	- 86 -
8.4- Primeros resultados y problemas	- 87 -
8.5- Simulación complementaria en el compilador Octave.....	- 89 -
Resultados	- 89 -
8.6- Análisis de resultados	- 90 -
Tr=3	- 91 -
Tr=7	- 91 -
Tr=16	- 92 -
8.7- Conclusion.....	- 92 -
9- Caso de estudio 5: Dos turbinas Francis; cierre y apertura	- 93 -
9.1- Modelo.....	- 93 -
- Introducción.....	- 93 -
9.2- Simulaciones	- 94 -
- Cierre y apertura al mismo tiempo.....	- 94 -
- Cierre y apertura con 20 s de diferencia.	- 94 -
- Cierre y apertura con 20 s de separación pero con una apertura no controlada-	96
-	

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

9.3-	Comparativa de resultados	- 96 -
10-	Conclusión	- 99 -
	Líneas de continuación del proyecto	- 100 -
11-	Bibliografía.....	- 101 -
12-	Anexos	- 105 -
12.1-	Anexo 1.A	- 105 -
12.2-	Anexo 1.B	- 111 -
12.3-	Anexo 2.A	- 117 -
12.4-	Anexo 2.B	- 120 -
12.5-	Anexo 3.A	- 122 -
12.6-	Anexo 3.B	- 127 -
12.7-	Anexo 4.A	- 129 -
12.8-	Anexo 4.B	- 131 -
12.9-	Anexo 4.C	- 133 -
12.10-	Anexo A	- 135 -
12.11-	Anexo B	- 139 -

Índice de Figuras

Figura 1 - Conducción forzada para el abastecimiento de agua de la ciudad de Cádiz por medio de un sifón en época romana.....	- 6 -
Figura 2 - Accidente en la central hidroeléctrica de Sayano–Shushenskaya (2009).....	- 11 -
Figura 3 - Colapso de una tubería por la depresión sufrida en un Golpe de Ariete.....	- 20 -
Figura 4 - Esquema de fuerzas en una sección de una tubería	- 23 -
Figura 5- Esquema depósito y tubería.....	- 24 -
Figura 6 - Evolución grafica del Golpe de Ariete en una tubería a presión.....	- 26 -
Figura 7 - Evolución sobrepresiones/depresiones de la válvula, en función del tiempo.-	- 26 -
Figura 8 - Análisis de la sobrepresión tras el cierre de una válvula	- 28 -
Figura 9 - Intersección de las curvas c+ y c-	- 33 -
Figura 10 – Matriz de puntos.....	- 34 -
Figura 11 - Analogía eléctrica de un aliviadero	- 35 -
Figura 12 - Analogía eléctrica de un segmento de tubería	- 36 -
Figura 13 - Analogía eléctrica de una tubería elástica	- 36 -
Figura 14 - Depósitos	- 42 -
Figura 15 - Tuberías	- 42 -
Figura 16 - Surge tank y Surge shaft.....	- 45 -
Figura 17 - Línea de alturas piezométricas.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 18 - Turbina Francis, Kaplan y Pelton	- 45 -
Figura 19 - Bloque de una válvula	- 47 -
Figura 20 - Bloque Prog	- 47 -
Figura 21 - Bloque FPOINTS.....	- 48 -
Figura 22 - Bloque del regulador	- 48 -
Figura 23 - UDLIMIT	- 49 -
Figura 24 - Evolución gráfica del comportamiento del UDLimit para una situación de crecimiento.....	- 49 -
Figura 25 - Evolución gráfica del comportamiento del UDLimit para una situación de decrecimiento.....	- 50 -

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

Figura 26 - Visor proporcionado por el software SIMSEN.....	50 -
Figura 27 - Instalación tutorial de golpe de ariete	51 -
Figura 28 - Resultados de la simulación del tutorial de Golpe de ariete	52 -
Figura 29 - Tutorial sobre oscilación de la masa de agua en una chimenea de equilibrio-	53 -
-	
Figura 30 - Evolucion de la presión, el nivel de agua y el caudal en la chimenea	54 -
Figura 31 - Resultados de la simulación en la válvula aguas abajo	54 -
Figura 32 - Tutorial de parada de emergencia	55 -
Figura 33 - Resultado de la simulación	56 -
Figura 34 - Instalación del tutorial sobre golpe de ariete	57 -
Figura 35 - Evolución de la presión y el caudal en la válvula.....	59 -
Figura 36 - Versión modificada del tutorial sobre golpe de ariete.....	59 -
Figura 37 - Evolución de la presión en ambas líneas.....	62 -
Figura 38 - Evolución del caudal en ambas líneas	62 -
Figura 39 - Modelo de un rechazo de carga	63 -
Figura 40 - Evolución de la apertura del distribuidor, velocidad de rotación y torque ...	65 -
Figura 41 - Definición de los parámetros de apertura y cierre	66 -
Figura 42 -Evolución de la apertura del distribuidor, la velocidad de rotación y el torque con la simplificación del UDLimit	68 -
Figura 43 - Apertura del distribuidor, velocidad del rotor y torque (p.u.) $dt = 1[s]$	69 -
Figura 44 - Modelo en SIMSEN de una turbina Francis.....	71 -
Figura 45 - Resultados del acoplamiento de una turbina Francis	72 -
Figura 46 - Modelo en SIMSEN para un arranque total de una turbina Francis	73 -
Figura 47 - Resultados de un arranque de una turbina Francis desde una situación de un paro total	74 -
Figura 48 - Modelo para el estudio del golpe de ariete en una turbina Pelton	75 -
Figura 49 - Resultados cierre normal.....	76 -
Figura 50 - Cierre escalonado de una Pelton (tiempo de cierre entre inyectores = 1s) ..	77 -
Figura 51 - Cierre escalonado de una Pelton (tiempo de cierre entre inyectores = 5s) ..	78 -
Figura 52 - Cierre escalonado de una Pelton (tiempo de cierre entre inyectores = 15s) -	79 -
Figura 53 - Cierre amortiguado de una turbina Pelton.....	80 -
Figura 54 - Cierre amortiguado y escalonado de una turbina Pelton.....	80 -
Figura 55 - Cierre normal de una turbina Pelton con una chimenea de equilibrio.....	81 -
Figura 56 - Cierre escalonado de una turbina Pelton con una chimenea de equilibrio...-	82 -
Figura 57 - Modelo para la maniobra de apertura y cierre	85 -
Figura 58 - Evolución distribución en una simulación con $Tr=10s$ de apertura y cierre ..	86 -
Figura 59 - Ejemplo del fallo de picos de presión de SIMSEN	87 -
Figura 60 - Resultados con el UDLimit filtrando la curva de presión	88 -

Figura 61 - Diferencia de pico de presión con y sin UDLimit.....	- 88 -
Figura 62 - Ejecución de la simulación de SIMSEN desde Octave	- 89 -
Figura 63 - Gráfico de Octave con la evolución de máximos y mínimos.....	- 89 -
Figura 64 - Mensaje de Octave con el máximo y el mínimo	- 90 -
Figura 65 - Evolución de una onda en una tubería a presión.....	- 90 -
Figura 66 - Apertura y cierre con $Tr=3$	- 91 -
Figura 67 - Apertura y cierre con $Tr=7s$	- 91 -
Figura 68 - Apertura y cierre con $Tr=16s$	- 92 -
Figura 69 - Colapso de una tubería por depresión	¡Error! Marcador no definido.
Figura 70 - Modelo de dos turbinas Francis en paralelo	- 93 -
Figura 71 - Cierre y apertura al mismo tiempo de dos turbinas Francis en paralelo (2) .	- 94 -
Figura 72 - Cierre y apertura de dos turbinas con 20 segundos de separación (2).....	- 95 -
Figura 73 - Presión máxima alcanzada en la simulación	- 95 -
Figura 74 - Cierre y apertura con 20s de separación con una apertura no controlada ...	- 96 -

Índice de Tablas:

Tabla 1 - Valores nominales pedidos en los diferentes bloques	- 41 -
Tabla 2 - Parámetros de los depósitos	- 42 -
Tabla 3 - Parámetros de las tuberías	- 43 -
Tabla 4 - Cálculo de N_b	- 44 -
Tabla 5 - Parámetros del Surge Tank.....	- 45 -
Tabla 6 - Parámetros de la turbina	- 45 -
Tabla 7 - Parámetros de la válvula	- 47 -
Tabla 8 - Parámetros del regulador.....	- 48 -
Tabla 9 - Resultados del estudio sobre golpe de ariete en una turbina Pelton	- 83 -
Tabla 10 - Comparativa resultados de dos Francis en paralelo.....	- 97 -

1-Introducción y Objetivos

1.1- Motivación del estudio

Si hay algo que caracteriza la energía, son sus transformaciones. Las transformaciones energéticas son las que desde siglos atrás nos han permitido aprovechar los recursos que tenemos, ya sea transformando la energía cinética en mecánica, ésta en eléctrica, o muchas otras transformaciones.

En el campo de la hidráulica, es habitual expresar la energía de un fluido como la suma de las tres siguientes:

- La energía potencial, o de altura sobre una cota de referencia.
- La energía cinética, o la que aporta la velocidad del fluido.
- La energía de presión, dada por la presión a la que está sometido el mismo.

Asimismo, gracias al primer principio de la termodinámica, sabemos que la energía ni se crea ni se destruye, por lo que una reducción de una de las energías en una conducción cerrada en la que no hay cesión de energía supondrá un aumento por otro lado, o sea, una transformación energética. Este es el caso del Golpe de Ariete. Este es un caso extremo de fenómeno transitorio que aparece debido al cierre de una válvula por ejemplo, una reducción drástica de la energía cinética, la cual se transforma en energía de presión.

Estos aumentos de presión repentinos ponen en serio riesgo todo tipo de instalaciones hidráulicas, tanto de bombeo como de turbinado. Lógicamente en grandes instalaciones hidráulicas los efectos de los fenómenos transitorios y particularmente del golpe de ariete son muy apreciables y en muchas ocasiones destructivos. Incluso en instalaciones más pequeñas, como por ejemplo las de abastecimiento de agua potable, un codo de una tubería sufre el riesgo de romperse debido a estas sobrepresiones. El presente proyecto se

centra en el estudio de fenómenos transitorios incluyendo el golpe de ariete en centrales hidroeléctricas. Se utilizarán modelos y casos desarrollados por la empresa Andritz Hydro.

1.2- Andritz AG (Andritz Actiengesellschaft)

Andritz Group es una empresa austriaca de ingeniería fundada en 1852, con sede en Graz (Austria). El Grupo coge su nombre del barrio donde nació y donde aún conserva su sede principal. La empresa se compone de 5 divisiones que dan trabajo a más de 23400 empleados distribuidos en 220 instalaciones de producción y servicios. Las cinco divisiones de las que se compone la empresa son:

- *Andritz Feed & Biofuel* (producción de piensos y pellets de Biomasa)
- *Andritz Pulp and Paper* (industria de pulpa y papel)
- *Andritz Metals* (industria del acero)
- *Andritz Separation* (separación sólido-líquido en los sectores industriales y municipales)
- *Andritz Hydro*

El presente trabajo se realizó en la sede de Kriens, cantón de Lucerna, que pertenece a la división de *Andritz Hydro*, en Suiza, la cual se dedica a la fabricación y mantenimiento de turbinas hidráulicas y generadores par las estaciones de energía hidroeléctrica, así como del diseño de las mismas. Muchas de las sedes de *Andritz Hydro* cuentan con un Departamento de Transitorios cuya labor principal se divide en el estudio previo de cara al diseño de turbinas, y a la identificación de fenómenos transitorios en turbinas ya instaladas y en funcionamiento.

La instalación de *Andritz Hydro* de Kriens da servicio no solo en Suiza, sino también en centrales hidroeléctricas como la de Kisangani (El Congo) o la de Umluspen (Suecia). Asimismo, Andritz AG posee instalaciones en países de todo el mundo, incluido España, que cuenta con tres oficinas de Andritz Ingeniería (Madrid, Barcelona y Córdoba) pertenecientes a la división *Andritz Separation* además de la fábrica de Algete (Madrid) perteneciente a la división de *Andritz Hydro*.

1.3- Introducción

Este proyecto nace del interés del Dr. Wolfgang Michler (Jefe del departamento de transitorios de Andritz Hydro Kriens) de mejorar el rendimiento de todos los departamentos de transitorios de la empresa a nivel mundial. Para ello, se toman una serie de medidas. Muchas de estas medidas son a nivel local en cada una de las sedes, pero las siguientes se toman en prácticamente toda la empresa.

- Los departamentos de transitorios de Andritz Hydro trabajan con el software Simsen para

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

cálculo de transitorios. Este programa será desarrollado en profundidad en el apartado 4 de este informe.

- Se realizan conferencias online bimensuales entre todos los departamentos a nivel mundial para poner en común las posibles implementaciones y también los problemas que aparezcan.
- Se crea una base de datos con para modelos hechos en Simsen la cual agilizará el trabajo de los ingenieros que necesiten estudiar un modelo que ya ha sido calculado con anterioridad.

Este último apartado es donde entra la labor principal de este trabajo. El objetivo en Andritz fue la realización de modelos utilizando el software Simsen que una vez supervisados por el Dr. Michler pasarán a disposición de toda la empresa, de cara a ser usados si es necesario.

Básicamente, se puede reducir la realización de este proyecto, a una fase de aprendizaje y otra de realización, aunque obviamente cualquier proyecto queda resumido en esos dos puntos.

En el caso de un estudio de Impacto Ambiental, de la construcción de un parque eólico o una reforma en un complejo minero, fácilmente se podría describir las etapas. En este caso no es posible delimitar unas etapas claras del proyecto, pero si se puede describir como fue el desarrollo del mismo.

En una primera fase (Aprendizaje), se comenzó con un estudio intensivo de la base teórica necesaria para entender todos los conceptos con los que se iba a trabajar. En primer lugar, los apuntes de la asignatura Centrales Hidroeléctricas de la UPCT (Blas Zamora, 2017), para después complementarlo con el libro Fluid Transients (Wylie y Streeter, 1993)

Una vez desarrollada la base teórica necesaria, se comienza con el aprendizaje del software leyendo el manual de uso y estudiando los componentes que se usarán más adelante.

Tras estas dos etapas se comienza con la parte práctica, pero sin dejar de lado el aprendizaje, realizando tanto los tutoriales que ofrece el software, como, una vez terminados estos, una serie de casos ya realizados por la empresa.

Finalmente ya estaba preparado para la realización de la parte fundamental de este proyecto. Los casos realizados fueron los siguientes

- Rechazo de carga.
- Arranque de una turbina.
- Estudio de golpe de ariete.
- Fallo en el sistema de cierre.
- Apertura de dos turbinas en paralelo.

Tanto el software como los casos, se verán en detalle en puntos posteriores de este proyecto.

1.4- Objetivos

En este proyecto se busca cumplir con los siguientes objetivos:

- Estudio general de los fenómenos transitorios en instalaciones hidráulicas. (revisión bibliográfica)
- Estudio particular del fenómeno del golpe de ariete, así como de los métodos de solución analítica de los mismos.
- Descripción y manejo del software SIMSEN, para estudio de instalaciones hidráulicas y resolución de fenómenos transitorios.
- Estudio de casos, interpretación de los resultados y propuesta de soluciones a problemas que se presenten.
- Implementación de la biblioteca de modelos realizados con el Código SIMSEN de Andritz Hydro.

2-Fenómenos hidráulicos transitorios

2.1-La hidráulica de presión a lo largo de la historia

Para estudiar la historia del transporte del agua habría que remontarse a los principios de la historia de la Humanidad. Siempre hubo necesidad de transportarla y almacenarla para una mayor facilidad a la hora de disponer de la misma. Por ello la mayor parte de núcleos urbanos estaban cerca de ríos.

Esta necesidad de suministro continuo ha propiciado que la Ingeniería Hidráulica sea una de las ingenierías más antiguas, o tal vez, la que más. No en vano el hombre ha dependido, depende y dependerá de su desarrollo, y como siempre ha imitado a la naturaleza, los primeros transportes “no naturales” de agua se realizan en régimen de lámina libre. El ejemplo de los ríos inspiró los primeros canales, cuyas técnicas de construcción fueron mejorando hasta lograr un máximo esplendor con las construcciones romanas.

Hasta hace décadas, el hombre siempre optó por el transporte en régimen de lámina libre. Tan solo se instalaban conducciones forzadas en los tramos finales de aprovechamientos hidroeléctricos, y ya entrado el S.XX en las traídas de agua a grandes núcleos urbanos. El transporte de agua a presión es conocido hace milenios como se puede observar más adelante en la Figura 1, pero este debía superar dos obstáculos importantes. El primero, disponer de materiales capaces de soportar presiones medianamente altas. Y aun disponiendo de ellos, surgía el segundo, la insuficiencia de los conocimientos técnicos del momento para construir tuberías de grandes diámetros. La tubería de presión más antigua que se conoce es un sifón invertido que en tiempos del rey Salomón suministraba agua a la ciudad de Jerusalén.

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

Con la caída del imperio romano llegó la edad oscura, época en la que la ciencia apenas avanzó. Hubo que esperar al renacimiento para ver avances en la Ingeniería Hidráulica.

En 1445 se construye la primera tubería a presión (de fundición gris) de la época moderna en el castillo de Dillenburg. Hubo que esperar 200 años hasta la construcción de la primera tubería con una longitud notable. Fue una tubería de fundición gris, instalada en 1664, que cubría la distancia de 25 km que separaba Marley on Seine del Palacio de Versailles.

Con el tiempo llegaría la necesidad de abastecer ciudades y el comienzo del aprovechamiento hidroeléctrico. Para el comienzo del S.XX, se superó el problema del transporte eléctrico a larga distancia, lo que motivó el crecimiento y desarrollo de las centrales hidroeléctricas, que a su vez impulsó el estudio de los fenómenos transitorios, sobretodo del golpe de ariete.

El progreso también ha traído una problemática mixta, unas tuberías en las que, en función de las circunstancias, el flujo circula en uno u otro régimen. Hablamos de redes de drenaje del agua de lluvia de las ciudades. Estas tuberías normalmente trabajan en lámina libre cuando por ellas circulan caudales iguales o inferiores a los de proyecto. Básicamente, su funcionamiento, permite conectar el colector con la superficie de la calle, facilitando así la incorporación del agua de lluvia, pero cuando el caudal que ingresa en el sistema supera el valor que como máximo, admite la conducción, el colector entra en carga y con relativa frecuencia, hay aire atrapado en la tubería. Esto puede generar transitorios violentos que ponen en peligro la integridad del sistema.



Figura 1 - Conducción forzada para el abastecimiento de agua de la ciudad de Cádiz por medio de un sifón en época romana

2.2-El estado actual de la Ingeniería Hidráulica

Los fundamentos de los transitorios hidráulicos se establecen al compás de las centrales ligadas a las grandes presas que se construyen durante la primera mitad del siglo XX. Para situarse en contexto convendrá decir que los avances del conocimiento van mucho más deprisa que los de los métodos constructivos. Ello se evidencia durante la construcción de la presa Hoover (221 m de altura y 380 m de anchura), causante final del cambio de fisionomía de Las Vegas. Aunque la ciudad nace con el siglo XX, se trata de una ciudad pequeña y dependiente de las comunicaciones por carretera y ferrocarril. En 1931, al inicio de las obras de la presa, la ciudad tiene una población de poco más de 5000 habitantes. En la obra tomaron parte más de 5000 personas, lo que hizo crecer la aparición de casinos y fomentó la vida nocturna que a día de hoy define la ciudad.

Con una potencia inicial de 1345 MW (hoy, 2000 MW), en su momento fue la central hidroeléctrica más grande del mundo. La tecnología de las turbinas nunca fue un factor limitante puesto que a excepción de la Kaplan, que nace en 1910, el resto se desarrollaron en el siglo XIX. En esta época ya se había solucionado el problema del transporte y almacenamiento de energía (primera central de bombeo en 1902 en Suiza).

Dicho esto, solo quedaba un problema, y era la seguridad de las instalaciones en base al cálculo de transitorios que en ellas se generaban. La motivación para el estudio de los mismos fue máxima. De hecho, fue la rotura de una tubería de una central hidroeléctrica en 1902 en Terni (100 Km al norte de Roma) lo que despertó en Allievi el interés por el golpe de ariete. Pocos años después establecería unos fundamentos que todos querían confirmar.

La necesidad fue la que hizo que las primeras décadas del siglo XX fueran las más fructíferas en cuanto al avance del estudio del golpe de ariete. Desde entonces, en lo que concierne a fundamentos, no ha habido avances significativos. El cuerpo de doctrina está muy bien recogido en numerosos libros. Dos de ellos. Dos de ellos (Chaudhry, 1987; Wylie y Streeter, 1993) destacan sobre el conjunto. Será la aparición de los ordenadores lo que revolucionará unos cálculos tan tediosos como complejos (Marchal et al., 1965), sobre todo si se acomete el estudio de sistemas complejos, con la infinidad de posibilidades de transmisión y reflexión de ondas de presión que presentan. Desde el primer momento se vio que así iba a ser, y hoy en día es impensable el cálculo manual de un transitorio hidráulico de cierta complejidad.

2.3-Importancia del estudio de los transitorios

Ya se ha visto en los puntos precedentes el origen y las motivaciones que impulsaron el estudio de los transitorios hidráulicos. El flujo permanente a presión comienza a estudiarse a fondo en cuanto el uso de las tuberías a presión comienza a generalizarse. Ya se ha visto que esto ocurre en el siglo XVIII. De hecho la ecuación de Bernoulli se conoce desde 1738 y a ella le seguirá la conocida expresión de Chézy en la que por primera vez se introduce la fricción para flujos en lámina libre. Su adecuación a tuberías de presión es posible gracias a las investigaciones realizadas por Weisbach y Darcy a mediados del s.XIX. Pronto culminarán en la fórmula universal de la pérdida de carga en tuberías, hoy plenamente vigente y que, en su honor, es conocida con el nombre de Darcy-Weisbach. Como se ha visto en el punto precedente, los fundamentos del golpe de ariete los establecerá en 1913, más de medio siglo después, Allievi.

Con todo, los dos tipos de análisis de flujo (estacionario y transitorio) son tan necesarios como complementarios. El flujo estacionario estudia las condiciones más habituales de una instalación y, por tanto, su diseño debe realizarse con el concurso de las expresiones que lo caracterizan. Y así, el diámetro de una tubería debe seleccionarse a partir del estudio del sistema en régimen estacionario. Y si, como resulta cada vez más frecuente, las condiciones de servicio cambian con el tiempo, para dimensionar la instalación hay que situarse en el “centro de gravedad” de las diferentes situaciones de régimen posibles. Hay, pues, que identificar la *condición estacionaria más representativa*, a la que le corresponden unas magnitudes hidráulicas constantes en el tiempo, consecuencia de haber considerado también invariables las condiciones de funcionamiento de la instalación. También hay que caracterizar las condiciones de contorno (demandas) y el estado de los elementos complementarios. A saber, alturas de agua de los depósitos, grado de apertura de las válvulas, o en fin velocidad de giro de las bombas. Después hay que determinar el estado de equilibrio hidráulico del sistema, cálculo relativamente sencillo en sistemas simples y mucho más complejo en redes. Por ello el artículo de Hardy Cross (1936), que introduce el método iterativo para el análisis de sistemas complejos, en su honor conocido con su nombre, ha jugado un papel decisivo.

Hay que tener en cuenta que nada es permanente. Sin embargo los cambios son muy lentos, casi imperceptibles, y por ello pueden modelarse con ecuaciones estacionarias en las que la variable “tiempo” no interviene. Un hecho que no nos puede hacer ignorar que, con la mirada puesta a medio-largo plazo, toda instalación hidráulica es un sistema dinámico, ya que ninguna variable es estacionaria. Todos los flujos, bien de forma gradual, bien repentina, cambian o se ajustan continuamente. Desde el primer llenado de un depósito hasta el final de la vida útil de la instalación.

Y es precisamente de estos últimos, de los cambios más bruscos, de los que nos ocupamos. Las instalaciones se arrancan y se paran, pasando en unos pocos segundos de un estado en reposo a otro de funcionamiento normal. Y a la inversa. Es en estas circunstancias cuando el sistema, en especial las tuberías, debe soportar las mayores tensiones. El principal objetivo del estudio de estos fenómenos transitorios es cuantificarlas y verificar que pueden ser absorbidas por el sistema sin que la instalación corra riesgo alguno. Como también lo es, si un primer análisis ha evidenciado un potencial riesgo de rotura, dimensionar los elementos de protección que lo anule.

Queda claro que el conocimiento actual de los transitorios hidráulicos está bien fundamentado y ofrece, desde el punto de vista estrictamente ingenieril, muy pocas lagunas. El advenimiento, ya avanzada la segunda mitad del siglo XX, de los ordenadores y las enormes posibilidades derivadas de poder automatizar sin esfuerzo humano la realización de cálculos tediosos, confiere una enorme tranquilidad a la hora de estudiar la seguridad de un sistema. Este es el hecho diferencial que cambia por completo el panorama de los transitorios hidráulicos. Y así, a finales de la década de los setenta aparecen las primeras versiones de los libros estándar, quedando perfectamente establecido el cuerpo básico ingenieril del estudio de los transitorios hidráulicos. Quedan por resolver unas cuantas cuestiones de un interés más académico que técnico y unos pocos problemas en los que el principal obstáculo es poder caracterizar bien el estado inicial del sistema.

En definitiva, dado que los sistemas hidráulicos a presión están sometidos a una gran gama de condiciones operacionales que varían en el tiempo, para garantizar su integridad es imprescindible identificar y caracterizar las más desfavorables. El análisis de estas condiciones mediante modelos dinámicos realistas es esencial tanto en la fase de diseño como en la de operación. Porque de una parte hay que fijar la capacidad de depósitos, dimensionar el espesor de las conducciones, verificar la resistencia mecánica de los demás elementos de la instalación y, en definitiva, seleccionar y dimensionar los dispositivos de protección que sean necesarios. Y, de otra, hay que garantizar una operación segura y eficiente, evitando flujos inversos, velocidades excesivamente bajas o vibraciones en las tuberías.

2.4-Tipos de transitorios. Necesidad de su análisis y control

En Hidráulica la clasificación tradicional de los flujos en función de la variable temporal se resume como sigue:

- a) Flujo permanente o estacionario
- b) Flujo variable o no estacionario

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

b1) Flujo periódico (oscilatorio o pulsátil)

b2) Flujo transitorio

c) Flujo uniforme o no uniforme

En la práctica, un régimen hidráulico a presión se llama permanente o estacionario cuando las variaciones de las magnitudes hidráulicas que lo definen (presión, velocidad, etc.) pueden considerarse constantes en el tiempo en cada punto (o sección de la tubería). Y al contrario, un flujo es variable (o no estacionario) si estas magnitudes cambian en el tiempo. Por último, un flujo variable es periódico si tiene una estructura en el tiempo también periódica. Este, a su vez, se divide en oscilatorio cuando el flujo medio es nulo (es el caso del movimiento de un líquido en un tubo en U) y pulsátil cuando, siendo periódico, su caudal medio no lo es (las bombas de émbolo generan un flujo de estas características). Por otra parte se denomina transitorio al régimen hidráulico no estacionario entre dos regímenes permanentes (eventualmente uno de ellos puede corresponder al reposo).

Cualquier alteración, provocada o fortuita, en las condiciones de funcionamiento de un sistema que conduzca a una rápida variación del caudal en un punto del mismo, se traduce también en una variación en la presión. En el caso de que el transitorio tenga entidad suficiente para que los efectos elásticos se manifiesten, tanto en el fluido como en la tubería (si el fluido es un líquido, se requiere que las variaciones de presión sean significativas), el fenómeno se denomina golpe de ariete.

La mayoría de los fallos provocados por este fenómeno suelen quedar en el anonimato, sin embargo, algunos sí han sido documentados, como el accidente ocurrido en la planta de Sayano-Shushenskaya (Siberia, Rusia) en el año 2009, cuando la central sufrió un catastrófico aumento de presión en la turbina número 2 generado por un cierre repentino de las compuertas. Al cierre le siguió un fuerte golpe de ariete en la tubería de carga causando su colapso. De inmediato el agua inundó el motor y los recintos de las turbinas (Figura 2) provocando la explosión del transformador (Daily Mail, 2009).



Figura 2 - Accidente en la central hidroeléctrica de Sayano–Shushenskaya (2009)

2.5-Fenómenos transitorios en conducciones

Se ha visto cómo la ecuación de Euler-Bernoulli generalizada o con pérdidas puede utilizarse para el cálculo de conducciones. Si centramos la atención en los posibles fenómenos transitorios que puedan aparecer, por simplicidad se considerarán despreciables los efectos viscosos y por tanto las pérdidas de carga. De esta manera, la ecuación de Euler-Bernoulli para un líquido ideal en el que las fuerzas másicas se reducen a la gravedad puede ponerse como sigue:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} + gz \right) = 0,$$

sobre una línea de corriente con una coordenada x a lo largo de ella. Esta ecuación permite estudiar movimientos no estacionarios dentro de las restricciones antes planteadas. Por ejemplo, es posible estudiar el proceso de apertura de un conducto desde depósito. Los resultados obtenidos podrían entonces modificarse con algún tipo de correlación para tener en cuenta el efecto disipativo de las pérdidas de carga. Puede comprobarse en la ecuación anterior que los saltos de presión estática en régimen estacionario son del orden de la presión dinámica, $\Delta p \sim \rho v^2$.

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

Sin embargo, en algunos casos las sobrepresiones pueden ser tan altas que la hipótesis de densidad constante (líquido perfecto) deja de ser válida, y por tanto la ecuación de Euler-Bernoulli no debe aplicarse. Estas sobrepresiones tan grandes pueden también modificar la dimensión de la sección del conducto introduciendo conceptos de elasticidad del mismo, hasta el momento considerado como rígido. El fenómeno es conocido en la práctica como golpe de ariete; se produce en los conductos al cerrar o al abrir rápidamente una válvula y al poner en marcha o parar una máquina hidráulica, o también al disminuir bruscamente el caudal; los cambios bruscos de energía cinética dan lugar a sobrepresiones o depresiones importantes. El fenómeno debe estudiarse de forma diferenciada, estableciendo las ecuaciones de conservación apropiadas que se verán después.

Al menos, la ecuación de Euler-Bernoulli sirve para estimar en este caso las sobrepresiones necesarias para cambiar la velocidad de orden U de modo significativo, durante un tiempo t_o en un conducto de longitud L y diámetro D ,

$$\Delta p \approx \rho L \frac{U}{t_o}.$$

Si el tiempo característico de parada lo impone la propagación de las ondas de presión en el tubo, el orden de magnitud de la velocidad de estas ondas será c , por lo que: $t_o = L/c$, siendo esta velocidad c del orden de 1000 m/s en un líquido. Con una longitud de un kilómetro, la onda recorre el tubo sólo en un segundo. Las sobrepresiones para una velocidad original de 10 m/s , serían en este caso del orden

$$\Delta p \approx \rho L \frac{U}{t_o} \approx \rho U c \approx 10^3 \cdot 10 \cdot 10^3 \approx 10^7 \text{ Pa} = 100 \text{ bares}.$$

Si además el tiempo característico de cierre es menor (como ocurre durante el cierre rápido de una válvula), las sobrepresiones producidas pueden ser incluso mayores a éstas. Las variaciones de presión producidas en este fenómeno transitorio deben incluirse de forma obligada en el proceso de diseño de cualquier instalación hidráulica, en el caso de que un análisis de la instalación indique probabilidad de aparición de golpe de ariete.

En el caso de una instalación de bombeo, la parada repentina de la bomba hace que la columna de líquido que se estaba bombeando se pare y caiga posteriormente con una sobrepresión muy alta sobre la misma bomba, de manera que bomba y/o conducción pueden verse gravemente afectadas.

Otro caso de interés es el que ocurre en las centrales hidroeléctricas, en las que se ha de reducir bruscamente el caudal suministrado a las turbinas hidráulicas acopladas a los alternadores, cuando se anula la carga del alternador. Si el cierre es muy brusco, el golpe de ariete generado puede afectar gravemente al sistema distribuidor o al mismo rodete.

2.6-Ecuaciones del movimiento con compresibilidad despreciable

Ecuaciones del movimiento. Condiciones iniciales y de contorno

En movimientos casi unidimensionales en el interior de un conducto (coordenada longitudinal x , área lentamente variable $A(x)$), la ecuación de continuidad es

$$\rho v A = G(t) \rightarrow v(x,t) = \frac{Q(t)}{A(x)},$$

habiéndose supuesto que la compresibilidad del fluido es despreciable, y por tanto que se comporta como un líquido perfecto con densidad constante. Si U es el orden de magnitud de las velocidades longitudinales, y U_T el de las transversales, es fácil relacionarlas entre sí y comprobar que las variaciones transversales de presión son despreciables frente a las longitudinales,

$$U_T \approx U \frac{D}{L} \rightarrow \Delta_T P \approx \rho D \frac{U_T^2}{D} \ll \Delta_L P \approx \rho U^2.$$

Esto significa que la presión, al igual que la velocidad, es uniforme transversalmente en cada sección. Se puede aplicar al tubo de corriente (o al conducto) la ecuación de Euler-Bernoulli antes planteada, e integrada longitudinalmente entre la entrada y un punto x genérico, resulta

$$\int_0^x \rho \frac{\partial v}{\partial t} dx = - \left(p + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho U_p \right)_0^x.$$

Introduciendo la ecuación de continuidad y teniendo en cuenta que se supone el área constante con el tiempo, aunque no uniforme en el espacio, resulta

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{1}{A(x)} \frac{dQ}{dt}$$

y por tanto si integramos entre el origen y el fin del conducto de longitud L resultará

$$\rho \frac{dQ}{dt} \int_0^L \frac{dx}{A(x)} = \left(p + \frac{1}{2} \rho \frac{Q^2}{A(o)^2} + \rho U_p \right)_o - \left(p + \frac{1}{2} \rho \frac{Q^2}{A(L)^2} + \rho U_p \right)_L,$$

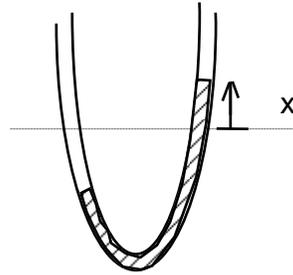
que también se puede escribir como

$$\rho \frac{dQ}{dt} \int_0^L \frac{dx}{A(x)} = p(o) - p(L) + \frac{1}{2} \rho Q^2 \left(\frac{1}{A(o)^2} - \frac{1}{A(L)^2} \right) + \rho [U_p(o) - U_p(L)]$$

Esta ecuación diferencial permite obtener el caudal en función del tiempo $Q(t)$ si se conocen la condición inicial $Q(0)$ y las condiciones de contorno $p(0,t)$ y $p(L,t)$. Si por el contrario, el caudal fuera el dato, permitiría obtener la diferencia de presiones necesaria entre los extremos del conducto $p(0) - p(L)$, en función del tiempo.

Ejemplo de aplicación: movimiento oscilatorio en un tubo en forma de U

El movimiento de un líquido en un tubo en forma de U abierto a la atmósfera por sus extremos tendrá como condiciones de contorno $p(0,t) = p(L,t) = p_a$.



Como el caudal para una sección constante está relacionado con la variación de la coordenada que define la superficie libre del líquido

$$Q = Av = A \frac{dx}{dt},$$

es fácil obtener la ecuación diferencial que la determina,

$$L \frac{d^2x}{dt^2} + 2gx = 0,$$

donde L es la longitud que ocupa el líquido.

La solución de esta ecuación diferencial es de tipo oscilatorio en la forma

$$x = x_o \cos\left(\sqrt{\frac{2g}{L}}t\right),$$

y el periodo de oscilación es por lo tanto

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{2g/L}} = \pi \sqrt{\frac{2L}{g}}.$$

2.7-Procesos de apertura. Aceleración de la corriente en un tubo

En el caso de procesos de apertura de una válvula o de establecimiento de la corriente, se verá a continuación que el flujo puede considerarse como incompresible, y por tanto aplicarse sin problemas la ecuación de Euler-Bernoulli. Considérese un tubo que sale de un depósito y que está lleno inicialmente de líquido en reposo. En su extremo tiene una válvula de área de paso $A_s(t)$ que se abre a partir del instante inicial. La ecuación de Euler-Bernoulli puede ponerse

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} + gz \right) = 0,$$

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

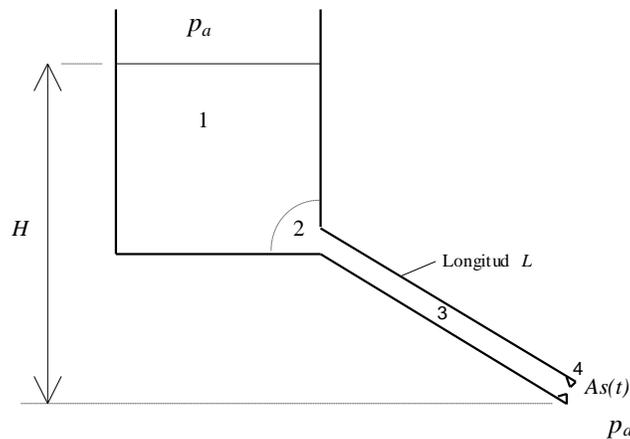
de la que se conoce la solución estacionaria final,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} + gz \right) = 0 \rightarrow 0 + \frac{p_a}{\rho} + gz = \frac{v_s^2}{2} + \frac{p_a}{\rho} + 0 \rightarrow v_s = \sqrt{2gH},$$

que es la ecuación de *Toricelli*. Si se quiere analizar el proceso de apertura y aceleración, es necesario imponer las siguientes condiciones iniciales

$$t = 0 \rightarrow A_s = 0, v = v_s = 0.$$

Se divide el campo fluido por zonas, y distinguiremos la velocidad en el depósito, la velocidad en el conducto y la velocidad en la boquilla de salida, respectivamente, por v_d, v, v_s .



1 Depósito: la ecuación de continuidad indica que la velocidad es mucho menor que en el tubo, y que por tanto la distribución de presiones corresponde a la dada por la fluidoestática,

$$v_d \ll v \Rightarrow p = p_a + \rho g(H - z).$$

2 Entrada al tubo, de tamaño característico igual al diámetro del tubo D : tiene un movimiento casiestacionario pues la diferencia de presión que significa el término de aceleración en esta zona de entrada es despreciable frente a la diferencia de presión general en el tubo,

$$\Delta_e \left(\frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gz \right) \approx \frac{U}{t_o} D \ll \frac{U}{t_o} L \approx \Delta_L \left(\frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gz \right).$$

En ese tramo la ecuación es la casi-estacionaria, y se puede obtener la presión en la sección de entrada al tubo,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} + gz \right) = 0 \rightarrow p_e + \frac{1}{2} \rho v^2 = p_a + \rho g(H - z_e).$$

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

3Tubo: en el conducto propiamente dicho el área de paso es constante, lo que significa que la ecuación de continuidad conduce a que la velocidad es uniforme en el conducto, de modo que v es función del tiempo, pero no de x ,

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \rightarrow \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \rightarrow v = v(t).$$

La ecuación de Bernoulli se reduce a

$$\frac{dv}{dt} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p}{\rho} + gz \right) = 0,$$

con las siguientes condiciones iniciales $t = 0: v = 0$; y de contorno:

$$x = 0: p = p_e; \quad x = L: p = p_L.$$

El proceso de aceleración tiene un tiempo característico que se obtiene de

$$\frac{U}{t_o} \approx \frac{\Delta(p/\rho + gz)}{L} \approx \frac{gH}{L} \approx \frac{U^2}{L},$$

que significa

$$t_o \approx \frac{L}{U} \approx t_r \approx \frac{L}{\sqrt{gH}}.$$

El tiempo característico en la aceleración es equivalente al de residencia y hay que retener por tanto ambos términos (inercial y convectivo), salvo que la ley de apertura sea aún más lenta. También se puede deducir de lo anterior que no se producen sobrepresiones, pues aunque la apertura sea más rápida, el tiempo característico de la aceleración no varía.

4Boquilla de salida: de ley de apertura $A_s(t)$, de tiempo característico de apertura t_a , y de longitud característica de la zona D . Si se llama a la porción del área de salida respecto a la del conducto

$$\alpha(t) = \frac{A_s(t)}{A},$$

se tiene que por continuidad la relación entre la velocidad en el tubo y la de la sección de salida es

$$vA = v_s A_s \rightarrow v_s = \frac{v}{\alpha}.$$

Si para esta zona se valora la importancia relativa del término no estacionario, tendremos una relación entre éste y el convectivo dada por

$$\frac{U/t_c}{U^2/D} = \frac{D}{U} \frac{1}{t_c} = \frac{D}{L} \frac{t_o}{t_c},$$

siendo t_c el tiempo característico del proceso de aceleración en esta zona, que es el mayor entre el tiempo de apertura y el de aceleración en el conducto $t_c = \{t_a, t_o\}$, por lo que el cociente t_o/t_c es a lo sumo la unidad. Como $D \ll L$, el término no estacionario es siempre despreciable y el movimiento en la boquilla responde a un flujo casi-estacionario, de modo que se cumplirá que

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} + gz \right) = 0 \rightarrow \frac{v^2}{2} + \frac{p_L}{\rho} = \frac{v_s^2}{2} + \frac{p_a}{\rho} \rightarrow \frac{p_L}{\rho} = \frac{p_a}{\rho} + \frac{1}{2} v^2 \left[\frac{1}{\alpha(t)^2} - 1 \right].$$

El sistema de ecuaciones que se ha ido desarrollando a lo largo de esta sección resuelve el problema planteado. Lógicamente, la solución del mismo dependerá de la rapidez de la apertura de la válvula; existen dos límites: apertura instantánea de la válvula, y apertura lenta de la misma. Una vez obtenida $v(t)$, tanto en un límite como en el otro, o en situaciones intermedias, es fácil obtener la presión en los puntos significativos. No hay sobrepresiones en ningún caso y las diferencias se mantienen siempre de orden gH o ρv^2 . No es preciso por lo tanto incluir la compresibilidad del líquido o la elasticidad del tubo para resolver el problema.

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

3-Estudio particular del Golpe de Ariete

Se estudia ahora el caso general en el que es preciso tener en cuenta tanto la compresibilidad del fluido como la elasticidad del material de la tubería. En este caso, las sobrepresiones son tan importantes, que producen un aumento de la densidad del líquido, y al mismo tiempo una dilatación de la tubería. Para ello, es preciso que tenga lugar un proceso brusco de parada de la corriente; de alguna forma, la energía cinética del flujo pasa repentinamente a energía de presión, de modo que se originan ondas de compresión-expansión que recorren la tubería.

3.1-Situaciones en las que se puede dar un golpe de ariete

La maniobra ejemplificada en el caso anterior no es la única en la que se puede dar este fenómeno, existen diversas maniobras donde podrán darse:

- Cierre y apertura de válvulas
- Arranque de Bombas
- Detención de Bombas
- Funcionamiento inestable de Bombas
- Llenado inicial de tuberías
- Sistema de protección contra incendios

El fenómeno aparecerá cuando, debido a cualquier causa, en una tubería se produzcan variaciones de velocidad, y por consiguiente, de presión. Estas son maniobras de normal uso en instalaciones hidráulicas por lo que se deberá realizar el uso adecuado gracias a un estudio previo para evitar un golpe de ariete que provoque serios daños en la instalación (Figura 3).



Figura 3 - Colapso de una tubería provocado por la depresión sufrida en un Golpe de Ariete

3.2-Ecuaciones del movimiento con compresibilidad apreciable

Al sistema de ecuaciones que resuelve el problema puede llegarse a partir de la forma unidimensional de las ecuaciones de continuidad y de cantidad de movimiento,

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho A)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v A)}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = 0, \end{cases}$$

ecuaciones a las que es preciso añadir la ley de la elasticidad del conducto $A = A(p)$ y la de compresibilidad del líquido $\rho = \rho(p)$, más las correspondientes condiciones iniciales y de contorno. El efecto de las fuerzas másicas se incluye en el sistema anterior como presión reducida en el término de presión. Se podrá obtener entonces el campo de presiones y velocidades $p(x,t)$ y $v(x,t)$.

El golpe de ariete es un caso particular del problema, que se produce por ejemplo en el caso de un *cierre instantáneo* en una válvula, lo que se introduce en el sistema de ecuaciones anterior a través de las correspondientes condiciones iniciales y de contorno,

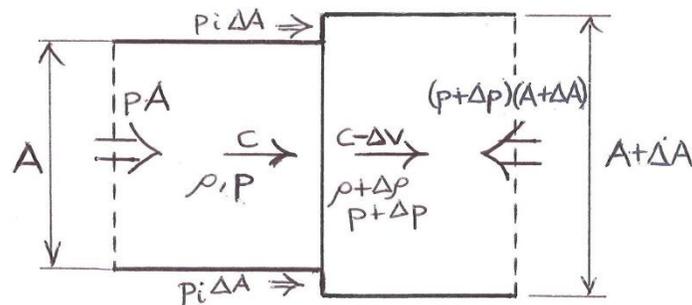
$$\begin{aligned} t = 0 &\Rightarrow \Delta p = 0, v = v_0, \\ t > 0 &\Rightarrow \begin{cases} x = 0, \Delta p = 0 \\ x = L, v = 0 \end{cases} \end{aligned}$$

El problema así planteado, para el caso extremo del golpe de ariete, tiene una solución analítica a través del denominado *método de las características*, que es utilizado como procedimiento de solución de sistemas de ecuaciones diferenciales en flujo transitorio unidireccional para gases.

Sin embargo, se desarrolla a continuación un análisis sobre un elemento diferencial de tubería en el que tiene lugar el paso de la onda de sobrepresión, con objeto de obtener la solución del problema sin necesidad de plantear el método matemático de las características. Aunque las presiones sean muy elevadas, pueden efectuarse las hipótesis $\Delta\rho \ll \rho$, $\Delta A \ll A$, siendo A el área de la sección transversal de la tubería. Es preciso admitir la existencia de una onda de presión que se mueve con velocidad c a lo largo del conducto; las variaciones de la velocidad del fluido Δv pueden suponerse $\Delta v \ll c$, pues como se ha dicho anteriormente, c es del orden de 1000 m/s en el caso de líquidos. Para estudiar el fenómeno, se despreciarán los efectos viscosos.

3.3-Salto de presión

En el esquema adjunto se muestra un volumen de control solidario con la onda, de manera que el fluido atraviesa a esta onda con una velocidad c .



La onda estudiada es de compresión, de modo que a medida que avanza, introduce una dilatación en la tubería ΔA ; la velocidad del fluido relativa a la onda en la entrada es c , y en la salida, $c - \Delta v$, menor. Se plantean a continuación las ecuaciones de conservación sobre este volumen de control. La *ecuación de continuidad* es

$$\rho c A = (\rho + \Delta\rho)(c - \Delta v)(A + \Delta A).$$

Veáse en la figura que la fuerzas de presión que actúan en las caras de entrada y de salida son pA y $(p + \Delta p)(A + \Delta A)$, respectivamente. En la sección donde actúa la onda de compresión, existe una diferencia de área dada por ΔA ; en esta sección actúa una fuerza $(p_i \Delta A)$, con p_i una presión intermedia entre p y $p + \Delta p$. La *ecuación de cantidad de movimiento* queda entonces

$$-\rho c^2 A + (\rho + \Delta\rho)(c - \Delta v)^2 (A + \Delta A) = pA - (p + \Delta p)(A + \Delta A) + p_i \Delta A,$$

de manera que dividiendo esta expresión por A , desarrollando el término $(p + \Delta p)(A + \Delta A)$, y simplificando, se tiene

$$\rho c \Delta v = \Delta p + (p + \Delta p - p_i) \frac{\Delta A}{A},$$

expresión en la que como $(p + \Delta p - p_i)$ es del orden de Δp , resulta que el término de la derecha es un producto de dos incrementos, y se puede despreciar frente a Δp . De este modo, se llega a la expresión final

$$\Delta p = \rho c \Delta v,$$

que fija el salto de presión producido por la onda de compresión proporcional a la densidad del fluido, a la velocidad de propagación de la onda y al salto de velocidades del fluido antes y después de la onda. Esta expresión se conoce como de *Allievi*.

3.4-Velocidad de propagación de la onda

Para hallar la velocidad de propagación de la onda, partimos de nuevo de la ecuación de continuidad. Esta se puede poner de la siguiente forma:

$$c + \Delta v - \Delta v = \frac{(\rho + \Delta\rho)(c - \Delta v)(A + \Delta A)}{\rho A},$$

y haciendo operaciones

$$\frac{\Delta v}{(c - \Delta v)} = \frac{(\rho + \Delta\rho)(A + \Delta A)}{\rho A} - 1 = \frac{(\rho + \Delta\rho)(A + \Delta A) - \rho A}{\rho A}.$$

Se recupera ahora la expresión hallada anteriormente para el salto de presión, de modo que se sustituye $\Delta v = \Delta p / \rho c$ en la ecuación anterior y se desprecia Δv frente a c ,

$$\frac{\Delta p}{\rho c (c - \Delta v)} = \frac{(\rho + \Delta\rho)(A + \Delta A) - \rho A}{\rho A} \Rightarrow \frac{\Delta p}{\rho c^2} = \frac{(\rho + \Delta\rho)(A + \Delta A) - \rho A}{\rho A}.$$

Si se desarrolla el miembro de la derecha de la ecuación anterior, operando, se obtiene

$$\frac{1}{c^2} = \frac{1}{A} \frac{\Delta(\rho A)}{\Delta p},$$

de manera que tomando el límite con incrementos pequeños, pasamos a derivadas

$$\frac{1}{c^2} = \frac{1}{A} \frac{d(\rho A)}{dp} = \frac{d\rho}{dp} + \frac{\rho}{A} \frac{dA}{dp}$$

El término $d\rho/dp$ se relaciona con la velocidad del sonido α ,

$$a^2 = \left. \frac{\partial p}{\partial \rho} \right|_{\text{entropía constante}} = \frac{E_0}{\rho},$$

que para el caso de un líquido puede calcularse a partir de su módulo de elasticidad. En el caso del agua, su módulo de elasticidad está en torno a $E_0 = 2 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$, y su densidad $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, de modo que la velocidad de propagación del sonido en el agua resulta en torno a 1400 m/s , del orden de unas tres veces superior a la velocidad del sonido en el aire.

El término $(\rho/A)(dA/dp)$ representa el efecto de la dilatación del material de la tubería. Si el material fuera infinitamente rígido, entonces $dA/dp = 0$, y se cumple que $c = a$; en general, se cumplirá según la ecuación anterior que $c < a$.

Puede estimarse del valor de dA/dp mediante un equilibrio de fuerzas en la sección transversal de la tubería.

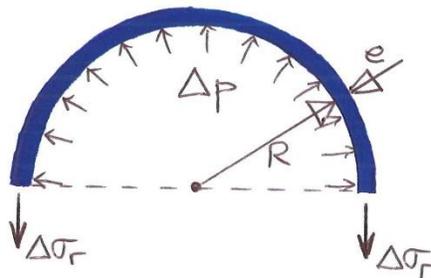


Figura 4 - Esquema de fuerzas en una sección de una tubería

En la Figura 4, la componente vertical de la fuerza ejercida por la presión debe equilibrarse con la tensión radial actuando sobre el espesor de la tubería,

$$\Delta p(2R) = \Delta \sigma_r(2e) \Rightarrow \Delta \sigma_r = \frac{R}{e} \Delta p,$$

siendo la elongación relativa del radio

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \sigma_r}{E} = \frac{R \Delta p}{eE},$$

con E el módulo de elasticidad el material de la tubería. Por tanto, el incremento de área del tubo es $\Delta A = 2\pi R(\Delta R)$, y sustituyendo en la expresión anterior, puede calcularse el término

$$\frac{\rho}{A} \frac{dA}{dp} = \frac{\rho}{E} \frac{2R}{e}.$$

Por tanto, la velocidad de propagación de las ondas de presión es

$$\frac{1}{c^2} = \frac{1}{a^2} + \frac{\rho}{E} \frac{2R}{e}$$

expresión llamada de *Joukowski*. A menudo, a esta velocidad se le llama en ciertos textos *celeridad*.

Como cabía esperar, obsérvese que si el módulo de elasticidad de la tubería es infinito (tubería infinitamente rígida), la celeridad es igual a la velocidad del sonido. Puesto que el módulo de elasticidad del acero es del orden de 2×10^8 kN/m², se obtiene como valores habituales de c los comprendidos entre 600 y 1200 m/s, inferiores en cualquier caso a la velocidad del sonido.

En el caso de que existan varios tramos de tubería, con diferentes longitudes, diámetros o espesores, se calcula la celeridad media por

$$c_m = \frac{\sum_i^N L_i}{\sum_i^N L_i / c_i}$$

3.5-Descripción del golpe de ariete

Siguiendo con el ejemplo del flujo establecido en un conducto que sale de un depósito, se supondrá que la velocidad con la que se mueve inicialmente el fluido en el conducto es v_0 , y que a la salida descarga mediante un orificio de área $A_s \ll A$, de manera que se tiene que $v_s \gg v_0$. (Figura 5)

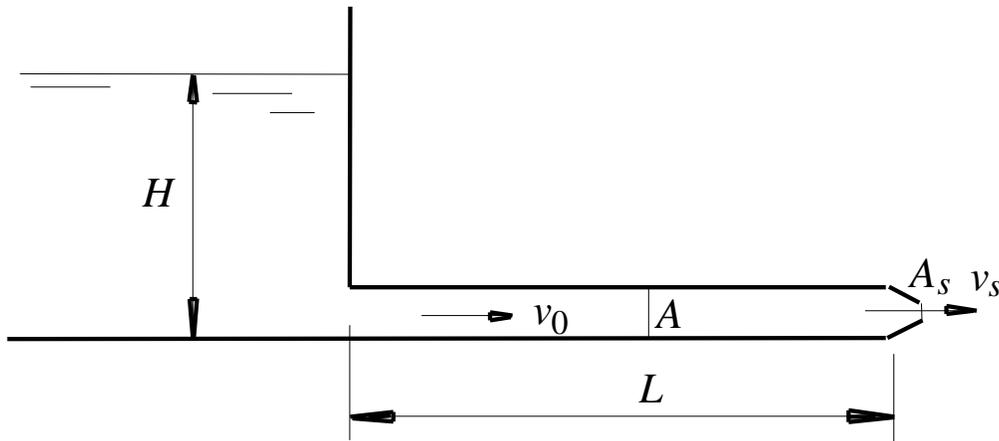


Figura 5- Esquema depósito y tubería

La velocidad en la salida es, por la ecuación de Torricelli:

$$v_s = \sqrt{2gH},$$

y puede demostrarse además que por la restricción de salida, en todo el conducto existe prácticamente la presión del fondo del depósito. Vamos a ver a continuación qué sobrepresiones adicionales sobre la presión en el fondo del depósito crearía el golpe de ariete debido a un *cierre brusco*. El tiempo característico del problema es entonces el tiempo de cierre de la válvula t_0 ; este tiempo debe ser lo suficientemente pequeño como para considerar un cierre brusco. La solución analítica del método de las características muestra que en este caso se produce un fenómeno cíclico con ondas de compresión-expansión-expansión-compresión que van recorriendo la tubería desde la válvula al depósito y viceversa. Vamos a describir y a justificar a continuación este fenómeno.

Inicialmente, al cerrar la válvula de forma súbita, el fluido se queda en reposo produciéndose una onda de compresión que se propaga a la izquierda. Como se ha indicado antes, esta sobrepresión es $\Delta p = \rho c v_0$. La onda llega hasta el depósito, donde se refleja. La condición de reflexión es que el fluido debe quedar detrás de la onda a la presión del depósito, $\Delta p = 0$, pero como delante de la onda el fluido está con $\Delta p > 0$, la onda es ahora de expansión. Cuando esta onda de expansión llega a la válvula, se refleja, siendo la condición de reflexión que el fluido quede en reposo detrás de la onda.

Delante de la onda el fluido se mueve a la izquierda con $-v_0$, luego la condición de reflexión impone que la onda comunique al fluido un incremento de velocidad hacia la derecha, alejándose de la onda, por lo que la onda es de expansión y comunica una depresión al fluido $\Delta p = -\rho c v_0$.

Esta onda llega al depósito y se refleja, con la condición de que el fluido quede a la misma presión del depósito, $\Delta p = 0$; como la presión delante es menor, la onda debe ser de compresión, y comunica al fluido una velocidad hacia la derecha $v = v_0$. Las condiciones $\Delta p = 0$, $v = v_0$ son las que se tenían inicialmente. A partir de este momento el proceso se vuelve a repetir, y duraría infinitamente; en la práctica, los procesos disipativos que se desprecian en la teoría ideal, producirían una amortiguación de estas ondas. A continuación se muestra gráficamente el proceso (Figura 6).

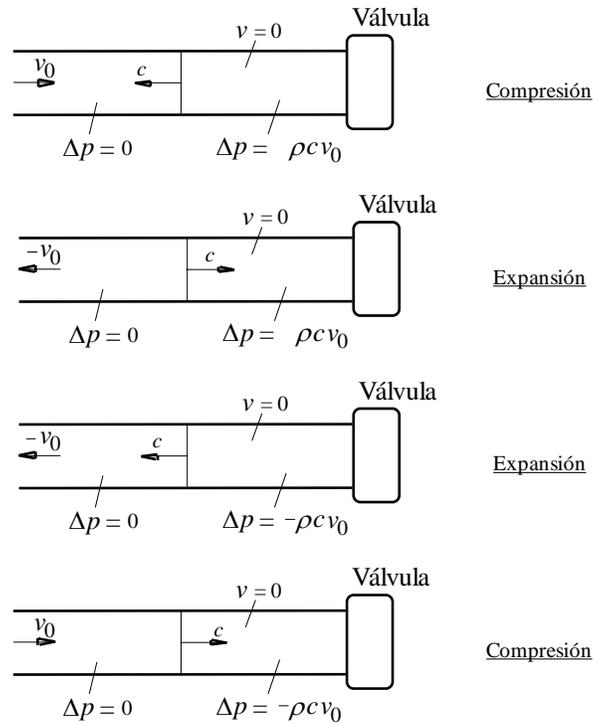


Figura 6 - Evolución grafica del Golpe de Ariete en una tubería a presión

Las sobrepresiones generadas deben ser soportadas por el material de la tubería; por otro lado, si las depresiones son grandes, la presión absoluta puede bajar y llegar incluso al valor de la presión de saturación del vapor del fluido, con lo que el agua herviría, apareciendo el fenómeno de la *cavitación*. En la Figura 7 se muestra el diagrama de sobrepresiones y depresiones junto a la válvula, en función del tiempo.

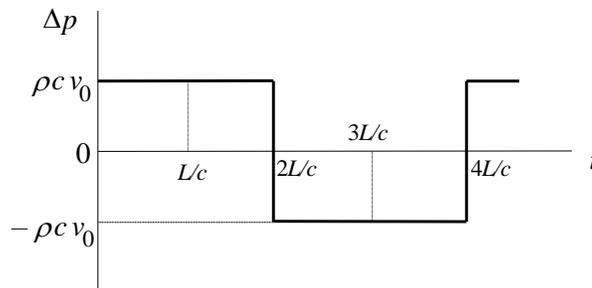


Figura 7 - Evolución sobrepresiones/depresiones junto a la válvula, en función del tiempo

3.6-Cálculo práctico del golpe de ariete. Tipos de cierre

El cálculo práctico del golpe de ariete puede llevarse a cabo a través del cálculo de *tiempos característicos*. Las relaciones entre estos clasifican el tipo de cierre.

- Si el *tiempo característico* del problema o *tiempo de cierre* de la válvula (t_0) es mayor que el *tiempo de residencia* de una partícula fluida en el conducto, $t_r = L/U$, siendo U la

velocidad media del fluido en la tubería, el término inercial es despreciable en las ecuaciones, y no se producen sobrepresiones. Este es el **cierre lento**.

- Si el tiempo de cierre es $t_0 \approx t_r$, el término inercial no es despreciable, siendo las sobrepresiones del orden de ρU^2 . No obstante, los efectos de compresibilidad siguen siendo despreciables. Este es el **cierre intermedio**.

- Si el tiempo de cierre es $t_0 < t_r$, y además $t_0 > t_{iv}$, siendo t_{iv} el tiempo de ida y vuelta de las ondas de presión, $t_{iv} = 2L/c$, se tiene un **cierre rápido, no instantáneo**. La sobrepresión generada puede calcularse de modo aproximado mediante la fórmula de **Michaud**, suponiendo que la ley de cierre de la válvula es lineal con el tiempo,

$$\Delta p = \frac{2\rho LU}{t_0},$$

siendo U la velocidad normal de funcionamiento, o velocidad de descarga, que se ha llamado antes v_0 . Si el cierre no es total, sino parcial, considerando que la velocidad en la tubería pasa desde una velocidad U_0 a otra U_1 , la sobrepresión puede calcularse por

$$\Delta p = \frac{2\rho L(U_0 - U_1)}{t_0}.$$

Nótese que en las fórmulas de Michaud interviene el tiempo de cierre de la válvula, siendo la sobrepresión inversamente proporcional a este tiempo de cierre, y directamente proporcional a la longitud de la tubería. En la mayoría de los casos prácticos, nos encontraremos con este tipo de cierre, de modo que las fórmulas de Michaud suelen ser las más utilizadas.

- Si el tiempo de cierre es $t_0 < t_r$, y además $t_0 < t_{iv}$ (aunque puede aceptarse que basta con que sean del mismo orden estos dos últimos tiempos), se tiene propiamente lo que se conoce por golpe de ariete; en este caso, se tiene un **cierre rápido, instantáneo**. Esta solución se conoce como de **Allievi**. Como se ha indicado anteriormente, la sobrepresión es

$$\Delta p = \rho c U,$$

si el cierre es total, y

$$\Delta p = \rho c (U_0 - U_1),$$

en caso de cierre parcial.

3.7-Influencia del tiempo de cierre

Sea considerado un cierre instantáneo de una válvula, una maniobra “teórica” que facilita la descripción física del fenómeno. Conviene recordar que el cierre instantáneo es una

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

abstracción de la realidad porque los órganos de cierre, por rápidos que sean, siempre exigen un tiempo mínimo para completar la obturación del caudal. El tiempo de cierre de la válvula está llamado a jugar un papel muy notable en el estudio del transitorio que genera, ya que las sobrepresiones y depresiones a las que estará sometida la tubería van a depender de su valor. Si la maniobra es muy rápida, la válvula cerrará por completo antes de que retorne la onda de depresión procedente del depósito. Por otro lado si la válvula cierra lentamente, habrá tiempo suficiente para que la onda de depresión actúe y compense el progresivo aumento de la presión antes de que se complete la obturación.

Para analizar cualitativamente la influencia del tiempo de cierre, se supone una maniobra de cierre superposición de un conjunto de maniobras elementales “instantáneas”. De este modo, el pulso de presión que se propaga por la conducción, es suma de muchos pulsos de presión infinitesimalmente superpuestos (Figura 8). De algún modo una maniobra real de cierre de una válvula puede considerarse la sucesión de pulsos infinitesimales (breves y finitos) en el tiempo. La primera maniobra elemental de reducción de sección provoca en la válvula una reducción de velocidad de V a $V-\Delta V$, la cual da origen a una sobrepresión inferior a la anulación instantánea de velocidad. Cada maniobra genera una pequeña sobrepresión en la sección de la válvula y una onda que va hacia el depósito. La presión en cada sección, es la resultante de las sucesivas variaciones correspondientes a las ondas elásticas incidente y reflejadas generadas por las perturbaciones elementales.

Si el cierre se produce en un tiempo inferior a dos veces la longitud de la tubería partido de la velocidad de la onda, en la válvula se alcanza la máxima sobrepresión antes que las primeras ondas regresen de vuelta. En este caso se alcanza el pulso máximo de Joukowski, o la suma de las onda infinitesimales generadas por los sucesivos cierres de la válvula hasta el cierre total. Este cierre se denomina cierre rápido, dado que aunque fuera muy rápido, no obtendría los valores de un cierre instantáneo.

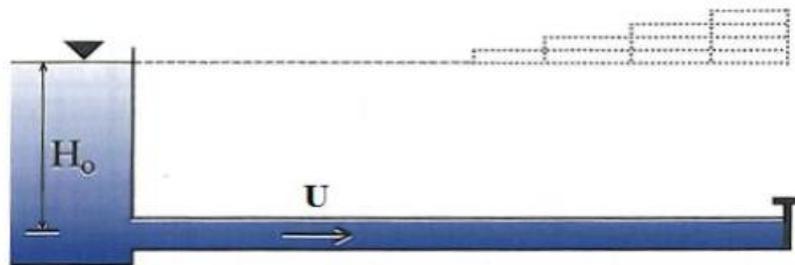


Figura 8 - Análisis de la sobrepresión tras el cierre de una válvula

Si por el contrario el tiempo de cierre fuera superior, la válvula aún no habrá completado el cierre cuando las primeras ondas negativas procedentes del depósito estén de vuelta. Estas ondas negativas de retorno, tras el nuevo rebote con la válvula, son origen de nuevas ondas,

también negativas, que de algún modo compensarán las ondas positivas que aún sigue generando el cierre de la válvula que aún no se ha completado. En consecuencia, al no alcanzarse la máxima sobrepresión, se hablará de cierre lento.

En el caso de una instalación de bombeo, la parada repentina de la bomba hace que la columna de líquido que se estaba bombeando se pare y caiga posteriormente con una sobrepresión muy alta sobre la misma bomba, de manera que bomba y/o conducción pueden verse gravemente afectadas.

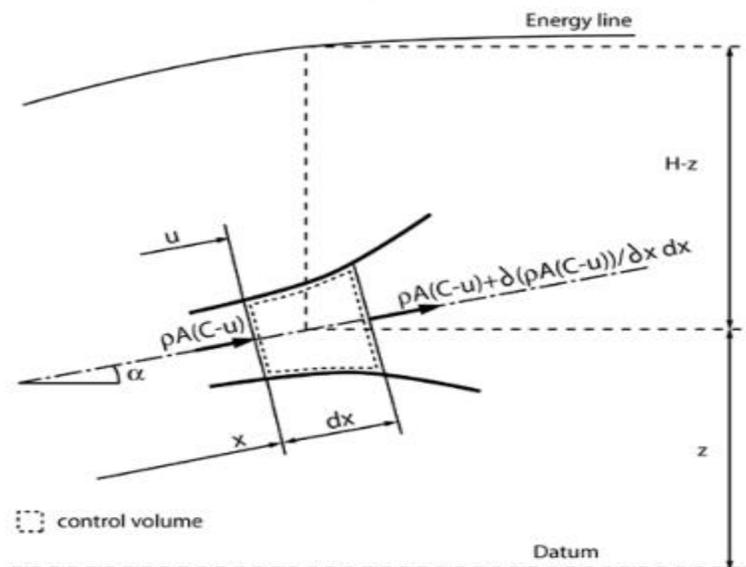
Otro caso de interés es el que ocurre en las centrales hidroeléctricas, en las que se ha de reducir bruscamente el caudal suministrado a las turbinas hidráulicas acopladas a los alternadores, cuando se anula la carga del alternador. Si el cierre es muy brusco, el golpe de ariete generado puede afectar gravemente al sistema distribuidor o al mismo rodete.

3.8-Métodos de resolución de las ecuaciones del golpe de ariete

A lo largo de los años se han utilizados diferentes métodos que ahora veremos para la resolución de las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento y el cálculo del golpe de ariete.

Ecuación de continuidad

La ecuación de continuidad tiene en cuenta un balance de masa sobre un volumen de control.



“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

Este esquema quedaría reflejado analíticamente de la siguiente manera

$$\frac{dM}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_v \rho dV + \int_v \rho * (C - u) * n * dA = 0$$

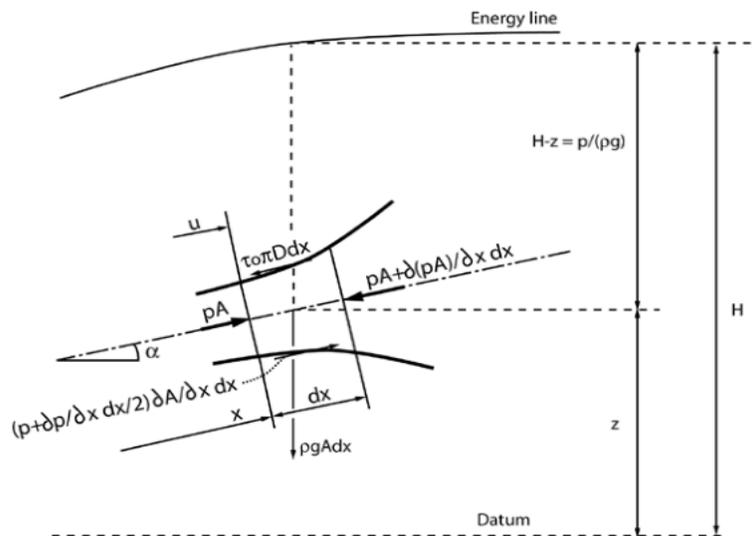
Y simplificando

$$\rho a^2 \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial t} + C \frac{\partial p}{\partial x} = 0$$

Quedando así la ecuación de continuidad.

Ecuación de la conservación de la cantidad de movimiento o de momentum.

La ecuación de conservación de la cantidad de movimiento surge al igualar las fuerzas externas aplicadas al volumen de control como la gravedad, la presión, la fricción, el viento entre otras. En forma conservativa puede escribirse esta ecuación en términos del caudal, área, profundidad, pendiente del canal, pendiente de fricción y de la gravedad, de la siguiente manera:



Este esquema quedaría reflejado analíticamente de la siguiente manera

$$\int_v \frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot C \cdot n) dV + \int \frac{\partial}{\partial t_{\partial v}} \rho C(C - u) \cdot ndA = \Sigma F$$

que a su vez se podría simplificar así

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial C}{\partial t} + C \frac{\partial C}{\partial x} + g \sin(\alpha) + \frac{\lambda C |C|}{2D} = 0$$

Nomenclatura:

A: sección de la tubería

C: velocidad del flujo

D: diámetro

g: gravedad

p: presión

α : ángulo de la tubería

ρ : densidad-

λ : coeficiente de fricción

Método de las características

El método de las características consiste esencialmente en la resolución numérica de las ecuaciones antes expuestas, con las condiciones de borde impuestas por cada problema.

Es importante destacar que el método de las características es el más general y el más utilizado históricamente que se dispone para resolver el problema, no habiendo simplificaciones que distorsionen los resultados.

El método parte de las dos ecuaciones antes vistas introduciendo la siguiente definición para simplificar matemáticamente:

$$H = Z + \frac{p}{\gamma} \quad \text{ó} \quad p = \gamma(H - Z)$$

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

- En la ecuación de la conservación de cantidad de movimiento hacemos las sustituciones con las anteriores definiciones matemáticas. Posteriormente multiplicamos por g y obtenemos:

$$g \frac{\partial H}{\partial x} + U \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{f}{2D} U|U| = 0 \Rightarrow L_2$$

- En la ecuación de la continuidad multiplicamos la ecuación por c^2 , después efectuamos el reemplazo y considerando que $\frac{\partial z}{\partial t} = 0$ y que $\frac{\partial z}{\partial x} = -\text{sen}\theta$, la ecuación se transforma con esos cambios. Por último dividimos por (ρg) y nos queda:

$$\frac{c^2}{g} \frac{\partial U}{\partial x} + U \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} + U \text{sen}\theta = 0 \Rightarrow L_1$$

Estas ecuaciones diferenciales en derivadas parciales (L_1 y L_2) no lineales en U y en H en función de x y t no responden a ninguna solución general, pero sí se pueden resolver aplicando el método de las características y adecuarlas a una solución en diferencias finitas en computadora.

Esto último es lo que nos ocupará a continuación.

Las ecuaciones L_1 y L_2 contienen dos incógnitas: U y H . Además, estas ecuaciones se pueden relacionar a partir de un multiplicador desconocido:

$$L = L_1 + \lambda L_2$$

Ahora, un par de valores λ cualquiera, reales y distintos, da un par de ecuaciones en U y H que conservan el significado físico dado por las ecuaciones de L_1 y L_2 .

Finalmente podremos deducir que:

$$\lambda = \pm \frac{c}{g}$$

Estos dos valores de λ reales y distintos convierten a las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales en un par de ecuaciones diferenciales ordinarias, es decir:

$$\begin{aligned}
 c+ & \left\{ \begin{aligned} \frac{dH}{dt} + \frac{c}{g} \frac{dU}{dt} + U \cdot \text{sen } \theta + \frac{c \cdot f}{2 \cdot g \cdot D} U \cdot |U| &= 0 \\ \frac{d\ell}{dt} &= U + c \end{aligned} \right. \\
 c- & \left\{ \begin{aligned} \frac{dH}{dt} - \frac{c}{g} \frac{dU}{dt} + U \cdot \text{sen } \theta - \frac{c \cdot f}{2 \cdot g \cdot D} U \cdot |U| &= 0 \\ \frac{d\ell}{dt} &= U - c \end{aligned} \right.
 \end{aligned}$$

Invariante a derechas (C+)

$$P + (c \rho \theta) v = \text{cte}$$

Invariante a izquierdas (C-)

$$P - (c \rho \theta) v = \text{cte}$$

Para comprender físicamente estas ecuaciones, es conveniente considerar que la solución se obtiene en un diagrama x,t.

Consideramos que se conocen U y H en R y en S.

En la intersección de las curvas c+ y c- las ecuaciones son válidas y pueden dar Up y Hp. En ese punto p las ecuaciones nos dan también l y t.

Conocidos dos puntos, R y S en este caso, a través de C+ y C- se llega a otro punto P que satisface los invariantes.

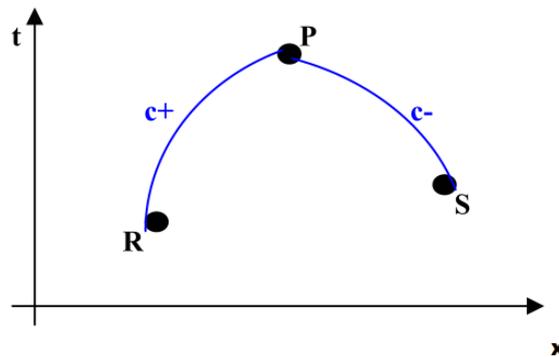


Figura 9 - Intersección de las curvas características c+ y c-

En los cálculos usuales $c \gg U$ y podemos despreciar U en comparación con c y, así, las líneas características son ahora rectas de pendiente $\pm c$ en el diagrama.

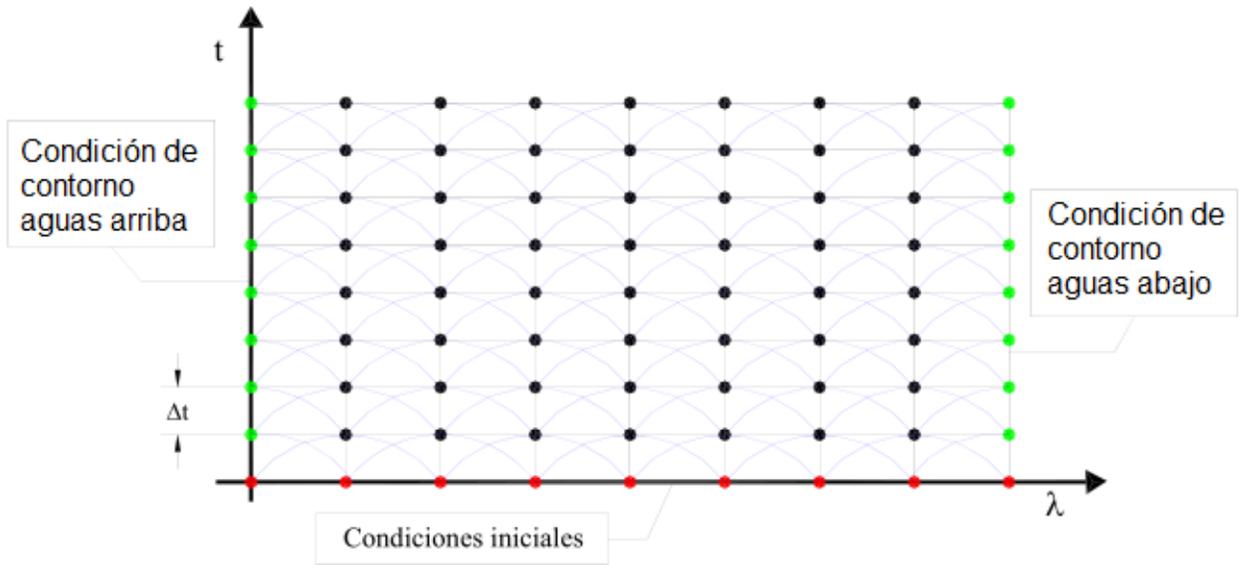


Figura 10 – Matriz de puntos de intersecciones de curvas características

Ahora recordando que, en diferencias finitas:

$$dH = H_p(I) - H(I-1) ; dU = U_p(I) - U(I-1) ; dt = \Delta t$$

Las ecuaciones entonces quedan:

$$H_p(I) - H(I-1) + \frac{c}{g} (U_p(I) - U(I-1)) + U(I-1) \cdot \text{sen} \theta * \Delta t + \frac{c * f}{2 * g * D} * \Delta t U(I-1) |U(I-1)| = 0$$

$$H_p(I) - H(I-1) - \frac{c}{g} (U_p(I) - U(I+1)) - U(I+1) \cdot \text{sen} \theta * \Delta t - \frac{c * f}{2 * g * D} * \Delta t U(I+1) |U(I+1)| = 0$$

Sumando estas dos ecuaciones se elimina $U_p(I)$, y queda:

$$H_p(I) = 0.5[H(I-1) - H(I+1)] + \frac{c}{g} [U(I-1) - U(I+1)] - \text{sen} \theta * \Delta t [U(I-1) - U(I+1)] - \frac{c * f}{2 * g * D} * \Delta t * [U(I-1) * |U(I-1)| - U(I+1) * |U(I+1)|]$$

Análogamente, al restar se obtiene:

$$U_p(I) = 0.5[U(I-1) - U(I+1)] + \frac{g}{c} [H(I-1) - H(I+1)] - \text{sen} \theta * \Delta t [U(I-1) - U(I+1)] - \frac{f}{2 * g} \Delta t * [U(I-1) * |U(I-1)| - U(I+1) * |U(I+1)|]$$

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

Estas dos últimas ecuaciones se emplean en los puntos intermedios para obtener los valores de U_p y H_p . Después se aplican las condiciones de borde para obtener $H_p(0)$, $U_p(0)$, $H_p(N)$ y $U_p(N)$.

Obtenido esto se reemplaza $U(l)$ y $H(l)$ por $U_p(l)$ y $H_p(l)$, se incrementa el tiempo y se repite el proceso.

Como parte del estudio del método se realizó una traducción del código, de FORTRAN a Octave, que realiza un cálculo de un transitorio encontrado en el capítulo III del libro *Fluid Transients* (Wylie y Streeter, 1978).

Este código simula los pasos a seguir para la resolución de Método de las Características. El código resultante puede verse en el Anexo A.

Analogía eléctrica.

Este método es el utilizado por el Código SIMSEN para el cálculo numérico de transitorios. Se basa principalmente en estudiar el comportamiento del fenómeno transitorio como si de un sistema eléctrico se tratara. Esto hace posible una simulación numérica en un estado estacionario o uno transitorio, considerando todas las interacciones entre el sistema hidráulico y uno eléctrico.

Este método fue desarrollado por Bergeron en 1950 y Paynter en 1953.

La Figura 11 muestra un esquema hidráulico y su equivalente circuito eléctrico de una chimenea de compensación. LA altura piezométrica y el caudal son reemplazados por el voltaje y la corriente. Todos los elementos de la equivalencia eléctrica pueden ser deducidos de los parámetros hidráulicos.

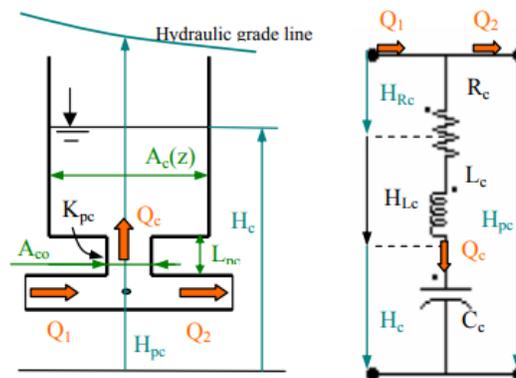


Figura 11 - Analogía eléctrica de un aliviadero

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

Este sistema puede ser aplicado a cada elemento, aunque ahora solo nos importa la tubería.

En el caso de la tubería, la analogía eléctrica se obtiene gracias a la ecuación de conservación y a la de cantidad de movimiento.

Una tubería siempre deberá ser dividida en una serie de segmentos (Nb) con longitud dx, por lo que se deberán reformular las ecuaciones, eligiendo como variables de estado la altura piezométrica en mitad del segmento $H_{i+1/2}$ y la entrada /salida de caudal Q_i/Q_{i+1} . La altura piezométrica de entrada/salida para este segmento de tubería pasa a ser la condición límite del segmento.

Finalmente, en la Figura 12 se puede ver el esquema a seguir por la analogía eléctrica de la tubería.

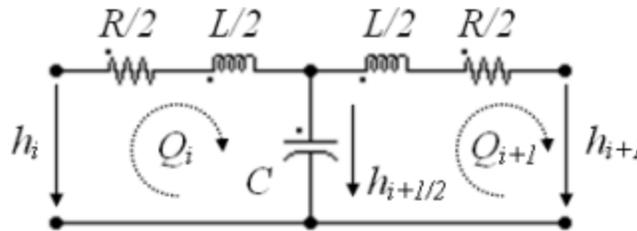


Figura 12 - Analogía eléctrica de un segmento de tubería

La analogía eléctrica presenta una ventaja clara además de una mayor velocidad en el cálculo y es que asegura la correcta interacción entre todos los elementos.

En la Figura 13 que se puede ver a continuación, se encuentra de una manera más detallada gráficamente la analogía eléctrica de una tubería elástica.

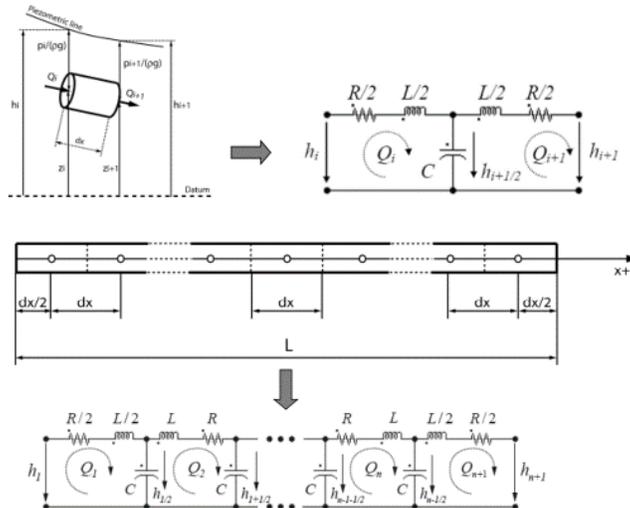


Figura 13 - Analogía eléctrica de una tubería elástica

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

Las principales equivalencias de este sistema son:

- **Potencial eléctrico:** En general, se usa como equivalente de la altura manométrica. El voltaje sería la diferencia de presión que hay entre dos puntos.
- **Corriente o intensidad eléctrica:** Usualmente medida en amperios, es el equivalente del caudal volumétrico.
- **Carga eléctrica:** Equivale a la cantidad de agua.
- **Resistencia:** Cualquier tipo de resistencia al flujo, ya sea un estrechamiento de la tubería o un cierre parcial de los álabes del distribuidor.
- **Inductancia:** La inercia del agua.
- **Capacidad eléctrica:** Capacidad de almacenamiento de la descarga (en chimeneas de equilibrio).

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

4-Código SIMSEN

4.1- Introducción

SimSen es un software de simulación diseñado para el análisis de fenómenos transitorios eléctricos e hidráulicos en Centrales Hidroeléctricas gracias a la *analogía eléctrica* vistos en el capítulo anterior. SimSen permite analizar una gran variedad de maniobras con turbinas, válvulas, bombas y otros elementos que se verán a continuación. A lo largo del presente trabajo, se podrán ver algunas de esas maniobras en las diferentes simulaciones realizadas. Estas simulaciones son las siguientes:

I. Rechazo de carga

Se simula un rechazo de carga tras el cual se procede a un cierre rápido de seguridad de la válvula de la turbina (Francis), por lo que se estudia el comportamiento de los fenómenos que suceden tras el mismo.

II. Puesta en marcha de una turbina

Se han realizado dos simulaciones. Un primer caso en el que la turbina parte de un estado de desacoplamiento con el generador y se procederá a realizar ese acoplamiento. El segundo caso parte de un estado de parada total.

III. Estudio de golpe de ariete

En este apartado se realizará un estudio del golpe de ariete producido en una instalación con una turbina Pelton. Se estudiaron distintos cierres para posteriormente realizar una comparación entre ellos.

IV. Apertura y cierre de una turbina

Este caso simula un fallo que provoca una apertura y posterior cierre de la turbina, estudiándose las variaciones de presión que esto pueda provocar en la instalación.

V. Cierre y apertura de dos turbinas en paralelo

Se estudia la influencia que tienen entre si dos turbinas que operan en paralelo.

4.2-Unidades de Simsen

Hay dos grandes grupos de bloques:

- En primer lugar se presentan los bloques que definen la instalación, o sea, los componentes físicos de la misma.
- En segundo lugar tenemos un grupo que vendría dado por los bloques en los que plasmamos las funciones o los programas que nos permitirán definir la maniobra a realizar.

Todos los bloques poseen una parte común llamada “General Data”.

- GENERAL DATA :

Name = FTURB1
 Comment = Francis turbine number 1
 Writing = SI (Escribiremos *SI* para grabar los resultados según el Sistema Internacional y en un archivo llamado *Name.vis* . Escribiremos *PU* para gabar los resultados en valores por unidad en el mismo archive antes mencionado. **Cualquier otra entrada hará que los resultados no queden grabados**)

Los bloques que representar las partes físicas de la instalación poseen unos *rated values* donde el usuario introducirá los valores nominales del elemento en cuestión. Estos valores nominales serán absolutamente necesarios si se desea obtener unos resultados finales por unidad. A continuación se puede ver los diferentes bloques que se usarán en este trabajo:

	Parámetros	Unidad	Descripción
Reservoir (depósito)	H_n, Q_n	$[m][m^3/s]$	Rated Piezometric head (altura piezométrica nominal) Rated discharge (caudal nominal)
Pipes (tuberías)	H_n, Q_n	$[m][m^3/s]$	Rated head (altura nominal) Rated discharge (caudal nominal)
Turbine (turbina)	H_n, Q_n, T_n, N_n	$[m][m^3/s][Nm][rpm]$	Rated head (altura nominal) Rated discharge (caudal nominal) Rated torque

			(par nominal)Rated rotational speed (giro nominal)
Valve (válvula)	H_n, Q_n	$[m][m^3/s]$	Rated head (altura nominal)Rated discharge (caudal nominal)
Tanks (tanques)	H_n, Q_n	$[m][m^3/s]$	Rated head (altura nominal)Rated discharge (caudal nominal)
Mechanical Mass (masa mecánica)	P_n, N_n	$[W][rpm]$	Rated mechanical power (potencia mecánica nominal)Rated rotational speed (giro nominal)

Tabla 1 - Valores nominales pedidos en los diferentes bloques

Los bloques destinados a funciones y programas, tienen, en todos los casos, dos secciones en común. Estas secciones son:

- REFERENCES X
- REFERENCES Y

Estos bloques leen los valores de entrada x_i (REFERENCES X) que el usuario aporta y generan hasta 20 valores de salida y_i que puedan ser leídos por cualquier otro bloque. Cada valor de entrada situado en una línea bajo la sección REFERENCES X corresponderá a un valor nombrado x_i , que está disponible en la sección – DATA siempre que se haga una llamada por el nombre x_i antes dado. En cada instante de tiempo t , los bloques de funciones y programas leerán los valores de entrada x_i especificados en la sección REFERENCES X y de los distintos cálculos realizados en la sección DATA. Entonces automáticamente se pasará al siguiente instante: $t=t+dt$.

Reservoir (depósito):

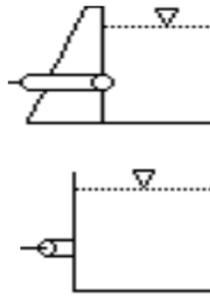


Figura 14 - Depósitos

Parámetro:	Unidad:	Descripción:
H	[m]	Piezometric head (altura piezométrica)
Rho	[kg/m ³]	Density (densidad)
g	[m/s ²]	Gravity acceleration (gravedad)

Tabla 2 - Parámetros de los depósitos

En este caso dispondremos de dos bloques, embalse y tanque. Se consideran ambos con capacidad infinita, por lo que no habrá diferencia en los cálculos entre ambos.

Pipes (tuberías):

El bloque *pipe* representa un conducto de agua en la instalación. Hay diferentes tipos de tuberías en SIMSEN, pero las que vamos a ver a continuación han sido usadas a lo largo de este proyecto en las diferentes maniobras a realizar. Independientemente de cómo o donde sea colocado, o de como sea la instalación, SIMSEN siempre considera el lado con dos puntos como la entrada de agua de la tubería.

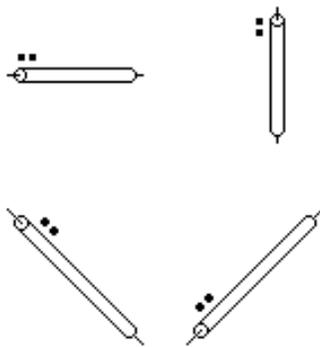


Figura 15 - Tuberías

Parámetro:	Unidad:	Descripción:
Nb	[1]	Numero de elementos (limitado a 399)
Zin	[m]	Altura de la entrada de la tubería
Zout	[m]	Altura de la salida de la tubería
L	[m]	Longitud de la tubería
D	[m]	Diámetro interior
Dh	[m]	Diámetro hidraulico
Ah	[m ²]	Área de la sección de la tubería
a	[m/s]	Velocidad de la onda
Lambda	[1]	Coefficiente de pérdidas locales (factor de fricción)

Ksi	[1]	Coficiente de inercia
Mu	[Pa s]	Viscosidad dinámica de un fluido o material para un comportamiento viscoelástico.
Rho	[Kg/m3]	Densidad
g	[m/s2]	Gravedad

Tabla 3 - Parámetros de las tuberías en SIMSEN

La altura manométrica H_i en una sección de la tubería nos viene dada por la siguiente ecuación

$$H_t = z_t + \frac{p_i}{\rho g} + \frac{Q_t^2}{2gA_t^2}$$

y será resuelto para cada paso de tiempo por el programa.

Selección del intervalo de tiempo o paso de integración:

Se introducirá el número de Courant C_r definido como:

$$C_r = \frac{dt \cdot a}{dx}$$

donde el intervalo de tiempo es dt . Para lograr la estabilidad de la integración numérica, se recomienda el uso de un número de Courant menor o igual a 0.5. Esto significa que si el tiempo base usado para definir el número de elementos es $dt=0.01s$, el intervalo de tiempo debe ser como máximo igual a $dt=0.005s$.

Selección de N_b

N_b es el número de elementos de medición de la tubería o condensadores. Es el Sistema usado para realizar las mediciones de presión y caudal a lo largo de la tubería con el Sistema de cálculo de la Analogía eléctrica. Para seleccionar una discretización apropiada y uniforme de las tuberías del Sistema, se deberá seguir los siguientes pasos:

1. Calcular la velocidad de onda en la tubería a_i
2. Seleccionar un diferencial de tiempo base, e.g.: $dt=0.01s$
3. Realizar el cálculo de la discretización especial de las tuberías: $dx_i = dt \cdot a_i$
4. Calcular el número de elementos de cada tubería: $N_{b_i} = L_i / dx_i$
5. Realizar la adaptación de la velocidad de la onda a_i a la nueva a_i' para obtener N_{b_i} y obtener un número de elementos N_{b_i} y siempre se debe obtener un número que sea un número natural $N_b=\{1, 2, 3, \text{etc}\}$: $N_{b_i} = L_i / (a_i' \cdot dt)$

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

La Tabla 4 muestra la realización de la selección del número de elementos Nb para una tubería real.

Intervalo inicial dT[s] :		0.01						
Tubería N°	Longitud[m]	Vel. Onda teórica[m/s]	Longitud elementos dx=a*dT [m]	Número inicial de elementos Nb=L/dx [-]	Vel. Ondaada ptada a'[m/s]	Longitud adaptada dx=a'*dT [m]	Número de elementos adaptados Nb=L/dx[-]	Error [%]
1	1238	1223	12.23	101.23	1225.74	12.2574	101	0.22
2	421	1246	12.46	33.79	1238.26	12.3826	34	0.62
3	27	1309	13.09	2.06	1349.98	13.4998	2	3.13

Tabla 4 - Cálculo del número de elementos de la tubería

Se recomienda el uso del elemento PIPEZ en lugar de PIPEN. De hecho, incluso si tuviéramos el mismo modelo dinámico de tubería en ambos elementos y estos fueran totalmente idénticos, el elemento PIPEZ ofrece las siguientes ventajas:

- Permite incluir la cota a la entrada y a la salida de la tubería (Zin y Zout, origen de una nueva tubería) para computar automáticamente la presión estática a lo largo de la tubería asumiendo una tubería recta entre ambos finales;
- Por defecto los elementos PIPEZ otorgan muchos resultados adicionales de simulación en comparación a los aportados por PIPEN, como por ejemplo, la altura piezométrica, la altura kinética, la presión estática Hp y la velocidad del fluido C para ambos extremos, llamados 1 y Nb.
- La resistencia viscoelástica Rve es automáticamente calculada basada en la viscosidad del fluido o material Mu.

Tanques

SIMSEN permite el uso de diferentes tipos de tanques o chimeneas de equilibrio. En las maniobras que se van a estudiar en este proyecto se utilizan los Surge Tanks (torre de compensación o torre piezométrica). Es una estructura complementaria en algunas centrales hidroeléctricas y estaciones de bombeo destinada a absorber las sobrepresiones y depresiones causadas por el golpe de ariete en galerías o túneles. También pueden proporcionar agua ante una caída de presión.

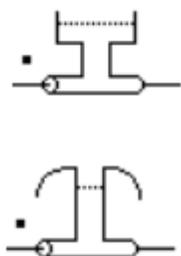


Figura 16 - Surge tank y Surge shaft

Parámetro:	Unidad:	Descripción:
Ao	[m ²]	Sección de referencia para una pérdida de carga
Aco	[m ²]	Sección de estrechamiento.
A	[m ²]	Sección en la altura Hc
Kd	[1]	Pérdida de carga diafragmática.
zd	[m]	Elevación diafragmática.
Rho	[kg/m ³]	Densidad.
g	[m/s ²]	Gravedad.

Tabla 5 - Parámetros para la definición del bloque Surge Tank

Turbinas

Una turbina hidráulica es una máquina rotativa que convierte la energía cinética y potencial del agua en trabajo mecánico. El programa ofrece tres opciones, Francis, Kaplan y Pelton. Existe también la posibilidad de añadir una bomba a nuestra instalación. En el caso de la turbina Francis, es posible hacerla funcionar como bomba o como turbina.



Figura 17 - Turbina Francis, Kaplan y Pelton

Parámetro:	Unidades:	Descripción:
y	[1]	Abertura del distribuidor
Dref	[m]	Diámetro de referencia de la turbina
Lequ	[m]	Longitud equivalente de la turbina
Amean	[m ²]	Sección media de la turbina
Rho	[kg/m ³]	Densidad
g	[m/s ²]	Gravedad

Tabla 6 - Parámetros necesarios para la especificación de la turbina en SIMSEN

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

Como ya se ha visto en el Capítulo 3, el software utiliza la analogía eléctrica para el cálculo de los diferentes bloques que ofrece. En el caso de la turbina

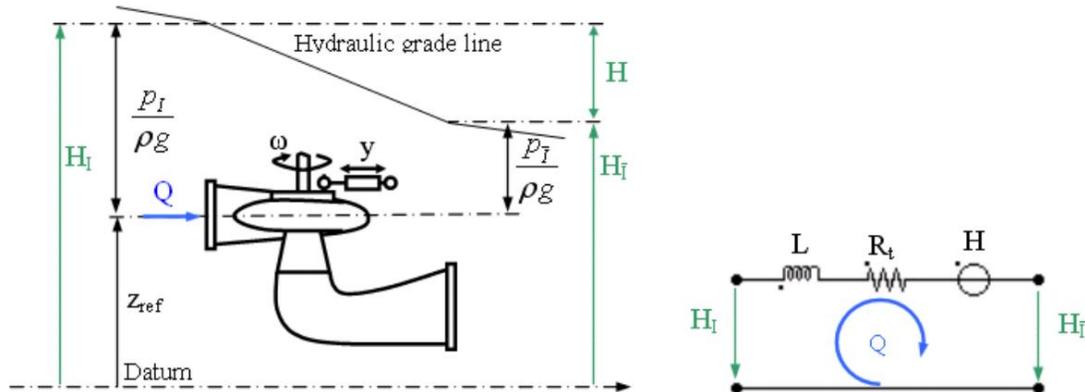


Figura 18 - Analogía eléctrica de la turbina

Esta es la analogía eléctrica de una turbina que realiza el programa (Figura 18). El origen de la presión (H) corresponde a la energía transferida entre el fluido y el rodete y viene dada por la interpolación de las curvas características de la turbina. La resistencia (R_t) corresponde al efecto del cierre de los alabes del distribuidor. La inductancia (L) corresponde al efecto de la inercia de agua, la que por medio de esta ecuación

$$L = \frac{L_{equ}}{g \cdot A_{mean}}$$

es calculada por el programa y depende de la geometría de la turbina como se puede ver.

La única diferencia con respecto al resto de turbinas se da en el caso de la turbina Pelton, donde dispondremos de 7 inyectores que podremos usar independientemente, además de sus siete deflectores, cuyo cierre vendrá marcado por un coeficiente de pérdida. En la sección – DATA deberemos incorporar el archivo con las curvas características de la turbina como se enseña a continuación.

```
- DATA :  
  
<Data Spec>  
  Read triangles from file = no  
</Data Spec>;  
<yN11Q11T11 File>  
  simsen_yn11q11t11_F657_GMC.txt  
</yN11Q11T11 File>  
<stabilization procedure>  
Nc,Tc -> y
```

Valve (Válvulas):

El bloque VALVE (válvula) representa una pérdida de presión localizada. Hay varios tipos de válvulas aunque solo vamos a utilizar la que se ve a continuación.



Figura 19 - Bloque de una válvula

Parámetro:	Unidad:	Descripción:
K	[1]	Losses coefficient
Aref	[m ²]	Reference cross section area
Rho	[kg/m ³]	Density
g	[m/s ²]	Gravity acceleration

Tabla 7 - Parámetros del bloque de la válvula

Bloque PROG.

Simsen ofrece un bloque llamado PROG a través del cual el usuario puede realizar ciertos cálculos necesarios para la correcta simulación. Para ello se puede hacer uso de diversas funciones matemáticas y lógicas. Simsen leerá y realizará dichos cálculos para cada paso de tiempo. Antes de leer el código, Simsen leerá los valores de entrada x_i (REFERENCES X) y genera hasta 20 valores de salida que podrán ser leídos por otra unidad.

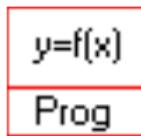


Figura 20 - Bloque Prog

Cada valor de dentro de la sección REFERENCES X responde la denominación x_i y estará disponible en la sección – DATA. Para cada instante Simsen leerá los valores x_i especificados en la sección REFERENCES X y las diferentes operaciones especificadas en la sección –DATA se calcularán. SIMSEN pasa automáticamente al siguiente paso de tiempo: $t=t+dt$.

FPOINTS

Usando esta función, es posible introducir en el programa una serie de puntos relacionados entre sí. La señal de entrada x de esta unidad es igual a la suma de todas las señales de entrada x_i (REFERENCES X). La función de puntos proporciona una señal de salida y . La interpolación lineal entre puntos es realizada por SIMSEN. El programa asignará el valor de salida mediante interpolación de los puntos dados por el usuario.



Figura 21 - Bloque FPOINTS

REG (Reguladores PID)

Este bloque representa un regulador PID. Normalmente se utiliza para el control de la velocidad de giro de la turbina. Es capaz de aceptar hasta 10 señales x_i (REFERENCES X). La señal de entrada x es igual a la suma de todas las señales de entrada x_i . El regulador genera una señal de salida y . También puede usar dos variables internas y_1 y y_2 , dependiendo del tipo de regulador.



Figura 22 - Bloque del regulador

Parámetro:	Unidad:	Descripción:
Type	[1]	Tipo de controlador.
k	[1]	Ganancia.
T1	[sec]	Constante de tiempo.
T2	[sec]	Constante de tiempo.
T3	[sec]	Constante de tiempo.
T4	[sec]	Constante de tiempo.
minX	[1]	Límite mínimo de la entrada del controlador.
maxX	[1]	Límite máximo de la entrada del controlador.
minY	[1]	Límite mínimo de la salida del controlador.
maxY	[1]	Límite máximo de la salida del controlador.

Tabla 8 - Parámetros del regulador.

La presente versión de SIMSEN propone 7 tipos de reguladores, desde el número 0 hasta el 6. Todos estos reguladores poseen una entrada ($minX$, $maxX$) y unas limitaciones en su salida ($minY$, $maxY$).

Type 0: On-off regulator. Funciona según histéresis.

Type 1: Controlador proporcional (P)

Type 2: Controlador integrativo (I)

Type 3: Controlador proporcional integrativo (PI)

Type 4: Controlador proporcional derivativo (PD)

Type 5: Controlador proporcional, integrativo, derivativo (PID)

Type 6: Controlador proporcional, integrativo, derivativo (PID*). (Añade T3 y T4)

UDLIMIT

Es un operador de cálculo que genera hasta 10 señales de salida y_i correspondientes a las 10 señales de entrada x_i (REFERENCES X). La unidad *Up Down Limiter* es una unidad digital. Funciona con un paso de tiempo dt . En cada paso de tiempo, el UDLimit calcula su señal de salida y_i en función de las señales de entrada x_i tal y como sigue:

- Si x_i aumenta y es en el rango $y_{uj} \Rightarrow y_{uj+1}$, la máxima variación permitida será: dy_{uj}/dt ;
- Si x_i descende y es en el rango $y_{dj} \Rightarrow y_{dj+1}$, la máxima variación permitida será: $-dy_{dj}/dt$.



Figura 23 - UDLIMIT

Parámetro:	Unidad:	Descripción:
$y_{u1}...y_{u5}$	[1]	Límites aplicados a la máxima variación de crecimiento relacionado con los valores $dy_{u0}..dy_{u5}$.
$dy_{u0}...dy_{u5}$	[1]	dy_{ui}/dT máxima variación cuando x_i aumenta.
$y_{d1}...y_{d5}$	[1]	Límites aplicados a la máxima variación de crecimiento relacionado con los valores $dy_{d0}..dy_{d5}$.
$dy_{d0}...dy_{d5}$	[1]	dy_{ui}/dT máxima variación cuando x_i descende.
dT	[sec]	Paso de tiempo.

El siguiente paso de tiempo realizará un nuevo cálculo de manera automática: $t=t+dt$. Este bloque se usará principalmente para definir el gradiente de la apertura o cierre de los alabes del distribuidor de la turbina, y para la activación de los deflectores en el caso de una turbina Peltoon. Las siguientes Figuras 24 y 25 ilustran a la perfección como actúa el UDLimit para crecimiento o decrecimiento de la curva que queremos definir.

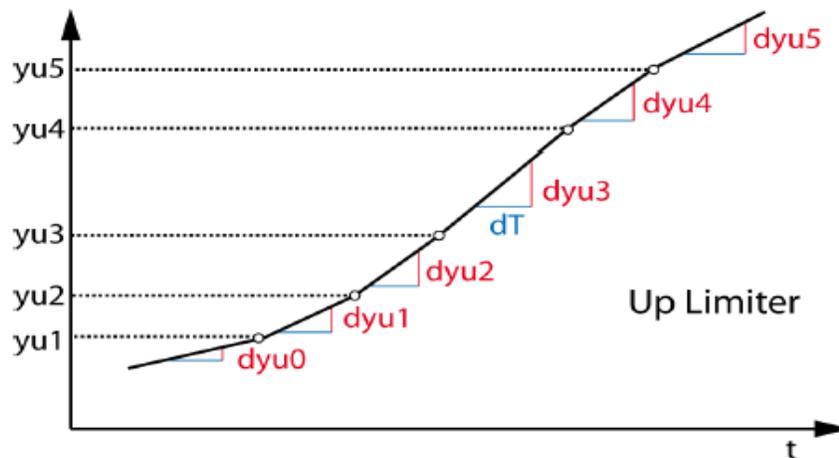


Figura 24 - Evolución gráfica del comportamiento del UDLimit para una situación de crecimiento

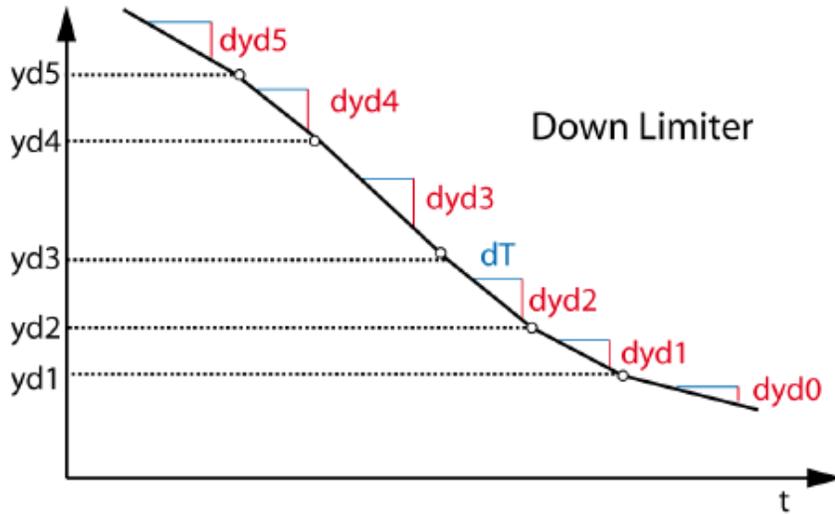


Figura 25 - Evolución gráfica del comportamiento del UDLimit para una situación de decrecimiento

4.2- Entradas y salidas

Las entradas en SIMSEN son proporcionadas en la mayoría de los casos por el usuario a través de los bloques antes mostrados (algunos datos vienen por defecto). En cuanto a la salida, el programa proporcionará la información actualizada tras la simulación en los propios bloques o gráficamente a través de los archivos “.VIS” que podrán abrirse con el visor que posee el software (Figura 26).

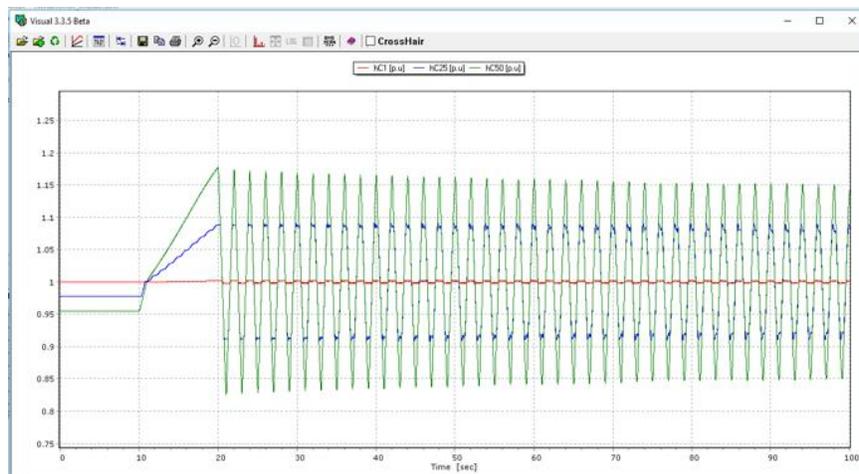


Figura 26 - Visor proporcionado por el software SIMSEN

4.3- Tutoriales de Simsen

Waterhammer

En este primer caso se nos presenta la instalación de la Figura 27. Es una instalación sencilla con:

- Dos depósitos de agua, uno aguas arriba y otro aguas abajo como será habitual en todos los ejemplos
- Una válvula previa al depósito aguas abajo
- Una tubería a presión que parte del depósito aguas arriba y que acaba en la válvula.
- Un bloque Prog, que definirá el desarrollo de la simulación.

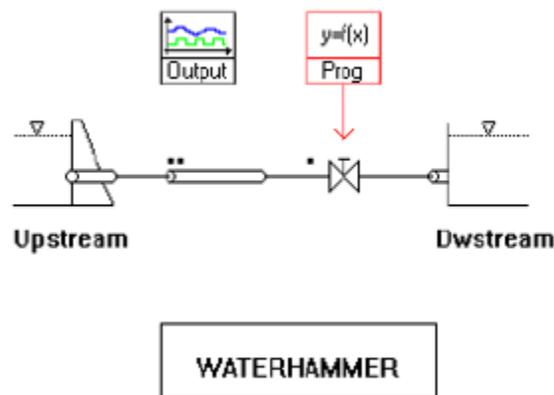


Figura 27 - Instalación tutorial de golpe de ariete

En la Figura 28 se puede observar con claridad el efecto producido por el cierre. En el segundo 1 comienza el cierre. Se puede apreciar como el caudal desciende (línea azul) mientras se desarrolla el cierre de la válvula. Se puede ver como la presión (línea roja) tiende a aumentar a medida que el cierre se desarrolla. Cuando el cierre se completa, nos queda una onda que recorrerá la tubería y cuyo efecto se puede apreciar en la gráfica.

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

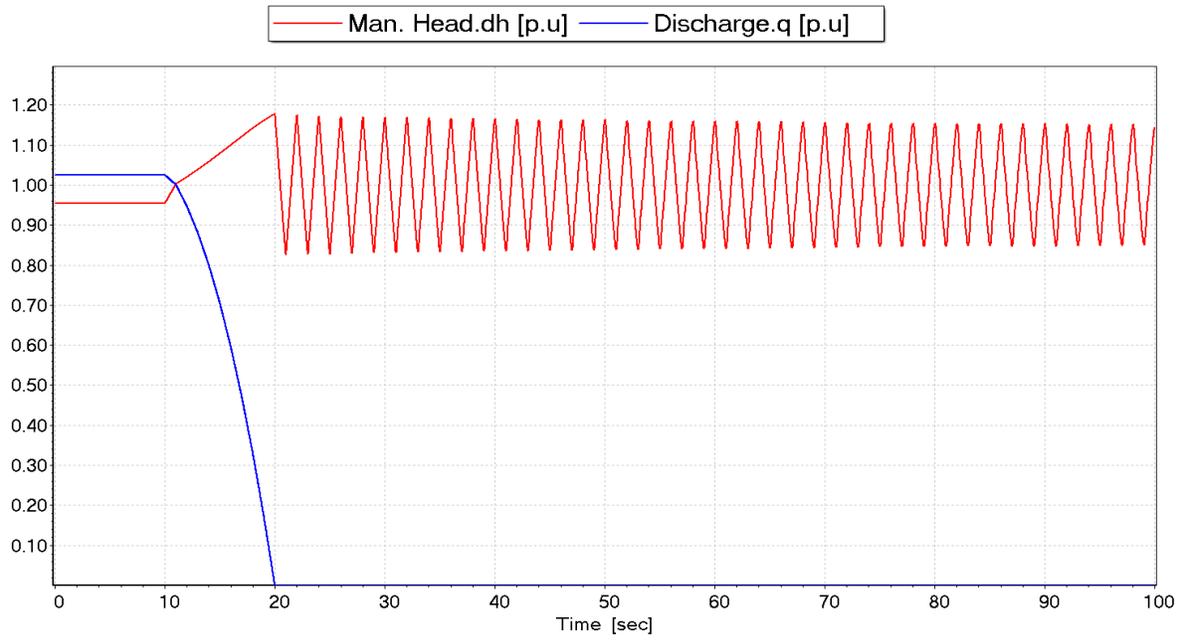


Figura 28 - Resultados de la simulación del tutorial de Golpe de ariete

Mass Oscillation

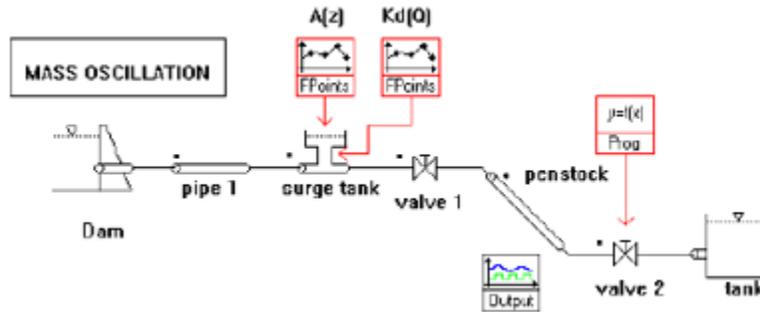


Figura 29 - Tutorial sobre oscilación de la masa de agua en una chimenea de equilibrio

En esta instalación tenemos:

- Depósitos aguas arriba y abajo, como es habitual.
- A mitad hay una tubería a presión que poseerá el mayor salto de cota,
- En su comienzo y final hay dos válvulas.
- Antes de la válvula aguas arriba, tenemos una chimenea de equilibrio
- Una tubería forzada que la conecta con el depósito de aguas arriba.

Este tutorial lleva a cabo la simulación de un fenómeno transitorio debido al cierre de una válvula, con unas condiciones distintas al ejemplo anterior. Este tutorial nos muestra cómo simular un transitorio debido al cierre de una válvula con unas condiciones distintas al anterior ejemplo. Veremos en las siguientes figuras 30 y 31 como se desarrolla la evolución de la presión en el caso de tener una chimenea de equilibrio.

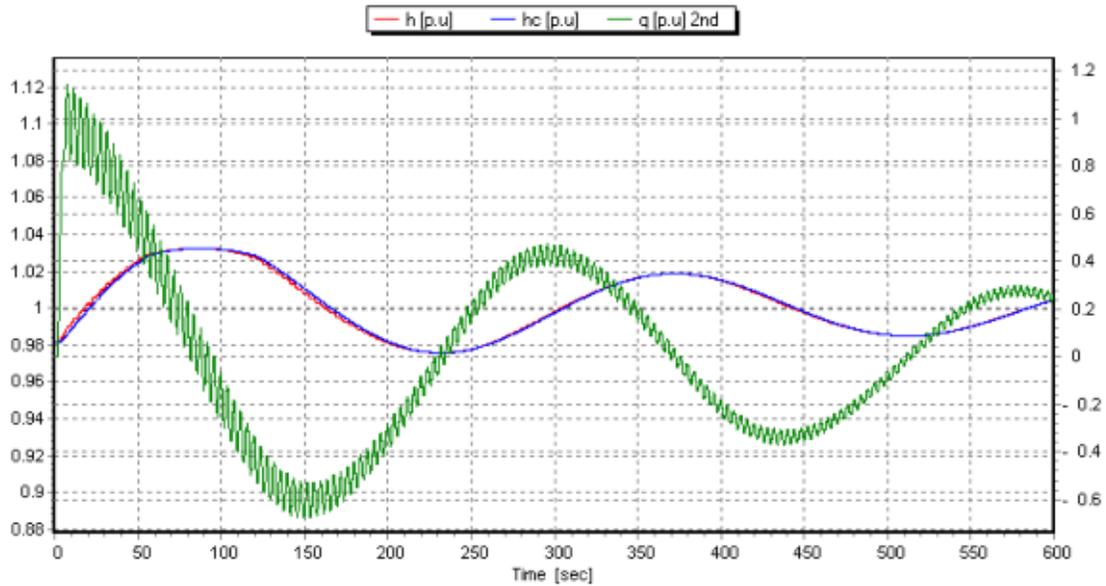


Figura 30 - Evolucion de la presión, el nivel de agua y el caudal en la chimenea

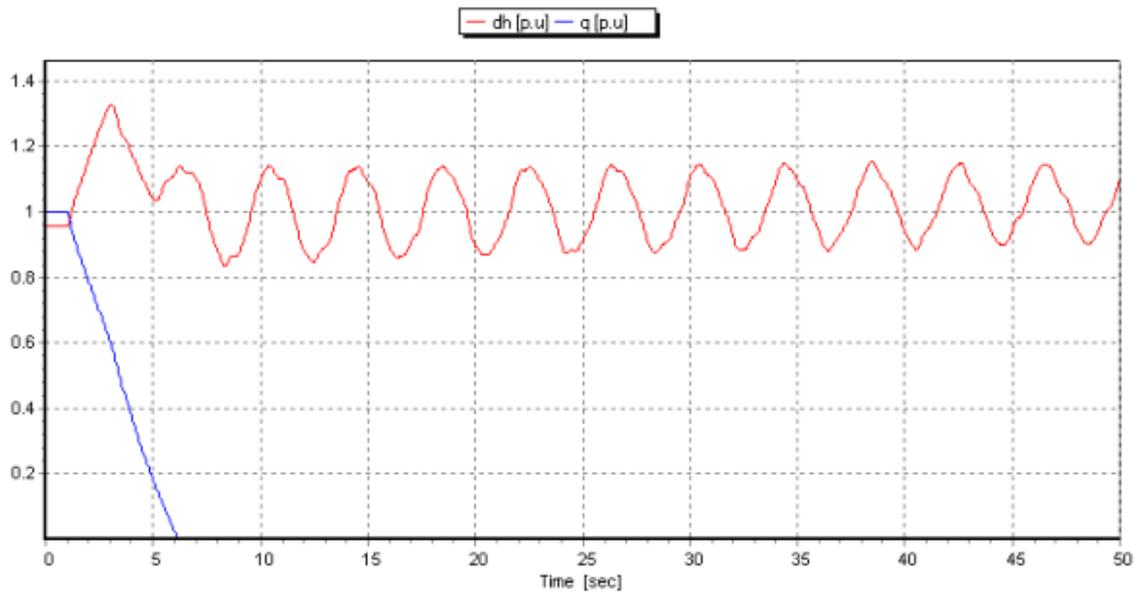


Figura 31 - Resultados de la simulación en la válvula aguas abajo

En la figura 30 podemos ver como la evolución de la presión a la altura de la chimenea de equilibrio no sigue la forma normal que produce la onda tras un golpe de ariete, sino que sigue el patrón que produce la oscilación del agua. Sin embargo, en la figura 28 podemos ver como aguas abajo, donde hemos cerrado la válvula, sí que se produce un golpe de ariete y una onda que recorre la tubería.

Emergency Shutdown

El siguiente tutorial nos muestra una instalación tipo de turbinado. En la figura 32 podemos ver un depósito aguas arriba de donde sale una conducción forzada que nos transporta el agua hasta una turbina Francis conectada a un generador y tras la que finalmente se descarga el agua a un depósito aguas abajo. En este tutorial se nos presenta una simulación de un fallo que provoca una parada de emergencia.

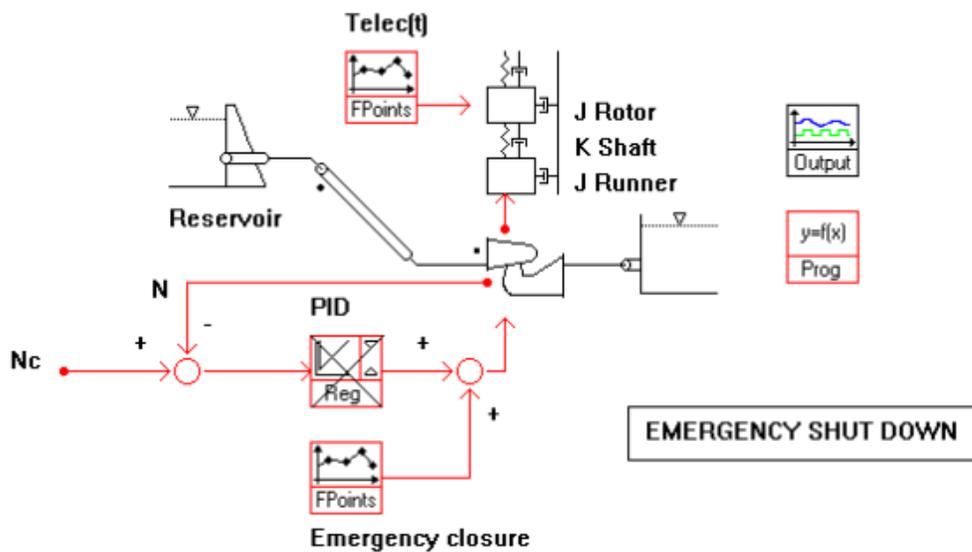


Figura 32 - Tutorial de parada de emergencia

En la figura 33 podemos ver los resultados de la simulación. Tras comenzar el cierre, podemos ver que la presión (roja) tiende a subir, hasta que la velocidad de cierre de los alabes del distribuidor (rosa) decrece y entonces la presión comienza a descender. Debido a ese cierre lento logramos disipar gran parte de esa sobrepresión y nos quedará una onda con que creará unas sobrepresiones mucho más reducidas como se puede apreciar. También podemos ver, como tras desacoplar el generador, el par (verde) cae, pero mientras este está por encima de cero, nuestro giro del rotor (negro) aumenta. Vemos como tras bajar el par de cero, el giro se reduce.

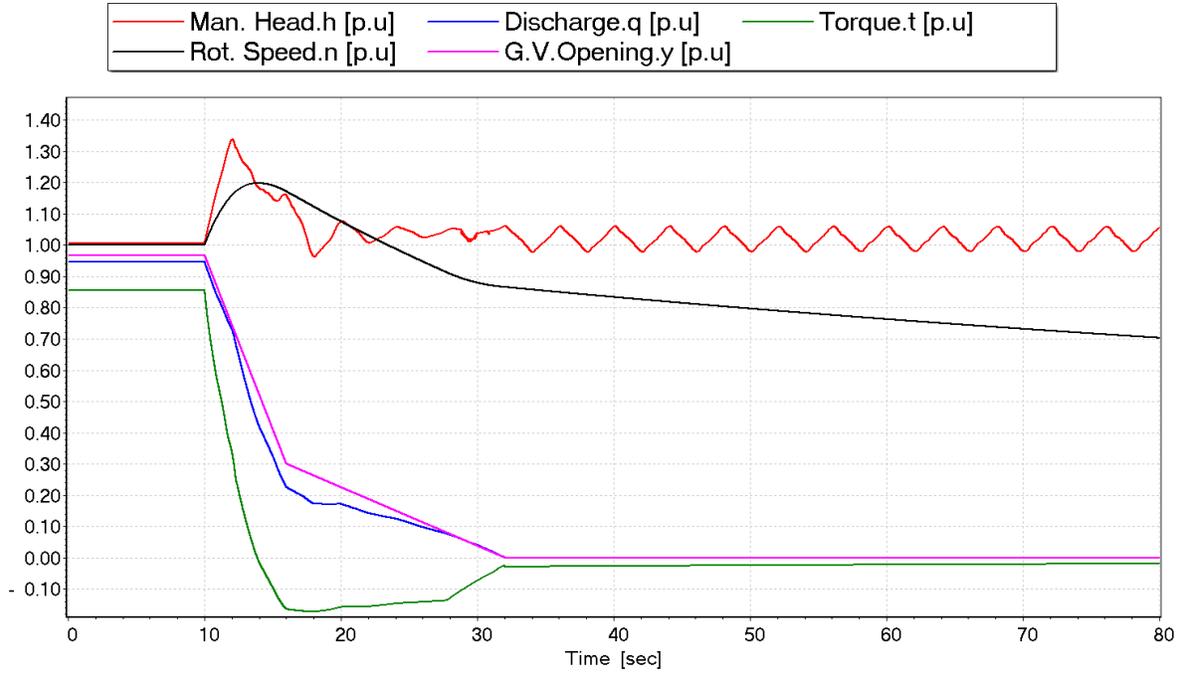


Figura 33 - Resultado de la simulación

4.4- Modificación del caso del primer tutorial de Golpe de ariete

Decara a mejorar en el uso del programa y dado que en los casos de estudio se usará siempre el bloque UDLIMIT, ahora se va a realizar el primer tutorial definiendo el cierre de los alevos del distribuidor por medio del mismo y comparando ambos resultados para asegurar un correcto uso.

Caso original

Esta es la instalación original que pudimos ver en la figura 34, que consta de una tubería con una válvula entre depósitos.

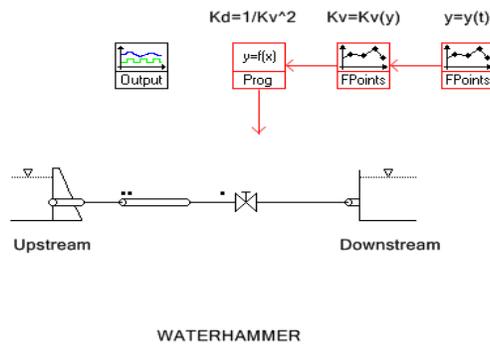


Figura 34 - Instalación del tutorial sobre golpe de ariete

En el segundo 10 se da un cierre de la válvula definido por el bloque FPOINT.

```

- GENERAL DATA :

Name           = FP_Y
Comment        =
Writing        = YES

- REFERENCES X :

FP_Y Time 1 0 Time [s]

- REFERENCES Y :

- DATA :

x1 [s] :    0 y1 [-] : 0.8
x2 [s] :   10 y2 [-] : 0.8
x3 [s] :   20 y3 [-] : 0
x4 [s] :  100 y4 [-] : 0
    
```

Entonces y_i se transforma en Kv (coeficiente de descarga) por el siguiente FPOINTS.

```

- GENERAL DATA :

Name           = FP_KV
    
```

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

```
Comment          =
Writing          = YES

- REFERENCES X :

FP_Y y 1 0 yvalve [-]

- REFERENCES Y :

- DATA :

x1      [-]    : 0      y1      [-]    : 0
x2      [-]    : 0.1    y2      [-]    : 0.0987055
x3      [-]    : 0.2    y3      [-]    : 0.189818
x4      [-]    : 0.3    y4      [-]    : 0.2733375
x5      [-]    : 0.4    y5      [-]    : 0.349264
x6      [-]    : 0.5    y6      [-]    : 0.4175975
x7      [-]    : 0.6    y7      [-]    : 0.478338
x8      [-]    : 0.7    y8      [-]    : 0.5314855
x9      [-]    : 0.8    y9      [-]    : 0.57704
x10     [-]    : 0.9    y10     [-]    : 0.6150015
x11     [-]    : 1      y11     [-]    : 0.64537
```

Finalmente PROG convierte ese valor en Kd, que es el coeficiente de pérdida de carga.

```
- GENERAL DATA :

Name          = PROG1
Comment       =
Writing       = YES

- REFERENCES X :

FP_KV y 1 0 Kv [-]

- REFERENCES Y :

VALVE1 K=y1 1 0

- DATA :

Kv=max(1e-6,x1)
Kd=1/(Kv^2)
y1 = Kd

- PARAMETERS :

dT [sec] = 0.000000000000000E+000

- INITIAL CONDITIONS :

kdT [sec] = 0.000000000000000E+000
y1 [1] = 1.000000000000000E+012
```

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

En la figura 35 podemos ver el golpe de ariete producido.

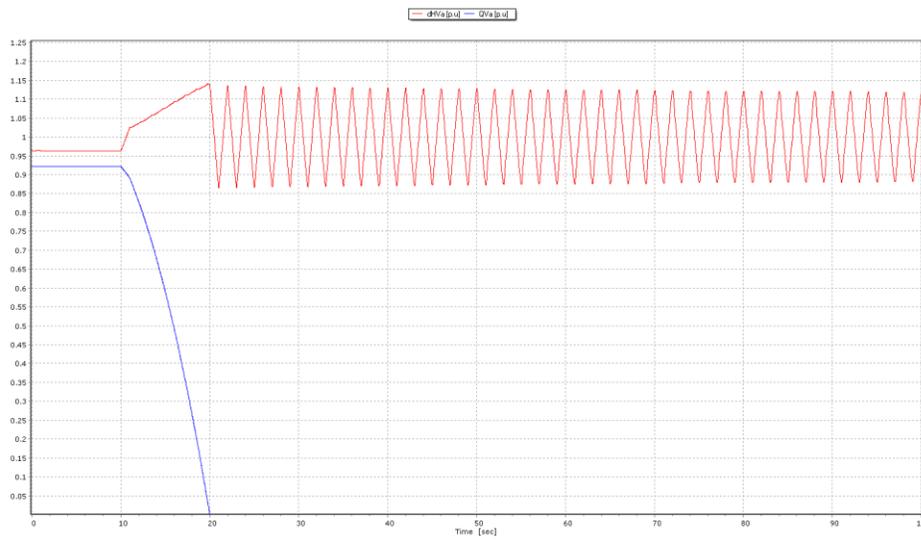


Figura 35 - Evolución de la presión y el caudal en la válvula.

Version modificada

En este caso vamos a sustituir el trabajo realizado por el FPOINTS y vamos a configurar un UDLimit para que realice idéntico trabajo como se puede observar en la figura 36.

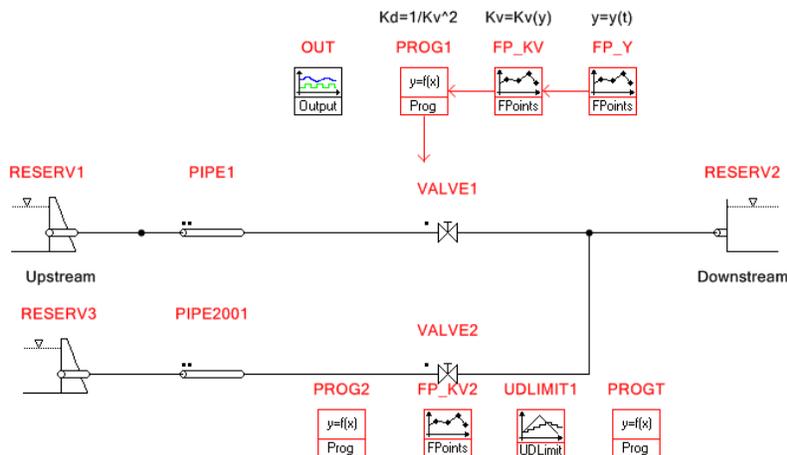


Figura 36 - Versión modificada del tutorial sobre golpe de ariete

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

El bloque PROG2 está configurado de manera que envíe una señal al bloque UDLimit1 para definir el comienzo del cierre. Este comienzo está configurado medio segundo después del original para poder comparar ambos resultados.

```
- GENERAL DATA :  
  
Name           = PROGT  
Comment        =  
Writing        = YES  
  
- REFERENCES X :  
  
PROG2 Time 1 0  
  
- REFERENCES Y :  
  
- DATA :  
t=x1  
tTrip=10.5  
y1= 0.8*LE(t,tTrip)  
y1= max(y1,0.000001)  
  
- PARAMETERS :  
dT [sec] = 0.000000000000000E+000  
  
- INITIAL CONDITIONS :  
kdT [sec] = 0.000000000000000E+000  
y1 [1] = 1.000000000000000E-006
```

Tras esto, podemos definir el UDLimit como:

```
- GENERAL DATA :  
  
Name           = UDLIMIT1  
Comment        =  
Writing        = YES  
  
- REFERENCES X :  
  
PROGT y1 1 0  
  
- REFERENCES Y :  
  
- PARAMETERS :  
yu1 [1] = 1.000000000000000E+000  
yu2 [1] = 1.000000000000000E+000  
yu3 [1] = 1.000000000000000E+000  
yu4 [1] = 1.000000000000000E+000  
yu5 [1] = 1.000000000000000E+000  
dyu0 [1] = 1.000000000000000E-003  
dyu1 [1] = 0.000000000000000E+000  
dyu2 [1] = 0.000000000000000E+000  
dyu3 [1] = 0.000000000000000E+000  
dyu4 [1] = 0.000000000000000E+000  
dyu5 [1] = 0.000000000000000E+000  
yd1 [1] = 0.000000000000000E+000  
yd2 [1] = 0.000000000000000E+000
```

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

```
yd3      [1] = 0.000000000000000E+000
yd4      [1] = 0.000000000000000E+000
yd5      [1] = 0.000000000000000E+000
dyd0     [1] = 0.000000000000000E+000
dyd1     [1] = 0.000000000000000E+000
dyd2     [1] = 0.000000000000000E+000
dyd3     [1] = 0.000000000000000E+000
dyd4     [1] = 0.000000000000000E+000
dyd5     [1] = 8.000000000000000E-004
dT       [sec] = 1.000000000000000E-002

- INITIAL CONDITIONS :
kdT      [sec] = 1.000000000000000E-002
y1       [1] = 1.000000000000000E-006
```

El programa aún necesitará de un bloque FPOINTS con un PROG que nos proporcione Kv y lo transforme en KD:

```
- GENERAL DATA
Name      = FP_KV2
Comment   =
Writing   = YES

- REFERENCES X :
UDLIMIT1 y1 1 0

- REFERENCES Y :

- DATA :

x1      [-] : 0      y1      [-] : 0
x2      [-] : 0.1    y2      [-] : 0.0987055
x3      [-] : 0.2    y3      [-] : 0.189818
x4      [-] : 0.3    y4      [-] : 0.2733375
x5      [-] : 0.4    y5      [-] : 0.349264
x6      [-] : 0.5    y6      [-] : 0.4175975
x7      [-] : 0.6    y7      [-] : 0.478338
x8      [-] : 0.7    y8      [-] : 0.5314855
x9      [-] : 0.8    y9      [-] : 0.57704
x10     [-] : 0.9    y10     [-] : 0.6150015
x11     [-] : 1      y11     [-] : 0.64537
```

En las siguientes figuras 37 y 38, vemos claramente que los resultados son idénticos independientemente del sistema usado.

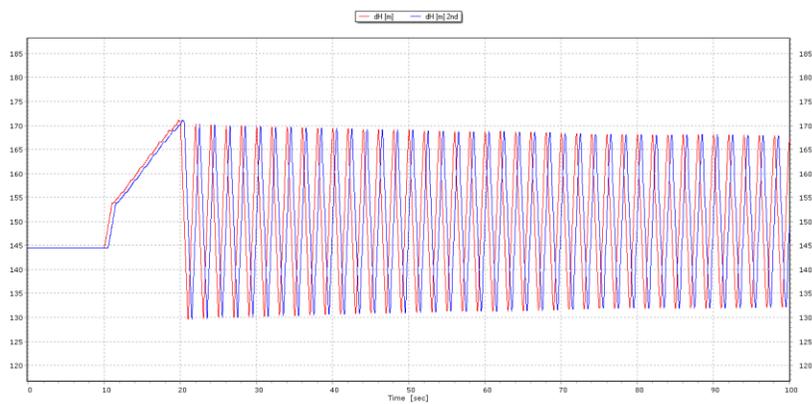


Figura 37 - Evolución de la presión en ambas líneas

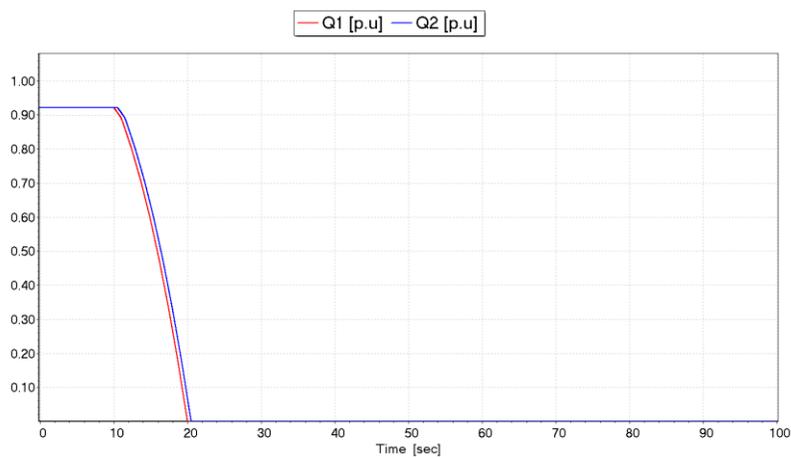


Figura 38 - Evolución del caudal en ambas líneas

5-Caso de estudio 1: Rechazo de carga (Load Rejection)

En este caso vamos a simular un cierre de emergencia, activado por el sistema de seguridad de la instalación, tras un rechazo de carga inesperado. En la instalación a estudiar tenemos un esquema muy sencillo. En primer lugar, un depósito aguas arriba que alimentará una conducción forzada, que acaba en una turbina Francis que desagua en un tanque aguas abajo. A continuación podemos ver, en la Figura 39, la instalación a estudiar.

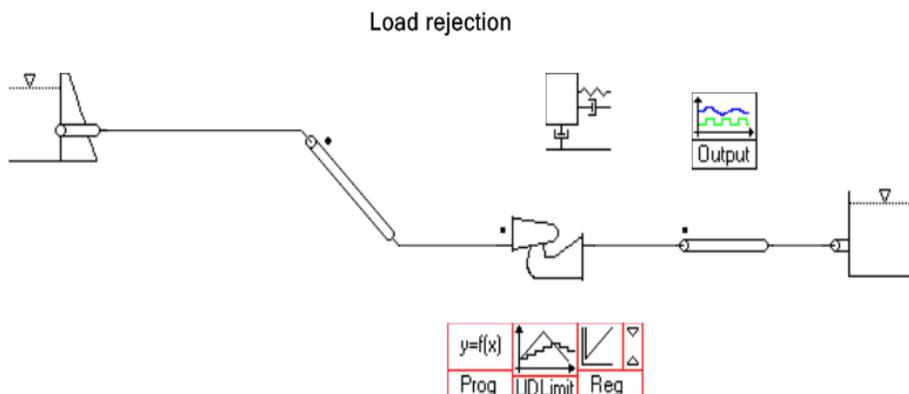


Figura 39 - Modelo de un rechazo de carga

En el segundo 1 provocaremos gracias al código realizado en el bloque PROG1, un rechazo de carga por lo que nuestro par pasará a 0 Nm. Una vez suceda esto comenzará la maniobra de cierre de emergencia programada para evitar daños en la instalación.

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

```
- GENERAL DATA :

Name           = PROG1
Comment        =
Writing        = YES

- REFERENCES X :

PROG1 Time 1 0 x1
JROTOR1 Text 1 0 x2
FTURB1 y 1 0 x3
REG1 y 1 0 x4
- REFERENCES Y :

JROTOR1 Text=y1 1 0 Text [Nm]
;FTURB1 y=y2 1 0 y [p.u]

- DATA :

t = x1
T = x2
yTurb = x3
yReg = x4
t_Trip = 1
t_Ein = 15
y1 = T*LE(x1,t_Trip)
y2 = yTurb*LE(t,t_Trip) + yReg*GE(t,t_Ein)

- PARAMETERS :

dT [sec] = 0.000000000000000E+000

- INITIAL CONDITIONS :

kdT [sec] = 0.000000000000000E+000
y1 [1] = 0.000000000000000E+000
y2 [1] = 0.000000000000000E+000
```

También se puede observar en el UDLimit1 la velocidad de cierre y apertura.

- GENERAL DATA :

```
Name           = UDLIMIT1
Comment        =
Writing        = YES

- REFERENCES X :

PROG1 y2 1 0 x1 [p.u]

- REFERENCES Y :

FTURB1 y=y1 1 0 y [p.u] Oeffnung

- PARAMETERS :

yu1 [1] = 1.000000000000000E+000
yu2 [1] = 1.000000000000000E+000
```

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

```
yu3 [1] = 1.000000000000000E+000
yu4 [1] = 1.000000000000000E+000
yu5 [1] = 1.000000000000000E+000
dyu0 [1] = 5.000000000000000E-005
dyu1 [1] = 1.000000000000000E+000
dyu2 [1] = 1.000000000000000E+000
dyu3 [1] = 1.000000000000000E+000
dyu4 [1] = 1.000000000000000E+000
dyu5 [1] = 1.000000000000000E+000
yd1 [1] = 1.000000000000000E-001
yd2 [1] = 1.000000000000000E+000
yd3 [1] = 1.000000000000000E+000
yd4 [1] = 1.000000000000000E+000
yd5 [1] = 1.000000000000000E+000
dyd0 [1] = 5.000000000000000E-005
dyd1 [1] = 1.000000000000000E-004
dyd2 [1] = 1.000000000000000E+000
dyd3 [1] = 1.000000000000000E+000
dyd4 [1] = 1.000000000000000E+000
dyd5 [1] = 1.000000000000000E+000
dT [sec] = 1.000000000000000E-003
```

- INITIAL CONDITIONS :

```
kdT [sec] = 0.000000000000000E+000
y1 [1] = 3.80382873956000E-001
```

Estos (Figura 40) son los resultados obtenidos para la apertura del distribuidor, la velocidad de rotación y el torque (y,n,t) p.u.:

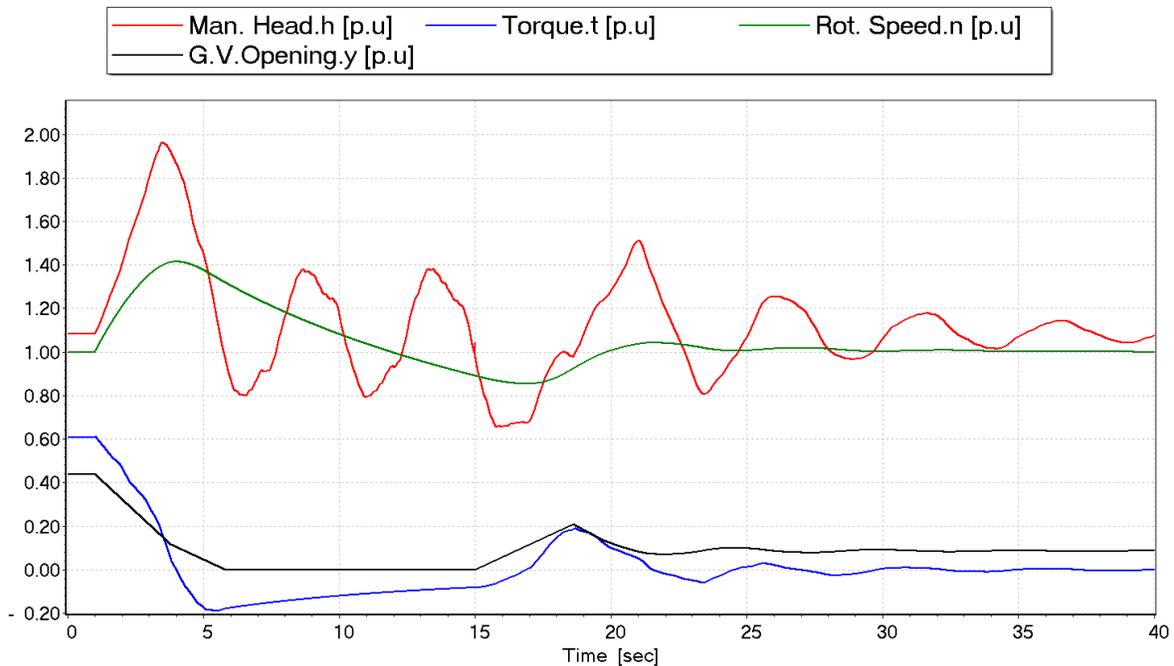


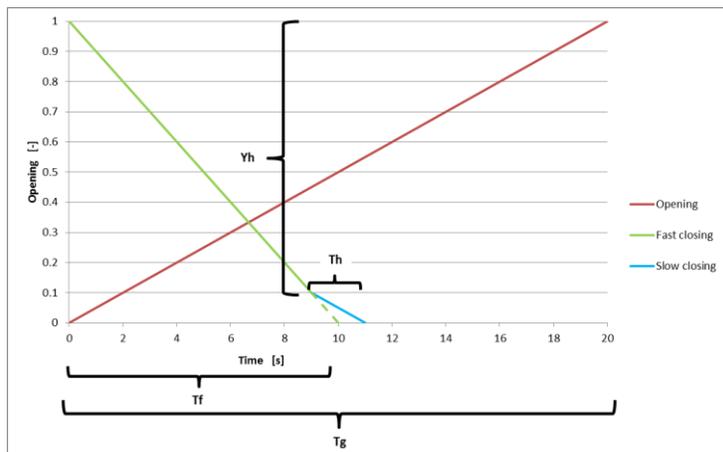
Figura 40 - Evolución de la apertura del distribuidor, la velocidad de rotación y el torque

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

En la figura 21 se puede observar como en el momento que se da el rechazo de carga, ($T=5s$) la velocidad de rotación del rotor de la turbina aumenta hasta que el par alcanza el valor de cero Nm. En el segundo 15 el distribuidor volverá a abrirse para alcanzar los valores nominales de velocidad de giro aunque sin carga. Esto permitirá realizar la conexión con el generador para una nueva puesta en marcha.

5.1- UDLIMIT: Simplificación de su configuración (T_f , T_g , T_h , Y_h).

En este caso se ha procedido a trabajar con el UDLimit para configurar los cierres del distribuidor. Por ello, para evitar realizar los cálculos en cada uno de los casos, se decidió realizar una simplificación del procedimiento añadiendo los parámetros T_f , T_g , T_h y Y_h en el apartado “Simulation Parameters” y poniéndolos en función del cálculo a realizar para cada uno, por lo que solo se ha de añadir los valores deseados y el programa realizará los cálculos, agilizando el trabajo (Figura 41).



T_g = Tiempo de apertura

T_f = Tiempo total de cierre con la velocidad rápida.

T_h = Tiempo de amortiguación.

Y_h = “longitud” del cierre rápido.

Figura 41 - Definición de los parámetros de apertura y cierre

Estos parámetros serán añadidos en “Sim Par” CONSTANT DATA donde podremos modificar sus valores y enviarlos de nuevo al bloque UDLimit.

- COMMENT :

- SIMULATION PARAMETERS :

```
Time min [sec] = 0.000000000000000E+000
Time max [sec] = 4.000000000000000E+001
Integration step [sec] = 1.000000000000000E-003
Precision for immediate events [%] = 1.000000000000000E+000
Precision for simultaneous events [%] = 1.000000000000000E+000
Integration process [-] = RK45
```

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

```
Write in output files every      [1] = 1.000000000000000E+000
Initial conditions from          [E/M] = E
Disturbances activated           [Y/N] = NO

- CONSTANT DATA :

Tf=10
TTg=20
Th=2
Yh=0.9
dT=1E-3

- PARAMETERS :

UDLIMIT1.yu1=1
UDLIMIT1.yu2=1
UDLIMIT1.yu3=1
UDLIMIT1.yu4=1
UDLIMIT1.yu5=1
UDLIMIT1.yd1=1-Yh
UDLIMIT1.yd2=1
UDLIMIT1.yd3=1
UDLIMIT1.yd4=1
UDLIMIT1.yd5=1
UDLIMIT1.dyu0=dT/TTg
UDLIMIT1.dyu1=0
UDLIMIT1.dyu2=0
UDLIMIT1.dyu3=0
UDLIMIT1.dyu4=0
UDLIMIT1.dyu5=0
UDLIMIT1.dyd0=(1-Yh)*dT/Th
UDLIMIT1.dyd1=dT/Tf
UDLIMIT1.dyd2=0
UDLIMIT1.dyd3=0
UDLIMIT1.dyd4=0
UDLIMIT1.dyd5=0
UDLIMIT1.dT=dT

- INITIAL CONDITIONS :

- DISTURBANCES :
```

Después de probar el nuevo sistema simplificado, podemos apreciar que el resultado es exactamente idéntico al anterior (Figura 42).

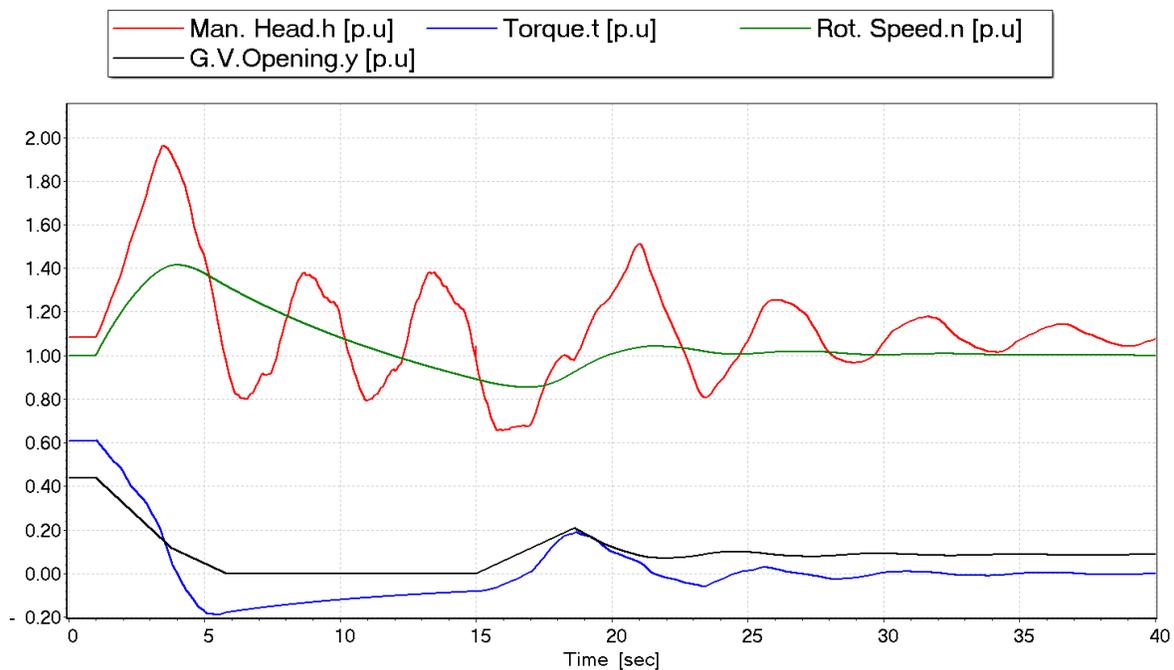


Figura 42 -Evolución de la apertura del distribuidor, la velocidad de rotación y el torque con la simplificación del UDLimit

5.2-Modificación del paso de tiempo. (DT=1)

Para este caso, se han seguido las indicaciones del Jefe de Transitorios de SIMSEN, el Dr. Michler, y se ha sustituido $dt=1E-3$ por $dt=1$ en los parámetros del UDLIMIT para evitar posibles problemas de cara a la siguiente actualización de SIMSEN, ya que debido al mayor número de cálculos que tendrá, se debe reducir el paso de tiempo para reducir el tiempo de cálculo.

Lo que hacemos es aumentar el paso de tiempo 1000 veces, por lo que modificaremos las velocidades de apertura y cierre aumentándolas 1000 veces también. En la figura 41 podemos observar los resultados obtenidos para este paso de tiempo. Vemos en la Figura 43 que no ha habido variación, por lo que el proceso se ha simulado adecuadamente.

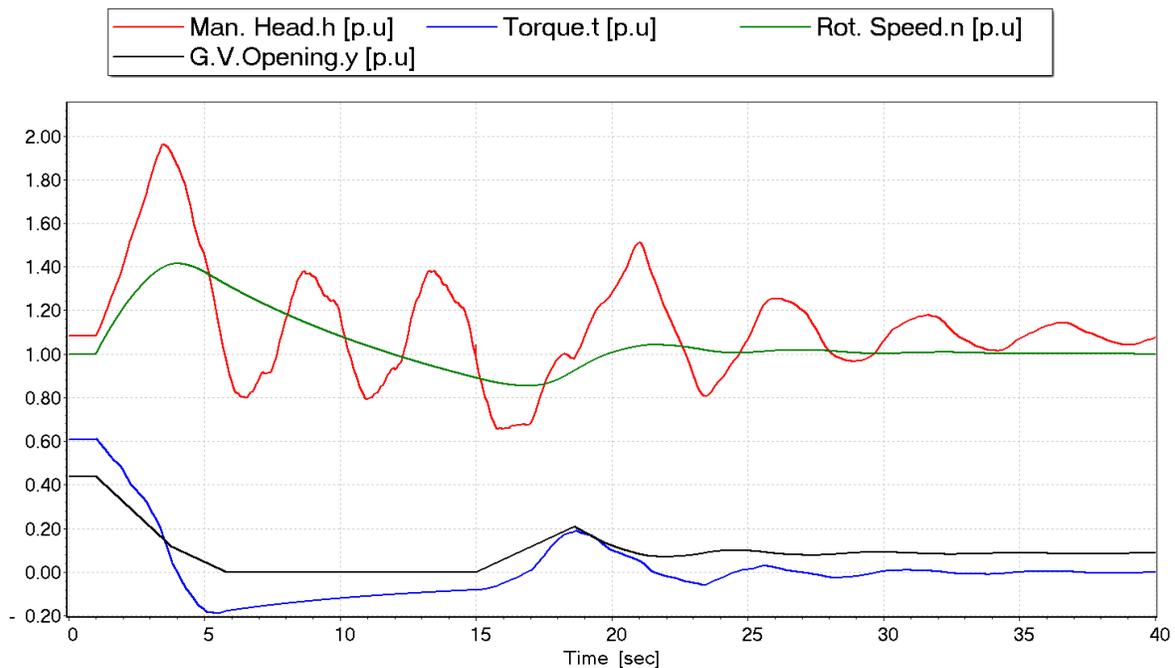


Figura 43 - Apertura del distribuidor, velocidad del rotor y torque (p.u.) $dt = 1[s]$.

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

6-Caso de estudio 2: Arranque de una turbina

6.1- Load Start

En este caso partimos de una situación de una turbina sin carga, o sea, desacoplada. Procederemos a acoplarla, manteniendo la velocidad nominal de giro del rotor de la turbina. Para ello ajustaremos los valores nominales y configuraremos el bloque PROG para que realice la simulación deseada (Figura 44).

- Modelo

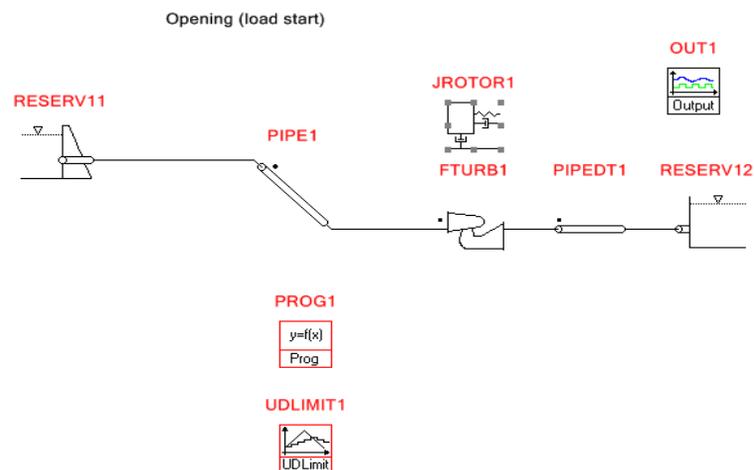


Figura 44 - Modelo en SIMSEN de una turbina Francis.

- **Bloques**

La configuración de los bloques presentes en la instalación de la Figura 44 se puede ver en el Anexo 1.A.

- **Resultados**

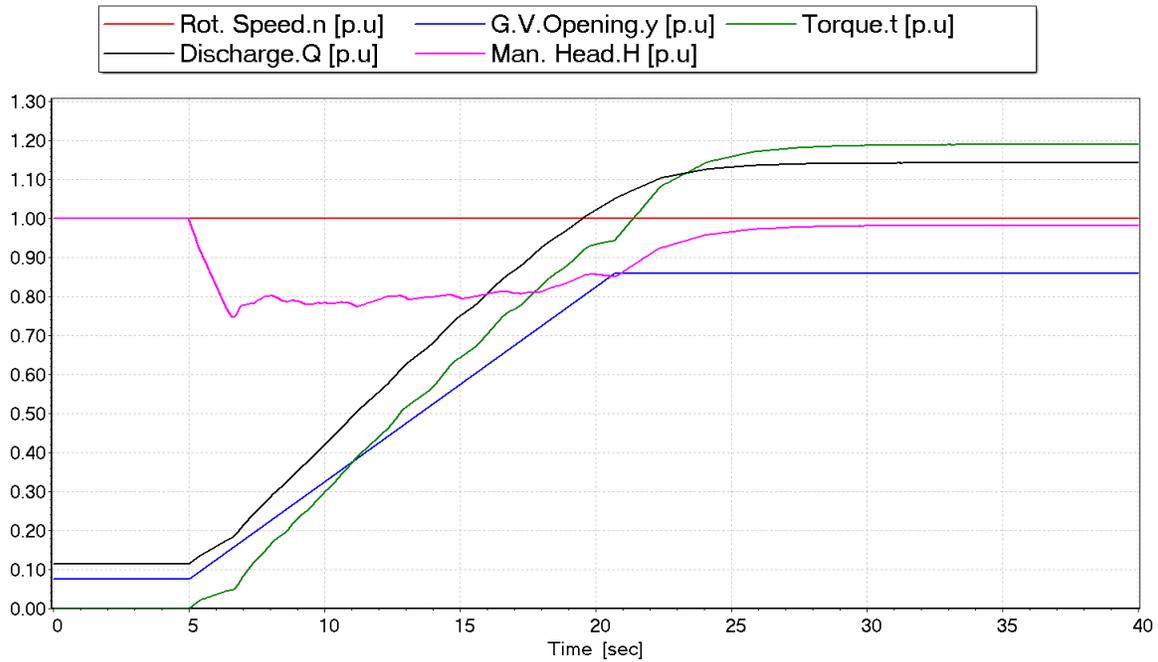


Figura 45 - Resultados del acoplamiento de una turbina Francis

Podemos ver en la Figura 45 que la velocidad del rotor permanece fija a 450 rpm y que la presión sube con una leve caída al hacer el empalme debido a la abertura del distribuidor. Se observa cómo al comienzo de la simulación, la distribución estaba levemente abierta, lo que nos proporciona el caudal necesario para mantener la velocidad de rotación a los 450 rpm deseados antes de que comience la maniobra.

6.2- Turbine Start

En este caso, hay una diferencia importante con respecto al caso anterior. Partimos de una situación de parada total, por lo que a excepción de la presión, el resto de valores está situado en cero. Por ello se deberá configurar un crecimiento de la velocidad de rotación que llegue a la velocidad nominal. Este crecimiento se regula por medio de la apertura de distribuidor de la turbina (Figura 46).

- Modelo

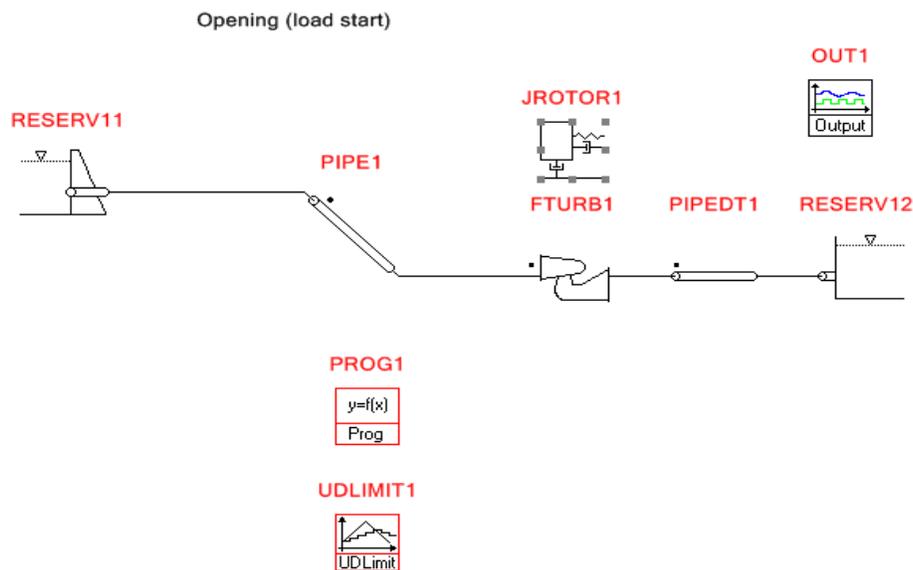


Figura 46 - Modelo en SIMSEN para un arranque total de una turbina Francis

- Bloques

La configuración de los distintos bloques de la instalación de la Figura 46 se puede ver en el Anexo 1.B.

- **Resultados**

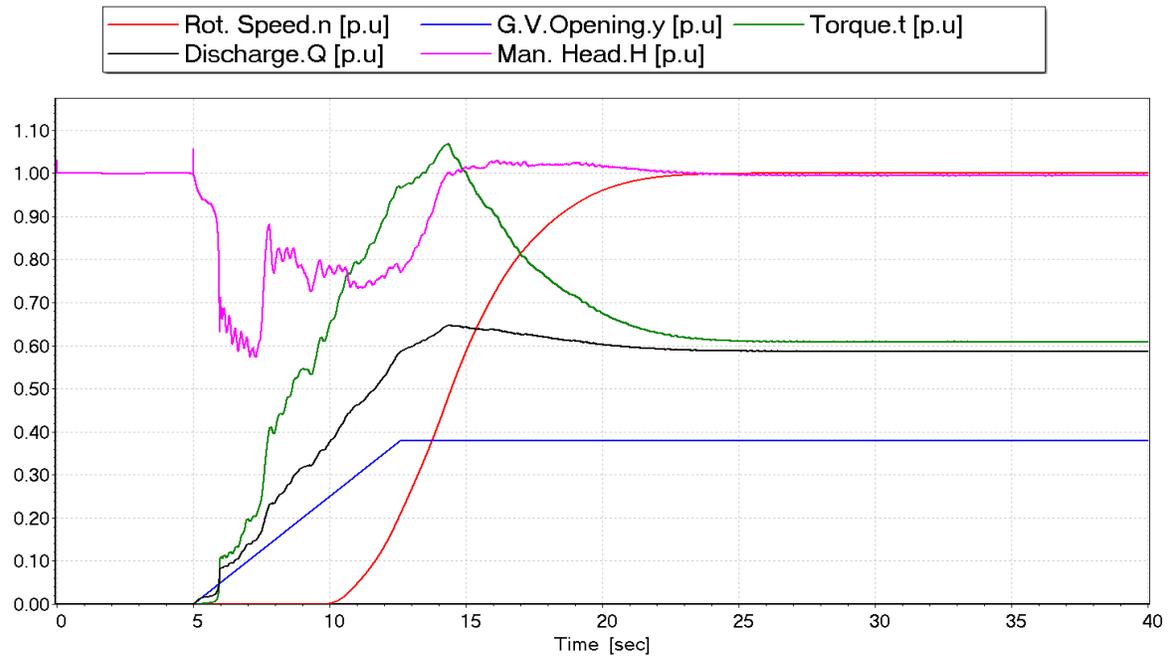


Figura 47 - Resultados de un arranque de una turbina Francis desde una situación de un paro total

Se puede apreciar claramente en la Figura 47 que a pesar de una leve caída de presión, el resto de valores crece hasta alcanzar valores nominales. En el segundo 5 se puede apreciar un ligero pico de presión puntual. Ese pico es un error de interpolación en las curvas características de la turbina producido por SIMSEN. Más adelante se tratará sobre ese problema y como solucionarlo.

7-Caso de Estudio 3: Estudio de golpe de ariete sobre diferentes maniobras de cierre en una turbina Pelton

En este caso de estudio se tratan distintas maniobras de cierre en una instalación con una turbina Pelton. En todos los casos se realizará la simulación con la misma instalación.

7.1-Cierre Normal

- Modelo

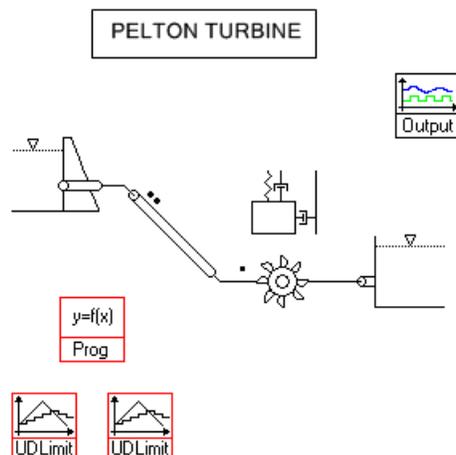


Figura 48 - Modelo para el estudio del golpe de ariete en una turbina Pelton

La configuración de los bloques que se ven en la Figura 46 se puede ver en el Anexo 2.A.

- Results

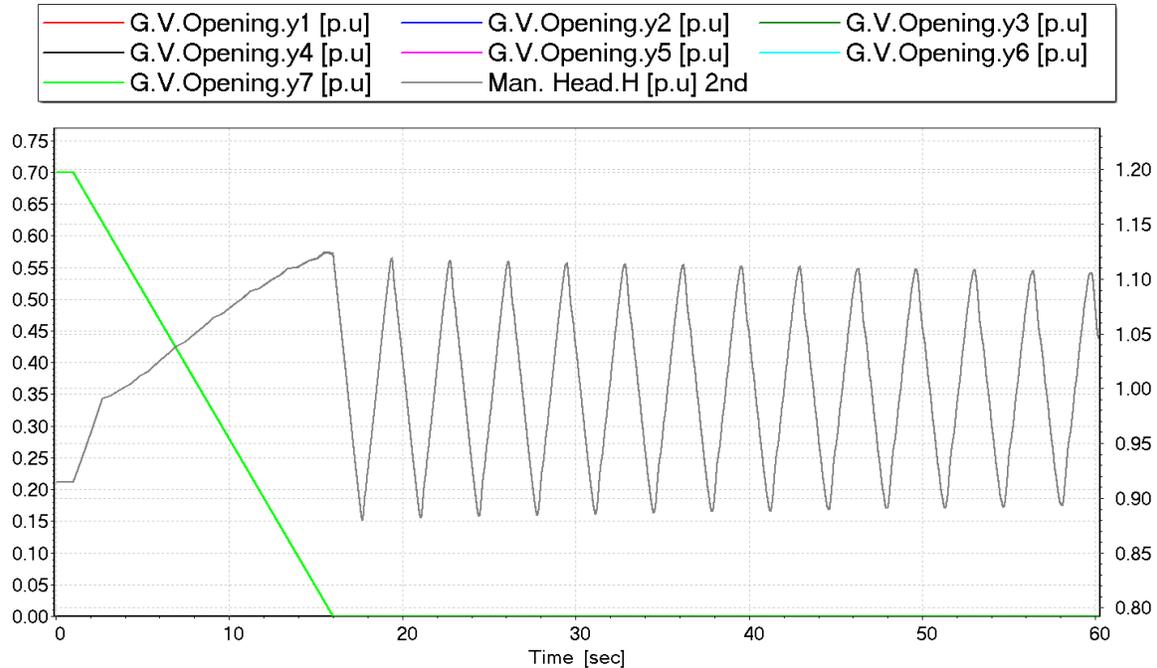


Figura 49 - Resultados cierre normal

Se aprecia claramente en la Figura 49 cómo la presión a la entrada de la turbina crece mientras la distribución se cierra. Tras el cierre se aprecia con claridad la onda producida tras el mismo.

7.2-Cierre escalonado

En esta simulación se podrán ver los resultados tras efectuar varios cierres de manera escalonada, o sea, con un intervalo de tiempo entre el cierre de un inyector a otro. La configuración de los bloques, incluido el programa que define la simulación, se puede ver en el Anexo 2.B

- Resultados

- Primera simulación

Tiempo de cierre de los inyectores (Figura 50):

- $y1 = 1 \text{ s}$
- $y2 = 2 \text{ s}$

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

- $y_3 = 3$ s
- $y_4 = 4$ s
- $y_5 = 5$ s
- $y_6 = 6$ s
- $y_7 = 7$ s

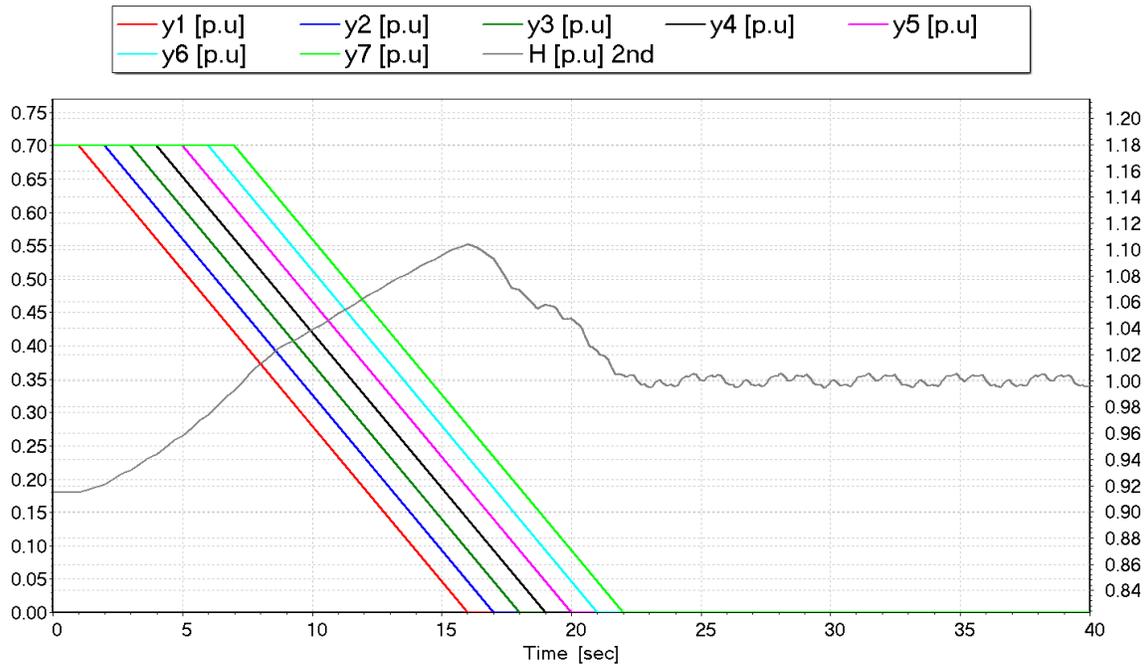


Figura 50 - Cierre escalonado de una Pelton (tiempo de cierre entre inyectores = 1s)

- Segunda simulación

Tiempo de cierre de los inyectores (Figura 51):

- $y_1 = 5$ s
- $y_1 = 10$ s
- $y_1 = 15$ s
- $y_1 = 20$ s
- $y_1 = 25$ s
- $y_1 = 30$ s
- $y_1 = 35$ s

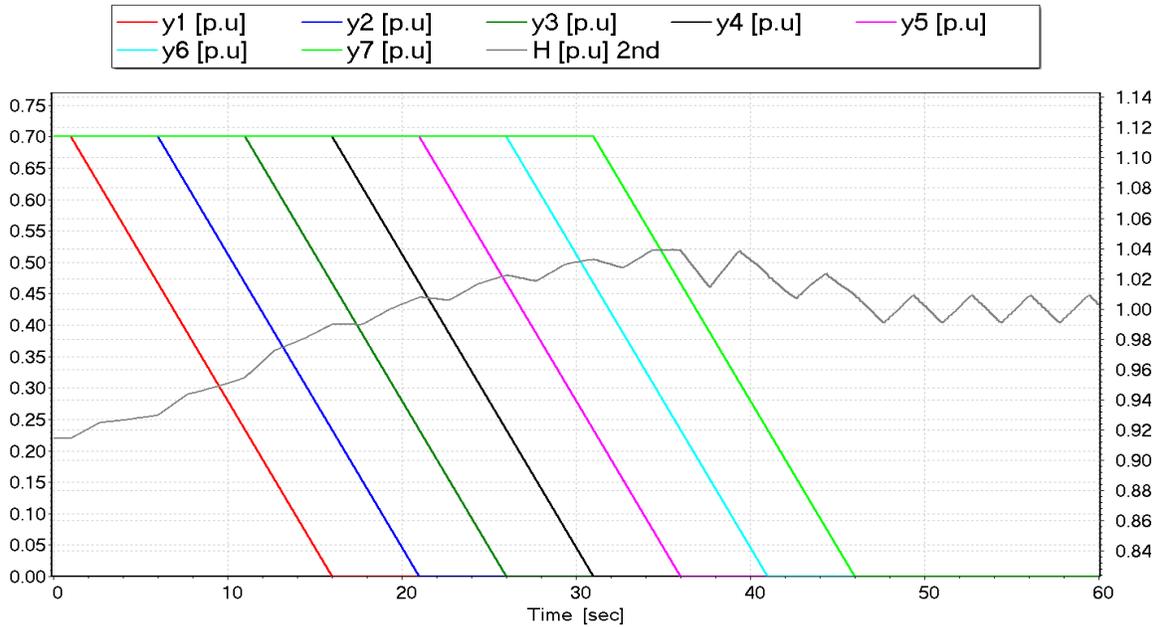


Figura 51 - Cierre escalonado de una Pelton (tiempo de cierre entre inyectores = 5s)

- Tercera simulación

En esta tercera simulación (Figura 52) el paso de tiempo entre el cierre de inyectores es de 15 segundos, que es el tiempo que necesita un inyector para cerrarse, por lo que no habrá dos inyectores cerrándose al mismo tiempo.

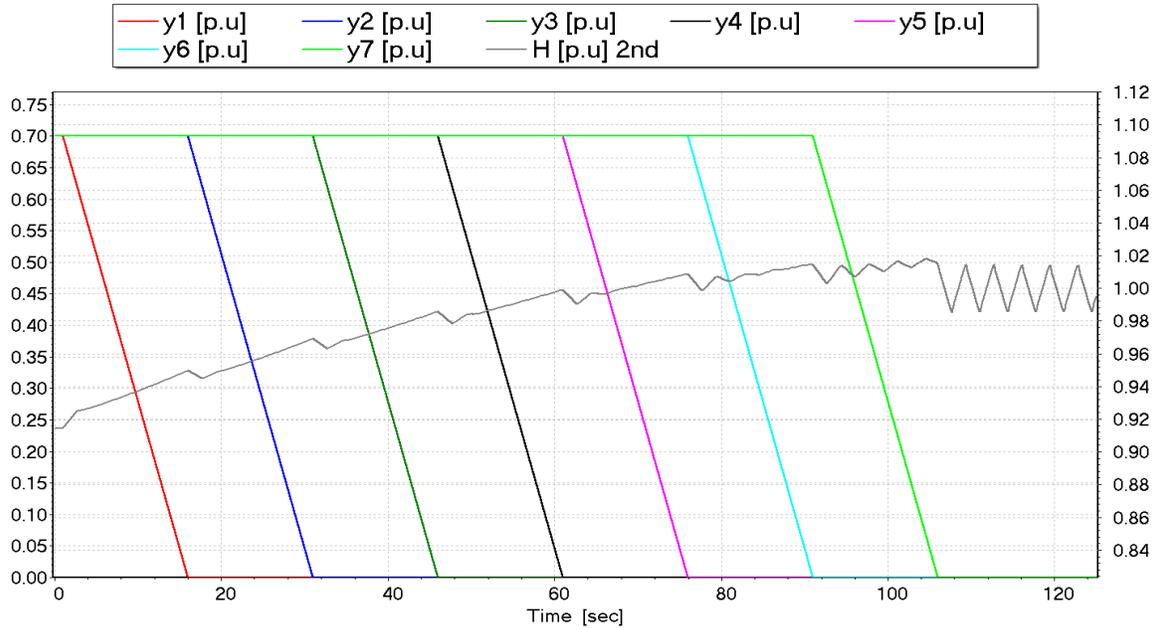


Figura 52 - Cierre escalonado de una Pelton (tiempo de cierre entre inyectores = 15s)

7.3-Cierre amortiguado.

En este caso se ha añadido un UDLIMIT en el que se configuran dos velocidades de cierre distintas para aplicar un cierre amortiguado.

- **Resultados**
- Primera simulación.

En este caso (Figura 53) se realiza un cierre amortiguado sin cierre escalonado de inyectores. Se cerrarán todos los inyectores al mismo tiempo pero se realiza un cierre amortiguado. Cuando la apertura del distribuidor sea del 20%, la velocidad de cierre se reducirá.

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

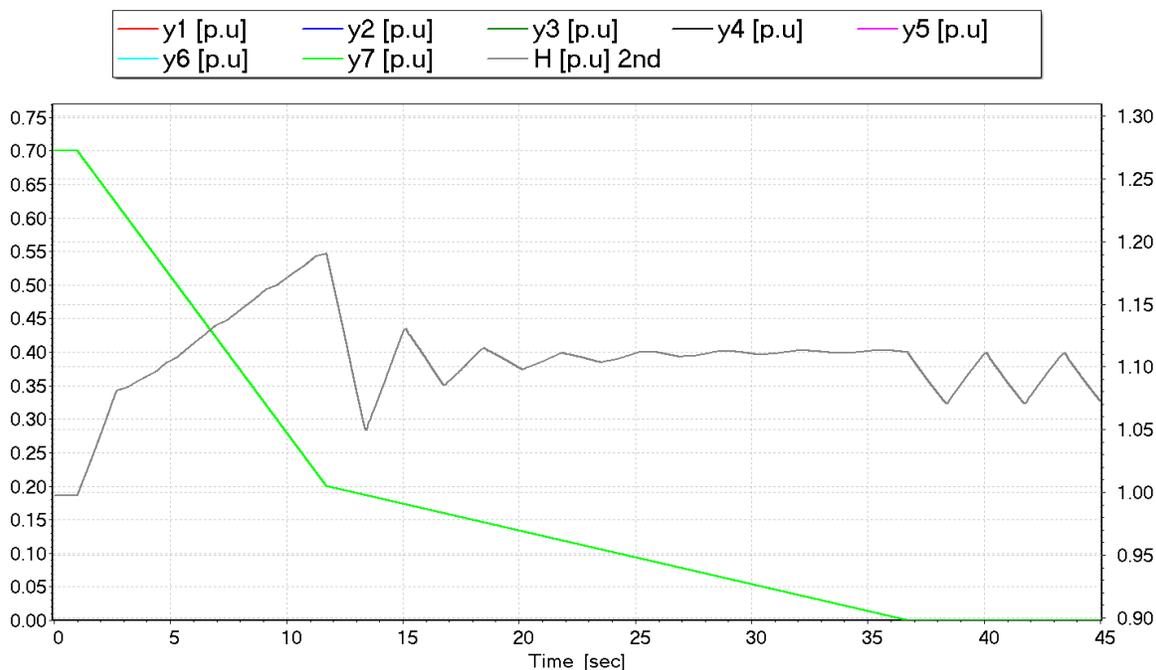


Figura 53 - Cierre amortiguado de una turbina Pelton

- Segunda simulación.

Se ha realizado el mismo cierre amortiguado que en el caso anterior salvo que en esta simulación sí que se realizará un cierre escalonado (Figura 54). El tiempo de cierre entre inyectoros está configurado en 5 segundos.

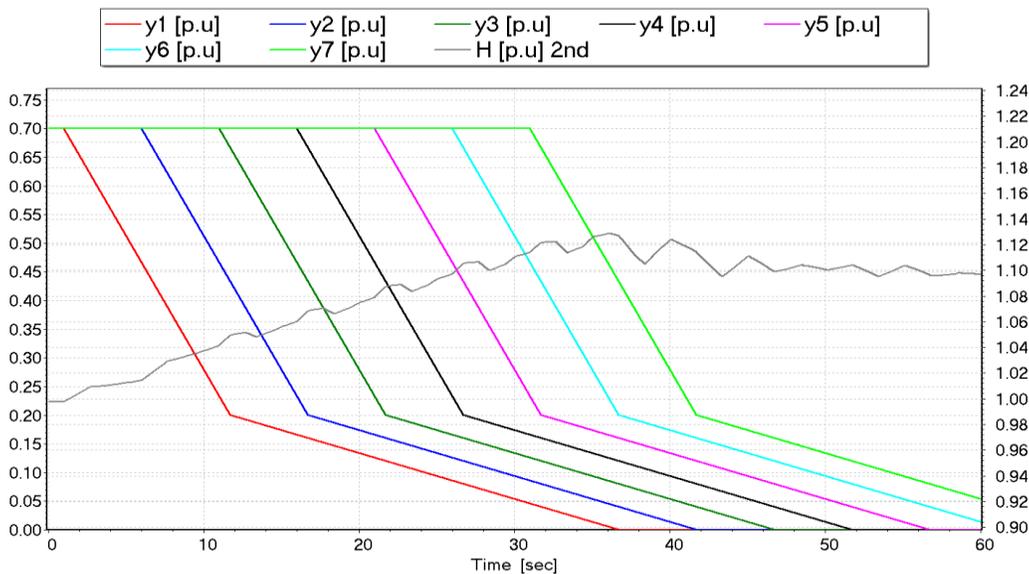


Figura 54 - Cierre amortiguado y escalonado de una turbina Pelton

7.4-Surge Shaft (chimenea de equilibrio o tanque de compensación)

- **Resultados**
- Primera simulación

En esta simulación (Figura 55) configuramos un cierre normal, o sea, con una sola velocidad de cierre y cerrando todos los inyectores al mismo tiempo, pero se ha añadido a la instalación una chimenea de equilibrio.

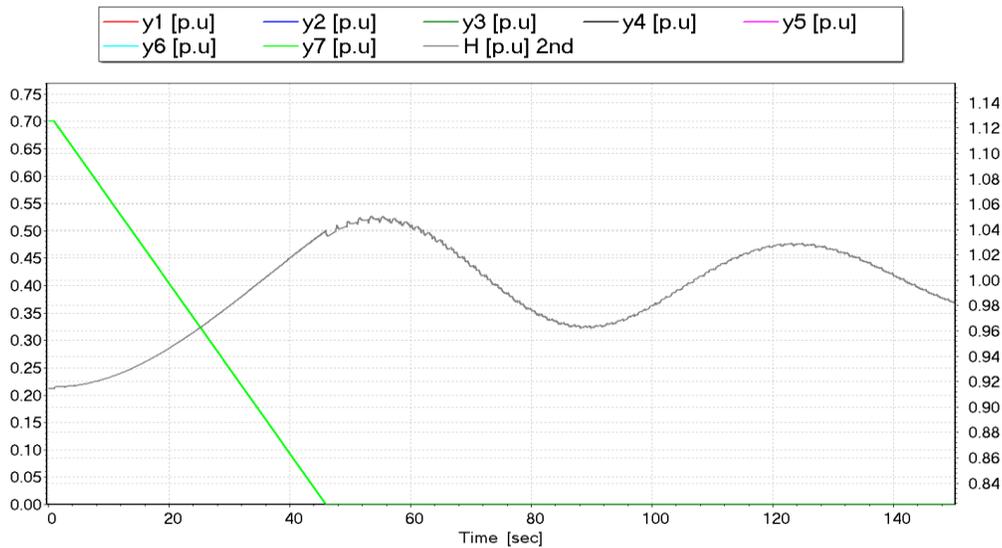


Figura 55 - Cierre normal de una turbina Pelton con una chimenea de equilibrio

- Segunda simulación

Misma instalación que en el caso anterior, con la chimenea de equilibrio pero realizando un cierre escalonado aun un intervalo de 5 segundos entre cierre de inyectores (Figura 56).

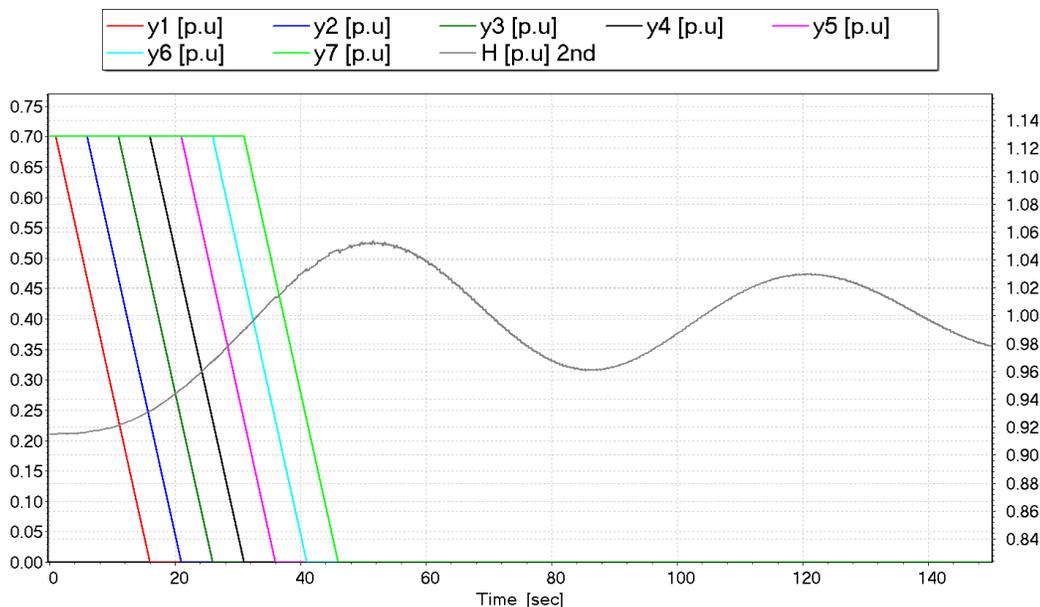


Figura 56 - Cierre escalonado de una turbina Pelton con una chimenea de equilibrio

4.5- Comparativa de resultados.

	Tiempo de cierre entre inyectores [s]	Cierre amortiguado	Chimenea de equilibrio	Golpe de ariete [Presión min – presión max p.u. ¹]	Presión máxima [%] ²
1	0	NO	NO	0.88 - 1.12	13
2	1	NO	NO	0.995 - 1.005	10
3	5	NO	NO	0.99 - 1.01	4
4	15	NO	NO	0.985 - 1.015	2
5	0	SI (20%)	NO	0.96 - 1.04	9.5
6	5	SI (20%)	NO	0.995 - 1.005	3.5
7	0	NO	SI	0	7
8	5	NO	SI	0	5

¹ La diferencia de presiones se mide sobre la unidad que equivale a la presión que tiene la válvula de entrada a la turbina cuando se encuentra cerrada y en equilibrio.

² Incremento porcentual de presión con respecto a la presión que tiene la válvula de entrada a la turbina cuando se encuentra cerrada y en equilibrio.

Tabla 9 - Resultados del estudio sobre golpe de ariete en una turbina Pelton

Como cabía esperar, la mejor situación se da con la chimenea de equilibrio, pero se debe entender que no siempre es posible instalarla debido a su coste y en muchas ocasiones, a lo difícil que resulta trabajar por la orografía del terreno. Es conveniente remarcar que a mayor tiempo entre cierres mayor pico de presión tenemos en el golpe de ariete. Esto se debe a que reducimos el tiempo de influencia entre inyectores. Es a tener en cuenta que la simulación se ha realizado para una turbina Pelton¹ por lo que las medidas para contrarrestar posibles aumentos de presión o daños por fatiga han de ser mayores que en otros casos.

¹ Los rangos de presión de la turbina Pelton son más altos por lo general que los de otras turbinas.

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

8-Caso de estudio 4: maniobra de apertura y cierre

Es este caso se va a realizar una simulación en la que se tendrá un fallo que provoca una maniobra de apertura y cierre repentino. Para ellos se ha desarrollado un programa en Octave que estabiliza y simula todos los casos posible aumentando el tiempo un segundo en cada caso.

8.1-Modelo

En esta simulación (Figura 57) se ha diseñado una instalación similar a las anteriores con dos depósitos y una turbina Pelton.

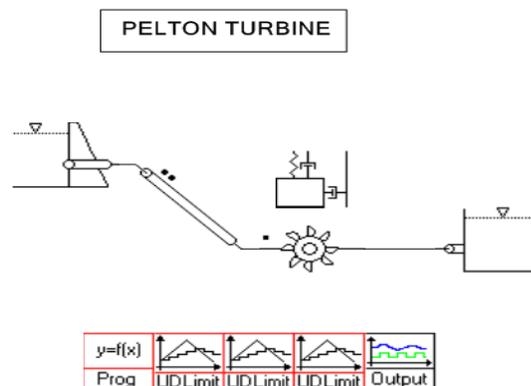


Figura 57 - Modelo para la maniobra de apertura y cierre

8.2-Variable Tiempo de apertura y cierre (Tr)

Se establece Tr como una variable que representa el tiempo de apertura y cierre (Figura 58), por lo que $Tr/2$ será el tiempo de apertura y $Tr/2$ el cierre. El objetivo de esta simulación es estudiar la evolución de las sobrepresiones y depresiones según un Tr dado. Gracias a esta simulación podremos ver la máxima sobrepresión y depresión que podría sufrir una instalación.

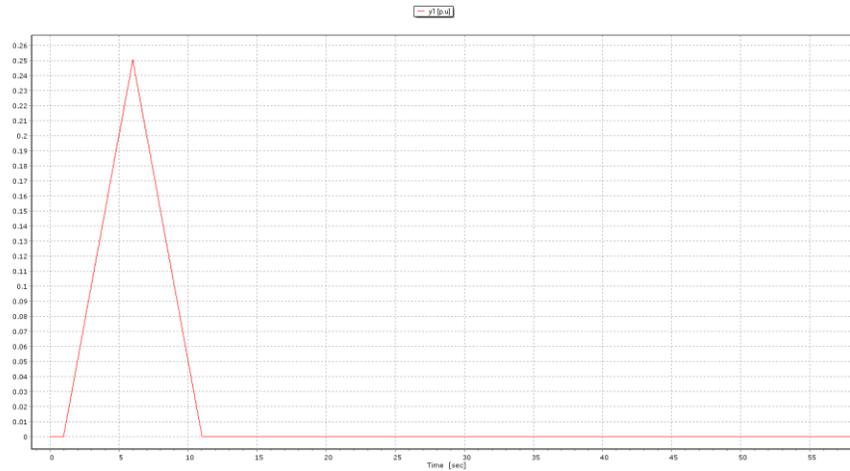


Figura 58 - Evolución distribución en una simulación con $Tr=10s$ de apertura y cierre

8.3-Análisis de los bloques

La única diferencia con la instalación tipo de turbinado es que finalmente se tuvo que añadir un tercer bloque UDLimit. Esto se debe a un problema de picos de presión que ya comentamos en el primer caso de estudio y que veremos en profundidad en el siguiente punto. Como ya se explicó en el caso de estudio anterior, el segundo UDLimit en las turbinas Pelton se configura para definir la posición de los deflectores. La configuración de los bloques que se ven en la Figura 55 se puede ver en el Anexo 3.A

8.4-Primeros resultados y problemas

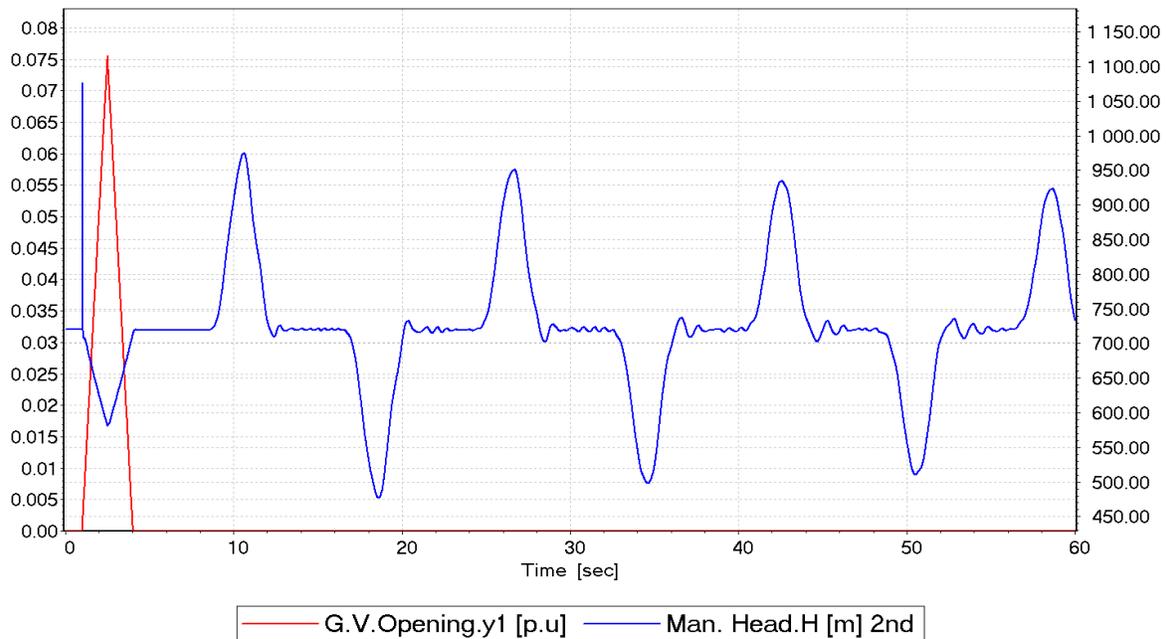


Figura 59 - Ejemplo del fallo de picos de presión de SIMSEN

En un primer intento de simular el caso, se puede apreciar con cierta facilidad en la Figura 59, que al comenzar la maniobra se produce un pico de presión que obviamente no se da en la realidad. El problema es que necesitamos valorar el máximo de presión dado en la simulación, y en varios de los casos, el pico de presión falso obtiene el valor de presión más alto.

Simsen usa unos archivos con las curvas características de la turbina para simular las situaciones mediante interpolación, pero a veces esa interpolación produce errores como el que sucede ahora. El fallo suele suceder al comenzar a abrir el distribuidor partiendo desde cero.

Solución.

La solución que se propone, aunque no resuelva el problema al 100%, devuelve unos datos que serán válidos para el propósito de este caso, que es el de analizar los máximos y mínimos valores de la presión. La solución consiste en pasar la curva de presión por un UDLimit con una velocidad máxima que filtrará la información no permitiéndole crecer como lo hace, aunque seguirá habiendo un pequeño pico de presión irreal, casi inapreciable.

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

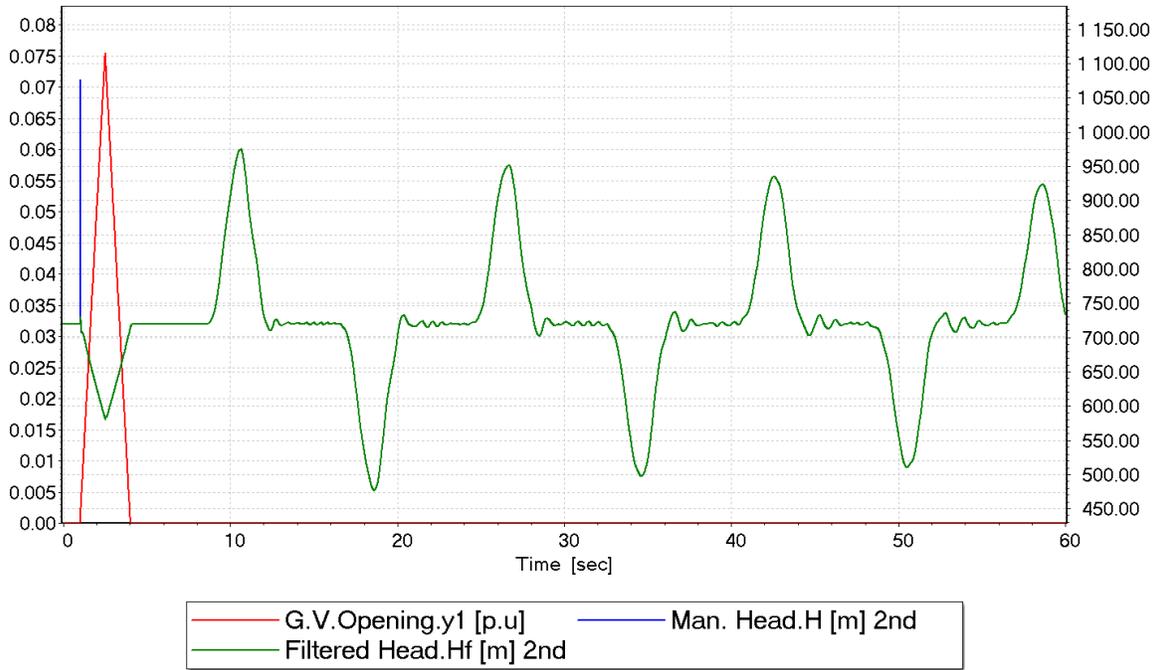
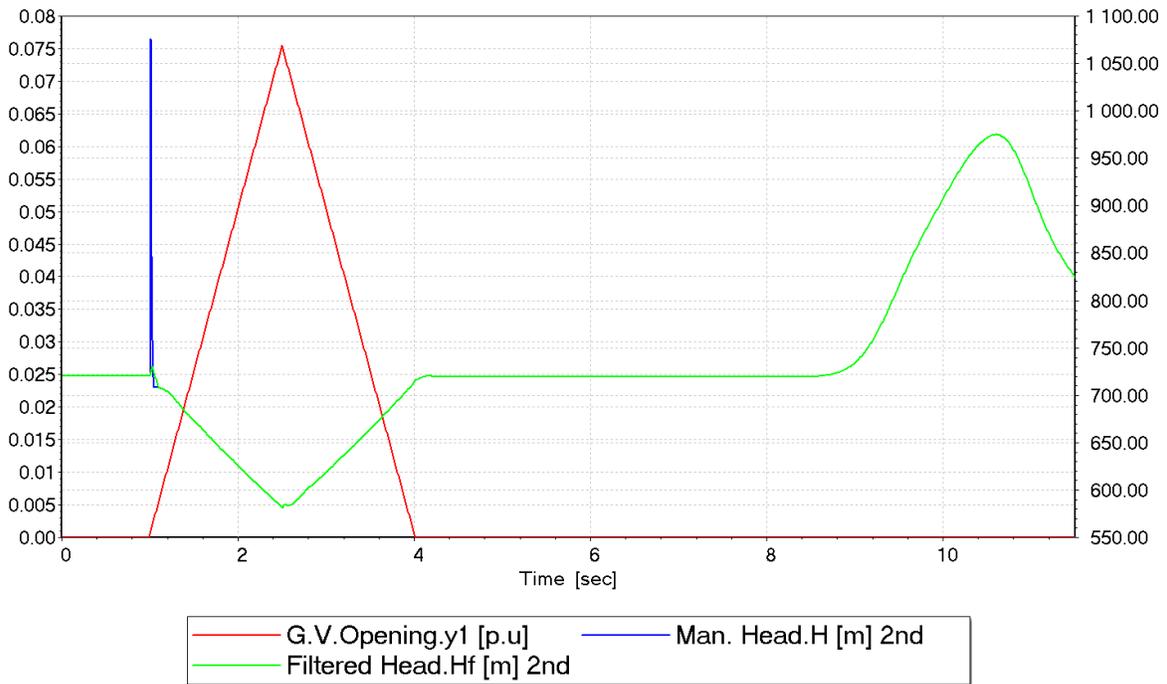


Figura 60 - Resultados con el UDLimit filtrando la curva de presión



C

Figura 61 - Diferencia de pico de presión con y sin UDLimit

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

Es fácil de ver en las Figuras 60 y 61 que el pico de presión prácticamente ha desaparecido. Lo más importante es que ahora podremos extraer cada presión máxima de cada uno de los casos desde el archivo OUT Data.

8.5-Simulación complementaria en el compilador Octave

Para poder realizar las simulaciones y sus respectivas estabilizaciones, en el Anexo 3.B se puede leer el programa que se desarrolló en Octave para la simulación y estabilización de los 40 casos (Figura 62). Esto es posible gracias a la opción que nos proporciona SIMSEN de hacer una llamada al archivo *SimsenCLI.exe* que permite manejar SIMSEN desde un software externo de programación. Al final de las 40 simulaciones, Octave almacenará los 40 máximos y mínimos y nos dará una gráfica que lo muestre (Figura 63), además de decirnos cuál es el máximo de entre todos los máximos y su *Tr* (Figura 64).

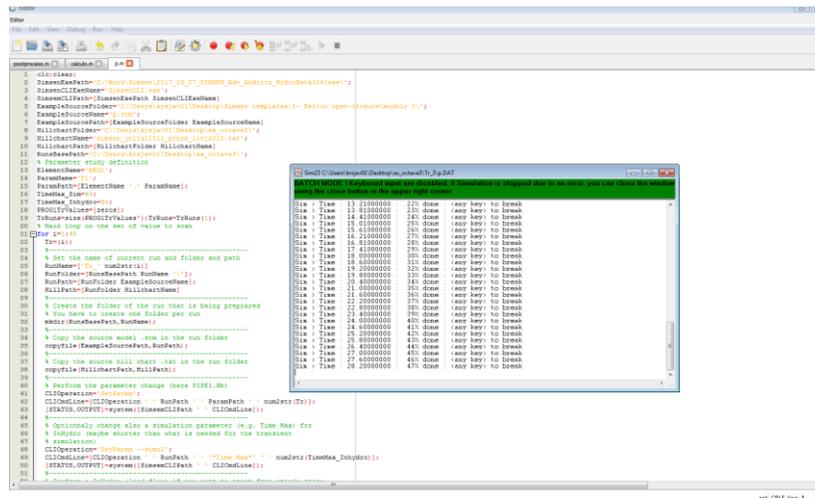


Figura 62 - Ejecución de la simulación de SIMSEN desde Octave

Resultados

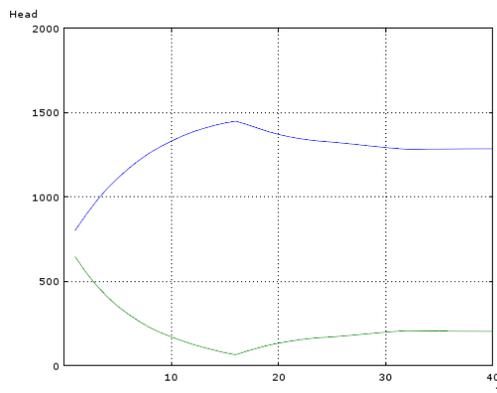


Figura 63 - Gráfico de Octave con la evolución de máximos y mínimos

```
Command Window
The maximum head reached after simulating from Tr=1 to Tr=40 is 1447.6, and it is done for a Tr equal to 16
The minimum head reached after simulating from Tr=1 to Tr=40 is 65.482, and it is done for a Tr equal to 16

The percentage growth of pressure in the maximum pressure point will be 101.056>> |
```

Figura 64 - Mensaje de Octave con el máximo y el mínimo

8.6-Análisis de resultados

Se ve claramente que el máximo sucede para un $Tr=16$ s, algo que era de esperar debido a lo estudiado en el capítulo 3 sobre la evolución de una onda. La onda tarda 4 segundos en recorrer la tubería, y debe recorrer 4 veces esta para realizar el fenómeno completo de golpe de ariete, por lo que el máximo se dará en 16 segundos. En la Figura 65 se puede ver el recorrido que realiza la onda.

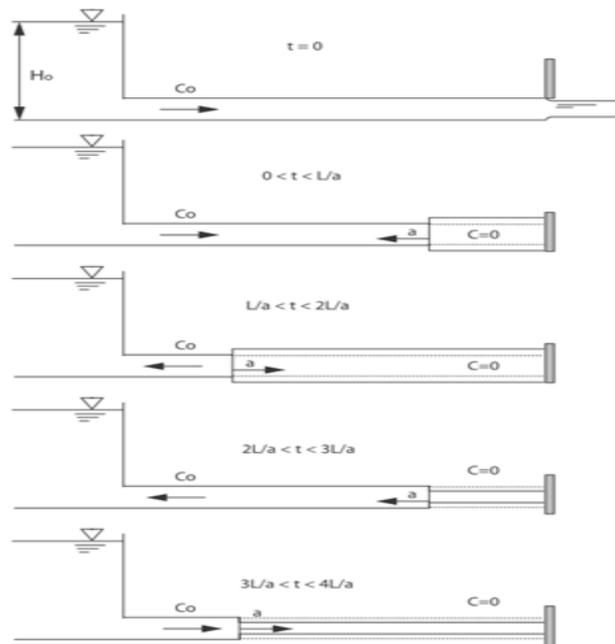


Figura 65 - Evolución de una onda en una tubería a presión

A continuación podemos ver cómo se desarrolla la simulación en tres casos diferentes

Tr=3

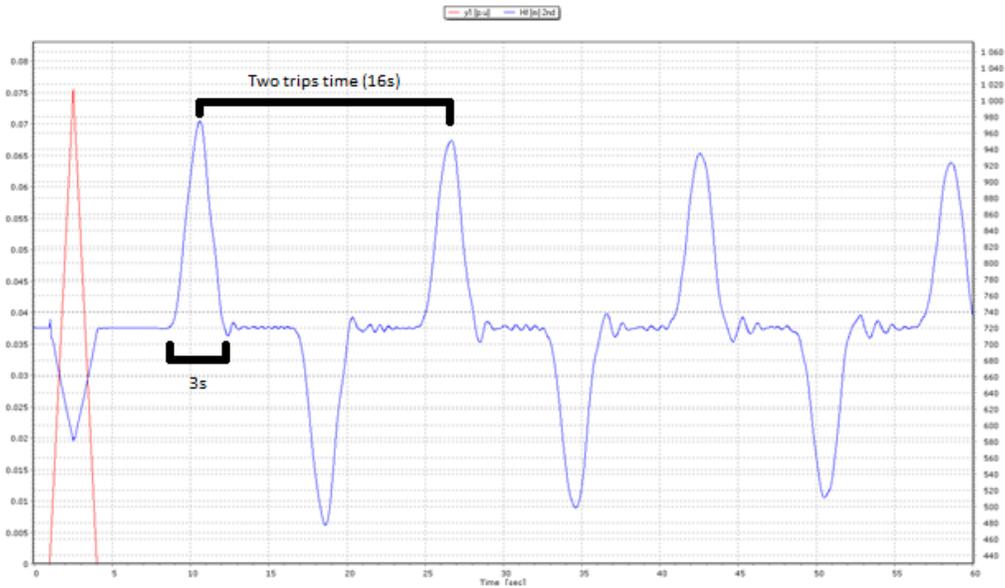


Figura 66 - Apertura y cierre con Tr=3

En la Figura 66 se puede observar con claridad un pico de depresión y sobrepresión de 3 segundos que coincide con el $Tr=3$ s. Entre picos de presión pasarán 16 segundos que es lo que teóricamente se ha visto que debe tardar la onda en volver a su máximo.

Tr=7

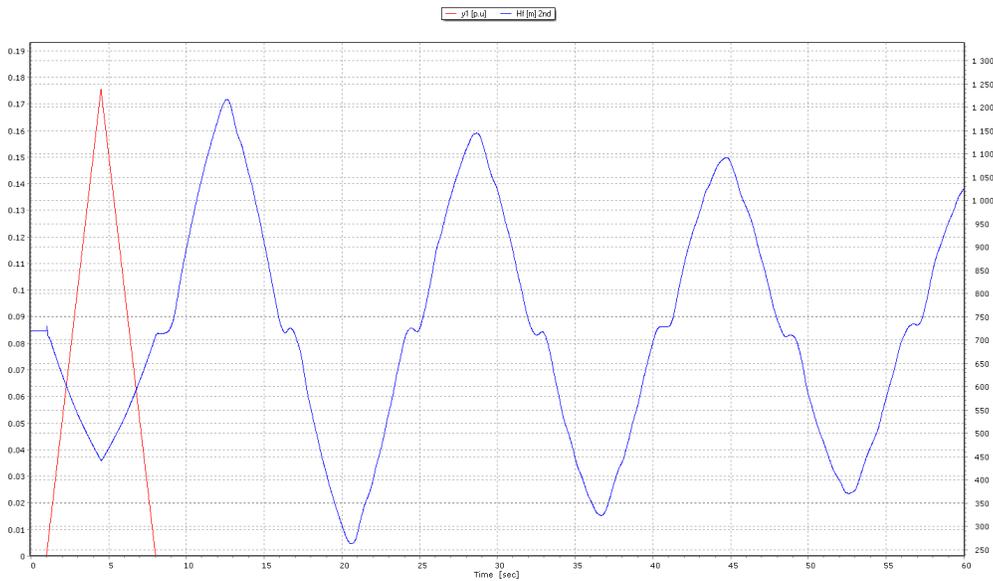


Figura 67 - Apertura y cierre con Tr=7s

En este caso se puede observar en la Figura 67 que al ser $Tr=7$ s, cuando nuestra onda de presión se disipa por completo, comienza una depresión un segundo después, por lo que con un $Tr=8$ coincidiría el final de la sobrepresión con el comienzo de la depresión.

Tr=16

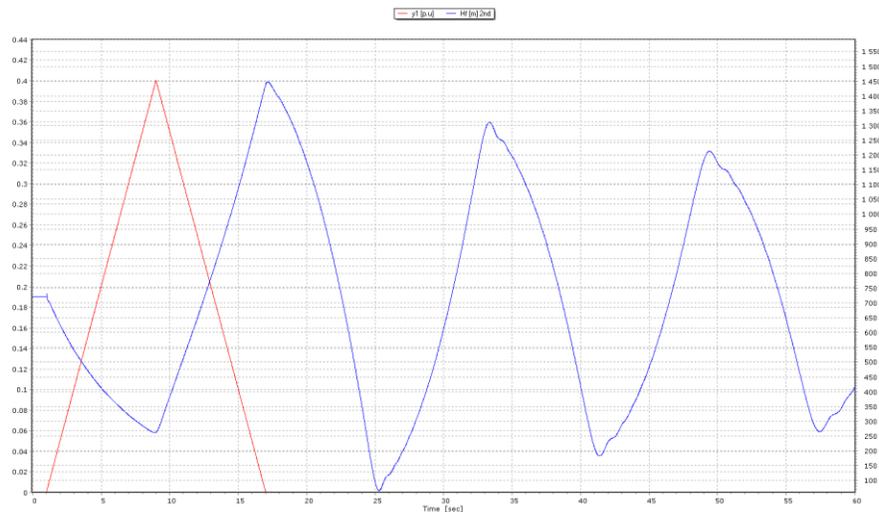


Figura 68 - Apertura y cierre con $Tr=16s$

En el caso de $Tr=16$ s (Figura 68) se obtienen los valores máximos y mínimos de presión. 8 segundos tras comenzar la apertura tenemos una onda que produce un aumento de presión durante 8 segundos. Esta subida de presión coincide con la ocasionada por los 8 segundos de cierre, lo que nos da un máximo de presión en el segundo 17, o sea, 16 más el segundo que tarda el sistema en iniciar la apertura. Este máximo coincidirá con el cierre total de los inyectores o de la válvula de acceso a la turbina. En la Figura 66 se puede apreciar también la típica forma de aleta de tiburón provocada por la cohesión entre partículas.

8.7-Conclusion

Se deberá evitar por todos los medios que pueda pasar algo como lo que sucede con un tiempo de reflexión de la onda de $Tr=16$ s, pues la sobrepresión dobla la original, y la caída drástica de presión prácticamente roza el vacío, lo que provocaría no solo problemas por sobrepresión, sino también una más que probable cavitación o un colapso de la tubería por depresión.

9-Caso de estudio 5: Dos turbinas Francis; cierre y apertura

En este caso estudiaremos la influencia entre turbinas en un caso de apertura y cierre de dos turbinas Francis. Se podrá la interacción de dos turbinas Francis que operan en paralelo si se cierran al mismo tiempo o con un intervalo de tiempo entre ambas.

9.1-Modelo

- Introducción

En la Figura 70 se puede ver el modelo que se desarrolló para esta simulación. Consta de una tubería principal que se divide en dos tuberías de acceso a ambas turbinas Francis. Ambas turbinas descargan en dos tuberías que llegan a un depósito aguas abajo.

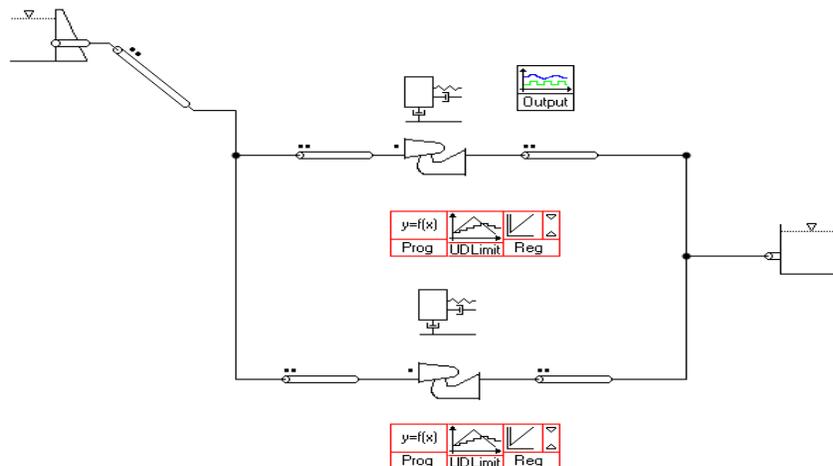


Figura 69 - Modelo de dos turbinas Francis en paralelo

9.2-Simulaciones

- Cierre y apertura al mismo tiempo

Se puede ver la configuración de los distintos bloques de la instalación en el Anexo 4.A.

- Resultados

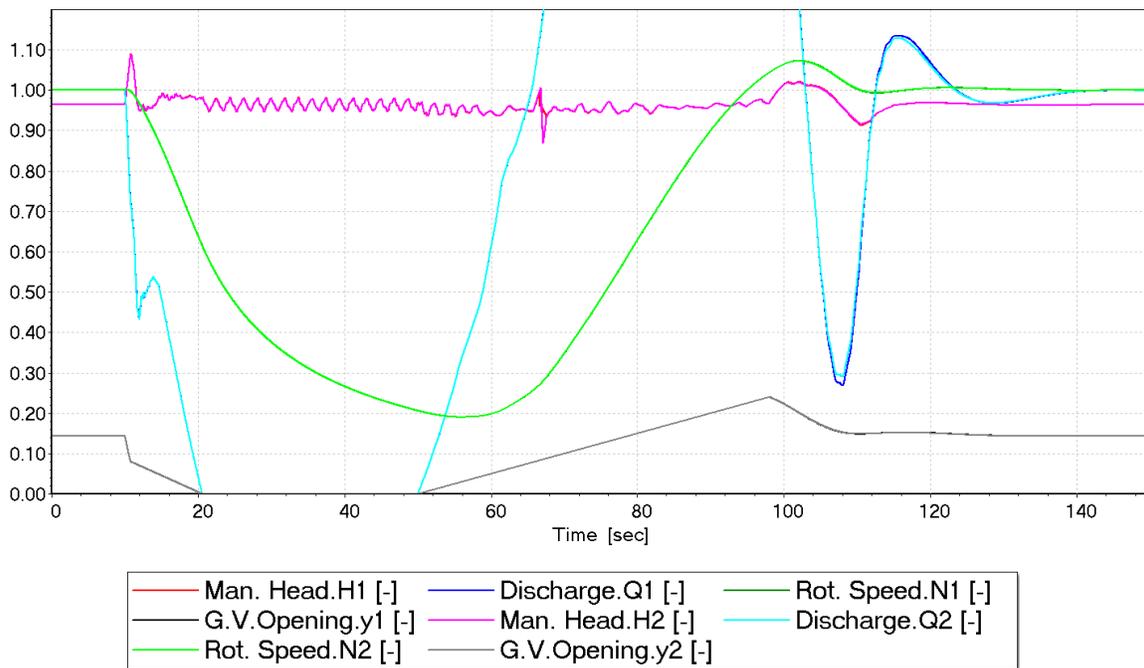


Figura 70 - Cierre y apertura al mismo tiempo en el caso de dos turbinas Francis en paralelo (2)

Se aprecia un pequeño pico de presión en las Figuras 71, pero es fácilmente visible que es rápidamente disipado debido a la influencia entre turbinas. La sobrepresión no es excesivamente grande, pero sí se aprecian unas variaciones importantes de caudal, que no son relevantes dado que la turbina escogida en esta simulación es de las más grandes que fabrica Andritz¹ y puede llegar a turbinar grandes caudales (175 m³/s de caudal nominal).

- Cierre y apertura con 20 s de diferencia.

En esta simulación se dejará un intervalo de 20 segundos entre las maniobras. Se puede ver la configuración de los distintos bloques de la instalación en el Anexo 4.B.

¹ Turbina Francis, Modelo Pumpturbine Vianden Kennfeld PT9/1108. Curvas características de la turbina desarrolladas en la fábrica de Vevey en Julio de 2011.

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

- Resultados

En las Figuras 72 se aprecia que la influencia que provoca una turbina abierta durante la maniobra de la otra permite suavizar los transitorios provocados por dicha maniobra.

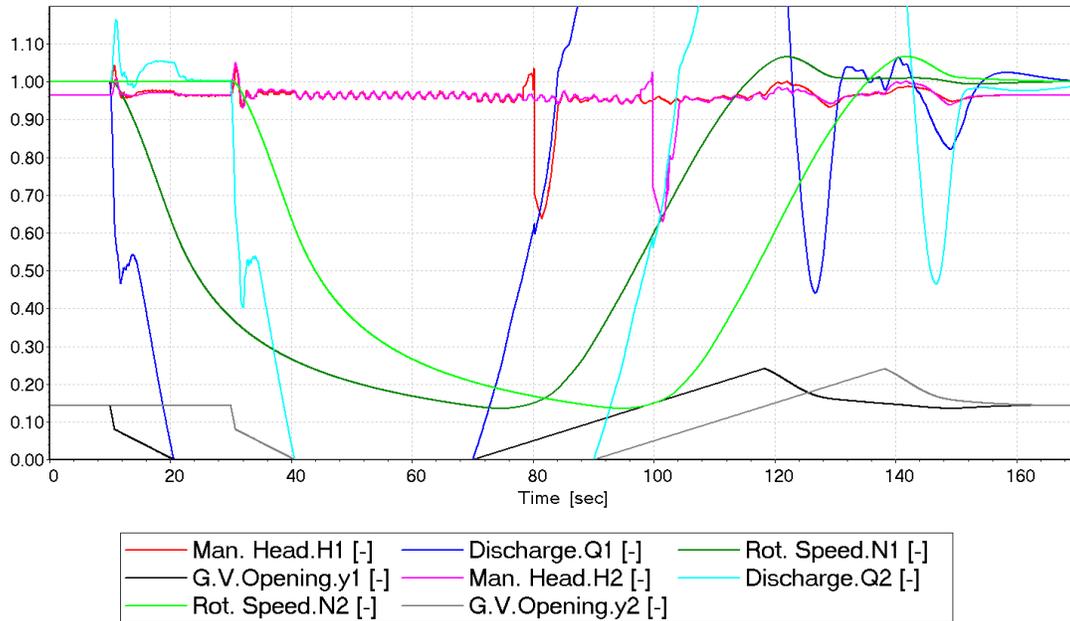


Figura 71 - Cierre y apertura de dos turbinas Francis con 20 segundos de separación (2)

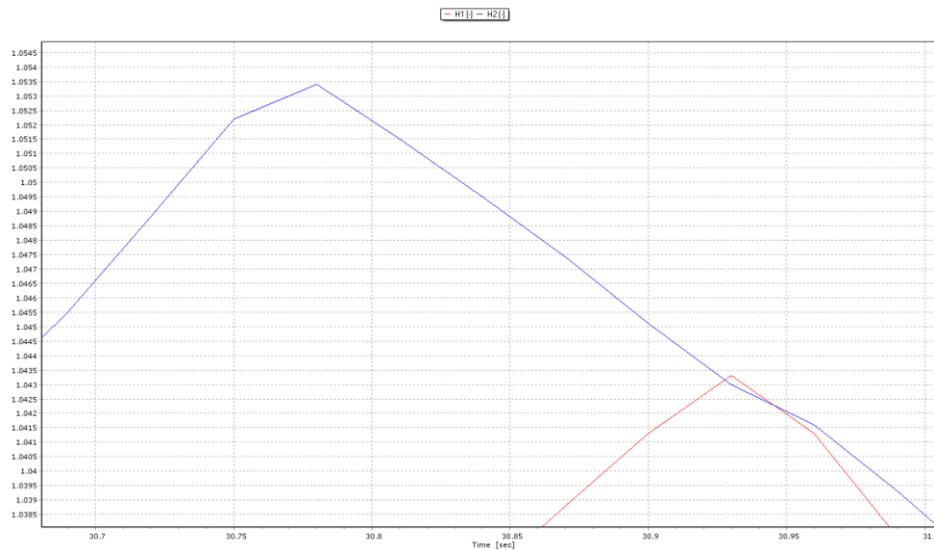


Figura 72 - Presión máxima alcanzada en la simulación

Vemos en la Figura 73 que la presión máxima se alcanza en la turbina 2.

- **Cierre y apertura con 20 s de separación pero con una apertura no controlada**

Se puede ver la configuración de los distintos bloques de la instalación en el Anexo 4.C. En esta simulación se alcanzará un 100% de apertura del distribuidor y se hará sin regulador. Esto obviamente provocará una apertura descontrolada que puede provocar un efecto oscilatorio que provoque daños en la instalación (Figura 74).

- **Resultados**

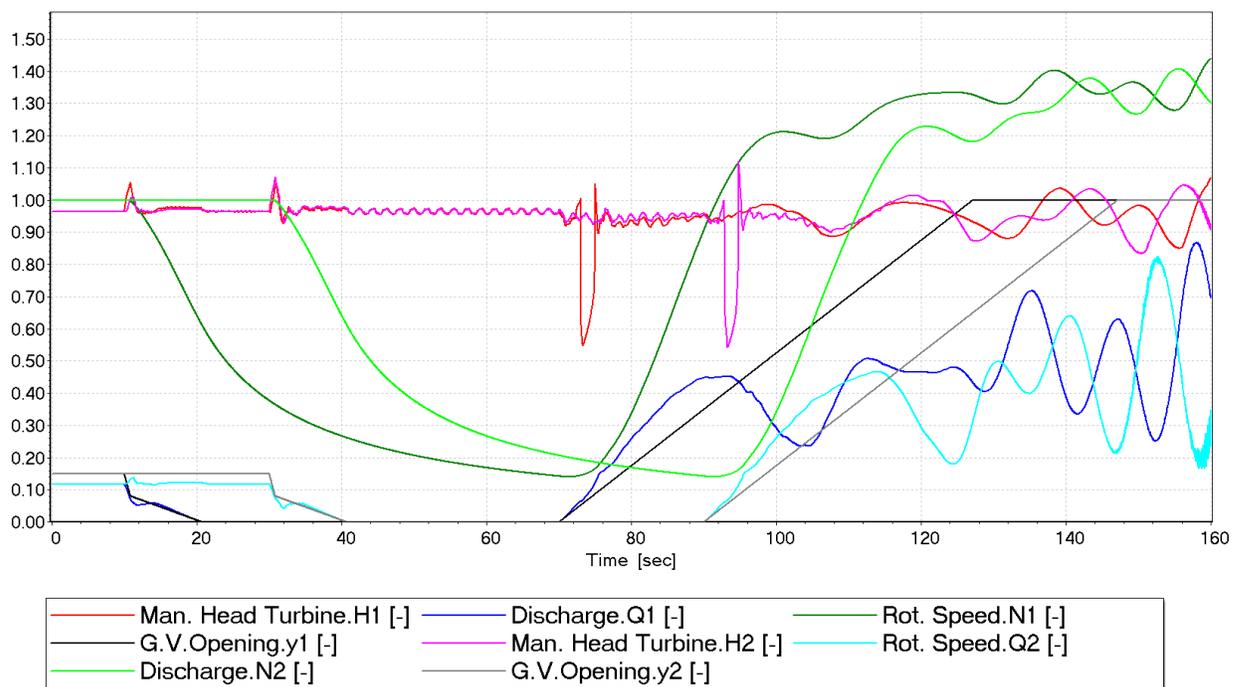


Figura 73 - Cierre y apertura con 20s de separación pero con una apertura no controlada

La presión alcanzada no es peligrosa, pero se crea una onda que afecta al caudal y que obviamente se evitaría con el uso de un regulador.

9.3-Comparativa de resultados

Se aprecia en los resultados que aperturas y cierres escalonados provocan menos presiones e inestabilidades. Además es necesario siempre el uso de un regulador que gobierne la apertura para evitar oscilaciones bruscas de caudal y presión.

X	Uso de regulador.	Tiempo entre turbinas [s]	Oscilación tras la apertura	Máxima presión [Cierre-Apertura (%)]¹
1	SI	0	NO	9.5 (turbina 2) – 2 (ambas turbinas)
2	SI	20	NO	5.35 (turbina 2) – 0
3	NO	20	SI	7 (turbina 2) – 11 (turbina 2)

Tabla 10 - Comparativa resultados de dos Francis en paralelo

¹ La diferencia de presiones se mide sobre la unidad que equivale a la presión que tiene la válvula de entrada a la turbina cuando se encuentra cerrada y en equilibrio.

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

10-Conclusiones

El objeto de este proyecto ha sido la realización de unos modelos sobre maniobras hidráulicas desarrollados con el código SIMSEN para la empresa Andritz Hydro. Estos modelos fueron supervisados por Jesús Contreras Espada (codirector del proyecto e ingeniero de Andritz) y por el Dr. Michler (jefe de transitorios en Andritz Kriens), quien los añadió a la biblioteca de modelos de maniobras hidráulicas de Andritz Hydro, creada por él mismo.

Inicialmente se llevó a cabo un estudio teórico sobre transitorios y una preparación teórico-práctica sobre el código SIMSEN. Se realizó una serie de tutoriales tanto del programa como de la empresa antes de desarrollar los modelos antes mencionados. Tras la realización de los modelos, se realizaron unos casos de estudio usando los modelos desarrollados:

- 1- En el primer caso de estudio, se ha estudiado un rechazo de carga. En este caso no preocupa tanto una sobrepresión como una rotura provocada por un aumento radical de la velocidad de giro del rodete. Debido a la activación del cierre de emergencia no habría problemas de ese tipo dado que se reduce la velocidad de manera rápida en un primer lugar, evitando esos problemas de velocidad de giro, y amortiguando el final del cierre como es habitual, lo que nos permite realizar un cierre final suave como es habitual. Esto evita las temidas sobrepresiones que pueden provocar daos estructurales.
Sería en caso de un fallo informático cuando se debería temer el resultado de un posible cierre manual de la válvula de entrada a la turbina, ya que un cierre rápido de emergencia sí que podría tener consecuencias fatales.

- 2- En el segundo caso de estudio, poco hay que decir sobre transitorios, dado que el caso estudia dos tipos de arranque. Este caso era más bien una continuación del anterior, ya que nos permite volver a operar tras el rechazo de carga previo.
- 3- En este caso ya se ha hecho un estudio de resultados. Si bien cabría recordar que siempre que fuera posible, sería interesante la construcción de chimeneas de equilibrio para evitar ciertos fenómenos transitorios. También nos muestra la influencia entre inyectores abiertos, lo que nos dice que es preferible efectuar un cierre con un menor intervalo de tiempo entre cierres, ya que los picos de presión provocados por la onda serán menores y evitaremos fatiga del material.
- 4- En el caso del estudio de presión máxima se obtuvieron valores realmente altos que podrían llegar a ser tremendamente destructivos. Cabe decir que se buscó eso. La intención era llevar al límite los resultados para observarlos mejor. Es un modelo muy interesante, ya que permitirá a Andritz, tan solo modificando algunos datos, saber la presión máxima que puede llegar a soportar una instalación, y estudiar cómo evitarlo o suavizar sus efectos.
- 5- Este último caso de estudio nos muestra la interacción entre las ondas de dos turbinas que comparten tubería. Este caso nos ayuda a entender mejor cuán peligroso puede llegar a ser no coordinar bien las maniobras en una turbina conectada en paralelo a otras.

También cabe decir que SIMSEN es una herramienta muy potente y muy completa a la hora del cálculo de transitorios aunque posee algunos fallos, como el problema de picos de presión en la interpolación, y una muy difícil detección de errores que te obliga a perder mucho tiempo repasando bloque a bloque toda la información previamente escrita.

Líneas de continuación del proyecto

Como continuación se podrían seguir creando nuevos modelos para ciertas maniobras de emergencia que se puedan producir. Es cierto que el proyecto no tiene mucho más labor que la realización de nuevos modelos, aunque sí que es cierto que estos podrían ser cada vez más complejos y con códigos más eficientes.

Sería interesante realizar una comparativa entre datos reales y datos simulados utilizando SIMSEN para de esa manera poder analizar su fiabilidad con respecto a la realidad.

11-Bibliografía

- **Abreu, J.M.; Guarga, R.; Izquierdo, J.**

Transitorios y oscilaciones en sistemas hidráulicos a presión.

Universidad de Coímbra (Portugal), Universidad Politécnica de Valencia (España), Universidad de la República (Uruguay), 1995.

- **Agüera Soriano, J.**

Mecánica de fluidos incompresibles y turbomáquinas hidráulicas

Editorial Ciencia 3, Madrid, 2002.

- **Aguerre, R.**

Golpe de ariete: simulación del transitorio amortiguado.

Mecánica Computacional Vol. XXX. Bahía Blanca (Argentina), 2011

- **Aguerre, R. & Provenano, P.**

Golpe de ariete: efecto de la velocidad de cierre de la válvula.

Mecánica Computacional Vol. XXII. Bahía Blanca (Argentina), 2003.

- **Cabrera, E.**

Ingeniería Hidráulica Aplicada a los Sistemas de Distribución de Agua.

Universidad Politécnica de Valencia, 1996.

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

- **Crespo, A**

Mecánica de Fluidos.

Thomson, 2006.

- **Daily Mail.**

Explosion at Russia's biggest hydroelectric plant leaves up to 76 workers dead,
<http://www.dailymail.co.uk/news/article-1207093/Accident-Russias-biggest-hydroelectric-plant-leaves-seven-workers-dead.html>, 2009.

- **Espert, V.; Garcia-Serra, J.; Sanz, F.; Abreu, J.; Cabrera, E.;**

Transitorios Hidráulicos, del régimen estacionario al Golpe de Ariete

Universidad Politécnica de Valencia, 2011.

- **Flores Giner, J. A.**

TFG: Diseño hidráulico de una central hidroeléctrica de acumulación por bombeo en la isla de Gran Canaria entre los embalses de Chira y Soria.

Universidad Politécnica de Cartagena, 2017

- **García Sarabia, D.**

PFC: Análisis y Simulación de Instalaciones Hidráulicas.

Universidad Politécnica de Cartagena, 2012

- **Nicolet, C.**

SIMSEN Simulation Software: Manual & Tutorials.

Power Vision Engineering (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne), 2016.

- **Nicolet, C.**

SIMSEN Simulation Software: Recent Developments.

Power Vision Engineering (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne), 2016.

- **Nicolet, C.**

SIMSEN Simulation Software: Help.

Power Vision Engineering (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne), 2016.

- **Pérez Farrás, L. E.**

Estudio de transitorios: Golpe de ariete.

Universidad de Buenos aires: Departamento de Hidráulica, 2005.

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

- **Rodríguez Calderón, W., & Muñoz, P.**

Modelo numérico del golpe de ariete con Scilab.

Ingeniería e investigación Vol. 27. 2007

- **Wikipedia**

https://en.wikipedia.org/wiki/Hydraulic_analogy, 18 de Agosto de 2017

- **Wikipedia**

https://es.wikipedia.org/wiki/Torre_piezom%C3%A9trica, 6 de Agosto del 2017

- **Wikipedia**

https://en.wikipedia.org/wiki/Water_hammer, 2 de Agosto de 2017

- **Wikipedia**

https://en.wikipedia.org/wiki/Shallow_water_equations#One-dimensional_Saint-Venant_equations, 24 de Julio de 2017.

- **Wylie, E. B.; Streeter, V. L.**

Fluid Transients in Systems

Prentice Hall, Engelwood Cliffs, 1993.

- **Zamora Parra, B.**

Apuntes de Centrales Hidroeléctricas.

Universidad Politécnica de Cartagena. 2014

- **Zamora Parra, B.**

Prácticas de Máquinas Hidráulicas.

Universidad Politécnica de Cartagena. 2014

- **Zetina Robleda, F.**

Simulación de flujo en tuberías aplicando un modelo de fricción transitorio.

Universidad de Ciudad de México: Programa de Maestría en Ingeniería Civil. 2015

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

12-Anexos

12.1-Anexo 1.A

Configuración de los siguientes bloques presentes en la instalación.

RESERV11

```
- GENERAL DATA :

Name           = RESERV11
Comment        =
Writing        = NO

- RATED VALUES :

Hn             [m] = 0.000000000000000E+000
Qn             [m3/s] = 0.000000000000000E+000

- PARAMETERS :

H              [m] = 4.995000000000000E+002
Rho [kg/m3]    = 9.980000000000000E+002
g              [m/s2] = 9.805000000000000E+000

- INITIAL CONDITIONS :

Q              [m3/s] = -1.43527156924000E+000
```

PIPE1

```
- GENERAL DATA :

Name           = PIPE1
Comment        =
Writing        = NO

- RATED VALUES :

Hn             [m] = 6.808000000000000E+001
Qn             [m3/s] = 3.000000000000000E+001

- PARAMETERS :

Nb             [1] = 1.200000000000000E+001
L              [m] = 1.272000000000000E+003
D              [m] = 3.018000000000000E+000
Dh             [m] = 0.000000000000000E+000
Ah             [m2] = 0.000000000000000E+000
a              [m/s] = 1.59398496241000E+003
Lambda        [1] = 1.505000000000000E-002
Ksi           [1] = 1.000000000000000E+000
Rvex          [s/m] = 0.000000000000000E+000
Rho           [kg/m3] = 9.980000000000000E+002
g             [m/s2] = 9.805000000000000E+000

- INITIAL CONDITIONS :
```

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

Q1 [m3/s] = 1.43527156924000E+000
Hc1 [m] = 4.99499461467000E+002

FTURB1

- GENERAL DATA :

Name = FTURB1
Comment =
Writing = SI

- MECHANICAL SYSTEM :

JROTOR1 1 0

- RATED VALUES :

Hn [m] = 6.80800000000000E+001
Qn [m3/s] = 1.25000000000000E+001
Tn [Nm] = 1.65000000000000E+005
Nn [rpm] = 4.50000000000000E+002

- PARAMETERS :

y [1] = 7.45131815977000E-002
Dref [m] = 1.26200000000000E+000
Lequ [m] = 1.01000000000000E+001
Amean [m2] = 1.25000000000000E+000
Rho [kg/m3] = 9.98000000000000E+002
g [m/s2] = 9.80500000000000E+000

- INITIAL CONDITIONS :

Q [m3/s] = 1.43527156924000E+000
N [rpm] = 4.50000000000000E+002

- SPECIFIED OPERATING POINT :

Tc [Nm] = 0.00000000000000E+000
Nc [rpm] = 4.50000000000000E+002
yc [1] = 1.00000000000000E-001

- CALCULATED VALUES :

P [W] = 4.03139796759000E-003
T [Nm] = 8.55489218818000E-005
H [m] = 7.39869594923000E+001
y [1] = 7.45131815977000E-002

- DATA :

```
<Data Spec>  
Read triangles from file = no  
</Data Spec>  
<yN11Q11T11 File>  
simsen_yn11q11t11_F657_GMC.txt  
</yN11Q11T11 File>  
<stabilization procedure>  
Nc,Tc -> y  
</stabilization procedure>
```

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

PIPEDT1

- GENERAL DATA :

Name = PIPEDT1
Comment =
Writing = NO

- RATED VALUES :

Hn [m] = 0.00000000000000E+000
Qn [m3/s] = 0.00000000000000E+000

- PARAMETERS :

Nb [1] = 6.00000000000000E+000
L [m] = 6.00000000000000E+001
D [m] = 6.00000000000000E+000
Dh [m] = 0.00000000000000E+000
Ah [m2] = 0.00000000000000E+000
a [m/s] = 1.11111111111000E+003
Lambda [1] = 1.50000000000000E-002
Ksi [1] = 1.00000000000000E+000
Rvex [s/m] = 0.00000000000000E+000
Rho [kg/m3] = 9.98000000000000E+002
g [m/s2] = 9.80500000000000E+000

- INITIAL CONDITIONS :

Q1 [m3/s] = 1.43527156924000E+000
Hc1 [m] = 4.25500021216000E+002

RESERV12

- GENERAL DATA :

Name = RESERV12
Comment =
Writing = NO

- RATED VALUES :

Hn [m] = 1.00000000000000E+000
Qn [m3/s] = 1.00000000000000E+000

- PARAMETERS :

H [m] = 4.25500000000000E+002
Rho [kg/m3] = 9.98000000000000E+002
g [m/s2] = 9.80500000000000E+000

- INITIAL CONDITIONS :

Q [m3/s] = 1.43527156924000E+000

JROTOR1

```
- GENERAL DATA :

Name           = JROTOR1
Comment        =
Writing        = YES

- MECHANICAL MASS CONNECTED :

- RATED VALUES :

Pn             [W] = 0.000000000000000E+000
Nn             [rpm] = 0.000000000000000E+000

- INERTIA PARAMETERS :

J             [kgm2] = 9.020000000000000E+003
Ae           [Nms/rad] = 0.000000000000000E+000
NAe          [rpm] = 0.000000000000000E+000
Tmin         [Nm] = 0.000000000000000E+000
Tfr          [Nm] = 0.000000000000000E+000
kpext        [1] = 0.000000000000000E+000
Text         [Nm] = -8.55489218818000E-005

- COUPLING PARAMETERS :

K            [Nm/rad] = 0.000000000000000E+000
Ai          [Nms/rad] = 0.000000000000000E+000
r           [1] = 1.000000000000000E+000
Tcoupl      [Nm] = 0.000000000000000E+000
state       [1] = 0.000000000000000E+000

- INITIAL CONDITIONS :

N           [rpm] = 4.500000000000000E+002
Thm        [deg] = 0.000000000000000E+000
```

OUT1

```
- GENERAL DATA :

Name           = OUT1
Comment        =
Writing        = SI

- REFERENCES X :

FTURB1 N 1/450 0 n [p.u]
FTURB1 y 1 0 y [p.u]
FTURB1 T 1/164000 0 t [p.u]
FTURB1 Q 1 0 Q [m3/s]

- PARAMETERS:
```

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

UDLIMIT1

```
- GENERAL DATA :

Name           = UDLIMIT1
Comment        =
Writing        = YES

- REFERENCES X :

PROG1 y1 1 0

- REFERENCES Y :

FTURB1 y=y1 1 0

- PARAMETERS :

yu1   [1] = 1.000000000000000E+000
yu2   [1] = 1.000000000000000E+000
yu3   [1] = 1.000000000000000E+000
yu4   [1] = 1.000000000000000E+000
yu5   [1] = 1.000000000000000E+000
dyu0  [1] = 5.000000000000000E-005
dyu1  [1] = 0.000000000000000E+000
dyu2  [1] = 0.000000000000000E+000
dyu3  [1] = 0.000000000000000E+000
dyu4  [1] = 0.000000000000000E+000
dyu5  [1] = 0.000000000000000E+000
yd1   [1] = 1.000000000000000E-001
yd2   [1] = 1.000000000000000E+000
yd3   [1] = 1.000000000000000E+000
yd4   [1] = 1.000000000000000E+000
yd5   [1] = 1.000000000000000E+000
dyd0  [1] = 5.000000000000000E-002
dyd1  [1] = 1.000000000000000E-001
dyd2  [1] = 0.000000000000000E+000
dyd3  [1] = 0.000000000000000E+000
dyd4  [1] = 0.000000000000000E+000
dyd5  [1] = 0.000000000000000E+000
dT    [sec] = 1.000000000000000E-003

- INITIAL CONDITIONS :

kdT   [sec] = 1.000000000000000E-003
y1    [1] = 7.45131808587000E-002
```

PROG1

```
- GENERAL DATA :

Name           = PROG1
Comment        =
Writing        = YES

- REFERENCES X :

PROG1 Time 1 0
FTURB1 y 1 0
JROTOR1 Text 1 0
FTURB1 T 1 0
```

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

- REFERENCES Y :

JROTOR1 Text=y2 1 0

- DATA :

t = x1 ; time
yTurb = x2 ; primary regulation stroke ratio
Text = x3 ; external torque
Tturb = x4 ; turbine torque
tTrip = 5 ; time of loading start
y1 = min(0.86,yTurb + GT(t, tTrip)) ; primary regulation stroke ratio
y2 = -max(Tturb, 0.0) ; external torque

- PARAMETERS :

dT [sec] = 0.000000000000000E+000

- INITIAL CONDITIONS :

kdT [sec] = 0.000000000000000E+000
y1 [1] = 0.000000000000000E+000
y2 [1] = 0.000000000000000E+000

12.2-Anexo 1.B

Configuración de los siguientes bloques presentes en la instalación.

RESERV11

```
- GENERAL DATA :  
  
Name           = RESERV11  
Comment        =  
Writing        = NO  
  
- RATED VALUES :  
  
Hn             [m] = 0.000000000000000E+000  
Qn             [m3/s] = 0.000000000000000E+000  
  
- PARAMETERS :  
  
H              [m] = 4.995000000000000E+002  
Rho            [kg/m3] = 9.980000000000000E+002  
g              [m/s2] = 9.805000000000000E+000  
  
- INITIAL CONDITIONS :  
  
Q              [m3/s] = -3.04286302935000E-003
```

PIPE1

```
- GENERAL DATA :  
  
Name           = PIPE1  
Comment        =  
Writing        = NO  
  
- RATED VALUES :  
  
Hn             [m] = 6.808000000000000E+001  
Qn             [m3/s] = 3.000000000000000E+001  
  
- PARAMETERS :  
  
Nb             [1] = 1.200000000000000E+001  
L              [m] = 1.272000000000000E+003  
D              [m] = 3.018000000000000E+000  
Dh             [m] = 0.000000000000000E+000  
Ah             [m2] = 0.000000000000000E+000  
a              [m/s] = 1.59398496241000E+003  
Lambda        [1] = 1.505000000000000E-002  
Ksi           [1] = 1.000000000000000E+000  
Rvex          [s/m] = 0.000000000000000E+000  
Rho           [kg/m3] = 9.980000000000000E+002  
g             [m/s2] = 9.805000000000000E+000  
  
- INITIAL CONDITIONS :  
  
Q1            [m3/s] = 3.04286302935000E-003  
Hc1          [m] = 4.99499999994000E+002
```

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

FTURB1

- GENERAL DATA :

Name = FTURB1
Comment =
Writing = SI

- MECHANICAL SYSTEM :

JROTOR1 1 0

- RATED VALUES :

Hn [m] = 6.808000000000000E+001
Qn [m3/s] = 1.250000000000000E+001
Tn [Nm] = 1.645000000000000E+005
Nn [rpm] = 4.500000000000000E+002

- PARAMETERS :

Y [1] = 2.015862826880000E-004
Dref [m] = 1.262000000000000E+000
Lequ [m] = 1.010000000000000E+001
Amean [m2] = 1.250000000000000E+000
Rho [kg/m3] = 9.980000000000000E+002
g [m/s2] = 9.805000000000000E+000

- INITIAL CONDITIONS :

Q [m3/s] = 3.042863029350000E-003
N [rpm] = 1.000000000000000E-004

- SPECIFIED OPERATING POINT :

Tc [Nm] = 0.000000000000000E+000
Nc [rpm] = 1.000000000000000E-004
yc [1] = 0.000000000000000E+000

- CALCULATED VALUES :

P [W] = 5.545781939470000E-009
T [Nm] = 5.295831653860000E-004
H [m] = 7.399999994180000E+001
Y [1] = 2.015862826880000E-004

- DATA :

```
<Data Spec>  
Read triangles from file = no  
</Data Spec>  
<yN11Q11T11 File>  
simsen_yn11q11t11_F657_GMC.txt  
</yN11Q11T11 File>  
<stabilization procedure>  
Nc,Tc -> y  
</stabilization procedure>
```

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

PIPEDT1

- GENERAL DATA :

Name = PIPEDT1
Comment =
Writing = NO

- RATED VALUES :

Hn [m] = 0.000000000000000E+000
Qn [m3/s] = 0.000000000000000E+000

- PARAMETERS :

Nb [1] = 6.000000000000000E+000
L [m] = 6.000000000000000E+001
D [m] = 6.000000000000000E+000
Dh [m] = 0.000000000000000E+000
Ah [m2] = 0.000000000000000E+000
a [m/s] = 1.11111111111000E+003
Lambda [1] = 1.500000000000000E-002
Ksi [1] = 1.000000000000000E+000
Rvex [s/m] = 0.000000000000000E+000
Rho [kg/m3] = 9.98000000000000E+002
g [m/s2] = 9.80500000000000E+000

- INITIAL CONDITIONS :

Q1 [m3/s] = 3.04286302935000E-003
Hc1 [m] = 4.25500000014000E+002

RESERV12

- GENERAL DATA :

Name = RESERV12
Comment =
Writing = NO

- RATED VALUES :

Hn [m] = 1.000000000000000E+000
Qn [m3/s] = 1.000000000000000E+000

- PARAMETERS :

H [m] = 4.255000000000000E+002
Rho [kg/m3] = 9.98000000000000E+002
g [m/s2] = 9.80500000000000E+000

- INITIAL CONDITIONS :

Q [m3/s] = 3.04286302935000E-003

JROTOR1

```
- GENERAL DATA :

Name           = JROTOR1
Comment        =
Writing        = YES

- MECHANICAL MASS CONNECTED :

- RATED VALUES :

Pn             [W] = 0.000000000000000E+000
Nn             [rpm] = 0.000000000000000E+000

- INERTIA PARAMETERS :

J             [kgm2] = 9.020000000000000E+003
Ae            [Nms/rad] = 0.000000000000000E+000
NAe           [rpm] = 0.000000000000000E+000
Tmin          [Nm] = 0.000000000000000E+000
Tfr           [Nm] = 0.000000000000000E+000
kpext         [1] = 0.000000000000000E+000
Text          [Nm] = -5.29583165386000E-004

- COUPLING PARAMETERS :

K             [Nm/rad] = 0.000000000000000E+000
Ai            [Nms/rad] = 0.000000000000000E+000
r             [1] = 1.000000000000000E+000
Tcoupl        [Nm] = 0.000000000000000E+000
state         [1] = 0.000000000000000E+000

- INITIAL CONDITIONS :

N             [rpm] = 1.000000000000000E-004
Thm           [deg] = 0.000000000000000E+000
```

OUT1

```
- GENERAL DATA :

Name           = OUT1
Comment        =
Writing        = SI

- REFERENCES X :

FTURB1 N 1/450 0 n [p.u]
FTURB1 y 1 0 y [p.u]
FTURB1 T 1/164000 0 t [p.u]
FTURB1 Q 1 0 Q [m3/s]

- PARAMETERS:
```

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

UDLIMIT1

```
- GENERAL DATA :

Name           = UDLIMIT1
Comment        =
Writing        = YES

- REFERENCES X :

PROG1 y1 1 0

- REFERENCES Y :

FTURB1 y=y1 1 0

- PARAMETERS :

yu1   [1] = 1.000000000000000E+000
yu2   [1] = 1.000000000000000E+000
yu3   [1] = 1.000000000000000E+000
yu4   [1] = 1.000000000000000E+000
yu5   [1] = 1.000000000000000E+000
dyu0  [1] = 5.000000000000000E-005
dyu1  [1] = 0.000000000000000E+000
dyu2  [1] = 0.000000000000000E+000
dyu3  [1] = 0.000000000000000E+000
dyu4  [1] = 0.000000000000000E+000
dyu5  [1] = 0.000000000000000E+000
yd1   [1] = 1.000000000000000E-001
yd2   [1] = 1.000000000000000E+000
yd3   [1] = 1.000000000000000E+000
yd4   [1] = 1.000000000000000E+000
yd5   [1] = 1.000000000000000E+000
dyd0  [1] = 5.000000000000000E-002
dyd1  [1] = 1.000000000000000E-001
dyd2  [1] = 0.000000000000000E+000
dyd3  [1] = 0.000000000000000E+000
dyd4  [1] = 0.000000000000000E+000
dyd5  [1] = 0.000000000000000E+000
dT    [sec] = 1.000000000000000E-003

- INITIAL CONDITIONS :

kdT   [sec] = 1.000000000000000E-003
y1    [1] = 0.000000000000000E+000
```

PROG1

```
- GENERAL DATA :

Name           = PROG1
Comment        =
Writing        = YES

- REFERENCES X :

PROG1 Time 1 0
FTURB1 y 1 0
JROTOR1 Text 1 0
FTURB1 T 1 0
```

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

- REFERENCES Y :

JROTOR1 Text=y2 1 0

- DATA :

```
t = x1 ; time
yTurb = x2 ; primary regulation stroke ratio
Text = x3 ; external torque
Tturb = min(x4,164500) ; turbine torque
tTrip = 5 ; time of loading start
y1 = min(0.86,yTurb + GT(t, tTrip)) ; primary regulation stroke ratio
y2 = -max(Tturb, 0.0) ; external torque
```

- PARAMETERS :

dT [sec] = 0.000000000000000E+000

- INITIAL CONDITIONS :

```
kdT [sec] = 0.000000000000000E+000
y1 [1] = 0.000000000000000E+000
y2 [1] = 0.000000000000000E+000
```

12.3-Anexo 2.A

Configuración de los siguientes bloques presentes en la instalación.

- Turbina Pelton

- GENERAL DATA :

Name = PTURB
Comment =
Writing = pu

- MECHANICAL SYSTEM :

JSYNCHR 1 0

- RATED VALUES :

Hn [m] = 7.000000000000000E+002
Qn [m3/s] = 4.000000000000000E+000
Tn [Nm] = 2.926660000000000E+005
Nn [rpm] = 7.500000000000000E+002

- PARAMETERS :

Ninj [1] = 7.000000000000000E+000
y1 [1] = 7.000000000000000E-001
y2 [1] = 7.000000000000000E-001
y3 [1] = 7.000000000000000E-001
y4 [1] = 7.000000000000000E-001
y5 [1] = 7.000000000000000E-001
y6 [1] = 7.000000000000000E-001
y7 [1] = 7.000000000000000E-001
Kdef1 [1] = 1.000000000000000E+000
Kdef2 [1] = 1.000000000000000E+000
Kdef3 [1] = 1.000000000000000E+000
Kdef4 [1] = 1.000000000000000E+000
Kdef5 [1] = 1.000000000000000E+000
Kdef6 [1] = 1.000000000000000E+000
Kdef7 [1] = 1.000000000000000E+000
Kt [1] = 1.000000000000000E+000
co [1] = 9.800000000000000E-001
Dref [m] = 2.000000000000000E+000
Rho [kg/m3] = 1.000000000000000E+003
g [m/s2] = 9.810000000000000E+000

- INITIAL CONDITIONS :

Q1 [m3/s] = 9.81709139054000E-001
Q2 [m3/s] = 9.81709139054000E-001
Q3 [m3/s] = 9.81709139054000E-001
Q4 [m3/s] = 9.81709139054000E-001
Q5 [m3/s] = 9.81709139054000E-001
Q6 [m3/s] = 9.81709139054000E-001
Q7 [m3/s] = 9.81709139054000E-001
N [rpm] = 7.500000000000000E+002

- SPECIFIED OPERATING POINT :

Ninjc [1] = 1234567
Tc [Nm] = 2.926660000000000E+005
Nc [rpm] = 7.500000000000000E+002

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

```
yc1      [1] = 7.000000000000000E-001
yc2      [1] = 7.000000000000000E-001
yc3      [1] = 7.000000000000000E-001
yc4      [1] = 7.000000000000000E-001
yc5      [1] = 7.000000000000000E-001
yc6      [1] = 7.000000000000000E-001
yc7      [1] = 7.000000000000000E-001
```

- CALCULATED VALUES :

```
P          [W] = 3.95409484676000E+007
T          [Nm] = 5.03450992252000E+005
Qtot      [m3/s] = 6.87196397060000E+000
C          [m/s] = 1.11395597029000E+002
H          [m] = 6.58544150481000E+002
```

- DATA :

```
<Data Spec>
  Read triangles from file = no
</Data Spec>
<yN11Q11T11 File>
simsen_yn11q11t11_pturb_linj2015.txt
</yN11Q11T11 File>
```

- PROG

- GENERAL DATA :

```
Name          = PROG1
Comment       =
Writing       = YES
```

- REFERENCES X :

```
PROG1 Time 1 0 x1
JSYNCHR Text 1 0 x2
PTURB y1 1 0 x3
PTURB y2 1 0 x4
PTURB y3 1 0 x5
PTURB y4 1 0 x6
PTURB y5 1 0 x7
PTURB y6 1 0 x8
PTURB y7 1 0 x9
PTURB Kdef1 1 0 x10
PTURB Kdef2 1 0 x11
PTURB Kdef3 1 0 x12
PTURB Kdef4 1 0 x13
PTURB Kdef5 1 0 x14
PTURB Kdef6 1 0 x15
PTURB Kdef7 1 0 x16
```

- REFERENCES Y :

```
JSYNCHR Text=y1 1 0 Text [Nm]
```

- DATA :

```
t = x1
T = x2
yTurb1 = x3
yTurb2 = x4
```

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

```
yTurb3 = x5
yTurb4 = x6
yTurb5 = x7
yTurb6 = x8
yTurb7 = x9
t_Trip = 1
y1 = T*LE(x1,t_Trip)
y2 = yTurb1*LE(t,(t_Trip+0))
y3 = yTurb1*LE(t,(t_Trip+0))
y4 = yTurb1*LE(t,(t_Trip+0))
y5 = yTurb1*LE(t,(t_Trip+0))
y6 = yTurb1*LE(t,(t_Trip+0))
y7 = yTurb1*LE(t,(t_Trip+0))
y8 = yTurb1*LE(t,(t_Trip+0))
y9 = x10*LE(t,(t_Trip+0))
y10 = x11*LE(t,(t_Trip+0))
y11 = x12*LE(t,(t_Trip+0))
y12 = x13*LE(t,(t_Trip+0))
y13 = x14*LE(t,(t_Trip+0))
y14 = x15*LE(t,(t_Trip+0))
y15 = x16*LE(t,(t_Trip+0))

- PARAMETERS :

dT [sec] = 1.000000000000000E-003

- INITIAL CONDITIONS :

kdT [sec] = 0.000000000000000E+000
y1 [1] = 0.000000000000000E+000
y2 [1] = 7.000000000000000E-001
y3 [1] = 7.000000000000000E-001
y4 [1] = 7.000000000000000E-001
y5 [1] = 7.000000000000000E-001
y6 [1] = 7.000000000000000E-001
y7 [1] = 7.000000000000000E-001
y8 [1] = 7.000000000000000E-001
y9 [1] = 1.000000000000000E+000
y10 [1] = 1.000000000000000E+000
y11 [1] = 1.000000000000000E+000
y12 [1] = 1.000000000000000E+000
y13 [1] = 1.000000000000000E+000
y14 [1] = 1.000000000000000E+000
y15 [1] = 1.000000000000000E+000
```

12.4-Anexo 2.B

Configuración de los siguientes bloques presentes en la instalación.

- PROG

In this case PROG will be adapted for a stepped closure.

```
- REFERENCES X :

PROG1 Time 1 0 x1
JSYNCHR Text 1 0 x2
PTURB y1 1 0 x3
PTURB y2 1 0 x4
PTURB y3 1 0 x5
PTURB y4 1 0 x6
PTURB y5 1 0 x7
PTURB y6 1 0 x8
PTURB y7 1 0 x9
PTURB Kdef1 1 0 x10
PTURB Kdef2 1 0 x11
PTURB Kdef3 1 0 x12
PTURB Kdef4 1 0 x13
PTURB Kdef5 1 0 x14
PTURB Kdef6 1 0 x15
PTURB Kdef7 1 0 x16

- REFERENCES Y :

JSYNCHR Text=y1 1 0 Text [Nm]

- DATA :

t = x1
T = x2
yTurb1 = x3
yTurb2 = x4
yTurb3 = x5
yTurb4 = x6
yTurb5 = x7
yTurb6 = x8
yTurb7 = x9
t_Trip = 1
y1 = T*LE(x1,t_Trip)
y1 = T*LE(x1,t_Trip)
y2 = yTurb1*LE(t,(t_Trip+0))
y3 = yTurb2*LE(t,(t_Trip+02)) <= we add time to each injector closing time
y4 = yTurb3*LE(t,(t_Trip+04))
y5 = yTurb4*LE(t,(t_Trip+06))
y6 = yTurb5*LE(t,(t_Trip+08))
y7 = yTurb6*LE(t,(t_Trip+010))
y8 = yTurb7*LE(t,(t_Trip+012))
y9 = x10*LE(t,(t_Trip+0))
y10 = x11*LE(t,(t_Trip+2))
y11 = x12*LE(t,(t_Trip+04))
y12 = x13*LE(t,(t_Trip+06))
y13 = x14*LE(t,(t_Trip+8))
y14 = x15*LE(t,(t_Trip+10))
y15 = x16*LE(t,(t_Trip+12))

- PARAMETERS :
```

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

dT [sec] = 1.000000000000000E-003

- INITIAL CONDITIONS :

kdT [sec] = 0.000000000000000E+000

y1 [1] = 0.000000000000000E+000

y2 [1] = 7.000000000000000E-001

y3 [1] = 7.000000000000000E-001

y4 [1] = 7.000000000000000E-001

y5 [1] = 7.000000000000000E-001

y6 [1] = 7.000000000000000E-001

y7 [1] = 7.000000000000000E-001

y8 [1] = 7.000000000000000E-001

y9 [1] = 1.000000000000000E+000

y10 [1] = 1.000000000000000E+000

y11 [1] = 1.000000000000000E+000

y12 [1] = 1.000000000000000E+000

y13 [1] = 1.000000000000000E+000

y14 [1] = 1.000000000000000E+000

y15 [1] = 1.000000000000000E+000

12.5-Anexo 3.A

Configuración de los siguientes bloques presentes en la instalación.

Tubería forzada

```
- PARAMETERS :  
  
Nb          [1] = 4.000000000000000E+001  
Zin         [m] = 6.800000000000000E+002  
Zout        [m] = 0.000000000000000E+000  
L           [m] = 5.000000000000000E+003  
D           [m] = 1.000000000000000E+000  
Dh          [m] = 0.000000000000000E+000  
Ah          [m2] = 0.000000000000000E+000  
a           [m/s] = 1.250000000000000E+003  
Lambda     [1] = 1.500000000000000E-002  
Ksi        [1] = 1.000000000000000E+000  
Mu         [Pa.s] = 0.000000000000000E+000  
Rho        [kg/m3] = 1.000000000000000E+003  
G          [m/s2] = 9.810000000000000E+000
```

FRANCIS TURBINE

- GENERAL DATA :

```
Name          = PTURB  
Comment       =  
Writing       = YES
```

- MECHANICAL SYSTEM :

```
JSYNCHR 1 0
```

- RATED VALUES :

```
Hn          [m] = 7.000000000000000E+002  
Qn          [m3/s] = 4.000000000000000E+000  
Tn          [Nm] = 2.926660000000000E+005  
Nn          [rpm] = 7.500000000000000E+002
```

- PARAMETERS :

```
Ninj        [1] = 7.000000000000000E+000  
y1          [1] = 1.000000000000000E-004  
y2          [1] = 1.000000000000000E-004  
y3          [1] = 1.000000000000000E-004  
y4          [1] = 1.000000000000000E-004  
y5          [1] = 1.000000000000000E-004  
y6          [1] = 1.000000000000000E-004  
y7          [1] = 1.000000000000000E-004  
Kdef1       [1] = 0.000000000000000E+000  
Kdef2       [1] = 0.000000000000000E+000  
Kdef3       [1] = 0.000000000000000E+000  
Kdef4       [1] = 0.000000000000000E+000  
Kdef5       [1] = 0.000000000000000E+000  
Kdef6       [1] = 0.000000000000000E+000  
Kdef7       [1] = 0.000000000000000E+000  
Kt          [1] = 1.000000000000000E+000
```

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

```
co          [1] = 9.800000000000000E-001
Dref        [m] = 2.000000000000000E+000
Rho         [kg/m3] = 1.000000000000000E+003
g           [m/s2] = 9.810000000000000E+000
```

- INITIAL CONDITIONS :

```
Q1          [m3/s] = 1.83173808832000E-004
Q2          [m3/s] = 1.83173808832000E-004
Q3          [m3/s] = 1.83173808832000E-004
Q4          [m3/s] = 1.83173808832000E-004
Q5          [m3/s] = 1.83173808832000E-004
Q6          [m3/s] = 1.83173808832000E-004
Q7          [m3/s] = 1.83173808832000E-004
N           [rpm] = 0.000000000000000E+000
```

- SPECIFIED OPERATING POINT :

```
Ninj       [1] = 1234567
Tc         [Nm] = 2.926660000000000E+005
Nc         [rpm] = 0.000000000000000E+000
yc1        [1] = 1.000000000000000E-004
yc2        [1] = 1.000000000000000E-004
yc3        [1] = 1.000000000000000E-004
yc4        [1] = 1.000000000000000E-004
yc5        [1] = 1.000000000000000E-004
yc6        [1] = 1.000000000000000E-004
yc7        [1] = 1.000000000000000E-004
```

- CALCULATED VALUES :

```
P          [W] = 0.000000000000000E+000
T          [Nm] = 1.75139511182000E-003
Qtot       [m3/s] = 1.28221666182000E-003
C          [m/s] = 1.16477441456000E+002
H          [m] = 7.19999989827000E+002
```

- DATA :

```
<Data Spec>
  Read triangles from file = no
</Data Spec>
<yN11Q11T11 File>
simsen_yn11q11t11_pturb_linj2015.txt
</yN11Q11T11 File>
```

MECHANICAL MASS

- GENERAL DATA :

```
Name          = JSYNCHR
Comment       =
Writing       = NO
```

- MECHANICAL MASS CONNECTED :

- RATED VALUES :

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

```
Pn          [W] = 0.000000000000000E+000
Nn          [rpm] = 0.000000000000000E+000

- INERTIA PARAMETERS :

J          [kgm2] = 2.000000000000000E+004
Ae        [Nms/rad] = 0.000000000000000E+000
NAe       [rpm] = 0.000000000000000E+000
Tmin      [Nm] = 0.000000000000000E+000
Tfr       [Nm] = 0.000000000000000E+000
kpext     [1] = 1.000000000000000E+000
Text      [Nm] = -1.75139511182000E-003

- COUPLING PARAMETERS :

K          [Nm/rad] = 0.000000000000000E+000
Ai        [Nms/rad] = 0.000000000000000E+000
r          [1] = 1.000000000000000E+000
Tcoupl    [Nm] = 0.000000000000000E+000
state     [1] = 0.000000000000000E+000

- INITIAL CONDITIONS :

N          [rpm] = 0.000000000000000E+000
Thm       [deg] = 0.000000000000000E+000
```

PROG

```
- GENERAL DATA :
Name          = PROG1
Comment       =
Writing       = NO

- REFERENCES X :
PROG1 Time 1 0 x1
JSYNCHR Text 1 0 x2
PTURB y1 1 0 x3
PTURB y2 1 0 x4
PTURB y3 1 0 x5
PTURB y4 1 0 x6
PTURB y5 1 0 x7
PTURB y6 1 0 x8
PTURB y7 1 0 x9
PTURB Kdef1 1 0 x10
PTURB Kdef2 1 0 x11
PTURB Kdef3 1 0 x12
PTURB Kdef4 1 0 x13
PTURB Kdef5 1 0 x14
PTURB Kdef6 1 0 x15
PTURB Kdef7 1 0 x16
PTURB T 1 0 x17
REG1 T1 1 0 x18
UDLIMIT3 y1 1 0 x19

- REFERENCES Y :
JSYNCHR Text=y1 1 0 Text [Nm]
PTURB y1=y2 1 0 y [p.u]
PTURB y2=y2 1 0 y [p.u]
PTURB y3=y2 1 0 y [p.u]
PTURB y4=y2 1 0 y [p.u]
PTURB y5=y2 1 0 y [p.u]
PTURB y6=y2 1 0 y [p.u]
```

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

```
PTURB y7=y2 1 0 y [p.u]

- DATA :

t = x1
Text = x2
Tturb = min(x17,1000000)
yTurb = x3
Def = x10
Def = x11
Def = x12
Def = x13
Def = x14
Def = x15
Def = x16
tTrip = 1
Tr = x18
y1 = -max(Tturb, 0.0)
y2 = min(1,yTurb + GT(t, tTrip))
y2 = y2*GT((tTrip+(Tr/2)),t)
y3 = LT((tTrip+(Tr/2)),t)
y4 = x19

- PARAMETERS :

dT [sec] = 0.000000000000000E+000

- INITIAL CONDITIONS :

kdT [sec] = 0.000000000000000E+000
y1 [1] = 0.000000000000000E+000
y2 [1] = 0.000000000000000E+000
y3 [1] = 0.000000000000000E+000
y4 [1] = 7.20121640034000E+002
```

UDLIMIT1

```
- GENERAL DATA :

Name           = UDLIMIT1
Comment        =
Writing        = NO

- REFERENCES X :

PROG1 y2 1 0 x1 [p.u]

- REFERENCES Y :

PTURB y1=y1 1 0
PTURB y2=y1 1 0
PTURB y3=y1 1 0
PTURB y4=y1 1 0
PTURB y5=y1 1 0
PTURB y6=y1 1 0
PTURB y7=y1 1 0

- PARAMETERS :
```

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

```
yu1      [1] = 1.000000000000000E+000
yu2      [1] = 1.000000000000000E+000
yu3      [1] = 1.000000000000000E+000
yu4      [1] = 1.000000000000000E+000
yu5      [1] = 1.000000000000000E+000
dyu0     [1] = 5.000000000000000E-004
dyu1     [1] = 1.000000000000000E+000
dyu2     [1] = 1.000000000000000E+000
dyu3     [1] = 1.000000000000000E+000
dyu4     [1] = 1.000000000000000E+000
dyu5     [1] = 0.000000000000000E+000
yd1      [1] = 1.000000000000000E+000
yd2      [1] = 1.000000000000000E+000
yd3      [1] = 1.000000000000000E+000
yd4      [1] = 1.000000000000000E+000
yd5      [1] = 1.000000000000000E+000
dyd0     [1] = 5.000000000000000E-004
dyd1     [1] = 1.000000000000000E+000
dyd2     [1] = 1.000000000000000E+000
dyd3     [1] = 1.000000000000000E+000
dyd4     [1] = 1.000000000000000E+000
dyd5     [1] = 0.000000000000000E+000
dT       [sec] = 1.000000000000000E-002
```

- INITIAL CONDITIONS :

```
kdT      [sec] = 1.000000000000000E-003
y1       [1] = 0.000000000000000E+000
```

12.6-Anexo 3.B

Código en Octave para la programación de una serie de estabilizaciones y simulaciones en bucle.

```
clc;clear;
SimsenExePath='C:\Work\Simsen\2017_03_27_SIMSEN_Adv_Andritz_HydroBeta304\exe\';
SimsenCLIExeName='SimsenCLI.exe';
SimsenCLIPath=[SimsenExePath SimsenCLIExeName]
ExampleSourceFolder='C:\Users\krsjav01\Desktop\Simsen templates\5- Pelton
open-closure\modelo 0\';
ExampleSourceName='p.stm';
ExampleSourcePath=[ExampleSourceFolder ExampleSourceName]
HillchartFolder='C:\Users\krsjav01\Desktop\ex_octave3\';
HillchartName='simsen_yn11q11t11_pturb_1inj2015.txt';
HillchartPath=[HillchartFolder HillchartName]
RunsBasePath='C:\Users\krsjav01\Desktop\ex_octave3\';
% Parameter study definition
ElementName='REG1';
ParamName='T1';
ParamPath=[ElementName '.' ParamName];
TimeMax_Sim=60;
TimeMax_Inhydro=30;
PROG1TrValues=[zeros];
TrRuns=size(PROG1TrValues');TrRuns=TrRuns(1);
% Main loop on the set of value to scan
for i=1:40
    Tr=(i);
    %-----
    % Set the name of current run and folder and path
    RunName=['Tr_' num2str(i)]
    RunFolder=[RunsBasePath RunName '\'];
    RunPath=[RunFolder ExampleSourceName];
    HillPath=[RunFolder HillchartName]
    %-----
    % Create the folder of the run that is being prepared
    % You have to create one folder per run
    mkdir(RunsBasePath,RunName);
    %-----
    % Copy the source model .stm in the run folder
    copyfile(ExampleSourcePath,RunPath);
    %-----
    % Copy the source hill chart .txt in the run folder
    copyfile(HillchartPath,HillPath);
    %-----
    % Perform the parameter change (here PIPE1.Nb)
    CLIOperation='SetParam';
    CLICmdLine=[CLIOperation ' ' RunPath ' ' ParamPath ' ' num2str(Tr)];
    [STATUS,OUTPUT]=system([SimsenCLIPath ' ' CLICmdLine]);
    %-----
    % Optionally change also a simulation parameter (e.g. Time Max) for
    % InHydro (maybe shorter than what is needed for the transient
    % simulation)
    CLIOperation='SetParam --simul';
    CLICmdLine=[CLIOperation ' ' RunPath ' ' '"Time Max" ' ' '
num2str(TimeMax_Inhydro)];
    [STATUS,OUTPUT]=system([SimsenCLIPath ' ' CLICmdLine]);
    %-----
    % Perform a InHydro (load flow) if you want to start from steady state
    % With the --save option soo that final results of load flow are
    % effectively saved back to the model
```

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

```
CLIOperation='InHydro --pturb_t --save';
CLICmdLine=[CLIOperation ' ' RunPath];
[STATUS,OUTPUT]=system([SimsemCLIPath ' ' CLICmdLine]);
%-----
% Readjust the changed simulation parameter for transient simulation
CLIOperation='SetParam --simul';
CLICmdLine=[CLIOperation ' ' RunPath ' ' '"Time Max"' ' '
num2str(TimeMax_Sim)];
[STATUS,OUTPUT]=system([SimsemCLIPath ' ' CLICmdLine]);
%-----
% Launch the time simulation to get the transient behavior of your model
% with a given value for the studied parameter.
CLIOperation='Sim';
CLICmdLine=[CLIOperation ' ' RunPath];
[STATUS,OUTPUT]=system([SimsemCLIPath ' ' CLICmdLine]);
% Select the maximum pressure
MatrixFolder=['C:\Users\krsjav01\Desktop\ex_octave3\Tr_',num2str(i),'\']
MatrixName='OUT1.VIS'
DataPath=[MatrixFolder MatrixName]
A=dlmread(DataPath, ',',8,11);
B(i)=max(A);
C(i)=min(A);
T(i)=Tr;
end
plot(T,B,T,C);
Tmax = 0;
Tmin = 0;
for i = 1:40
    if B(i)== max(B);
        Tmax=T(i);
    end
    if C(i)== min(C);
        Tmin=T(i);
    end
end
fprintf(' The maximum head reached after simulating from Tr=1 to Tr=40 is
%d, and it is done for a Tr equal to %d \n The minimum head reached after
simulating from Tr=1 to Tr=40 is %d, and it is done for a Tr equal to %d
\n\n ',max(B),Tmax,min(C),Tmin);
fprintf(' \n\n The percentage growth of pressure in the maximum pressure
point will be %d',((max(B)-720)/720)*100);
```

12.7-Anexo 4.A

Configuración de los siguientes bloques presentes en la instalación.

Upstream Reservoir

```
- PARAMETERS :  
H [m] = 4.877000000000000E+002  
Rho [kg/m3] = 9.980000000000000E+002  
g [m/s2] = 9.805000000000000E+000
```

First Pipe

```
- GENERAL DATA :  
Name = PIPE1002  
Comment =  
Writing = NO  
  
- RATED VALUES :  
  
Hn [m] = 0.000000000000000E+000  
Qn [m3/s] = 0.000000000000000E+000  
  
- PARAMETERS :  
  
Nb [1] = 2.600000000000000E+001  
Zin [m] = 4.572000000000000E+002  
Zout [m] = 2.390000000000000E+002  
L [m] = 5.090000000000000E+002  
D [m] = 7.620000000000000E+000  
Dh [m] = 0.000000000000000E+000  
Ah [m2] = 0.000000000000000E+000  
a [m/s] = 1.31818181818000E+003  
Lambda [1] = 1.36558418968000E-002  
Ksi [1] = 1.000000000000000E+000  
Mu [Pa.s] = 0.000000000000000E+000  
Rho [kg/m3] = 9.980000000000000E+002  
g [m/s2] = 9.805000000000000E+000
```

Mecanical Mass

```
- INERTIA PARAMETERS :  
  
J [kgm2] = 5.651152000000000E+006
```

PROG

```
- GENERAL DATA :  
  
Name = PROGTU1  
Comment =  
Writing = NO  
  
- REFERENCES X :  
  
PROGTU1 Time 1 0  
FTURB1 y 1 0  
FTURB1 T 1 0
```

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

```
REG1 y1 1 0

- REFERENCES Y :

MECA1 Text=y2 1 0

- DATA :

t = x1
yTurb = x2
TTurb = x3
t_Close = 10
t_Open = 50
y1 = max(0.00, (yTurb*LE(t,t_Close) + x4*GE(t,t_Open)))
y2 = -max(TTurb,0.0) * le(t,t_Open)

- PARAMETERS :

dT [sec] = 0.000000000000000E+000

- INITIAL CONDITIONS :

kdT [sec] = 0.000000000000000E+000
y1 [1] = 1.000000000000000E+000
y2 [1] = -1.500000000000000E+007
```

12.8-Anexo 4.B

Configuración de los siguientes bloques presentes en la instalación.

Upstream Reservoir

```
- PARAMETERS :
H      [m] = 4.877000000000000E+002
Rho [kg/m3] = 9.980000000000000E+002
g      [m/s2] = 9.805000000000000E+000
```

First Pipe

```
- GENERAL DATA :
Name      = PIPE1002
Comment   =
Writing   = NO

- RATED VALUES :
Hn      [m] = 0.000000000000000E+000
Qn      [m3/s] = 0.000000000000000E+000

- PARAMETERS :
Nb      [1] = 2.600000000000000E+001
Zin     [m] = 4.572000000000000E+002
Zout    [m] = 2.390000000000000E+002
L       [m] = 5.090000000000000E+002
D       [m] = 7.620000000000000E+000
Dh      [m] = 0.000000000000000E+000
Ah      [m2] = 0.000000000000000E+000
a       [m/s] = 1.318181818180000E+003
Lambda  [1] = 1.365584189680000E-002
Ksi     [1] = 1.000000000000000E+000
Mu      [Pa.s] = 0.000000000000000E+000
Rho     [kg/m3] = 9.980000000000000E+002
g       [m/s2] = 9.805000000000000E+000
```

Mecanical Mass

```
- INERTIA PARAMETERS :
J      [kgm2] = 5.651152000000000E+006
```

PROG

- Turbine 1

```
- GENERAL DATA :
Name      = PROGTU1
Comment   =
Writing   = NO
```

```
- REFERENCES X :
```

```
PROGTU1 Time 1 0
FTURB1 y 1 0
FTURB1 T 1 0
REG1 y1 1 0
```

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

- REFERENCES Y :

MECA1 Text=y2 1 0

- DATA :

```
t = x1
yTurb = x2
TTurb = x3
t_Close = 10
t_Open = 70
y1 = max(0.00, (yTurb*LE(t,t_Close) + x4*GE(t,t_Open)))
y2 = -max(TTurb,0.0) * le(t,t_Open)
```

- PARAMETERS :

dT [sec] = 0.000000000000000E+000

- INITIAL CONDITIONS :

```
kdT [sec] = 0.000000000000000E+000
y1 [1] = 1.000000000000000E+000
y2 [1] = -1.500000000000000E+007
```

- Turbine 2

- GENERAL DATA :

```
Name          = PROGTU2
Comment       =
Writing       = NO
```

- REFERENCES X :

```
PROGTU2 Time 1 0
FTURB2 y 1 0
FTURB2 T 1 0
REG2 y1 1 0
```

- REFERENCES Y :

MECA2 Text=y2 1 0

- DATA :

```
t = x1
yTurb = x2
TTurb = x3
t_Close = 30
t_Open = 90
y1 = yTurb*LE(t,t_Close) + x4*GE(t,t_Open)
y2 = -max(TTurb,0.0) * le(t,t_Open)
```

- PARAMETERS :

dT [sec] = 0.000000000000000E+000

- INITIAL CONDITIONS :

```
kdT [sec] = 0.000000000000000E+000
y1 [1] = 1.000000000000000E+000
y2 [1] = -1.500000000000000E+007
```

12.9-Anexo 4.C

Configuración de los siguientes bloques presentes en la instalación.

Upstream Reservoir

```
- PARAMETERS :
H          [m] = 4.877000000000000E+002
Rho [kg/m3] = 9.980000000000000E+002
g         [m/s2] = 9.805000000000000E+000
```

First Pipe

```
- GENERAL DATA :
Name          = PIPE1002
Comment       =
Writing       = NO

- RATED VALUES :

Hn           [m] = 0.000000000000000E+000
Qn           [m3/s] = 0.000000000000000E+000

- PARAMETERS :

Nb           [1] = 2.600000000000000E+001
Zin          [m] = 4.572000000000000E+002
Zout         [m] = 2.390000000000000E+002
L            [m] = 5.090000000000000E+002
D            [m] = 7.620000000000000E+000
Dh           [m] = 0.000000000000000E+000
Ah           [m2] = 0.000000000000000E+000
a            [m/s] = 1.31818181818000E+003
Lambda      [1] = 1.36558418968000E-002
Ksi          [1] = 1.000000000000000E+000
Mu           [Pa.s] = 0.000000000000000E+000
Rho          [kg/m3] = 9.980000000000000E+002
g            [m/s2] = 9.805000000000000E+000
```

Mecanical Mass

```
- INERTIA PARAMETERS :

J           [kgm2] = 5.651152000000000E+006
```

PROG

- Turbine1

```
- GENERAL DATA
Name          = PROGTU1
Comment       =
Writing       = NO
```

```
- REFERENCES X :
PROGTU1 Time 1 0
FTURB1 y 1 0
```

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

```
FTURB1 T 1 0

- REFERENCES Y :
MECA1 Text=y2 1 0

- DATA :
t = x1
yTurb = x2
TTurb = x3
t_Close = 10
t_Open = 70
y1 = max(0.00, (yTurb*LE(t,t_Close) + GE(t,t_Open)))
y2 = -max(TTurb,0.0) * le(t,t_Open)

- PARAMETERS :
dT [sec] = 0.000000000000000E+000

- INITIAL CONDITIONS :

kdT [sec] = 0.000000000000000E+000
y1 [1] = 1.500000000000000E-001
y2 [1] = -1.500000000000000E+007
```

- Turbine 2

```
- GENERAL DATA :
Name           = PROGTU2
Comment        =
Writing        = NO

- REFERENCES X :
PROGTU2 Time 1 0
FTURB2 y 1 0
FTURB2 T 1 0

- REFERENCES Y :
MECA2 Text=y2 1 0

- DATA :
t = x1
yTurb = x2
TTurb = x3
t_Close = 30
t_Open = 90
y1 = yTurb*LE(t,t_Close) + GE(t,t_Open)
y2 = -max(TTurb,0.0) * le(t,t_Open)

- PARAMETERS :
dT [sec] = 0.000000000000000E+000

- INITIAL CONDITIONS :
kdT [sec] = 0.000000000000000E+000
y1 [1] = 1.500000000000000E-001
y2 [1] = -1.500000000000000E+007
```

12.10- Anexo A

Programa en lenguaje Matlab traducido de Fortrand (Fluid Transients, Wylie & Streeter, 1967)

```
clc
clear
format short

HP=zeros([1,11]);
QP=zeros([1,11]);
H=zeros([1,11]);
Q=zeros([1,11]);
A=1200;
XL=600;
D=0.5;
H0=143.49;
F=0.018;
G=9.806;
HR=150;
CDA=0.009;
TC=2.1;
EM=1.5;
TMAX=4.3;
N=5;
IPR=1;
NS=N+1;
R=F*XL/(2*G*(D^5)*(.7854^2)*N);
B=A/(G*0.7854*D*D);
DT=XL/(A*N);
fprintf('Time step = %2f\n',DT);
Q0=sqrt(2*G*CDA*HR/(R*N*2*G*CDA*CDA+1));
T=0;
K=0;
TAU=1;
fprintf('A, XL, D, F=%2f, %2f, %2f, %2f\n',A,XL,D,F);
fprintf('HR, H0, Q0=%2f, %2f, %6f\n',HR,H0,Q0);
fprintf('CDA, TC, EM=%3f, %2f, %2f\n',CDA,TC,EM);
fprintf('G, TMAX, DT, B=%3f, %2f, %2f, %6f\n',G,TMAX,DT,B);
fprintf('N, IPR=%1f, %1f\n \n',N,IPR)
disp('HEADS AND DISCHARGES ALONG THE PIPE \n \n');
fprintf('\tTIME\t\tX/L=\t0.0\t0.2\t0.4\t0.6\t0.8\t1.0\t\tTAU \n')
fprintf('\t%.2f\t\tH=',T);
for i=1:NS;
    H(i)=HR-(i-1)*R*Q0*Q0;
    fprintf('\t %.2f',H(i));
end
    fprintf('\t %.3f',TAU);
fprintf('\n\t\t\t\t\tQ=');
    for i=1:NS;
        Q(i)=Q0;
        fprintf('\t %.3f',Q(i));
end
    CVP=.5*Q0*Q0/H(NS);
while (T<TMAX)
    for i=2:N;
        CP=H(i-1)+Q(i-1)*(B-R*abs(Q(i-1)));
        CM=H(i+1)-Q(i+1)*(B-R*abs(Q(i+1)));
        HP(i)=0.5*(CP+CM);
        QP(i)=(HP(i)-CM)/B;
    end
    T=T+DT;
```

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

```

HP(1)=HR;
QP(1)=Q(2)+(HP(1)-H(2)-R*Q(2)*abs(Q(2)))/B;
if (T-TC)<0;
    TAU=(1-T/TC)^EM;
    CV=TAU*TAU*CVP;
else
    TAU=0;
    CV=0;
end
CP=H(N)+Q(N)*(B-R*abs(Q(N)));
QP(NS)=-CV*B+sqrt(CV*CV*B*B+CV*CP*2);
HP(NS)=CP-B*QP(NS);
for i=1:NS;
    H(i)=HP(i);
    if i==1
        fprintf('\n\t%.2f\t\t H=\t',T);
    end
    fprintf(' %.2f ',H(i));
    if i==NS;
        fprintf(' %.3f',TAU);
    end
end
for i=1:NS;
    Q(i)=QP(i);
    if i==1;
        fprintf('\n\t\t\t\t Q=')
    end
    fprintf(' \t %.3f',Q(i));
end
end
end

```

Salida por pantalla del programa anterior

```

Time    0.1
step
=
A,      XL,      D,      F      =      1200    600    0.5    0.018
HR,     H0,      Q0      =      150     143.49  0.4774
CDA,    TC,      EM      =      0.009   2.1    1.5
G,      TMAX,    DT,      B      =      9.806   4.3    0.1    623.24
N,      IPR      =      5       1      4496

```

HEADS AND DISCHARGES ALONG THE PIPE

TIME	X/L=	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	TAU
0	H=	150	148.7	147.4	146.09	144.79	143.49	1
	Q=	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	
0.1	H=	150	148.7	147.4	146.09	144.79	154.28	0.929
	Q=	0.477	0.477	0.477	0.477	0.477	0.46	
0.2	H=	150	148.7	147.4	146.09	155.53	165.79	0.861
	Q=	0.477	0.477	0.477	0.477	0.46	0.442	
0.3	H=	150	148.7	147.4	156.79	167	178.08	0.794
	Q=	0.477	0.477	0.477	0.477	0.46	0.442	

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

	Q=	0.477	0.477	0.477	0.46	0.442	0.422	
0.4	H=	150	148.7	158.05	168.2	179.24	191.11	0.728
	Q=	0.477	0.477	0.46	0.442	0.422	0.401	
0.5	H=	150	159.3	169.41	180.4	192.22	204.93	0.665
	Q=	0.477	0.46	0.442	0.423	0.402	0.379	
0.6	H=	150	170.62	181.56	193.33	205.99	219.46	0.604
	Q=	0.444	0.442	0.423	0.402	0.38	0.356	
0.7	H=	150	172.21	194.45	207.05	220.47	234.73	0.544
	Q=	0.407	0.406	0.402	0.38	0.357	0.332	
0.8	H=	150	173.81	197.64	221.49	235.7	250.64	0.487
	Q=	0.369	0.368	0.364	0.357	0.333	0.307	
0.9	H=	150	175.42	200.83	226.23	251.56	267.17	0.432
	Q=	0.328	0.327	0.323	0.317	0.308	0.281	
1	H=	150	177.01	203.99	230.87	257.64	284.19	0.379
	Q=	0.285	0.284	0.28	0.274	0.265	0.255	
1.1	H=	150	178.56	207.04	235.38	263.47	284.87	0.329
	Q=	0.24	0.239	0.235	0.229	0.221	0.221	
1.2	H=	150	180.02	209.94	239.62	262.6	283.52	0.281
	Q=	0.192	0.191	0.188	0.182	0.185	0.188	
1.3	H=	150	181.37	212.59	237.15	259.67	279.91	0.235
	Q=	0.143	0.142	0.139	0.144	0.15	0.157	
1.4	H=	150	182.57	208.59	232.65	254.47	273.74	0.192
	Q=	0.091	0.09	0.098	0.106	0.116	0.127	
1.5	H=	150	177.22	202.63	225.92	246.74	264.8	0.153
	Q=	0.038	0.047	0.058	0.07	0.083	0.099	
1.6	H=	150	170.07	194.56	216.74	236.27	252.81	0.116
	Q=	0.004	0.006	0.019	0.035	0.053	0.074	
1.7	H=	150	167.34	184.17	204.91	222.82	237.57	0.083
	Q=	-0.027	-0.024	-0.017	0.003	0.025	0.051	
1.8	H=	150	164.1	177.69	190.26	206.22	218.84	0.054
	Q=	-0.052	-0.049	-0.041	-0.027	0.001	0.032	
1.9	H=	150	160.36	170.2	179	186.29	196.45	0.029
	Q=	-0.072	-0.069	-0.059	-0.043	-0.02	0.016	
2	H=	150	156.1	161.68	166.23	169.24	170.2	0.01
	Q=	-0.085	-0.082	-0.071	-0.053	-0.027	0.005	
2.1	H=	150	151.32	152.14	151.93	150.16	152.27	0
	Q=	-0.091	-0.087	-0.075	-0.055	-0.027	0	
2.2	H=	150	146.05	141.59	136.08	134.96	133.48	0
	Q=	-0.089	-0.085	-0.072	-0.049	-0.028	0	
2.3	H=	150	140.27	130	124.64	119.41	117.66	0
	Q=	-0.078	-0.074	-0.059	-0.044	-0.023	0	
2.4	H=	150	133.96	123.33	113.34	107.34	105.35	0
	Q=	-0.058	-0.053	-0.046	-0.032	-0.017	0	

“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

2.5	H=	150	133.06	117.3	106.04	99.28	97.02	0
	Q=	-0.027	-0.031	-0.026	-0.019	-0.01	0	
2.6	H=	150	133.34	115.77	103.24	95.72	93.22	0
	Q=	-0.004	0	-0.003	-0.003	-0.002	0	
2.7	H=	150	132.71	119.28	105.46	97.18	94.42	0
	Q=	0.027	0.024	0.022	0.014	0.006	0	
2.8	H=	150	135.94	122.39	113.22	104.15	101.14	0
	Q=	0.052	0.049	0.041	0.032	0.016	0	
2.9	H=	150	139.68	129.87	121.09	117.18	113.89	0
	Q=	0.072	0.068	0.059	0.043	0.026	0	
3	H=	150	143.93	138.37	133.82	130.81	133.21	0
	Q=	0.085	0.081	0.07	0.052	0.027	0	
3.1	H=	150	148.68	147.87	148.08	149.85	147.74	0
	Q=	0.091	0.087	0.075	0.055	0.027	0	
3.2	H=	150	153.93	158.38	163.88	164.99	166.48	0
	Q=	0.089	0.085	0.071	0.049	0.028	0	
3.3	H=	150	159.69	169.93	175.28	180.5	182.25	0
	Q=	0.078	0.073	0.059	0.044	0.023	0	
3.4	H=	150	165.99	176.59	186.55	192.53	194.52	0
	Q=	0.058	0.053	0.046	0.032	0.017	0	
3.5	H=	150	166.89	182.6	193.83	200.56	202.81	0
	Q=	0.027	0.031	0.026	0.019	0.01	0	
3.6	H=	150	166.61	184.13	196.62	204.11	206.6	0
	Q=	0.004	0.004	0.003	0.003	0.002	0	
3.7	H=	150	167.24	180.63	194.41	202.66	205.4	0
	Q=	-0.026	-0.024	-0.022	-0.013	-0.006	0	
3.8	H=	150	164.02	177.52	186.67	195.71	198.71	0
	Q=	-0.052	-0.049	-0.041	-0.032	-0.016	0	
3.9	H=	150	160.29	170.06	178.82	182.73	186.01	0
	Q=	-0.071	-0.068	-0.059	-0.043	-0.026	0	
4	H=	150	156.05	161.59	166.13	169.13	166.75	0
	Q=	-0.085	-0.081	-0.07	-0.052	-0.027	0	
4.1	H=	150	151.31	152.12	151.91	150.15	152.26	0
	Q=	-0.091	-0.087	-0.075	-0.055	-0.027	0	
4.2	H=	150	146.08	141.65	136.17	135.05	133.57	0
	Q=	-0.089	-0.084	-0.071	-0.049	-0.028	0	
4.3	H=	150	140.34	130.14	124.79	119.59	117.84	0
	Q=	-0.078	-0.073	-0.059	-0.044	-0.022	0	

12.11-Anexo B

Colección de fotografías recogidas durante la elaboración del presente trabajo en Andritz Kriens sobre la fábrica de construcción y mantenimiento de turbinas y generadores.



“Desarrollo de modelos en Simsen para el cálculo de transitorios en maniobras hidráulicas”

