

Concepto de energía específica como herramienta útil en diseño de canales

Concept of specific energy as a useful tool in channels design

Zivko Gencel^{1,2}

Recibido: 24 de febrero de 2016

Aceptado: 15 de abril de 2016

Resumen

El concepto de energía específica es ampliamente enseñado como elemental en los cursos universitarios de hidráulica de canales abiertos en Ingeniería Civil y Agrícola, aunque los profesionales de ingeniería, la mayoría de ellos incluso hoy en día, con frecuencia no son conscientes de su utilidad en el uso corriente.

En este trabajo se ofrece una referencia a algunos - los más frecuentes, entre muchos posibles usos, que se le podría dar a un concepto específico de energía en la práctica del diseño y las intervenciones eventuales asociados a la necesidad de resolución de un problema particular, durante la construcción de obras hidráulicas. El objetivo de la misma es promover el proceso de diseño más preciso cerca de la perfección.

La esencia de este análisis, derivada para el flujo uniforme en canales con superficie abierta, es el balance de energía de flujo y podría aplicarse a la variación gradual del flujo, así como para el flujo rápidamente variado. Se ofrece como herramienta básica para la solución de los problemas conceptuales de caudal en canales abiertos. Como ejemplo se puede mencionar los casos de definición de nivel de la superficie del agua condicionada por el cambio de sección del canal, por la variación de la pendiente del fondo o por el flujo de cambio de clasificación, en el diseño y el flujo de energía disipados debajo de las barreras.

Palabras clave: concepto, energía específica, diseño de canales, hidráulica, solución de problemas.

Abstract

The specific energy concept is widely taught as elementary one in university courses of open channel hydraulics at Civil and Agricultural Engineering, though engineering practitioners, most of them even today, frequently are not aware of its utility in common use.

This paper offers the reference to some - most frequent, among many, possible uses which could be given to a specific energy concept in the design practice and eventual interventions associated with the necessity to resolve particular problem during construction of hydraulic works. The purpose of it is to promote the more accurate design process closer to perfection.

The essence of this analysis, derived for the uniform flow in channels with open surface, is the flow energy balance and could be applied to gradually varied flow as well as for rapidly varied flow. It is offered as basic tool for conceptual open channel flow problems solutions. As example can be mentioned cases of water surface level definition conditioned by channel section change, by bottom slope variation or by flow classification change, in energy dissipators design and flow under gates.

Keywords: concept, specific energy, canals design, hydraulic, problem solving.

1. Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Piura, Perú.

2. Escuela de Ing. Civil de la Facultad de Ingeniería, Universidad Privada Antenor Orrego, Trujillo, Perú .
zaugencel@yahoo.com

I. INTRODUCCIÓN

A pesar que el concepto de energía específica es un concepto ampliamente presente en la enseñanza actualizada de hidráulica de canales en las carreras universitarias de ingeniería civil e ingeniería agrícola, la mayoría de ingenieros rara vez acuden a esa herramienta en práctica.

El presente trabajo hace referencia a varios - más frecuentes, entre muchos, usos que se pueden dar al concepto de energía específica en la práctica del diseño y eventuales intervenciones puntuales como consecuencia de problemas encontrados durante la ejecución de obras hidráulicas. La finalidad es promover un proceso de diseño más acertado y profesionalmente perfeccionado. La esencia de los análisis en este sentido, desarrollados para el flujo uniforme con espejo de agua libre, reposa en el balance energético del flujo y es aplicable para flujos gradualmente y rápidamente variados. Se ofrece como sustento de las soluciones conceptuales del análisis hidráulico de flujo en canales con espejo de agua libre. Como ejemplos se pueden mencionar casos desde la definición de niveles de la superficie del agua que se darán en cambio de secciones transversales, en cambio de pendientes del fondo o por el cambio de naturaleza de flujo, así como en diseño de colchones amortiguadores y flujo de descarga de compuertas.

II. CONCEPTO DE ENERGÍA ESPECÍFICA

A diferencia de la energía mecánica, la referencia de nivel energético en caso de energía específica no es un plano horizontal sino el plano del fondo del conducto con espejo de agua libre. De este modo y para el flujo uniforme (canal prismático con pendiente de fondo, rugosidad y caudal constantes, trazo recto en planta y longitud apreciable) las líneas de energía, piezométrica y la del perfil de fondo son paralelas, igualándose de este modo el descenso del fondo en un tramo con la energía disipada en mismo tramo. La energía específica igual a $E_s = y + \alpha v^2/2g$ o, en otras palabras, es energía de flujo así concebido, medida a partir del fondo del canal prismático. Su análisis y uso son grandemente facilitados para canales de sección rectangular, pero no hay impedimentos particulares para secciones de forma arbitraria. En todo caso cual fuera la sección debe ser idéntica a lo largo del tramo del canal donde pretendemos usar el concepto de energía específica.

1) *Presentación gráfica de la línea de energía específica:* La presentación grafica de energía específica es la herramienta que facilita conceptualizar las soluciones de problemas de flujo sin perder de la vista el correcto balance energético. Las siguientes figuras ilustran las principales características de la presentación gráfica:

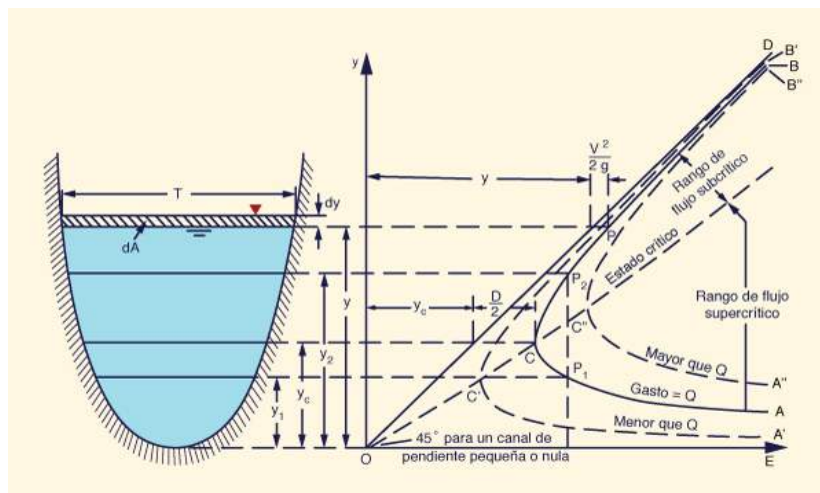


Fig. 1 Curva de energía específica (2,3)

La identificación de cada curva consiste de dato sobre la sección para la cual se ha elaborado y para un solo caudal. En caso de secciones rectangulares el caudal se remplaza por la relación entre el caudal y ancho del fondo del canal:

$q = Q/b$. Cada curva representa para una determinada sección y caudal relación de tirantes normales (caracterizan tirante del flujo uniforme) y de energía específica para una gama de pendientes desde tirantes muy grandes para pendientes pequeñas hasta lo opuesto.

2) *Tendencia básica del uso de la línea de energía específica para soluciones de problemas de flujo.* Los canales que transportan agua para diversos usos se diseñan para un flujo en régimen subcrítico y con velocidades que no superan 3m/s aproximadamente. Obras que se puedan presentar localmente son caídas,

rápidas, contracciones de la sección – lateral y/o desde el fondo o expansiones que se diseñan de modo que no requiera aumento de energía específica aguas arriba.

Si se produjera el caso que la energía disponible del flujo uniforme del canal no fuera suficiente automáticamente se produciría aguas arriba el remanso hasta crear energía específica suficiente. En otras palabras, si la energía del flujo uniforme aguas arriba de alteración local llegase a ser menor que la energía específica “crítica” - la mínima necesaria para llevar determinado caudal en forma natural, el nivel de agua aguas arriba subiría para cumplir la condición mínima necesaria poniendo en riesgo la seguridad del canal contra desbordes.

La disipación local de energía que se produjera en el canal inclusive sin alteración local de su sección causaría el mismo efecto sobre el nivel de agua aguas arriba. A pesar de ser derivada, rigurosamente hablando, para el flujo uniforme es posible aprovechar la línea de energía específica para predecir el comportamiento del flujo en circunstancias descritas líneas arriba.

3) *Ejemplos elementales del uso de la línea de energía específica para soluciones de problemas de flujo.* Las situaciones reales pueden obligar al proyectista o ejecutor a pensar en la necesidad de introducir una protuberancia del fondo para evitar algún obstáculo (afloramiento rocoso, estructura y/o instalación existente) o para tener facilidades de medición del caudal y semejante. Con la finalidad de evitar la formación de vorticidades localmente y la disipación de energía la forma de esta en perfil debe consistir en un cuarto de elipse seguido por la tangente hacia aguas abajo que encierre con el fondo el ángulo no mayor de 7° como se observa en la Fig. 2.

La disipación local de energía es despreciable, por lo cual la línea de energía mantiene su caída característica para el flujo uniforme que precede el trastorno – protuberancia y continua al pasarlo.

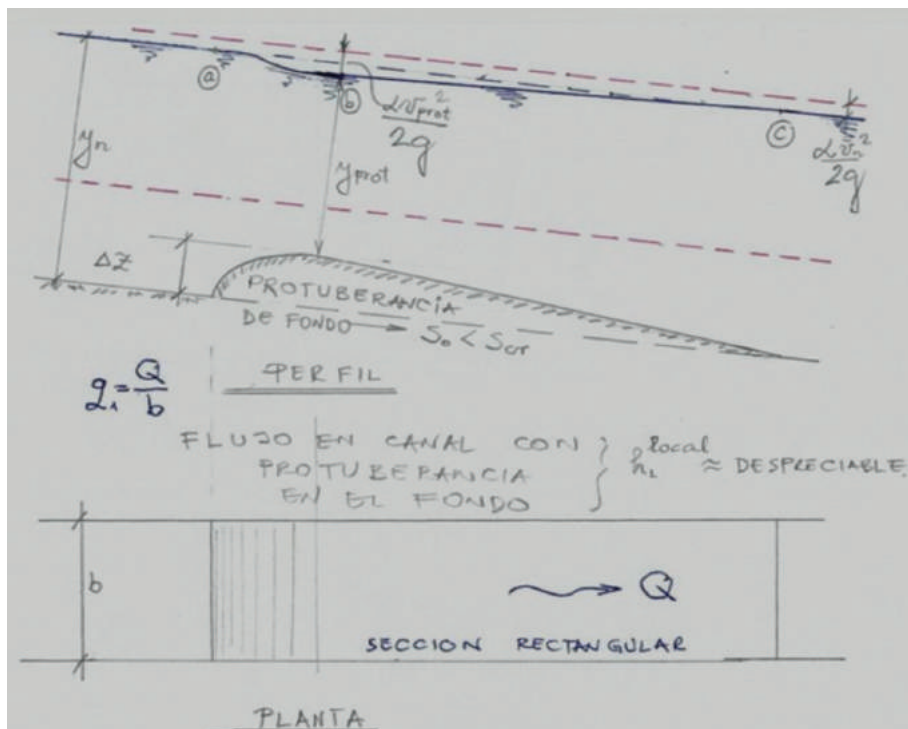


Fig. 2 Se presenta la protuberancia en el fondo

En la línea de energía correspondiente se pudo diseñar la posición de espejo de agua: $E_{sn} = y_n + \alpha v^2/2g = \Delta z + y_{prot} + \alpha v_{prot}^2/2g$. siendo en esta ecuación conocido lado izquierdo (estado de flujo uniforme) y altura de la protuberancia – los parámetros ... “yn” y “ $\alpha v_{prot}^2/2g$ ” se definen siendo igual su suma al resultado de operación ($E_{sn} - \Delta z$). Son variables dependientes y sus valores se encuentran por iteración. Tal como se señala en la Fig. 3, el nivel indicado en el perfil de la Fig. 2 pasará del punto “a” hacia punto “b” y de nuevo al punto “c” – tirante normal en el canal.

La máxima altura de la protuberancia se define como $\Delta z_{max} = E_{sn} - E_{critico}$. En estas condiciones el caudal todavía puede pasar sin alteraciones del nivel aguas arriba (siendo despreciable la disipación de energía asociada con la protuberancia).

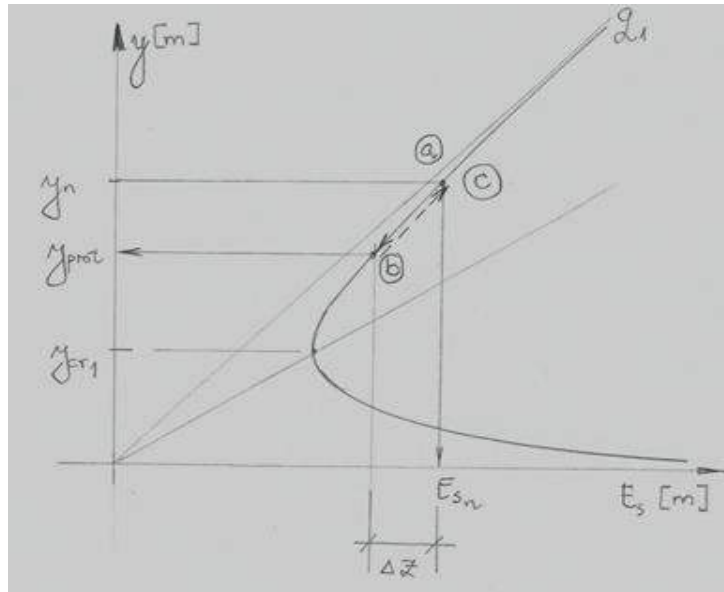


Fig. 3 Variación local del nivel por encima de la protuberancia

También es posible, con más frecuencia en la vida real, que se presente la necesidad de reducir el ancho del canal en lugares como cruce de una vía de tránsito que pasa por encima del canal (se construirá puente) o en caso de caída en el trazo del canal, ensanchamiento de la sección del canal en un desarenador (asociado con profundización) o por facilitar acceso de personas y/o ganado al agua en algún tramo, playa - bebedero.

En el caso de simple contracción de la sección del canal requerida por reducir la luz del puente (generalmente sobre una sección trapezoidal del canal), se busca el mínimo ancho para la luz sin que cause alteraciones de flujo aguas arriba. En este caso se procede a formar el estrecho de forma semejante a la presentada para la protuberancia de fondo en la Fig. 3 solo en plano vertical y preferible de forma simétrica – adaptando ambas paredes laterales del canal. Así se crea una transición de la sección trapezoidal a la rectangular según se aprecia en la Fig. 4. La más simple dentro de una sección rectangular funciona como se aprecia en las Fig. 4 y 5. El nuevo ancho así formado “b2” implica la existencia de un caudal unitario más grande en este lugar, por lo cual el tirante que se establecerá en este lugar es aquel que se lee en la curva “q2” para la energía E_{s2} – energía de la corriente antes de la transición! Se puede escribir: $q_2 = Q/b_2$, $E_{s2} = E_{s1} = y_2 + \alpha v_2^2 / 2g$, $v_2 = q_2 / y_2$. Estas ecuaciones permiten definir la variable b_2 o q_2 , lo que abre camino para calcular tirante o velocidad en la garganta. El límite de reducción del “b1” representa la situación de $E_{s1} = E_{crit2}$ – así se puede definir el “b2min”. Si se presentara disipación de energía por realizar reducción del ancho de una forma que cause disipación local de energía, entonces el “b2min” sería resultado de $E_{crit2} = E_{s1} - hL$, donde “hL”. La disipación de energía sería causada por la falta de forma hidrodinámica del estrechamiento.

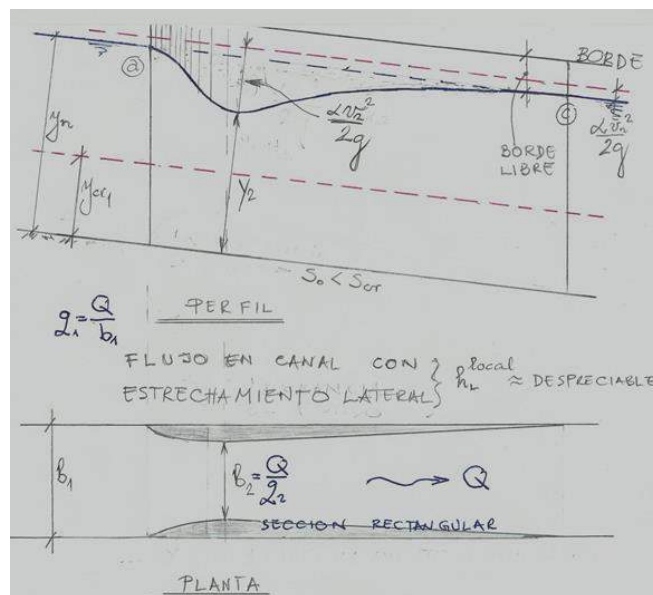


Fig. 4 Estrechamiento simple de la sección rectangular

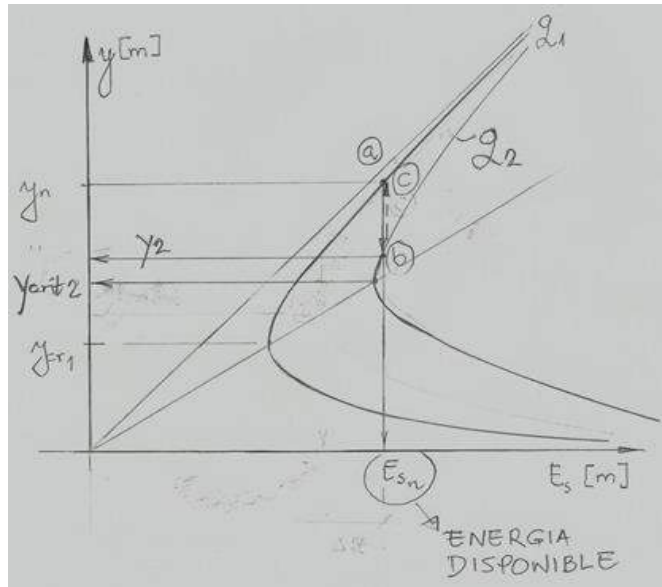


Fig. 5 La misma energía pero menor tirante para otro caudal unitario

III. EJEMPLOS DE APLICACIÓN MÁS COMPLEJOS Y PRÁCTICOS

1) *Simultánea existencia de estrechamiento con protuberancia del fondo.* Teniendo más que nada una connotación teórica, por poca probabilidad de ocurrencia real, este caso merece atención predominantemente porque ayuda a entender plenamente el uso de la línea de energía para definir qué pasará en esta y semejantes situaciones más complejas.

Esta vez la protuberancia acompaña al estrechamiento. El nuevo ancho "b2" también implica existencia de un caudal unitario más grande en el lugar de estrechamiento; pero la magnitud del tirante que se establecerá en este lugar es aquel que se lee en la curva "q2" para la energía E_{sn} – energía de la corriente antes de la transición reducida por Δz o E disponible para estrechamiento es igual a $E_{sn} - \Delta z$! Se puede escribir nuevamente: $q_2 = Q/b_2$, $E_{s2} = E_{sn} - \Delta z = y_2 + \alpha v_2^2 / 2g$, $v_2 = q_2 / y_2$. A la vez, para un máximo estrechamiento en estas condiciones se puede escribir $E_{sn} - \Delta z = E_{crit2}$. Al conocer el valor de la energía crítica posible se puede calcular $y_{2crit} = 2/3 E_{crit2}$ y de $y_{2crit} = (q_2^2 / g)^{0.3333}$ válido para una sección rectangular se encuentra fácilmente "q2" el que define el "b2min". Esto que abre camino para calcular tirante o velocidad en la garganta. Si se presentará disipación de energía por realizar reducción del ancho o instalar la protuberancia de una forma que cause disipación local de energía entonces el "b2min" sería resultado de $E_{crit2} = E_{sn} - \Delta z - h_L$, donde "hL" sería la disipación de energía causada por falta de formas hidrodinámicas.

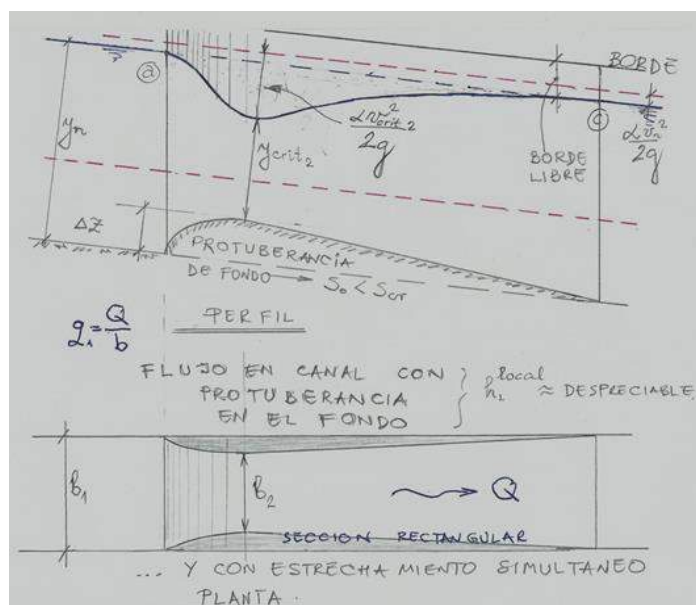


Fig. 6 Canal rectangular con una protuberancia de fondo y estrechamiento de lados

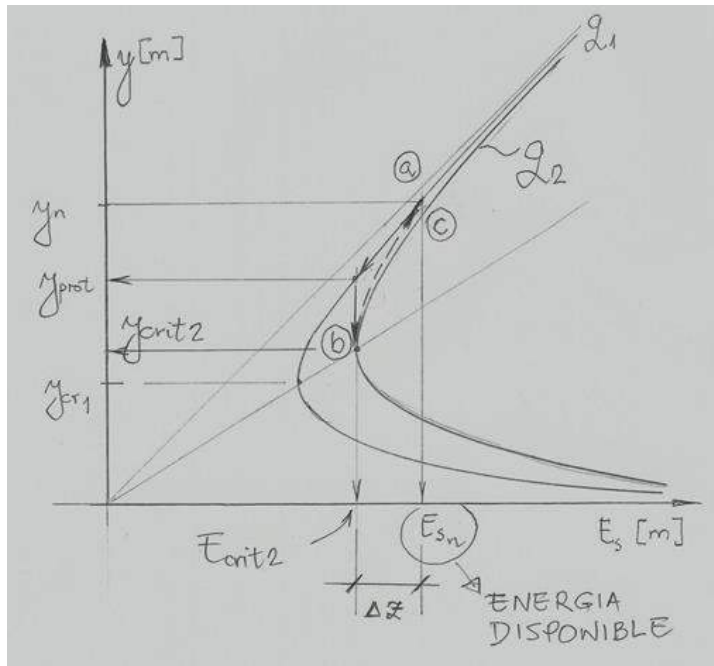


Fig. 7 Variación del nivel de agua en el estrechamiento con protuberancia

2) *Caída y salto hidráulico*: Entre la sección típica del canal (salvo para un canal rectangular sin cambio de ancho en el lugar de puente) y el borde de la caída se encuentra la transición hacia la sección rectangular de la caída, ya que esta alberga simultáneamente el colchón amortiguador. La energía en el lugar de paso del nivel por el tirante crítico no puede ser mayor que la energía de flujo uniforme aguas arriba reducido por eventual disipación local de energía en la transición.

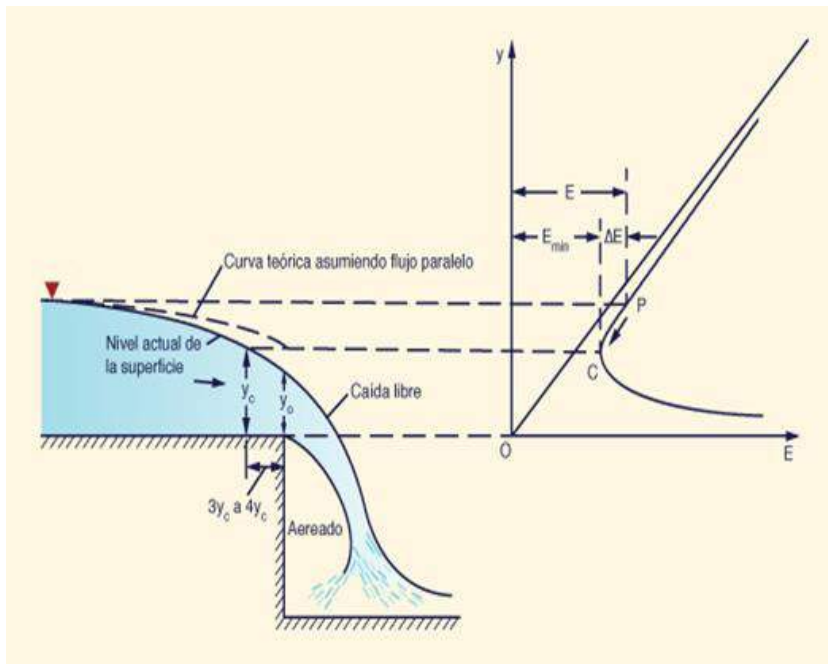


Fig. 8 Caída sin estrechamiento (2,3)

En la Fig. 8 se observa un “ ΔE ” que ocurre entre el flujo uniforme y la caída. Este cambio de energía no tiene nada que ver con disipación local de energía sino es consecuencia de gradual adaptación del flujo a nueva condición – crítica.

Por otro lado, tal como se observa de la Fig. 9, el “ ΔE ” entre inicio del salto hidráulico y su final es la disipación de energía que se ha dado en el colchón amortiguador. También se puede concluir que las energías específicas del final de salto hidráulico y de la continuación del canal (con misma pendiente y sección que aguas arriba) deben de ser iguales, lo que facilita definir la necesidad de disponer con profundización del colchón amortiguador respecto al fondo de continuación del canal y por cuanto.

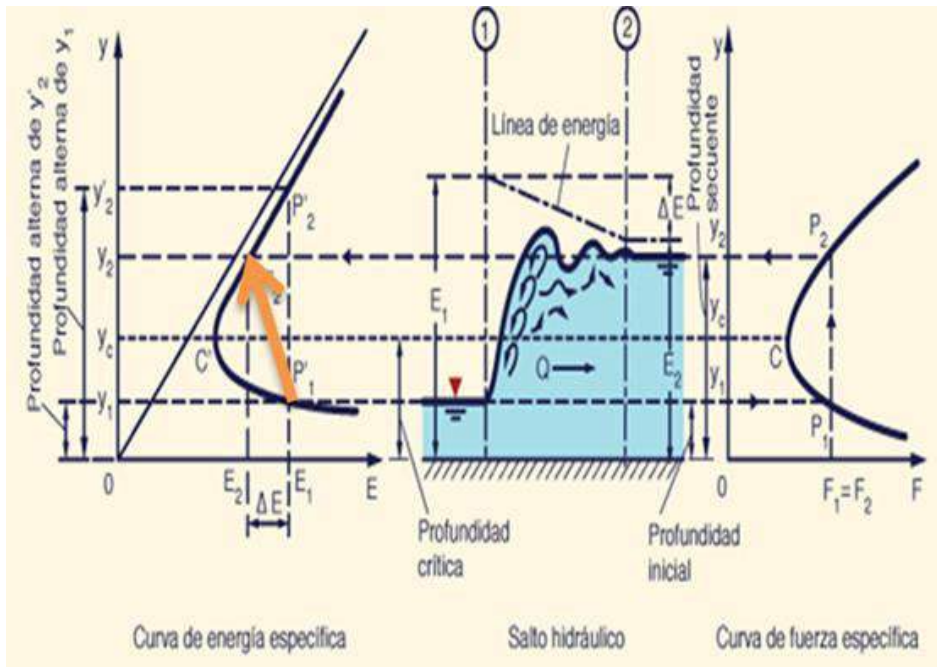


Fig. 9 El salto hidráulico ilustrado en las curvas de energía específica y fuerza específica (2,3).

IV. SOLUCIONES CONCEPTUALES DE FLUJO EN CANALES PRISMÁTICOS

El éxito en la conducción de los cálculos de niveles en los canales prismáticos, hoy altamente mecanizados, de todos modos depende de la medida en que el operador entiende lo que hace. Por esta razón un previo chequeo de cómo se darían las cosas facilitan la incorporación de datos y la obtención de resultados satisfactorios. En la imagen Fig. 9 se presenta el resultado de un análisis de esta naturaleza cualitativa. Para iniciar es indispensable trazar fondos con indicio de clase de pendientes – suave $S_0 < S_{cr}$ o $S_0 > S_{cr}$, lo que facilita ubicar relativamente los tirantes críticos (único para todos los tramos de una misma sección) y los tirantes normales que después permite deducir tipos y extensiones de curvas de flujo gradualmente variado de forma cualitativa tal como se ha hecho acá. En este caso también se presenta la variación de nivel en el diagrama de energía específica que, por más cualitativo que sea, define con claridad relaciones energéticas específicas.

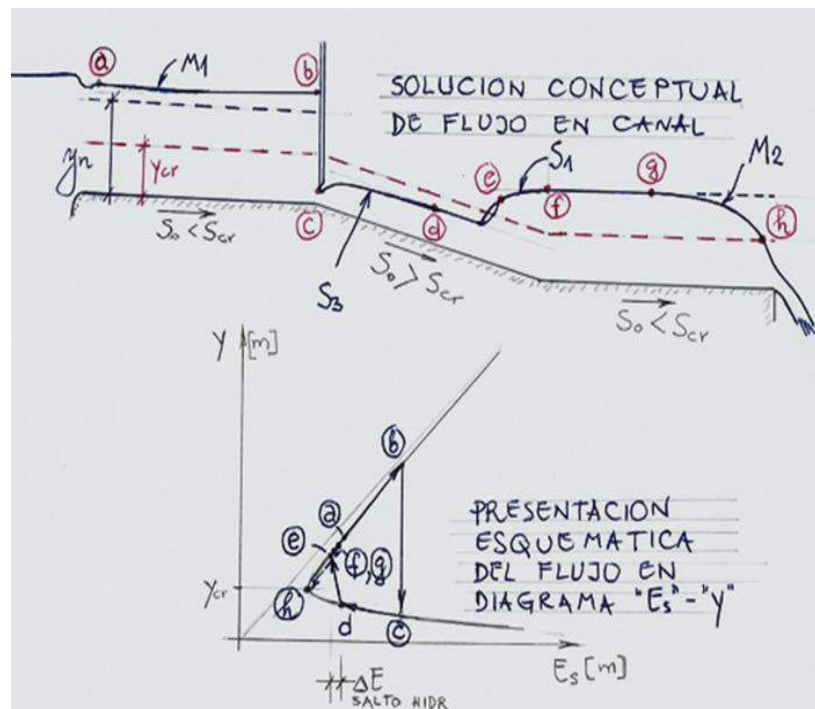


Fig. 9 Solución conceptual de flujo en canal con pendiente variada y equipos hidromecánicos

V. COMENTARIOS FINALES

Los ejemplos vertidos en este artículo son solo mera sombra de lo que se puede lograr usando el concepto de energía específica y, a pesar de ello son de uso académico principalmente. No hay duda que manejando bien el concepto y adoptándolo al uso diario el diseñador y/o calculista se arma con un elemento que brinda seguridad en cuanto a los resultados de su trabajo. El presente artículo tiene el propósito de convencer a los profesionales especialistas y a los que ocasionalmente deben resolver problemas de que no existe mejor herramienta para procedimientos correctos que esta. Vale la pena decir que, en cauces naturales, a pesar de la variabilidad de secciones, el principio ayuda a pronosticar lo que ocurriría cuando intervenimos en la naturaleza. Sin embargo, debido a la erodibilidad del fondo y eventualmente las laderas de los cauces naturales solo en primer momento se tendrá la consecuencia planteada por el análisis cualitativo mediante concepto de energía específica. Para el resultado final es indispensable analizar la erosión y paso por paso buscar la situación de equilibrio – eso es lo que algunos paquetes de programas cibernéticos realizan.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) H. Koloseus, 1980, Curso: *Hidráulica de Canales Abiertos, Apuntes de clases*, Postgrado, Colorado State University, Fort Collins, Colorado EE.UU.
- 2) V.Miguel Ponce, 2015. *Fundamentos de Hidráulica de Canales*, Universidad de San Diego, California .
- 3) Ven Te Chow, 2004, *Hidraulica de Canales Abiertos*, Mc Graw Hill, Santa Fe de Bogota, Colombia.
- 4) Martín Vide, Juan Pedro (1997), *Ingeniería Fluvial*, Universidad Politécnica de Catalunya, primera edición.
- 5) Zivko Gencel, 2015, *Curso Hidráulica de Conductos, Apuntes de clases*, Universidad Nacional de Piura, Perú.