



Master en Medio Ambiente y Cooperación Internacional 2008

Módulo: Cooperación Internacional

MINIHIDRÁULICA Y EÓLICA

AUTOR: JOSÉ ANTONIO MANCEBO



Índice

A. ENERGÍA MINIHIDRÁULICA	3
1. CONTEXTO: ACCESO UNIVERSAL A SERVICIOS BÁSICOS. ENERGÍA.	3
2. DEFINICIONES Y CONCEPTOS EN INGENIERÍA HIDRÁULICA.	4
3. TIPOLOGÍA DE MÁQUINAS HIDRÁULICAS COMO TECNOLOGÍA APROPIADA PARA EL DESARROLLO.	6
4. COMPONENTES PRINCIPALES DE UN APROVECHAMIENTO EN MINIHIDRÁULICA..	8
5. EL ARIETE HIDRÁULICO COMO CASO SINGULAR DE TECNOLOGÍA ENERGÉTICA MINIHIDRÁULICA.	11
B. ENERGÍA EÓLICA	14
1. APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL VIENTO. USOS DE LA ENERGÍA EÓLICA.	14
2. AEROTURBINAS PARA BOMBEO MECÁNICO DIRECTO. MOLINO MULTIPALA	14
3. PEQUEÑOS AEROGENERADORES	21

A. ENERGÍA MINIHIDRÁULICA

1. CONTEXTO: ACCESO UNIVERSAL A SERVICIOS BÁSICOS. ENERGÍA.

Se han publicado numerosos estudios sobre la situación del acceso a la energía en países en desarrollo. Los datos globales son, entre otros, que 1600 millones de personas carecen de acceso a la electricidad, que unos 2400 millones dependen de la biomasa para cocinar y calentarse, etc. Si partiendo de estos estudios se detectan enormes carencias, la experiencia in situ permite captar un panorama todavía más desolador, especialmente en cuanto nos alejamos del centro de las ciudades principales. Así por ejemplo la realidad del acceso a servicios básicos en general, y a la energía en particular, en África subsahariana rural, es de carencia y degradación casi total. Las poblaciones, grandes y pequeñas, no tienen acceso a la electricidad sencillamente porque a ellas no llega ninguna red de transporte, ni se genera localmente esa energía, salvo casos contados para usos comunes, resueltos en general con grupos electrógenos, y raramente con módulos fotovoltaicos o generadores eólicos.

El desarrollo de las energías renovables se encuentra además numerosos problemas:

- (a) Escasez de corrientes de agua con desniveles suficientes para instalar miniturbinas, incluso microturbinas.
- (b) Periodos de tiempo sin potencia eólica disponible a veces superiores a un mes al año

- (c) Dificultades técnicas para la realización de las instalaciones.
- (d) Sostenibilidad variable.

El estado del acceso a la energía que se observa es de práctica inexistencia y por tanto las intervenciones de desarrollo parten de esa base a la hora de formular sus proyectos.

2. DEFINICIONES Y CONCEPTOS EN INGENIERÍA HIDRÁULICA.

Desde un punto de vista teórico, los sistemas desarrollados y utilizados en el proyecto de aprovechamiento de la energía hidráulica precisan de la aplicación de las ecuaciones básicas de mecánica de fluidos:

- a) *Continuidad*. De ella obtendremos, para los regímenes permanentes: velocidades, caudales y secciones de paso en conducciones.
- b) *Conservación de cantidad de movimiento y de energía*. Nos permitirán conocer fuerzas actuantes y pérdidas de carga.
- c) *Conservación del momento cinético*. Ofrece el par motor de las máquinas hidráulicas y la potencia capturada por una máquina de una corriente de fluido

Definimos una máquina hidráulica motora (turbina) como aquella que produce un trabajo exterior a costa de la energía de una masa líquida. Para ello es necesario poner a disposición de la máquina una corriente con suficiente contenido energético, tanto potencial como cinético que puede expresarse mediante la conocida ecuación de Bernoulli:



$$Z + \frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} = H$$

Donde

- Z: cota geométrica (L)
- P: presión ($ML^{-1} T^{-2}$)
- γ : peso específico ($L^3 T^{-1}$)
- v : velocidad (LT^{-1})
- g : aceleración de la gravedad (LT^{-2})

Suele darse como dato de partida el “salto bruto” (H_b) que en la práctica representa al diferencia de cota entre el nivel del agua en el punto de captación (una acequia, un canal o una presa) y el punto de ubicación de la turbina. Sin embargo los parámetros básicos de un aprovechamiento hidráulico son el “salto útil” o disponible (H) en metros, que en realidad es el salto bruto menos las pérdidas en el trayecto hasta la minicentral, y el caudal (Q) en m^3/s . De ellos obtenemos la potencia dada por una turbina que tiene un rendimiento η

$$N = \gamma \cdot Q \cdot H \cdot \eta \text{ (vatios)}$$

Como ejemplo, una minicentral que tiene un rendimiento global del 60 % con un caudal de 30 l/s y dispone de un salto de 20 m, dará una potencia:

$$N = 9810 \cdot 0,03 \cdot 20 \cdot 0,6 = 2531 \text{ w}$$

Si no se dispone de datos previos con series temporales de caudales, será preciso construir un sistema de medición de caudales con los medios de los que se disponga en cada lugar, por ejemplo:

- **Vertedero rectangular.** El caudal es el resultado de aplicar la ecua-

ción del vertedero correspondiente

$$Q = f (h)$$

Siendo h la carga o altura de agua sobre el umbral de salida.

- *Depósito.* Apenas se necesita un recipiente con capacidad mínima de 100 litros siendo el caudal la relación entre volumen llenado y el tiempo tardado en ello.

El salto bruto se puede medir fácilmente si se tiene una nivel de albañil. Para la pérdida de carga es necesario tener alguna tabla de pérdidas de carga de los materiales más comunes: acero, PVC, PE, hormigón.

3. TIPOLOGÍA DE MÁQUINAS HIDRÁULICAS COMO TECNOLOGÍA APROPIADA PARA EL DESARROLLO.

Todas las turbinas tienen su fundamento teórico en el principio de la reacción del que se obtiene la ecuación de Euler que expresa el par motor (P_m) como:

$$P_m (N \cdot m) = \rho \cdot Q \cdot (r_1 v_1 \cos \alpha_1 - r_2 v_2 \cos \alpha_2)$$

Donde:

ρ : densidad del agua (kg/m^3)

Q: caudal (m^3/s)

r_1 , r_2 : radio vector de un punto en la sección de entrada y en la de salida al rodete de la turbina.

α_1 , α_2 : ángulo de la velocidad absoluta con la tangencial en la entrada y salida del rodete.



La potencia (PW) es el producto del par motor por la velocidad angular (ω):

$$PW = P_m \cdot \omega$$

Desde la perspectiva de la forma de llevar a cabo la conversión de energía hidráulica en mecánica existen dos tipos de turbinas:

- Turbinas de acción (Pelton)
- Turbinas de reacción (Francis y Hélice o Kaplan)

Una vez determinados el caudal y el salto disponible debe elegirse la máquina que mejor se adapte a las características del salto. Existen varios criterios que ayudan en esta selección:

a) Velocidad específica (n_s).

Aplicable a toda la tipología de turbinas, tiene el mismo valor para turbinas semejantes.

$$n_s = n \frac{\sqrt{N_{cv}}}{H^{1,25}}$$

siendo n : velocidad de giro (r/min)

N: potencia global de la turbina en CV

H: salto disponible o útil (m)

Los rangos de utilización son:

Turbinas Pelton $2,7 < n_s < 32$

Turbinas Francis $50 < n_s < 500$

Turbinas Hélice $420 < n_s < 1200$

b) Salto (H):

Las turbinas Pelton se pueden instalar en grandes saltos, superiores a 150 m teniendo su techo actual en 1800 m. Las Francis en saltos medios, de 20 a 300 m, y las hélice o Kaplan en pequeños saltos, inferiores a 50 m. Hay que señalar que en el caso de las microturbinas, estos rangos de utilización son diferentes (una microturbina Pelton puede instalarse en un salto de 20 a 40 m, aunque también en saltos de 150 m).

c) Caudal (Q):

Los caudales hasta 20 m³/s son mejor utilizados por las turbinas Pelton, los caudales medios, de 10 a 50 m³/s son el campo de trabajo de las Francis y para caudales mayores suelen instalarse turbinas Kaplan. Del mismo modo que antes estos rangos varían en el caso de las microturbinas (una microturbina Pelton puede trabajar con un caudal de 2 l/s)

Es necesario resaltar que la selección del tipo de turbina debe atender a una combinación de todos los factores que influyen en su funcionamiento, y de ninguna manera atendiendo a un solo de los criterios mencionados

4. COMPONENTES PRINCIPALES DE UN APROVECHAMIENTO EN MINIHIDRÁULICA.

a) Presa o azud de derivación. Es la parte que precisa de mayor inversión e infraestructura de obra civil, salvo en el caso de microturbinas. En muchos casos se trata de presas de gravedad o contrafuertes con suficiente altura para que mediante un aliviadero lateral de superficie se conduzca el agua al canal de alimentación de la turbina. Pero casi

nunca será una presa de un embalse de acumulación o regulación de cuenca hidrográfica.

- b) Canal de alimentación o tubería forzada. El canal de alimentación precisa de reja basta en el inicio y reja fina en la terminación, justo antes de entregar el caudal a la tubería forzada o a la cámara de la turbina, si es de tipo abierto. La tubería forzada debe tener un timbraje adecuado a la presión normal de trabajo más la sobrepresión que pudiera originarse por un golpe de ariete.
- c) Cámara de la turbina. Recibe el agua de la tubería forzada y la dirige hacia el distribuidor y rodete. En el caso de turbina Pelton se trata de una prolongación de la tubería forzada con las correspondientes derivaciones a los inyectores. Las turbinas de reacción disponen de una cámara espiral de sección decreciente que proporcionan una admisión uniforme en todo el perímetro de la turbina. En turbinas con salto pequeño la cámara suele ser abierta constituyendo prácticamente un depósito en cuyo fondo se instala la turbina de eje horizontal o vertical.
- d) Distribuidor. Se trata de un órgano intermedio, previo al rodete, en el que se conduce al agua de manera conveniente hacia la entrada al rodete. En las turbinas Francis y Hélice consiste en un corto paso entre dos coronas a las que se han calado unas palas directrices orientables para dar al agua el ángulo (α) adecuado para conseguir un rendimiento óptimo (η).

$$\eta = \frac{u_1 v_1 \cos \alpha_1 - u_2 v_2 \cos \alpha_2}{gH}$$

En las turbinas de acción (Pelton) el distribuidor consiste en una tobera de sección decreciente con un punzón que se desplaza axialmente obturando la salida del agua. Es necesario observar la importante función reguladora del caudal, sin olvidar el riesgo que ello supone (de golpe de ariete) cuando se actúa demasiado rápido en la maniobra de cierre o apertura. En turbinas pequeñas se puede regular el caudal con una simple válvula de compuerta insertada en la tubería forzada justo antes de la turbina.

- e) Rodete, rotor o rueda móvil. Puede considerarse como el órgano principal de la turbina. Consta básicamente de una rueda a la que se unen una serie de superficies alabeadas sobre las que incide el agua que procede del distribuidor. La variación del momento de la cantidad de movimiento de la corriente de agua se transforma en el rodete en el par motor que hace girar el eje de la turbina. Los álabes de las turbinas Pelton son dobles cucharas sobre las que incide el chorro libre lanzado por la tobera. En las turbinas Francis son superficies alabeadas unidas a dos cubos o cinturas. En las de hélice son sencillas paletas de perfil aerodinámico. Otros rodetes utilizados son los Banki y Turgo.
- f) Tubo de aspiración. Conduce el agua desde la salida del rodete hasta el canal de desagüe. Está constituido por un tubo troncocónico, a veces acodado, de altura máxima 7 m, para evitar cavitación en la salida del rodete. Este órgano permite aumentar el salto disponible, al disminuir la presión en la salida del rodete de la turbina. Es preciso destacar que en las turbinas Pelton no se instala tubo de aspiración.

- g) Además de los anteriores órganos, las turbinas incorporan un sistema de regulación que se encarga de mantener el funcionamiento de la turbina dentro de los límites requeridos, para que las prestaciones que ofrece, principalmente de velocidad de giro, potencia y rendimiento, estén dentro de los márgenes normalizados.

5. EL ARIETE HIDRÁULICO COMO CASO SINGULAR DE TECNOLOGÍA ENERGÉTICA MINIHIDRÁULICA.

a) Consideraciones previas acerca del golpe de ariete. Cuando en una conducción se producen maniobras de cierre y apertura con una determinada rapidez, se produce una sobrepresión –golpe de ariete- que puede aprovecharse para realizar impulsiones sin aporte energético mecánico exterior. La conversión del incremento de presión en energía potencial de posición significa la elevación del líquido hasta alturas considerables, si bien con caudales reducidos.

Mediante la fórmula de Michaud para maniobras lentas, obtenemos una altura de elevación por golpe de ariete (H), que aplicada a un ejemplo sencillo nos ofrece resultados como los siguientes:

$$H = \frac{2 \cdot L \cdot V}{g \cdot T}$$

Aplicación:

L : longitud de tubería: 50 m

V : velocidad del agua en régimen estacionario: 4 m/s

g : aceleración de la gravedad: 9,81 m/s

T : tiempo de duración de la maniobra: 1s

$$H = 40 \text{ m}$$

b) Descripción general de la bomba de ariete. Aplicaciones

El agua aumenta de velocidad en una conducción de alimentación hasta que cierra una válvula pulsante y a la vez abre otra válvula antiretorno que deja pasar el agua a un depósito hasta que se equilibran las presiones en la cámara de llegada. Entonces se abre la válvula pulsante dejando salir el agua al exterior, hasta que se inicie otro nuevo ciclo. El depósito se encarga de mantener una presión y caudal constante en la tubería de salida a la impulsión.

Por tanto para que el ariete funcione necesita de los siguientes apoyos hidráulicos:

- agua en cantidad suficiente (de 30 a 900 l/min)
- un mínimo desnivel entre la toma y la bomba (50 cm)

El ariete trabaja entre 60 y 90 golpes por minuto y puede alcanzar alturas de elevación de hasta 150 m. Una formulación sencilla para determinar el caudal impulsado (q : l/min) hasta una altura (H : m) utilizando para ello un desnivel de (h : m) y un caudal de alimentación (Q : l/min)

$$q = \frac{2 \cdot Q \cdot h}{3 \cdot H}$$

Como ejemplo de lo anterior podemos citar el caso de la impulsión de Barazani (Tanzania) en la que se tienen una conducción de alimentación mediante una tubería de 80 mm de diámetro de paso con un caudal de 250 l/min (Q), un desnivel de 2 m (h), y una elevación de 50 m. Aplicando la fórmula anterior obtenemos:

$$Q = 6,66 \text{ l/min} = 9500 \text{ l/día}$$

En realidad nunca se pasó de 6500 l/día, y eso significaba una dotación de 0,81 litros de agua cada día por habitante de la población.



eoi | escuela
de negocios



Tubería de alimentación al ariete de Barazani-Tanzania-Ingeniería sin Fronteras

B. ENERGÍA EÓLICA

1. APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL VIENTO. USOS DE LA ENERGÍA EÓLICA

Las turbinas eólicas se han utilizado desde hace siglos para distintos usos, trituración de granos, bombeo, generación eléctrica, etc. En la actualidad este tipo de energía se ha desarrollado enormemente en los países desarrollados, agobiados por un consumo creciente e imparable de energía eléctrica. De este modo se han instalado miles de máquinas en centrales eólicas distribuidas por gran parte del territorio, ocupando buena parte del mismo, principalmente en aquellas regiones cuyo potencial eólico es mayor.

Sin embargo desde la perspectiva de la cooperación para el desarrollo los aprovechamientos eólicos son mucho más modestos y se pueden reducir en la práctica a dos aplicaciones concretas:

- Aerogeneradores aislados de pequeña potencia eléctrica
- Aerobombas o molinos de viento

A veces los aerogeneradores están asociados con baterías de acumuladores que también pueden recibir carga procedente de módulos fotovoltaicos.

2. AEROTURBINAS PARA BOMBEO MECANICO DIRECTO. MOLINO MULTIPALA.

El molino multipala –también llamado Molino de Viento Americano- apareció a finales del XIX en EEUU y, con algunas décadas de sequía, ha seguido desarrollándose hasta la actualidad. En España existen varios fabricantes,



ubicados en Alicante, Tarragona y Badajoz, entre otros.

Esta aeroturbina captura la potencia del viento con un rotor compuesto por 12-24 palas, de eje horizontal, que, una vez convertido el movimiento circular en alternativo, mueve una bomba de émbolo sumergida en el agua del pozo o depósito de captación. La transmisión de la potencia en el eje del rotor precisa de una caja reductora de engranajes y, no obstante, el arranque de la máquina es dificultoso con velocidades del aire reducidas (inferiores a 3 m/s). Por este motivo se hace necesario el avance en sistemas que reduzcan el par resistente de arranque.

El diámetro del rotor está entre 1,5 y 5 m en general, aunque puede elevarse hasta 8 m-10 m. Sus necesidades de mantenimiento son escasas y los repuestos son en general baratos, y en algunos casos pueden fabricarse por los usuarios (palas, cuerdas, aros del rotor, barras de transmisión, etc.).



Aerobomba en el valle de Mangola-Tanzania- Ingenierías sin Fronteras



eoi | escuela
de negocios





Sin embargo presentan también algunos inconvenientes:

- El polvo y la arena afectan a los mecanismos de transmisión,
- Las velocidades elevadas del viento son causa de numerosas averías.
- Necesita de una estructura espacial que eleve el rotor en zonas donde la existencia de viento es a veces insuficiente. El molino debe situarse sobre la vertical del pozo.
- El coeficiente de potencia (C_p) es bastante menor que el límite de Betz y apenas alcanza un valor de 0,3 cuando la velocidad en punta de pala iguala a la velocidad del viento ($\lambda = 1$). La eficiencia, definida como la relación entre la energía neta producida y la energía disponible en el viento es reducida (5 % aproximadamente)

La velocidad de giro es elevada (40-70 r/min) a pesar de que la velocidad en punta de pala es pequeña por tener un diámetro también pequeño, así un rotor de 2 m de diámetro, con un viento de 5 m/s y $\lambda=1$, girará a 57,3 r/min.

El proyecto de una instalación de bombeo eólico con aerobomba tiene en principio las mismas fases que cualquier otra impulsión en el marco de la



cooperación:

- 1- Cálculo de necesidades hídricas. Principalmente determinación del caudal (Q) a suministrar.
- 2- Altura de bombeo. Considerando la altura del depósito. Pérdidas de carga en las tuberías con una velocidad de 0,7-0,8 m/s, conociendo el material de la tubería. Se puede calcular con tablas de pérdida por unidad de longitud o bien utilizando alguna de las fórmulas usuales, por ejemplo la de Darcy-Weissbach. A estas pérdidas se sumarán las que se produzcan en las singularidades: codos, válvulas, estrechamientos, etc. La suma será la altura total (H_T).
- 3- Potencia de la bomba (P_B):

$$P_B = \gamma \cdot Q \cdot H_T$$

- 4- Energía que dará la aerobomba (E_B) en un tiempo (T) de horas al mes o al año:

$$E_B = P_B \cdot T$$

En la práctica, se tendrá en cuenta tanto la irregularidad del viento como el rendimiento del acoplamiento bomba-aeromotor. Por ello se aplicará a la energía de bombeo (P_B) un coeficiente de 2-3 para obtener la energía útil (E_U) mensual o anual.

También puede calcularse la energía considerando que la potencia útil es:



$$P_u = \frac{P_B}{\eta_T}$$

Con un rendimiento total η_T de 0,7-0,8 para bombas de émbolo

5- Diámetro del rotor.

Como la potencia en el eje del rotor (P_r) es:

$$P_r = P_v \cdot C_p$$

Teniendo en cuenta la potencia del viento

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3$$

Donde

ρ : densidad del viento, 1,25 kg/m³

A: área barrida por el rotor: $\pi D^2/4$ (m²), D: diámetro del rotor (m)

V: velocidad del viento incidente (m/s)

Considerando $C_p = 0,3$, se obtiene la potencia del rotor como

$$P_r = 0,15 \cdot D^2 V^3$$

De donde se puede deducir el diámetro D, haciendo

$$P_r = P_u$$

$$D = \sqrt{\frac{P_u}{0,15 \cdot V^3}}$$



6- Velocidad de giro del rotor.

Tomando un rendimiento máximo para $\lambda=0,75$,

$$\lambda = \frac{\pi \cdot n \cdot D}{60 \cdot V}$$

Tendremos una velocidad de giro (n):

$$n = 14,3 \frac{V}{D}$$

Es necesario tener en cuenta que las bombas más efectivas y seguras son las de émbolo de simple efecto que exigen movimientos lentos del pistón. Para este tipo de bomba el rotor del aeromotor debe ser lento.

3. PEQUEÑOS AEROGENERADORES

Para generar electricidad se utilizan aerogeneradores rápidos por varios motivos: son menos pesados, el multiplicador es más barato, el par de arranque es menor.

El problema es similar al del bombeo de agua, aunque precisa conocer las curvas características de la máquina. Sin embargo este aeromotor presenta algunas ventajas de ubicación respecto a las aerobombas ya que puede elegirse el lugar de ubicación óptimo.

La velocidad nominal se sitúa entre 1,5 y 2 veces la velocidad media del viento que suele ser de 4-6 m/s en emplazamientos bien expuestos.

En la selección del generador deberá considerarse aquel de menor veloci-



dad de giro nominal para que la relación de multiplicación sea baja. Es preceptivo conocer los siguientes datos de la máquina a instalar:

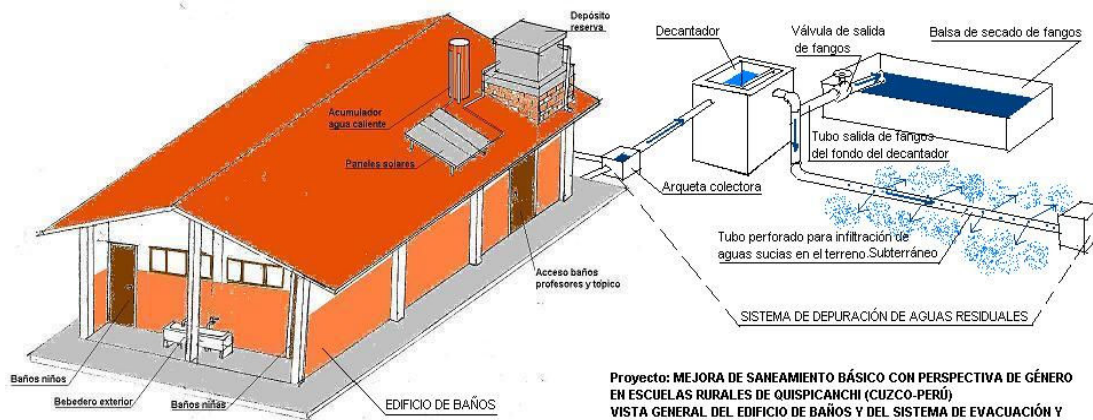
- n_i : velocidad inicial de generación para alcanzar el voltaje nominal
- n_i : velocidad angular nominal con la que se produce la intensidad y potencia nominales
- I_{max} : intensidad de corriente máxima que da el generador

Además:

No debe olvidarse que la energía se incluye dentro del marco general de acceso a servicios básicos, y por lo tanto está íntimamente relacionada con el resto de instalaciones, así en cada proyecto de agua se pone de manifiesto la carencia de energía. Y en algunos casos se identifica el proyecto. (por ejemplo el caso de Panamá)

En otros se complementa como por ejemplo en los paneles o termas solares de Perú. Cuando la radiación solar es suficiente, se puede aprovechar la energía que se transmite mediante paneles solares que captan esa energía. El interés de su uso se sitúa en el calentamiento de agua para baños, calefacciones y cocinas.

(Como ejemplo se refleja a continuación un proyecto de baños en escuelas en el altiplano andino del Perú)



Proyecto: MEJORA DE SANEAMIENTO BÁSICO CON PERSPECTIVA DE GÉNERO EN ESCUELAS RURALES DE QUISPICANCHI (CUZCO-PERÚ)
VISTA GENERAL DEL EDIFICIO DE BAÑOS Y DEL SISTEMA DE EVACUACIÓN Y DEPURACIÓN PRIMARIA DE AGUAS RESIDUALES.
José A. Mancebo, Grupo de Cooperación: Sistemas de Agua y Saneamiento para el Desarrollo, Universidad Politécnica de Madrid, febrero de 2008

0-1