

Magíster de Diseño Náutico y Marítimo
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso

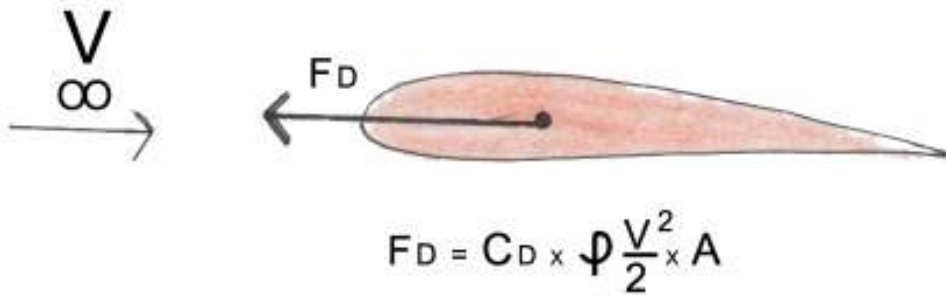
Clase N°4 de Hidrodinámica
Profesor Ramiro Mege
17 de Abril de 2008

Transcribe: Wolfgang Breuer

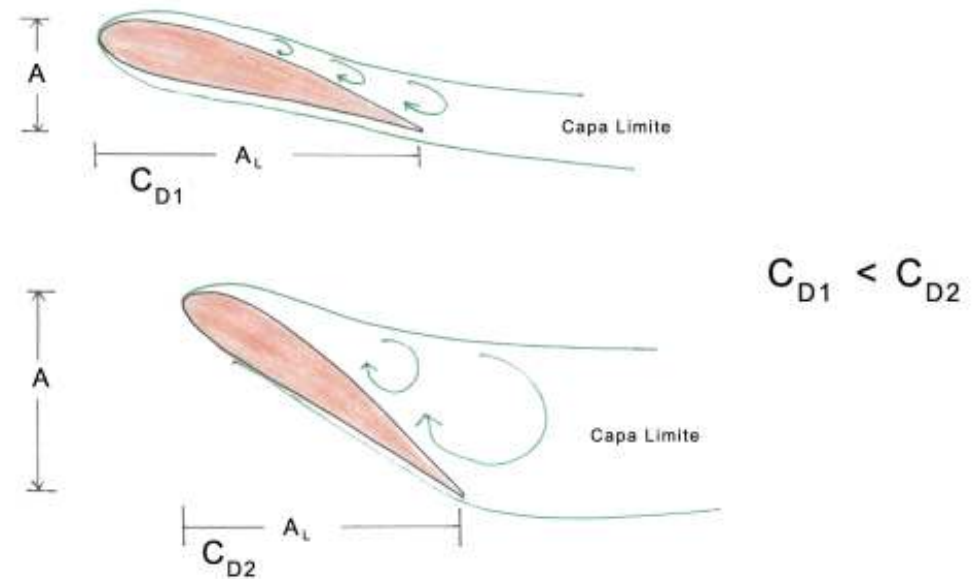
Arrastre y sustentación

Retomamos con un repaso de la clase anterior que hace referencia a arrastre y sustentación.

El arrastre es una fuerza paralela al vector de velocidad o flujo, a esto lo llamamos velocidad infinita que no es alterado, donde se genera una fuerza contraria al movimiento lo cual es una fuerza de resistencia (F_D), esta fuerza se puede calcular considerando:



El área (A) que se toma en cuenta es el área proyectada en el plano perpendicular al vector velocidad (V), normalmente en algunas bibliografías hay que especificar el vector, esta es la fuerza, ahora el Coeficiente depende de la **forma y posición del cuerpo**, es decir, si un objeto esta puesto con un ángulo de ataque determinado produce una capa limite en su parte superior e inferior del perfil, a mayor ángulo de ataque se produce una capa limite mayor en su parte superior, esto es fundamental, que en algunos casos por aumentar la sustentación se hace que el arrastre crezca tanto que el sistema se derrumba y entra en colapso.

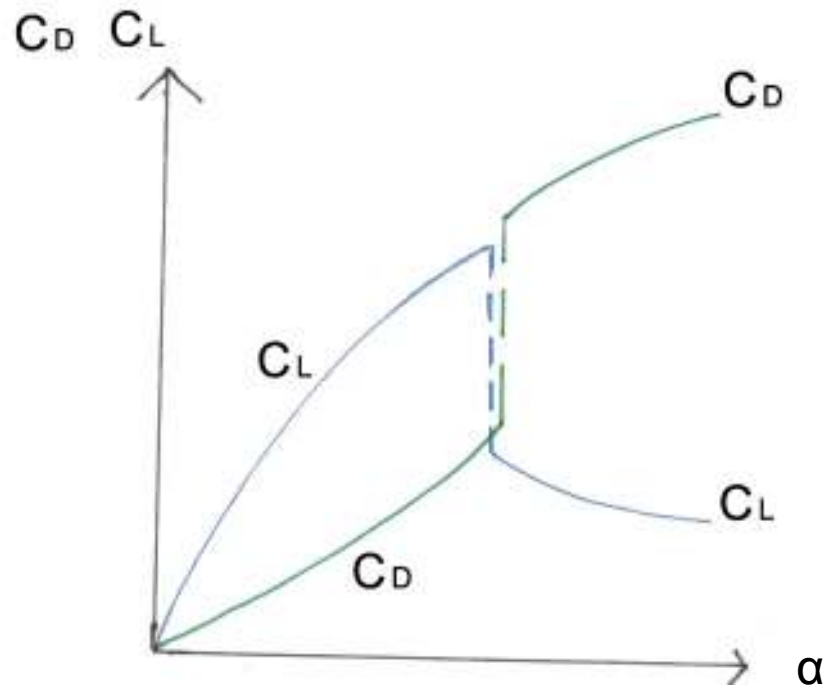


La sustentación (F_L) o fuerza útil, dijimos que es un coeficiente dependiente de la forma de la posición CL1 menor que CL2 el área A_L es la proyección en el área paralela del flujo, este como depende de la forma y la posición donde el segundo es mayor que el primero pero puede ser catastrófico, en algunas publicaciones existe un grafico donde hay un ángulo de ataque y al otro lado el coeficiente de resistencia y de sustentación

A medida que aumenta el ángulo de ataque aumenta la sustentación desde 0 por otro lado la resistencia aumenta de esta forma pero en algún punto llega un instante donde el ángulo está grande donde el ángulo llega a una posición donde la sustentación entra en colapso por que el arrastre crece terriblemente por esto el ángulo de ataque debe ser manejado con gran cuidado para lograr gran efecto de sustentación pero sin aumentar el excesivo efecto de resistencia.

La fuerza de sustentación (F_L)

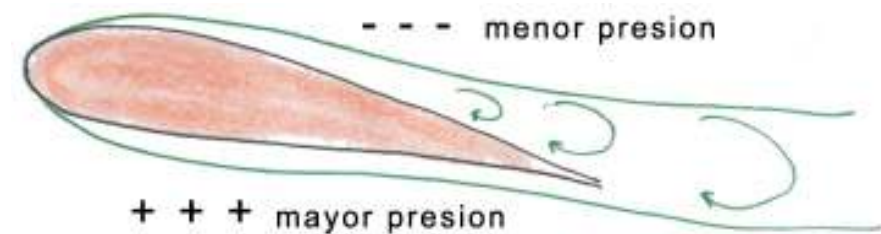
$$F_L = C_L \times \rho \frac{V^2}{2} \times A_L$$



C_L : Coeficiente de sustentación

C_D : Coeficiente de resistencia

La fuerza de sustentación (F_L) es una fuerza perpendicular al flujo en cualquier dirección del plano del flujo, en el caso de los aviones los aviones vuelan por la sustentación y aterrizan con pérdida de caída controladas de sustentación, por eso la velocidad disminuye aumentando la superficie del ala, el cambio de geometría del ala cambia el coeficiente del ala, son fuerzas que actúan como una separación de la capa límite, y este efecto genera la diferencia de presión de arriba con respecto a abajo.



No es la única forma de ver este fenómeno, otro criterio. La cantidad de movimiento.

La ley de Newton es igual a Fuerza = masa x aceleración ($F = m \times a$), donde aceleración es la variación de velocidad con respecto al tiempo, Fuerza por tiempo es = a la masa por la variación de velocidad, un impulso un empuje. El impulso es la masa en velocidad.

$$F = m \times a$$

$$F = m \times \frac{dv}{Dt}$$

$$F \times dt = m \times dv \quad \text{Cantidad de Movimiento}$$

El impulso es igual a la cantidad de movimiento, es el producto de la masa x la variación de velocidad que experimenta esta masa, una fuerza en un cierto tiempo, una masa de reposo a una cierta velocidad.

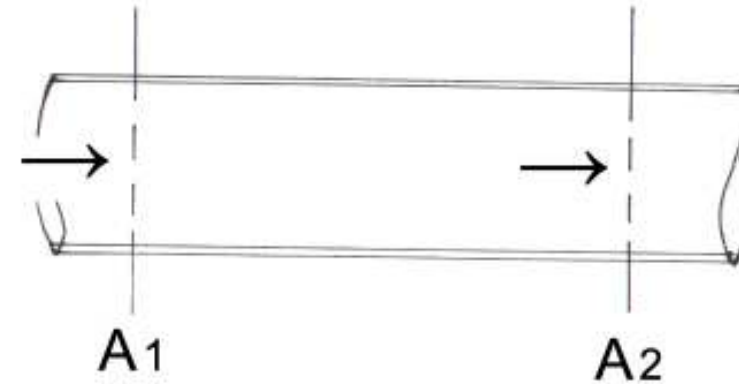
Si se desarrolla como que la fuerza es un vector con una fuerza con un sentido y una magnitud, es decir es vectorial, la velocidad también tiene una magnitud una dirección y un sentido, entonces variar la cantidad de movimiento quiere decir que variamos el vector velocidad, variando la magnitud sus dirección o sus sentido, por la variación de cualquiera de estas variables o las tres variables simultáneas se genera impulso es decir se genera una **Fuerza**

Ahora, si se cambiamos $F = m / dt \times dv$, esto es el flujo másico es masa / tiempo o un flujo másico (m punto) x dv genera un cambio.

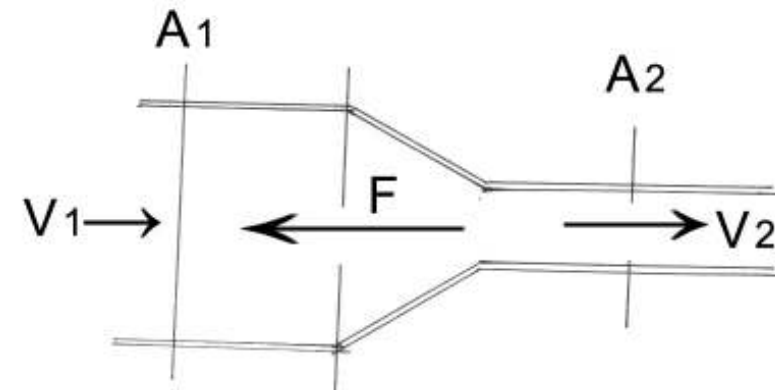
$$\text{Flujo másico} = \frac{m}{dt}$$

$$\vec{F} = \dot{m} \times \vec{v}$$

¿Qué pasa en las tuberías? En una tubería recta de sección constante donde el líquido se mueve igual en una dirección en dos puntos con una sección de paso ($A1 = A2$) es decir en este lapso **no se produce cambio en la velocidad** entonces no se produce ninguna fuerza



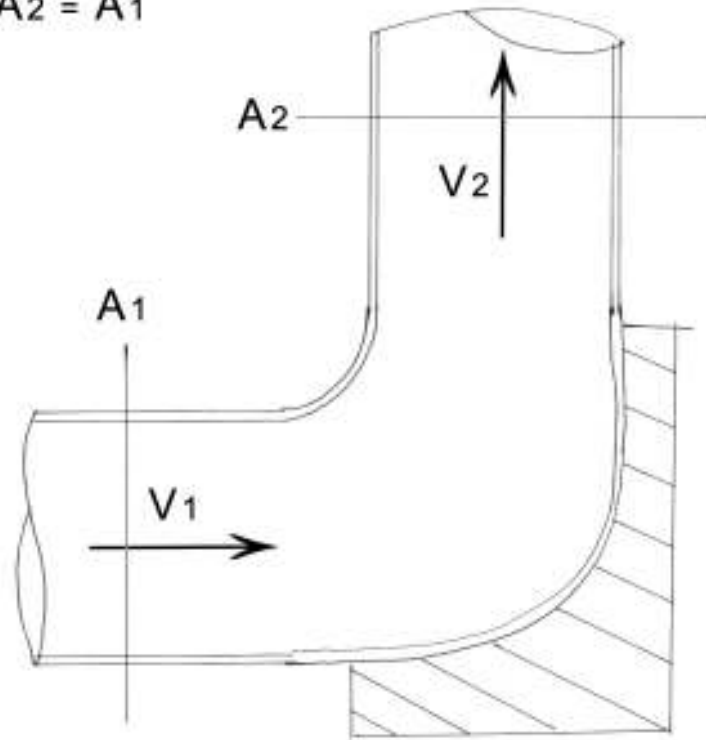
En tanto en una tubería cerrada con un vector velocidad es el área inicial y el vector final está en un área menor, la dirección y el sentido es el mismo pero la magnitud es diferente donde la velocidad $V2$ es mayor que $V1$ por que el área es mas pequeña, por que vario la magnitud se produce una fuerza, ejemplo de esto es los pitones de las mangueras, donde se produce una fuerza.



$$V2 = \frac{V1 \times A1}{A2}$$

De otra forma un tubo curvo donde la sección es la misma $A_1 = A_2$ donde la velocidad $V_1 = V_2$ en magnitud pero cambiamos la dirección donde se genera una fuerza por la variación del factor velocidad, en tuberías pequeñas no es mucho problema pero en grandes tuberías si es importantes.

$$V_2 = V_1$$
$$A_2 = A_1$$

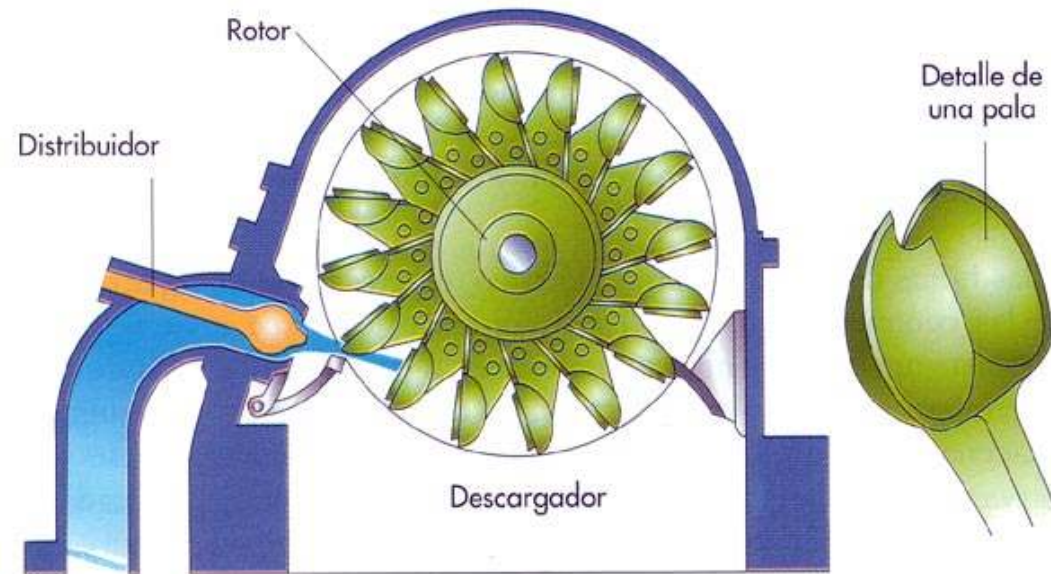


Para los perfiles Hidrodinámicos esto posee un implicancia directa, en un esquiador en movimiento y un liquido quieto, se ve como el efecto del vector velocidad que el lleva sobre un fluido es desviado por el esquiador, la dirección de la persona genera un cambio en la dirección por esto el vector velocidad esto genera una fuerza hacia arriba equiparada con el MG del esquiador hacia abajo, esto también se interpreta como la fuerza de sustentación. Esto contiene una fuerza de acción y reacción.

Maquinas

Turbina Pelton

Ahora veremos un tema de maquinas de gran tamaño en este caso una turbina Pelton, donde su principio de funcionamiento se basa en la variación de la cantidad de movimiento, o por la sustentación de sus alabes por lo cual también posee una resistencia de estas sus alabes poseen una división de donde el chorro de agua que se obtiene de una tobera que impacta dividiéndose en dos devolviéndose casi en 180° donde no se produce cambio de presión sino que un cambio de dirección del flujo, ni siquiera de la magnitud de la velocidad, pero genera una fuerza capaz de mover un generador eléctricos, que es muy usado en las centrales en Chile



Turbo compresor

Un turbo compresor en que funciona con gas que sale en forma radial por los bordes de los alabes donde se produce la variación de la cantidad de movimiento le ha transferido una cantidad de energía por el cambio de movimiento.

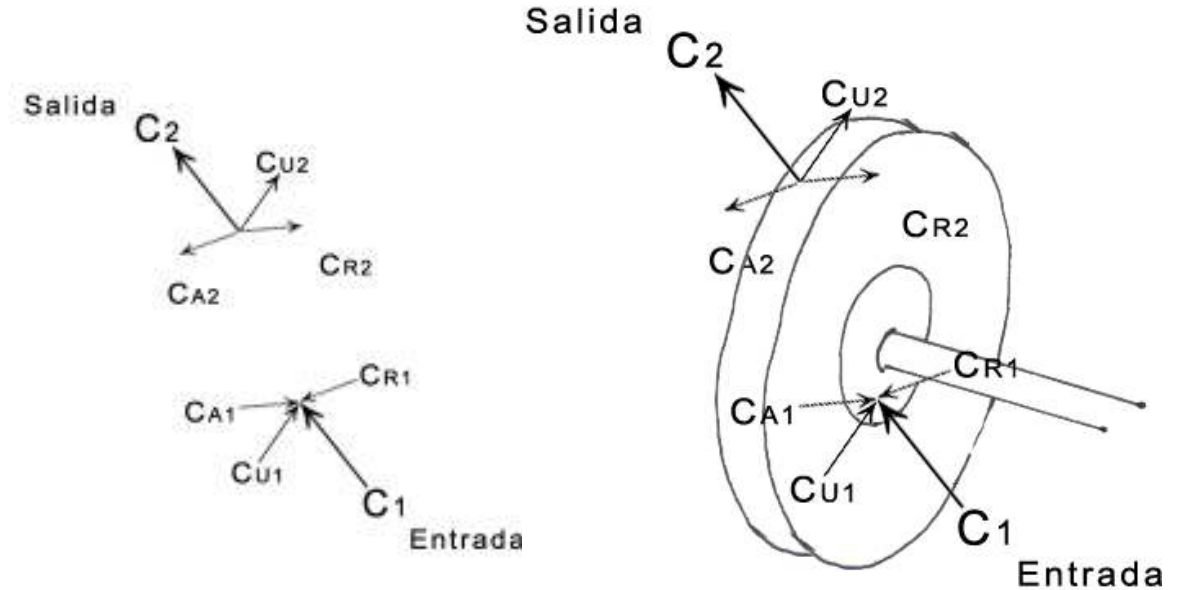


Turbina Kaplan

Turbina Kaplan de gran tamaño, como una hélice de paso variable, donde las aspas toman distintas posiciones.



Esto es interesante ya que vamos HELICES, donde las Hélices también son turbo maquinas, a ver el fluido llega en C1 con una dirección cualquiera donde la velocidad C1 se puede descomponer en componentes axiales, componentes radial y una componente tangencial, y el la salida lo mismo, componentes axiales, componentes radial y una componente tangencial, por que al pasar por las maquinas sufren cambios en su magnitud dirección y sentido ya que se están generando fuerzas.



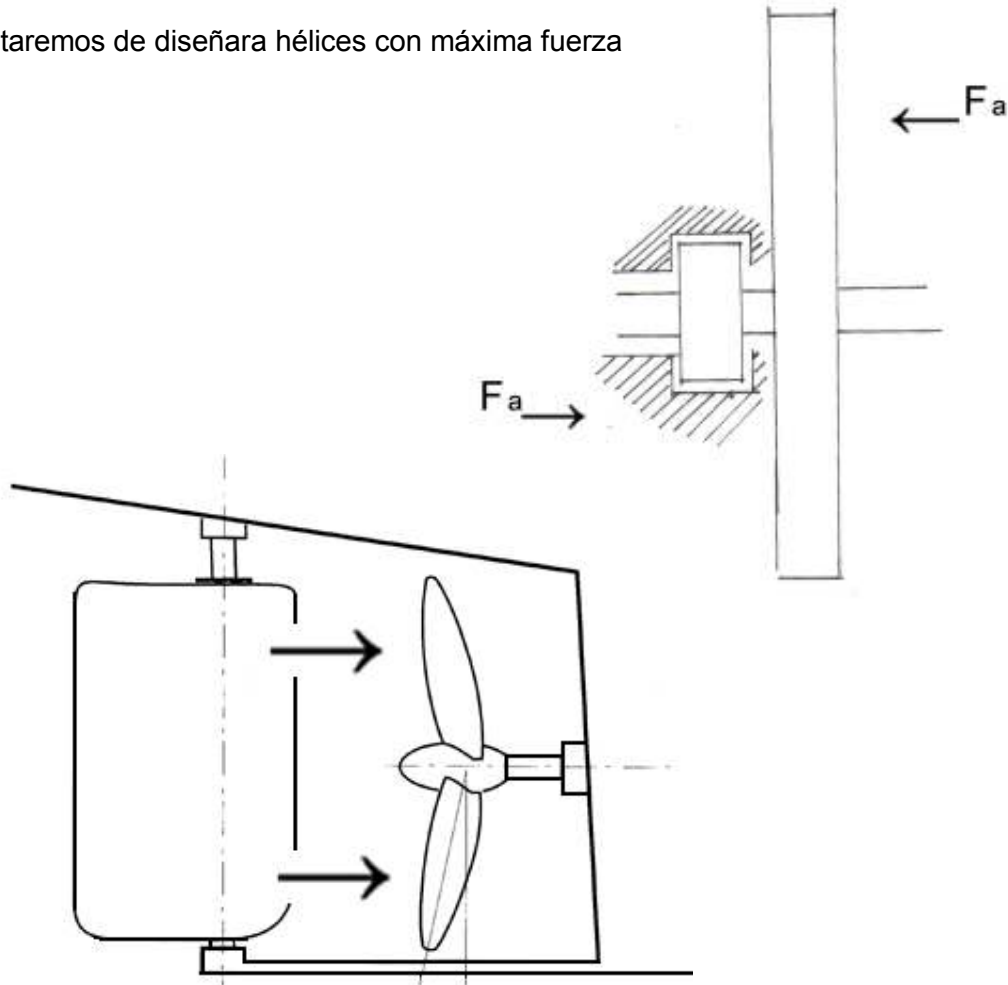
Si se produce un cambio de velocidad axial entre la entrada y la salida tendríamos una fuerza axial (F_a) = masa del fluido circulante (\dot{m}) x la velocidad axial de salida – la velocidad axial de entrada ($Ca_2 - Ca_1$).

$$\vec{F}_a = \dot{m} \times (C_{a2} - C_{a1})$$

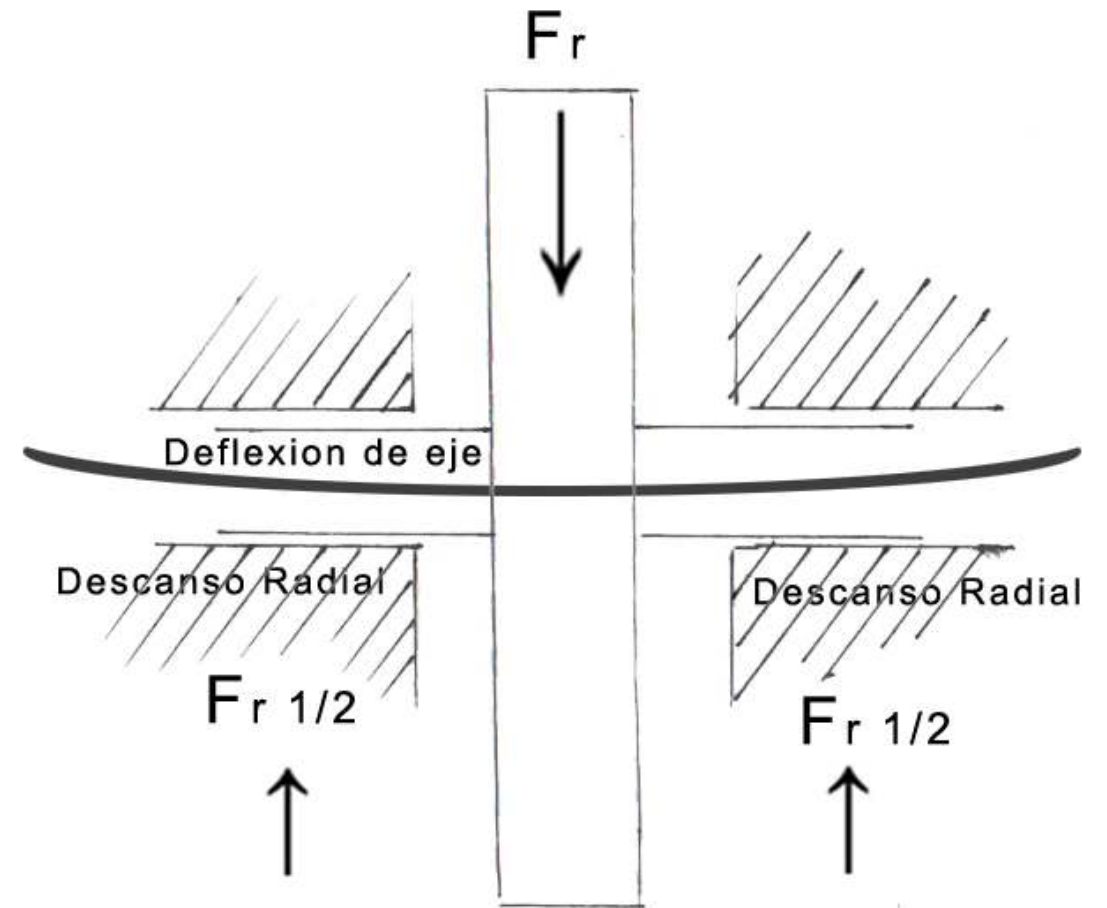
Esta fuerza esta en una dirección donde esta trata de mover un rotor entonces uno coloca un descanso axial sujetándolo a tierra para compensar las fuerzas axiales producidas es decir una fuerza idéntica igual y contraria, esta fuerza mayormente no nos importa

En una embarcación una hélice que empuja la embarcación, esta fuerza es importantísima, es la fuerza clave por que es la hélice la que debido a la variación en el sentido axial que genera la fuerza en ese sentido y que mueve la embarcación, todos lo buques poseen grandes descansos de empuje axial con el fin de maximizar la fuerzas axial por esto se resiste internamente en el buque existen grandes descansos de empuje axial que es donde se trasmite esta fuerza de aquí al casco para que se mueva la embarcación donde es muy útil esta fuerza.

Trataremos de diseñara hélices con máxima fuerza



Ahora si tenemos la velocidad radial que cambia de R1 A R2 se genera una fuerza radial que posee consecuencias las que se deben soportar en los descansos por lado y lado, donde cada uno da $\frac{1}{2} F_r$ y el otro $\frac{1}{2} F_r$ con lo que se produce una deflexión del eje por lo que los ejes deben tener dimensiones apropiadas.



La otra es la velocidad tangencial, es la que tiene una de entrada y una de salida, esta es la que interesa, esta es la que hace rotar la turbina, esta fuerza tangencial:

$$F_u = m (C_{u2} - C_{u1})$$

esta es la que permite transferir energía entre el fluido el rotor en las turbinas hidráulicas, las bombas, los ventiladores y los turbocompresores, como esto gira con una velocidad angular y esta fuerza se genera en un punto donde se multiplica $\times r$ y ω , esto es la energía transferida por unidad de masa.

$$\text{Energía Transferida} = H\omega^{\circ} = 1/g (C_{u2} U_2 - C_{u1} U_1)$$

donde U_2 y U_1 es la velocidad tangencial del rodete en el caso de la hélice, en este caso $U_1 = U_2$ por que el flujo es axial, por donde pasa el fluido esta en el mismo radio es decir velocidad tangencial ($\omega \times R$, $r_2 \times \omega = r_1 \times \omega$) energía transferida por unidad de masa, (th=theoric) donde no se considera el roce y es infinito de carácter teórico ya que el espesor de las alabes es de espesor despreciable, por que el fluido al pasar por el contorno del alabe es perfecto lo cual es teórico donde el fluido sigue la geometría perfecta de la forma del alabe sin desviación ni roce (teórico)

A esta figura se le lleva de tres dimensiones a dos dimensiones. Esta es la parte interna, nos olvidamos de la fuerza axial, dejamos la fuerza C_1 o fuerza total de entrada descompuesta en la radial C_{m1} (velocidad meridional de entrada), C_{u1} (velocidad tangencial) la velocidad del rodete no líquido, y la velocidad relativa del líquido en la entrada al alabe. Visto de canto.

En esta relación los triángulos rectángulos se pueden hacer ciertas relaciones pudiendo modificar estas relaciones y saber como funciona, para que la energía transferida sea grande, lo que se debe hacer grande la energía de entrada sea grande y la de salida sea pequeño, que es lo que buscamos mucha energía transferida

En las bombas centrifugas la entrada es cerca del eje (U_1) y la salida es por la periferia del rodete (U_2), que buscamos en este caso, que U_1 sea chico y el U_2 sea grande, entonces estos rodetes de gran diámetro y una entrada bien chico,

es una bomba de alta presión, en caso de manómetro es alta, si esta diferencia entre U_1 y U_2 es pequeño es una bomba de baja presión.

Al usar esta formula puedo modificar esta ecuación y saber lo que esta pasando a partir de los juegos geométricos posibles.

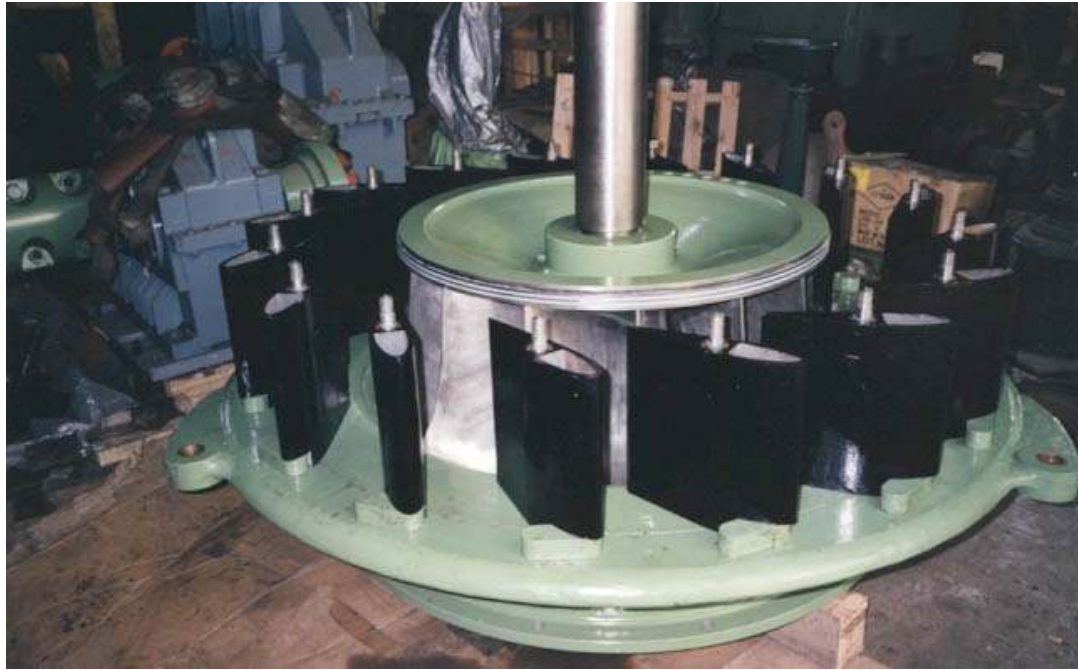
$$H\omega^{\circ} = 1/2g [(U_2^2 - U_1^2) + (C_2^2 - C_1^2) + (W_1^2 - W_2^2)]$$

Entonces, esto tiene que ver con el cambio de velocidad tangencial en el rodete y esto al cuadrado es $\omega^2 \times r^2$ pero $\omega^2 \times r$ es la fuerza centrifuga que se genera, entonces una bomba centrifuga predomina el cambio de radio, en las hélices U_2 y U_1 es igual y desaparece este efecto, no hay efecto centrifugo, la hélice es axial, el cambio de entrada es el mismo de salida,

El efecto centrifugo genera presión, si disminuye la velocidad relativa del fluido y aumenta la presión, estos efectos hacen aumentos de presión.

Una alta velocidad implica una alta perdida por roce, ya la perdida por roce son en función de la velocidad al cuadrado, cuando se pasa de una velocidad de 2 a 4 la perdida esta en 4 y 16, se multiplica, en el caso de las bombas tienen una voluta o caracol, este va recolectando el fluido que donde es cónico es un difusor que disminuye la velocidad para que aumente la presión, lo mas rápidamente posible para no tener excesivo roce.

En el caso de una turbina la Francis, es una bomba donde el liquido entra, y la voluta distribuye el fluido alrededor del rotor con una velocidad tal que no choque o que sea tangente y no haya perdida de energía, se acelera en el momento indicado, cuando entra el agua entra a 2m/s pasa y llega a 16 m/s, con las hélices hay que estar pendiente no solo del arrastre y la sustentación, sino que también verlo como el cambio en la cantidad de movimiento y esto es importante.



Turbina la Francis

En el caso de la hélice La velocidad absoluta con respecto a un punto fijo y la velocidad relativa del agua con respecto a la hélice, esta es la ecuación de la cantidad de movimiento.

La presión es una energía potencial de presión, una reserva de energía para otras cosas, Ej. En la salida de una bomba la energía se saca de la presión almacenada para subirla, hay que vencer la resistencia de las cañerías, significa que hay que gastar energía, por esto se saca de la presión; si al final del trayecto hay que aumentar la velocidad, como chorro, esta energía la saco de la presión, por esto hay que mover el líquido a baja velocidad para no perder energía y en el momento oportuno la ocupo para elevar el líquido o para lograr una velocidad grande de salida y tener alcance, entonces la presión es nuestra reserva de energía.

En el caso de la caldera la presión sirve para inyectar el agua al interior, un generador de vapor esta a una presión de 100 y algo bar. de presión

La turbina Pelton aprovecha la velocidad del chorro de agua, requiere un chorro de agua a alta velocidad con caídas grandes, acá en Chile la planta de los Quilos en el camino internacional posee una caída de 250 mts, que si bien tiene poca caída se puede obtener energía concentrada muy concentrada, se aprovecha el desnivel pronunciado, en el complejo del laja en el Toro también.

En Rapel se ocupa una Francis o turbina radial, que son para caudales medios y alturas medias que es la generalidad.

La turbina de hélices como las Kaplan para grandes volúmenes de agua pero pequeñas diferencias de nivel, acá la gran cantidad de energía esta en el volumen de agua que se mueve no en la presión diferencia.

$$F = M \times dv$$

Esta ecuación funciona en dos direcciones, si tengo una bomba o una hélice tengo una fuerza que es un torque mecánico, que obtengo una potencia hidráulica; en una hélice se aplica un torque obtengo cantidad de movimiento generado produce una fuerza axial que empuja un buque. Tengo energía disponible hidráulica, como la hago cambiar logro obtener una fuerza y por lo tanto un par en el eje.

Funciona en las dos direcciones.

Maquinas conducidas bombas compresoras hélices y maquinas conductoras que son las turbinas hidráulicas a vapor a gas, todas bajo el mismo principio, ahora como manejan distintos fluidos tendrán sus peculiaridades, pero muchas veces son parecidas.

Esto es aplicable a todo, la fuerza del viento, que pasa con el viento, que pasa ahí, el viento que viene en una dirección lo desvío y eso genera una fuerza sobre la estructura, entonces que debo tratar de desviarlo lo menos posible que el cambio de dirección sea lo menor posible, de tal manera que las fuerzas

generadas sean mínimos, ahora en la turbina Pelton que trato de hacer, que el cambio sea máximo, por eso el agua viene así y se devuelve en la turbina Pelton, el rodete, ese cangilon tiene una forma en corte, entonces el agua viene por acá choca y se desvía y sale una por cada lado, ¿porque una por cada lado y no solamente una? Para evitar las fuerzas axiales, el líquido viene y se devuelve y se devuelve,

¿cambio la magnitud? No, la magnitud del líquido de aquí si es 16m/s alla siguen siendo 16m/s pero venia en una dirección y salio caso en 180°.

Entonces: la masa de fluido x la velocidad de salida – la velocidad de entrada.

Pero resulta que la velocidad de salida es negativa por salir en una dirección salio en sentido contrario, entonces $m(v_2 + v_1)$ en valor absoluto, se maximizo el efecto.

No cambian las magnitudes, en los hidrofoil hacen cambiar la dirección, pero no la magnitud de la velocidad, esto es solamente por el efecto de impulso, una vela de un buque

¿Qué hace la vela? capta el aire, pero lo que hace es cambiar la dirección, con eso se logra el efecto que se quiere, que impulsa el buque con la cantidad de movimiento, que cuando se hace bien con viento casi en contra, hacen avanzar hacia delante dando posición a la vela tal que permite que el vector resultante de la velocidad de la embarcación, valla hacia donde se quiera.

Esto ultimo para explicar lo que pasa en el interior habíamos visto que teníamos un SHTH infinito y que pasa cuando tengo un numero finito de alabes y se produce el problema ¿Cuántas aspas le pongo a una hélice? Si le pongo pocas tengo grandes desviaciones, si le pongo muchas es un obstáculo al paso del líquido, entonces hay que buscar un numero, esta figura pretende indicar que pasa en el pasaje dentro del rotor de una bomba por ejemplo de un ventilador, podríamos decir que hay dos corrientes, una que es la corriente de paso que se puede asumiendo que el vector velocidad en toda la sección de paso tiene el mismo valor. Eso idealmente es así, y la formula lo considera, si toman el vaso y lo giran van a ver que el café con la espuma empieza a girar en el mismo sentido, entonces lo que pasa es que si suponemos que esta cerrado el ala, de aquí y el ala de acá no puede salir el liquido, el liquido comienza ha circulación, ¿Por qué? un efecto simplemente de la inercia, el fluido tiende ha estar en reposo pero el que

esta en la periferia tiene mayor energía que el que esta en el centro entonces se produce este efecto. En una bomba real cuando tengo una corriente de paso y tengo estos fenómenos sucede que en vez de ser la velocidad pareja, la velocidad en el interior se distribuye de manera no uniforme, una velocidad menor con una por que ha esa tengo que restarle esa corriente de liquido en cambio en el otro extremo a esa tengo que sumarle le velocidad de circulación de otro lado por ende se me deforma el triangulo de velocidades y la cosa se complica, por que la energía que se puede transferir teóricamente va ha ser mayor que la se puede transferir directamente. Aquí están los cambios que se producen, el triangulo que se tiene de una manera se transforma en otra cosa, por lo tanto varían las velocidades tangenciales que son claves en la transferencia de energías, se pensaba que se iba a tener un CU1 y tengo CU0, creció este, y en otra pensaba que CU2 voy a tener un CU3, que es menor entonces tengo menos energía transferida, entonces es clave en una maquina es poder decidir cuantas palas va atener o cuantos alabes va a tener. Los fabricantes le ponen el numero de alabes de acuerdo a su experiencia, Entonces hay que empezara ver lo que han hecho otros o comenzar a experimentar.

Ensayos en modelos

Vamos a abocarnos ver la resistencia en una embarcación, que vamos a llamar R la resistencia total, se cree que es una función de varias cosas, se puede descomponer en las componentes geométricas, suponemos una Longitud L que tiene que ver con la embarcación, luego la definimos, después con la resistencia están las **variables cinemáticas una importante es la velocidad, la aceleración de gravedad**

¿Qué tiene que ver la aceleración de gravedad? Con la formación de las olas. Después están las características del fluido como es la densidad del fluido, que es muy importante por estar relacionada con la masa que esta en juego, y la otra **como estamos hablando de resistencia esta el roce y el roce tiene que ver con la viscosidad** y se puede producir un efecto de **diferencias de presión**, por lo que se incorporar como variable presión, en un perfil la presión abajo es distinta a la presión de arriba, puede que tenga que ver algo lo de la presión, luego se verán las importancia relativas de cada una.

$$R = f(L, V, g, \rho, \mu, P)$$

Otro tema que veremos a fondo mas adelante, en las clases pasadas se estuvo viendo la necesidad de hacer ensayos, en modelos, veíamos que se debe cumplir con ciertas condiciones, y que los ensayos podían ser muy numerosos si las cantidades de variables son muchas, entonces hay 7 variables 10 elevado a 7. 10.000.000 de ensayos

Tengo Siete variables y cuales son las dimensiones que están en juego: longitudes, la masa y el tiempo, no hay mas variables ni mas dimensiones; tenemos siete variables y tres dimensiones, tenemos cuatro parámetros adimensionales.

Π1 El primero por tradición lo llamaremos Π1, lo puedo sacar de donde lo conozco, la viscosidad, la densidad, la velocidad y una longitud características ahí aquí está el **número de Reynolds (Re)**, que es la velocidad por una longitud característica por la densidad dividido por la viscosidad, ¿esta el número de Reynolds? Sí señor.

$$\Pi_1 = \frac{V L \rho}{\mu} \quad \text{Reynolds (RL)}$$

Reynolds L, por la longitud característica,

Π2 Los otros en base al método que esboce el otro día, tendríamos un segundo parámetro que va a ser la velocidad al cuadrado partido por L y por G, también adimensional, por que velocidad al cuadrado son metros al cuadrado por segundo al cuadrado, por ende se cancela, adimensional, este es el **número de Froude**. Clave en todo lo que son embarcaciones.

$$\Pi_2 = \frac{V^2}{L g} \quad \text{Froude (Fn)}$$

Π3 Después tenemos el de la resistencia R y está dado por $v^2 L^2 \rho$.

$$\Pi_3 = \frac{R}{V^2 L^2 \rho} \quad \text{Resistencia}$$

Π4 va a ser lo que tiene que ver con la presión, va a ser la presión partido por la velocidad al cuadrado por ρ .

$$\Pi_4 = \frac{P}{V^2 \rho} \quad \text{Presión}$$

Esos son los cuatro parámetros adimensionales que tienen relación con la resistencia Total de una embarcación, así que de 10 elevado a 7 lo reducimos a 10 elevado a 4,

