

Construcció d'un submarí

Treball de Recerca

Índex

1. Una mica d'història	6
2. Fluids.....	8
2.1. Estàtica de fluids.....	9
2.1.1.El principi de Pascal	11
2.1.2.El principi d'Arquímedes.....	12
2.2.Dinàmica de fluids.....	13
2.2.1.El número de Reynolds	14
2.2.2.Tipus de flux	14
2.2.3.Caudal i equació de continuïtat	16
2.2.4.L'equació de Bernoulli i l'efecte Venturi	16
3. Els submarins.....	20
4. Circuits elèctrics.....	22
4.1. Llei d'Ohm.....	23
4.1.1 Associació de resistències	23
4.2. Energia i potència del corrent elèctric.....	24
4.3. Efecte Joule.....	25
4.4. Generadors i receptors elèctrics.....	25
5. Part Pràctica.....	26
5.1.Primers dissenys.....	27
5.1.1.Dissenys amb tanc de llastrat	27
5.1.2. Disseny amb estabilitzadors	29
5.2. Disseny final	30
5.2.1. Muntatge.....	31
5.2.2. Llast.....	33
5.2.3. Proves	34
6. Conclusions	36
7. Bibliografia	37
8. Annexos.....	38
8.1. Bomba d'extracció	38
8.1.1. Material	38
8.1.2. Muntatge.....	38
8.1.3. Conclusions	42
8.2. Submarí	43

8.2.1. Material	43
8.2.2. Muntatge	44
8.2.3. Conclusions	56

Motivacions

La raó d'haver triat aquest tema té diferents cares. Des del dia que em van dir que havia de pensar un tema pel treball de recerca, ja sabia que havia de ser un tema relacionat amb la física, degut a que sempre m'ha agradat, i a més que tingués quelcom a veure amb les enginyeries, que és el que sempre he volgut fer.

La primera idea era continuar amb el projecte de recerca que vaig fer a 4t d'ESO, "La creació d'un túnel de vent", però portava molt problemes: costos del treball, dificultat d'aquest, buscar un expert en el tema, etc.; per l'altre, tampoc no podia treure'm del cap l'idea de crear un túnel de vent era un treball poc atractiu, a més de poc útil.

Això em va portar a buscar alguna cosa que pogués tenir utilitat, a més de semblar-me interessant. Em vaig plantejar no fer res relacionat amb la física, però em semblava una traïció a mi mateix. Aquí és quan vaig començar a pensar en altres coses que m'agradaven i algun projecte útil per a millorar-les, i vaig trobar la solució: la meva gran passió, l'activitat que m'ha ocupat mitja vida i desitjaria que ocupés mitja més, la natació.

El meu entrenador em va explicar que actualment els mètodes d'entrenament estan canviant, que ara no importa la quantitat sinó la qualitat, que aplicat al món de la natació significa que ja no s'entrena nedant quantitats indecents de metres sinó que es busca millorar l'estil, el com nedem. Per fer això, es grava als nedadors perquè vegin els seus errors i els puguin corregir. Es pot fer des de fora l'aigua o des d'algun dels vidres laterals que s'instal·len a algunes piscines, i fins i tot per sota, però en aquest cas, només es fa a les olimpíades amb les càmeres subaquàtiques, el cost de les quals molt poca gent coneix.

És aquí on neix el meu treball. Havia de trobar una manera de fer-ho accessible a qualsevol club o entrenador, però, com? Fent un submarí: una obra d'enginyeria, d'utilitat, amb certa dificultat, però no impossible. Aquest seria capaç de filmar als nedadors des de sota i el cost de fer-lo no seria tant alt com instal·lar uns rails per a una càmera especial per a l'aigua. Per tot això, vaig decidir seguir endavant amb el treball.

1. Una mica d'història

Segons el diccionari del IEC un submarí és una “*nau que pot navegar sota l'aigua*”. Fàcil d'entendre, però, què hi ha darrere d'aquesta paraula? Història i anys d'investigació.

En època d'Alexandre el Gran es van construir màquines que podien submergir-se durant uns segons amb finalitat bèl·lica, però no estaven completament submergides, així que s'assemblaven més a una escafandre, per això, la veritable història del submarí no comença fins mil anys més tard, amb Leonardo da Vinci, el gran artista i enginyer del segle XV.

Tenim constància de que va dissenyar un aparell que permetia respirar sota l'aigua, però a un dels aforismes escrits per ell, recollits al llibre *Aforismos de Leonardo da Vinci*, concretament al número 252, diu el següent: <<*De com és possible per mitjà d'un aparell, romandre algun temps sota l'aigua; per què em nego a descriure el meu procediment per a romandre sota l'aigua per tot el temps durant el qual m'és possible prescindir d'alimentar-me. No el publico i no el vull explicar, tement el caràcter malvat dels homes, que aplicarien aquest dispositiu amb finalitat de destrucció, utilitzant per destrossar, des del fons del mar, el casc dels vaixells i enfonsar-los juntament amb les seves tripulacions. He ideat un altre aparell que no ofereix aquest perill i que consisteix en un tub l'extrem del qual es manté sobre la superfície de l'aigua per mitjà de bótes o de suros, i permet al bus respirar a través d'ell.*>>

D'aquestes paraules podem entendre que ell ja havia trobat la manera de romandre sota l'aigua indefinidament, havia dissenyat el primer submarí, o potser fins i tot l'havia construït, però no el va voler compartir amb el món pel perill que suposava.

No va ser fins el segle XVII, que va aparèixer William Bourne amb les primeres idees sobre per què els vaixells floten, i fins el segle XVIII, amb el *Turtle* de Bushnell (fig.1) i el *Nautilus* de

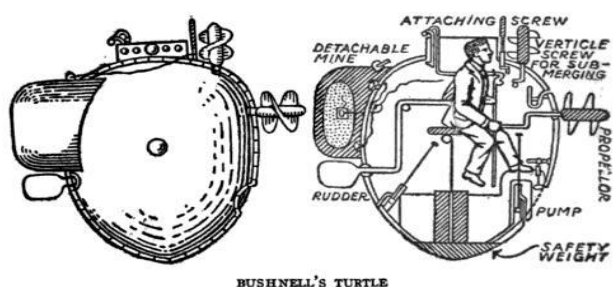


Figura 1: *Turtle* de Bushnell

Fulton (fig. 2), que no es van establir les bases de la navegació submarina. Però no va ser fins la revolució industrial del segle XIX que van aparèixer els submarins.

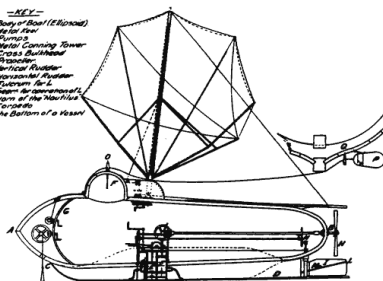


Figura 2: *Nautilus* de Fulton

Va ser un espanyol, Narcís Monturiol, que l'any 1859 va crear el *Ictíneo I* (fig. 3). Capaç de submergir-se fins a 20 metres durant més de dues hores, es va convertir en el primer submarí de la història. Des d'aleshores, el submarí ha anat evolucionant amb les noves tecnologies fins arribar a les complexes màquines que són avui dia.

Degut a aquesta complexitat, he volgut fer una selecció a l'hora de fer la meua explicació, per això he agafat els principis que s'han de tenir en compte per al funcionament d'un submarí i el que necessita el nostre submarí per poder



Figura 3: Ictíneo I de Nacís Monturiol

aprofitar aquests principis. A més, com haurà de ser a escala, necessitarà una font d'energia diferent als reals, per això he considerat necessari afegir un apartat de circuits elèctrics.

2. Fluids

El primer que cal estudiar és el què es vol fer: que el submarí es mogui i que pugui enfonsar-se i emergir de l'aigua. Per fer-ho cal estudiar per on es mourà, i què implica que es mogui en aquest medi. Es mourà per l'aigua, un *fluid*.

Comprenem com a fluid els estats líquid i gasós; és a dir, una matèria està en aquest estat quan les seves molècules presenten gran mobilitat i es desplacen lliurement degut a la poca cohesió entre elles.

Característiques

Els fluids tenen unes característiques concretes, que són:

- **Compressibilitat:** és la propietat que tenen els fluids per a disminuir els seu volum a mesura que són sotmesos a una pressió constant. A diferència dels sòlids, els fluids es deformen més fàcilment, tot i que els líquids són bastant difícils de comprimir en comparació amb els gasos.
- **Viscositat:** és una mesura de la resistència que fa al desplaçament d'unes capes del fluid sobre unes altres, és a dir, la resistència a les deformacions tangencials.
- **Ample distància molecular:** les molècules dels fluids es troben separades a una gran distància en comparació amb els sòlids i això permet canviar la seva velocitat molt fàcilment degut a les forces externes i facilita la seva compressió.
- **Llibertat de moviment:** prenen forma del recipient que el conté, això és conseqüència de la característica anterior, que provoca que no tinguin forma. Degut a això, no es pot calcular el volum i la densitat a simple vista; per això s'utilitzen recipients
- **Forces de Van der Waals:** descobertes pel físic holandès Johannes Van der Waals. Estableixen la relació entre la pressió, el volum i la temperatura d'un fluid.

A més d'aquestes, també cal tenir en compte la *densitat*, propietat de tota substància, que és el quocient entre la massa i el volum d'aquesta.

$$Densitat = \frac{massa}{volum} \rightarrow \rho = \frac{m}{V} [kg/m^3]$$

La densitat de l'aigua és de 1000 kg/m^3 i dependrà de la diferència d'aquesta amb la densitat del objecte que es vulgui submergir a l'aigua, que ho faci o no. Si la densitat és major s'enfonsarà, si és menor, flotarà. Això s'explicarà més endavant, amb el *Principi d'Arquímedes*.

Classificació

Segons les característiques de les que s'ha parlat abans, es pot classificar els fluids entre:

- **Newtonians:** són aquells que segueixen la llei de viscositat de Newton. Aquesta diu que el comportament dels fluids segueix una proporcionalitat entre velocitat relativa entre capes i la resistència al lliscament. Tots els gasos ho són i alguns líquids també.
- **No Newtonians:** són tots aquells que no compleixen la llei anterior, això és degut a que la seva viscositat varia amb el moviment. Són fluids no newtonians, per exemple, el iogurt, la sang i la mel.

En aquest cas, l'aigua, és un fluid newtonià.

Ara ja es pot estudiar el comportament dels fluids. D'això s'encarrega la mecànica de fluids, però com és un camp molt extens, cal centrar-se en el que és necessari: la hidrostàtica i la hidrodinàmica.

2.1. Estàtica de fluids

La estàtica estudia els fluids en equilibri, és a dir, sense forces que alterin el seu moviment o posició.

El primer que cal explicar és el concepte de *pressió*, que és la força perpendicular que exerceix el fluid a la superfície d'un cos que estigui envoltat d'aquest.

$$P = \frac{F}{A} \left[\frac{N}{m^2} \right] [Pa]$$

on P = Pressió; F = Força; A = Àrea de la superfície

Partint d'aquesta primera fórmula, es pot calcular la pressió en un punt d'un fluid, que alhora està sotmès a la pressió d'un altre fluid, com passa amb l'aigua a la terra, que està sotmesa a la pressió de l'aire. Primer cal tenir en compte la pressió inicial, és a dir, la pressió fora de l'aigua. Després caldrà tenir en compte que a mesura que l'altura disminueixi, la pressió augmentarà, ja que augmentarà la quantitat d'aigua que pressiona aquest punt. Així doncs, la pressió serà la suma de la pressió inicial i la pressió que exerceixi l'aigua per sobre d'aquest punt, ja que com s'ha dit abans, les forces estan en equilibri (fig.4). La pressió que exerceixi l'aigua per sobre d'aquest punt serà el pes d'aquesta, és a dir, el volum d'aigua multiplicat per la densitat d'aquesta per obtenir la massa i després multiplicat per la gravetat. Així doncs el pes serà:

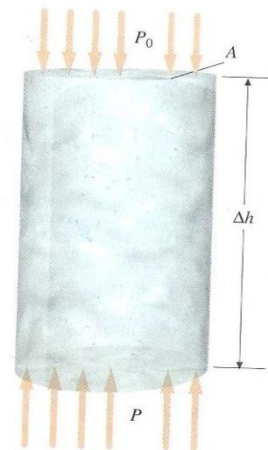


Figura 4: Columna d'aigua sotmesa a la pressió de l'aire

$$p = \rho A \Delta h g$$

on $p = \text{Pes}$; $\rho = \text{densitat de l'aigua}$; $A = \text{Àrea de la base}$;

$h = \text{altura del cilindre}$; $g = \text{gravetat}$

Aleshores:

$$PA = P_0 A + \rho A \Delta h g \text{ per a } \rho \text{ constant}$$

Que si es divideix entre A , queda: $P = P_0 + \rho \Delta h g$

Un cop ja es sap la pressió que hi haurà a la superfície del cos, es pot calcular la força que haurà de resistir la superfície del cos. Això es pot calcular multiplicant la pressió per l'àrea d'aquesta superfície

$$F = P \times A$$

Amb aquesta petita introducció, ja es pot aprofundir una mica més en el camp de la hidrostàtica amb els dos principis en els que es basa: el *principi de Pascal* i el *principi d'Arquímedes*.

2.1.1.El principi de Pascal

Aquest principi, que rep aquest nom en honor a *Blaise Pascal* (1623-1662), diu que un canvi de pressió aplicat a un líquid dins d'uns recipient es transmet per igual a tots els punts del fluid i a les pròpies parets del recipient. Això es pot comprovar al següent exemple:

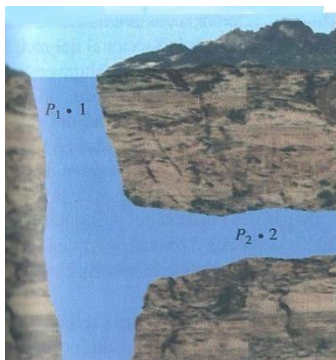


Figura 5.a

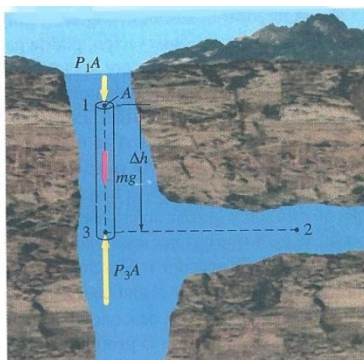


Figura 5.b

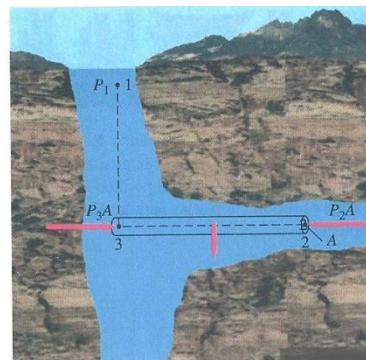


Figura 5.c

Es compara la pressió en el punt 1 amb la pressió en el punt 2, que està situat a una cova sota l'aigua (fig. 5a). Primer es compara la pressió entre els punts 1 i 3, sent aquest últim un punt situat sota el punt 1 a la mateixa profunditat que el punt 2 (fig.5b). S'estudien les forces verticals a la columna d'aigua d'altura Δh i base A que relacionen els punts 1 i 3. La força cap amunt sobre la columna, P_3A , compensa les dues forces cap avall, P_1A i mg , on $m = \rho A \Delta h$ és la massa d'aigua de la columna. És a dir:

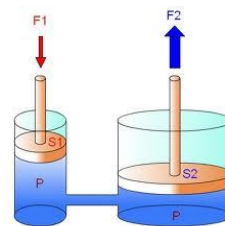
$$P_3A = P_1A + \rho A \Delta h g \rightarrow P_3 = P_1 + \rho \Delta h g$$

S'estudien ara les forces que actuen sobre el cilindre horitzontal d'aigua, també de base A , que connecta els punts 2 i 3 (fig. 5c). Hi ha dues forces amb components que van en la direcció del eix del cilindre, P_3A i P_2A . El fet de que aquestes dues forces es compensin significa que $P_3 = P_2$. Per tant:

$$P_2A = P_1A + \rho A \Delta h g \rightarrow P_2 = P_1 + \rho \Delta h g$$

Així doncs, si s'augmentés P_1 (augmentant P_0 , la pressió exterior), s'augmentaria la pressió a tot el fluid.

Una aplicació comú d'aquest principi és la premsa hidràulica (fig.6). En el cas d'aquest projecte, es podria utilitzar per a fer la bomba d'extracció d'aigua del submarí.



$$P_1 = P_2$$

$$F_1/S_1 = F_2/S_2$$

Figura 6: Funcionament de la premsa hidràulica

2.1.2.El principi d'Arquímedes

Aquest diu que tot cos parcial o totalment submergit en un fluid experimenta una força ascendent igual al pes del fluid desplaçat.

Es diu que aquest principi va ser descobert al s.III a.C. quan el rei Hieró II li va demanar a Arquímedes (287-212 a.C) que determinés si una corona fabricada per a ell era completament d'or, o pel cas contrari, si contenia algun metall més barat, com la plata. El problema estava en determinar la densitat d'un objecte de forma irregular, com era la corona, sense destruir-lo.

Arquímedes va trobar un procediment senzill i exacte per comparar la densitat de la corona amb la de l'or utilitzant una balança. Va posar la balança a un recipient i va col·locar la corona a un costat i la mateixa massa d'or pur a l'altre. Aleshores va afegir aigua al recipient, submergint així la corona i l'or. La balança va oscil·lar, elevant la corona, és a dir, indicant que la força cap amunt que afectava a la corona era major que la que afectava a l'or, perquè el volum d'aigua desplaçat per la corona era major que el que desplaçava l'or. Així doncs va demostrar que la corona era menys densa que l'or, per tant, no era completament d'or.

Ara bé, a l'actualitat, es pot explicar aquest fet gràcies a les lleis de Newton.

Segons la segona llei de Newton, el sumatori de forces marcarà el moviment; si aquest és 0, no hi haurà moviment.

A la primera imatge (fig.7a) es pot veure un recipient amb una porció de volum, V , que té un pes, p , que es pot definir com $p = mg$ i m com $m = \rho_v V$ (sigui ρ_v la densitat d'aquest volum) una força amb sentit contrari, E , que es pot definir com $E = -mg = -\rho_f Vg$ (sigui ρ_f la densitat del fluid), que és equivalent al pes

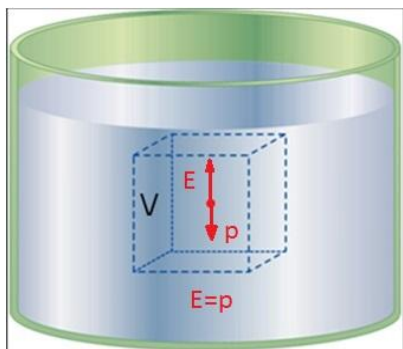


Figura 7a: Porció de volum V amb densitat igual

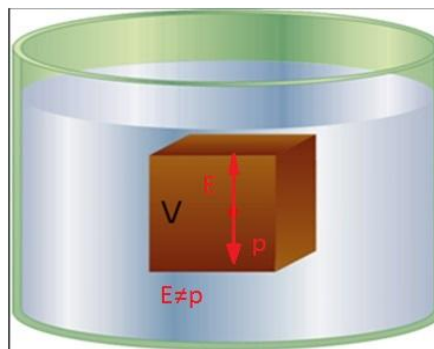


Figura 7b: Porció de volum V amb densitat igual

del volum desplaçat, per tant, $-E = p$. Per tant el sumatori de forces serà igual a 0 i no hi haurà moviment.

A la segona (fig.7b), es veu el mateix recipient, però aquest cop, V té una densitat diferent. Això comportarà que p serà diferent, per tant, $E \neq p$. A conseqüència d'això, el sumatori de forces deixarà de ser 0 i hi haurà moviment. Aquest moviment dependrà de la diferència entre E i p (fig.8)

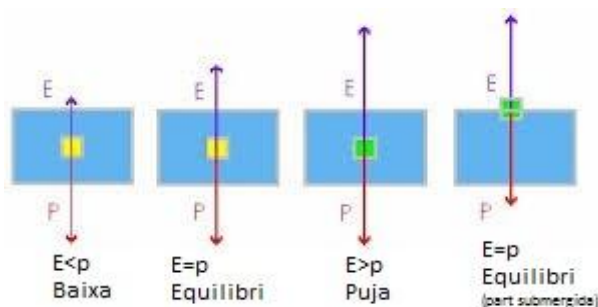


Figura 8: Moviment segons E i p

Quan $E < p$ baixarà; quan $E = p$ es mantindrà en la mateixa posició, en equilibri; quan $E > p$, pujarà fins que $E = p$, això passarà quan p sigui igual a E de la part submergida.

Aquest és el principi que s'utilitza per submergir o fer emergir el submarí.

2.2.Dinàmica de fluids

Si la estàtica de fluids era la encarregada d'estudiar els fluids en equilibri, la dinàmica és la que s'encarrega de fer-ho quan no ho estan, és a dir, quan hi ha forces que alteren el seu moviment o posició. Aquest moviment s'anomena flux i s'estudia analitzant les propietats del fluid en cada punt de l'espai en funció del temps.

2.2.1.El número de Reynolds

Abans de començar amb els tipus de flux cal explicar què és el número de Reynolds, ja que aquest influirà en el tipus de flux segons el moviment de les seves molècules.

A baixes velocitats el flux és laminar, però arribada a certa velocitat, el flux passa a ser turbulent. Aquesta velocitat crítica varia segons la densitat i la viscositat del fluid i el radi del tub per on flueix. Aquest flux es pot caracteritzar amb el número de Reynolds que és un número adimensional que es defineix com:

$$N_R = \frac{2r\rho v}{\eta}$$

On v és la velocitat, r el radi del tub, ρ la densitat del fluid i η el coeficient de viscositat d'aquest.

Si $N_R > 2000$ serà un flux laminar, i si $N_R < 3000$ serà un flux turbulent. Entre aquests dos valors el flux és inestable i pot variar d'un tipus a l'altre.

2.2.2.Tipus de flux

Com s'ha vist abans, els fluids tenen diferents propietats i depenent d'aquestes es pot trobar un tipus de flux o un altre. El primer que cal tenir en compte és el tipus del que s'ha parlat amb el número de Reynolds. Segons el moviment de les seves molècules, un flux pot ser:

- **Flux laminar:** és aquell en què les seves molècules es mouen tot seguint trajectòries paral·leles(fig.9a)
- **Flux turbulent:** és aquell en què les seves molècules es mouen tot seguint trajectòries irregulars(fig.9b)

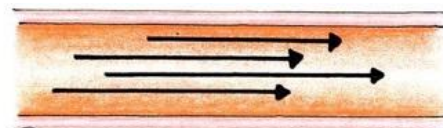


Figura 9a: Flux laminar

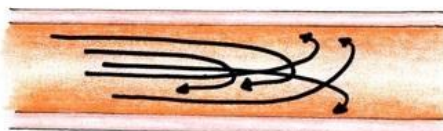


Figura 9b: Flux turbulent

Ara que sabem aquests dos tipus de flux, cal tenir en compte les altres propietats, que porten als següents tipus:

- **Flux compressible/incompressible:** depèn de la densitat segons la posició a l'interior del fluid. Es pot dir doncs que un fluid és compressible si aquesta densitat varia i que és incompressible si és constant
- **Flux estacionari/no estacionari:** depèn de la velocitat en cada punt en funció del temps. Si la velocitat és constant en tot punt (la velocitat pot ser diferent entre punts), es diu que és estacionari, en el cas contrari, que no ho és.
- **Flux viscos/no viscos:** depèn de la viscositat del fluid. Quan un fluid viscos flueix per una canonada, degut al fregament es creen diferents capes en què el fluid flueix.

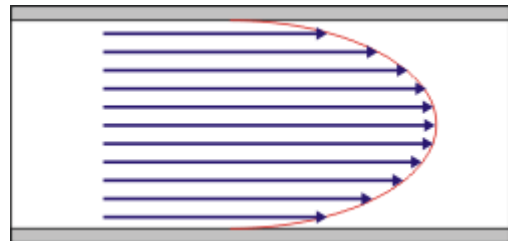


Figura 10: Resistència en un fluid viscos

Aquestes capes suporten diferent resistència, per tant van a diferents velocitats: quan més exterior, més lent anirà el fluid(fig.10). En el cas contrari, el del flux no viscos, el fregament no és significatiu, per tant, es diu que la velocitat és la mateixa.

- **Flux rotacional/irrotacional:** es diu que un flux és rotacional si presenta un vòrtex sobre el que gira el fluid i irrotacional en el cas de què no existeixi tal vòrtex.

Donada la classificació dels fluxos de fluids, cal centrar-se en els fluids ideals, que són aquells que tenen un flux laminar, incompressible(la major part dels líquids ho són aproximadament), estacionari, no viscos i irrotacional.

2.2.3.Caudal i equació de continuïtat

S'imagina un tub, el radi del qual decreix, per on flueix un fluid d'esquerra a dreta.(fig.11)

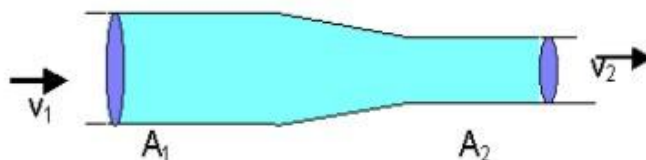


Figura 11: Tub de radi decreixent

A la primera part del tub, d'àrea, A_1 , el volum de fluid que entra al tub en un interval de temps, Δt , a una velocitat, v_1 , serà:

$$\Delta V = A_1 v_1 \Delta t$$

Com el fluid és incompressible, el volum de fluid desplaçat al principi del tub en un interval de temps haurà de ser el mateix que a una part on el radi sigui inferior en el mateix interval. Per tant, si s'agafa una segona part del tub, d'àrea, A_2 , en el qual el fluid entra a una velocitat, v_2 , en un mateix interval de temps, Δt , es pot dir que:

$$A_2 v_2 \Delta t = A_1 v_1 \Delta t \rightarrow A_1 v_1 = A_2 v_2$$

A aquesta magnitud Av se l'anomena *cabal* Q , que es mesura en unitats de volum dividides per temps. Com ja s'ha dit, aquesta magnitud, en un fluid incompressible, serà igual en qualsevol punt del tub, per tant, serà constant. D'aquí es pot extreure el que s'anomena *equació de continuïtat*:

$$Q = Av = \text{constant}$$

2.2.4.L'equació de Bernoulli i l'efecte Venturi

Quan un fluid que flueix per un tub entra a una zona més estreta, augmenta la velocitat degut a que la pressió que l'empeny cap endavant és major a la pressió que s'oposa al moviment. L'equació de Bernoulli relaciona la pressió, l'elevació i la velocitat d'un fluid incompressible en flux estacionari.

Es pren com exemple un tub que varia d'alçada i àrea. (fig.12)

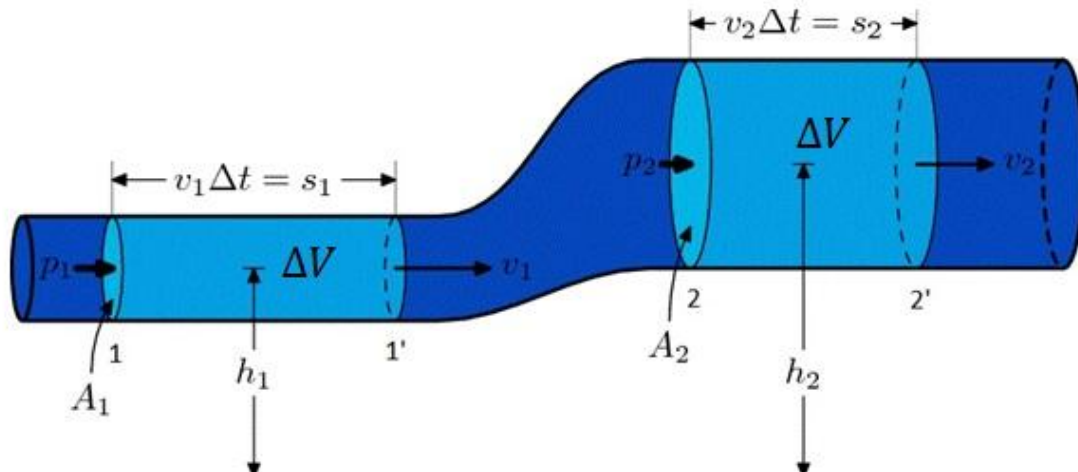


Figura 12: Tub que varia en radi i alçada

S'aplica el teorema treball-energia a la mostra de flux que està continguda inicialment entre els punts 1 i 2. Després d'un temps, Δt , aquesta mateixa mostra s'haurà mogut i estarà continguda entre els punts 1' i 2'. S'anomena Δm a aquesta mostra, que també es pot definir com $\Delta m = \rho \Delta V$. Així doncs, el que ha passat és que la mostra Δm s'ha elevat des de h_1 fins a h_2 i la seva velocitat a variat de v_1 a v_2 . La variació de l'energia potencial de la mostra és:

$$\Delta U = (\Delta m)gh_1 - (\Delta m)gh_2 = \rho \Delta V g(h_2 - h_1)$$

I la seva variació d'energia cinètica és:

$$\Delta E_{cin} = \frac{1}{2}(\Delta m)v_2^2 - \frac{1}{2}(\Delta m)v_1^2 = \frac{1}{2}\rho \Delta V g(v_2^2 - v_1^2)$$

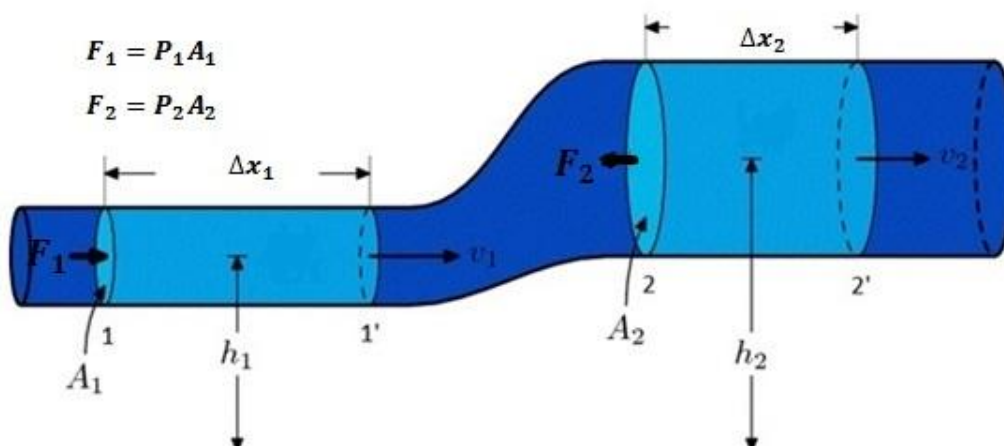


Figura 13: El fluid flueix per darrere de la mostra Δm

El fluid que flueix per darrere de la mostra Δm exerceix una força sobre ella amb valor $F_1 = P_1 A_1$ (fig.13) on P_1 és la pressió en el punt 1. Aquesta força realitza un treball, que és:

$$W_1 = F_1 \Delta x_1 = P_1 A_1 \Delta x_1 = P_1 \Delta V$$

Alhora, el fluid que precedeix a Δm , és a dir, a la dreta de la mostra, també realitza una força $F_2 = P_2 A_2$, però dirigida en sentit contrari. Com que s'oposa al moviment, realitza un treball negatiu:

$$W_2 = -F_2 \Delta x_2 = -P_2 A_2 \Delta x_2 = -P_2 \Delta V$$

Per tant, el treball total d'aquestes forces serà la suma de treballs:

$$W_{total} = P_1 \Delta V - P_2 \Delta V = (P_1 - P_2) \Delta V$$

El teorema treball-energia diu que:

$$W_{total} = \Delta U + \Delta E_{cin}$$

Que si s'utilitza amb totes les fórmules obtingudes prèviament queda:

$$(P_1 - P_2) \Delta V = \rho \Delta V g (h_2 - h_1) + \frac{1}{2} \rho \Delta V g (v_2^2 - v_1^2)$$

Si això es divideix entre ΔV i després es ho reordena, queda:

$$P_1 + \rho g h_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \rho g h_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

Això significa que aquesta combinació de magnituds calculada en un punt determinat del tub és igual en qualsevol altre punt. Per tant:

$$P + \rho g h + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{constant}$$

Aquestes dues últimes equacions, que són la mateixa, són el que es coneix com *equació de Bernoulli*.

Quan s'agafa un tub, que no varia l'alçada, però té una regió amb un

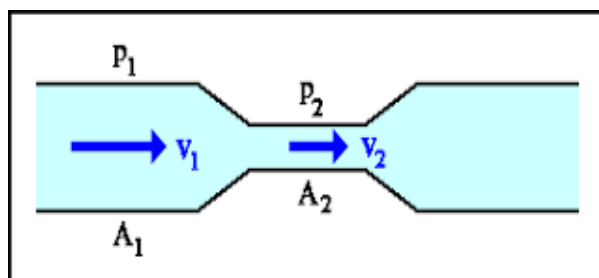


Figura 14: Tub amb una regió de radi inferior

radi inferior (fig.14), com manté la mateixa alçada, $h_1 = h_2$. Si s'utilitza l'equació de Bernoulli, queda reduïda a:

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 = constant$$

Quan el fluid entra a la part més estreta si $A_1 > A_2$ aleshores $v_1 < v_2$ per l'equació de continuïtat. A més, tenint en compte l'equació de Bernoulli, si la velocitat augmenta, la pressió haurà de disminuir, ja que $P + \frac{1}{2}\rho v^2$ haurà de seguir sent constant. Per tant, es pot dir que, si la velocitat del fluid augmenta, la seva pressió disminueix. Això és el que es coneix com *efecte venturi*.

Aquest efecte permet explicar qualitativament per què els avions volen (fig.15), per què realitzen trajectòries corbes les pilotes llançades amb efecte o

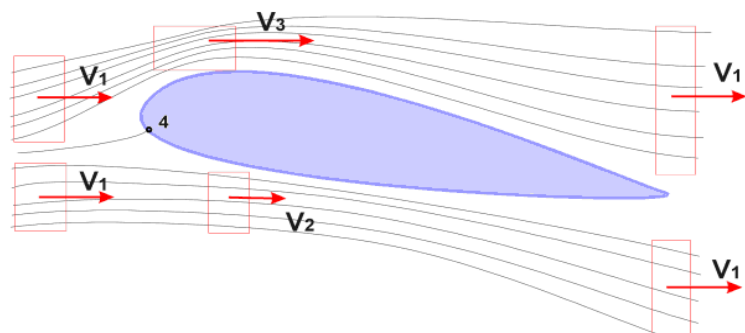


Figura 15: Ala d'un avió

el que interessa per a aquest treball, com funciona el timó d'un vaixell o submarí. Així doncs, quan el timó s'inclina cap un dels costats, la diferencia de pressió provoca que tot el vehicle giri.

3. Els submarins

Ara ja només cal saber com s'apliquen aquestes lleis als submarins.

En primer lloc, el concepte de pressió. Com els submarins poden arribar a enfonsar-se, alguns, fins a 1000 metres, és un aspecte molt important a tenir en compte. Com ja s'ha explicat abans, a més profunditat, més pressió exerceix l'aigua al submarí. Si es va enfonsant un submarí, arribarà un punt en que la pressió serà tan alta que les parets d'aquest no ho suportaran i cediran, destrossant així el submarí.

Com s'ho fan per aconseguir que el submarí aguantí aquestes pressions? Amb el casc de pressió. Aquest casc és l'encarregat de suportar tota aquesta pressió de manera que a l'interior d'aquest es mantingui la pressió que hi ha fora de l'aigua. De la resistència d'aquest depèn la profunditat a la que pot arribar un submarí.

Actualment, gairebé tots els grans submarins tenen un casc exterior a més del de pressió.(fig.16) Això és degut a que el de pressió, per a poder suportar millor les altes pressions, ha de tenir una forma

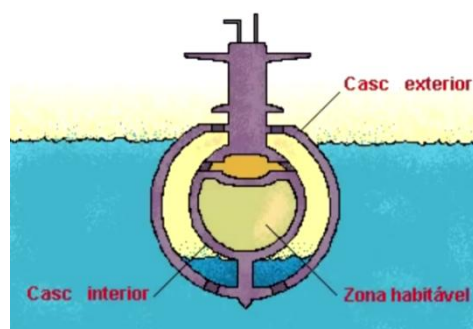


Figura 16: Cascs d'un submarí

per tot el casc, però aquesta no és la millor forma hidrodinàmicament parlant. Per això s'afegeix un casc exterior que no haurà de suportar la pressió i que donarà una forma que ofereixi menys resistència a l'aigua, permetent una millor mobilitat al submarí, a més d'una protecció per al casc de pressió.

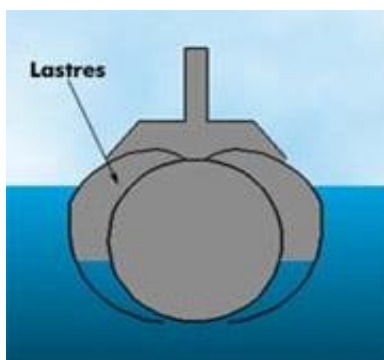


Figura 17: Tancs de llustrat

El següent pas és el principi d'Arquímedes, que permetrà que el submarí s'enfonsi. Segons aquest principi, que una cosa s'enfonsi o no dins d'un fluid depèn de la seva densitat, per tant, cal fer variar la densitat del submarí.

Es sap que la *densitat* depèn de la *massa* i el *volum* de l'objecte, i a més, que com el submarí és un sòlid, no pot variar de volum (no significativament), per tant, l'única manera

de fer variar la densitat és augmentant la massa del submarí. Per fer-ho s'utilitzen tancs de llastrat.(fig.17) Aquests estan distribuïts pel submarí i s'omplen o buiden per enfonsar-lo o fer-lo sortir a l'exterior, a més de, juntament amb els timons, donar estabilitat a la nau.

Per últim tota la part de la dinàmica serviria per estudiar el moviment del submarí i quina seria la millor forma per a aquest. Permetria saber a quines velocitats pot arribar, quin tipus de moviment faria, que passaria si hi hagués corrents d'aigua,... Però el que més interessa per aquest treball, ja que no es disposen dels mitjans ni coneixements suficients com per treure profit de les altres coses, és el que ja s'ha parlat abans, l'efecte venturi en el timó. Aquest permet dirigir el submarí, a més de donar-li estabilitat com també s'ha dit abans.

4. Circuits elèctrics

Com el submarí serà bastant petit en comparació als reals, no pot funcionar igual que aquests, per tant, cal trobar una solució. En aquest cas, una bona solució és l'electricitat, és a dir, circuits elèctrics, com els cotxes teledirigits.

Un circuit elèctric no fa més que aprofitar el que s'anomena *corrent elèctric*. Aquest és el flux ordenat de càrregues amb una direcció i sentit provocat per la diferència de potencial entre dos punts. Si s'agafen dues plaques metàl·liques de diferent potencial elèctric i s'uneixen amb un conductor, es produirà un desplaçament de càrrega elèctrica des de la placa amb major potencial cap a la de menys potencial.

Aquest desplaçament es pot quantificar segons la quantitat de càrrega elèctrica, Q , que travessa una secció del conductor, S , per unitat de temps, t . (fig.18) S'anomena intensitat i la seva unitat de mesura és l'*Ampere* (A).

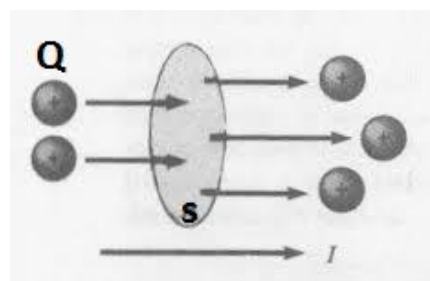


Figura 18: Desplaçament de Q

Per aprofitar aquest desplaçament, el que es fa és connectar diferents elements amb conductors, això dóna lloc a un circuit tancat per on fluirà la càrrega elèctrica, portant energia a aquests elements. En general, tots els circuits segueixen un mateix esquema (fig.19):

- **Generador:** element capaç de transformar alguna forma d'energia en energia elèctrica.
- **Receptor:** element que transforma l'energia elèctrica en altres formes d'energia
- **Interruptor:** element que obre o tanca el circuit, de manera que permet o no el pas del corrent elèctric.
- **Conductors:** cables que uneixen els diferents elements del circuit i permeten la circulació del corrent

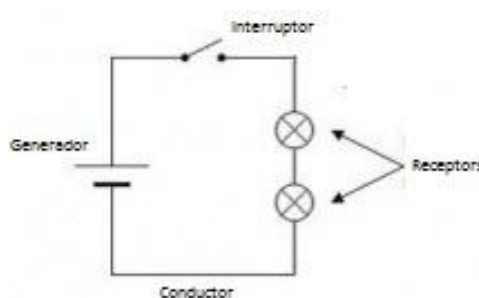
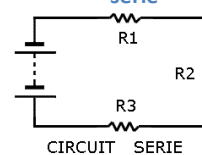


Figura 19: Esquema d'un circuit elèctric

Tot i això, es poden complicar molt les maneres de connectar els diferents elements. Les dues més comunes són:

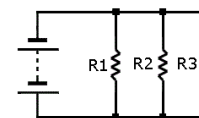
- **En sèrie:** intensitat de corrent igual per als dos elements i diferència de potencial repartida entre els dos. (fig.20a)
- **En paral·lel:** intensitat repartida entre els dos elements i diferència de potencial igual per ambdós elements. (fig.20b)

Figura 20a: Circuit en sèrie



CIRCUIT PARAL·LEL

Figura 20b: circuit en paral·lel



4.1. Llei d'Ohm

El físic alemany George Simon Ohm va mesurar la intensitat del corrent, I , que circulava per un conductor metàl·lic en aplicar diversos valors de diferència de potencial, V , entre el seus extrems. Els resultats d'aquest experiment li van permetre comprovar el següent:

$$\frac{V_1}{I_1} = \frac{V_2}{I_2} = \frac{V_3}{I_3} = \dots = \text{constant}$$

Aquesta constant s'anomena resistència elèctrica, R , i si es generalitza la fórmula anterior queda:

$$R = \frac{V}{I} [\Omega]$$

4.1.1 Associació de resistències

Normalment s'usen conductors de molt baixa resistivitat, però sovint interessa d'augmentar la dificultat del pas del corrent. Per a fer-ho s'inclouen al circuit uns elements amb una resistència elèctrica determinada que s'anomenen *resistències*.

A vegades no es té la resistència del valor que es vol, per això es poden associar diferents per a obtenir-ne una del valor necessari. Podem dir, per tant, que un conjunt de resistències es comporta com una única resistència anomenada resistència equivalent.

Segons com estiguin associades, la resistència equivalent es calcularà d'una manera o altra.

- En sèrie: (fig.21)
 - $I = I_1 = I_2 = I_3 = \dots$
 - $V_t = V_1 + V_2 + V_3 + \dots$
 - $R_t = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$

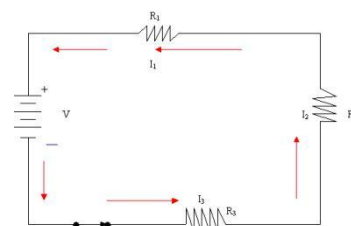


Figura 21: Resistències en sèrie

- En paral·lel: (fig.22)
 - $I_t = I_1 + I_2 + I_3 + \dots$
 - $V = V_1 = V_2 = V_3 = \dots$
 - $\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots$

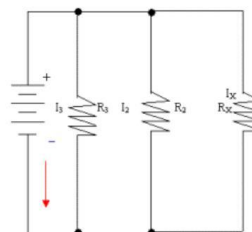


Figura 22: Resistències en paral·lel

- Mixta: (fig.23)
 - $I_t = I_1 + I_2 + I_3 + \dots$
 - $V = V_1 = V_2 = V_3 = \dots$
 - $\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots$

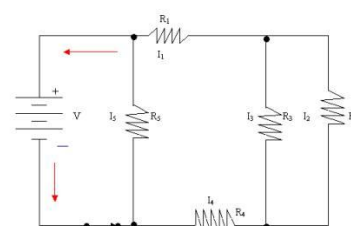


Figura 23: Resistències mixtes

4.2. Energia i potència del corrent elèctric

Tot circuit té una energia elèctrica, E , disponible. Aquesta és igual al treball, W , realitzat per les càrregues elèctriques al desplaçar-se d'un punt a a un punt b . Aquest és:

$$W = QV = E \text{ [J]}$$

Quan es relaciona l'energia que proporciona el generador a les càrregues amb el temps emprat, obtenim la potència elèctrica:

$$P = \frac{W}{t} = \frac{QV}{t} = \frac{ItV}{t} = VI \text{ [W] } \left[\frac{J}{s} \right]$$

4.3. Efecte Joule

Quan un aparell està en funcionament, s'escalfa. Això significa que té pèrdues d'energia en forma de calor. Aquestes pèrdues són degudes al xoc dels electrons amb els àtoms del conductor, fent que augmenti la seva energia cinètica, per tant, també la seva temperatura. Aquest fenomen s'anomena *efecte Joule*

4.4. Generadors i receptors elèctrics

Com ja s'ha explicat abans, els generadors i receptors són els encarregats de transformar l'energia: els generadors converteixen energia en energia elèctrica que els receptors convertiran en una altre tipus d'energia.

Ambdós treballen de la mateixa manera:

- Realitzen un treball per unitat de càrrega (ε i ε'), tot i que el primer és per càrrega proporcionada i el segon per càrrega rebuda.
- Tenen una resistència interna que, per efecte Joule, provocarà que el treball que faci el generador disminueixi i que el que hagi de fer el receptor augmenti.

Normalment, quan s'obtenen generadors o receptors, ja s'indica directament el treball alterat, V , i la potència, P , d'aquests.

5. Part Pràctica

Per a fer el disseny de submarí cal parar-se a pensar en què es vol fer, plantejar què es pot fer, i el que és més important, pensar si aquestes idees son factibles per a les nostres possibilitats.

És per això que he pensat diferents opcions i he utilitzat la que s'adaptava a les meves possibilitats. He plantejat quatre dissenys els quals han aparegut a mesura que anava avançant amb la part teòrica. En els tres primers casos el moviment i la direcció serien iguals o similars. En el quart, la direcció varia lleugerament.

La part electrònica del submarí és molt similar en tots els dissenys. Tots necessiten plaques receptores amb el seu respectiu emissor, un comandament.

En el meu cas aprofitaré les de cotxes teledirigits de quan era petit, per un costat perquè no els utilitzo i per l'altre perquè comprar-ne no és barat. Cada una d'aquestes plaques permet dos canals, és a dir, dos

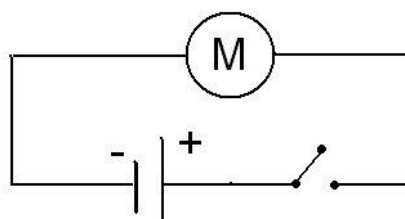


Figura 24: Esquema bàsic

funcions, per exemple en un cotxe teledirigit, la velocitat i la direcció. En el cas del submarí calen mínim tres canals pel que en necessitem dos. També és podria buscar una de quatre canals, però el preu és encara més elevat.

Si es volgués fer un esquema de les plaques, es pot considerar la placa com un motor, per tant, seria un circuit amb un motor, una bateria i un interruptor. (fig.24).

Pel que fa al casc, els quatre serien iguals: un tub de PVC de radi 4,5 cm, per a que els cables y plaques hi càpiguen. El que si que variaria seria la longitud d'aquest. Ja que tenen un tanc de llastrat, els dos primers dissenys necessitarien més longitud per tal de deixar espai per aquests. Els dos últims només necessiten espai per a l'electrònica, així que no caldria que fossin tan llargs.

5.1. Primers dissenys

El moviment seria donat per un parell de motors que farien moure unes hèlixs que mourien l'aigua i així mourien el submarí. De la direcció s'encarregaria un altre motor que faria moure uns timons que com s'ha vist abans, per la diferencia de pressió donarien control sobre la direcció del submarí.

La gran diferencia entre els tres apareix quan es vol que el submarí s'enfonsi o emergeixi.

5.1.1. Dissenys amb tanc de llastrat

Els dos primers dissenys estan fets pensant completament com si es volgués fer un submarí real, però a escala. Els submarins funcionen amb un conjunt de tancs de llastrat que permeten jugar amb el principi d'Arquímedes. Per fer-ho a escala s'hauria de crear un recipient, amb dos compartiments, un dels quals hauria d'estar completament aïllat de l'aigua i que portaria tota l'electrònica per fer funcionar els motors a distància, i un altre compartiment que s'ompliria d'aigua per enfonsar el submarí i buidaria per fer-lo emergir.

Com ja s'ha vist abans, el fet de que s'enfonsi o no un objecte a l'aigua depèn del seu pes. Per tant, per enfonsar el submarí cal controlar el seu pes.

Al principi, perquè el submarí floti, caldrà que el seu pes, P , sigui inferior a la seva força E , per tant:

$$V_T g \rho_{aigua} > g m_t$$

$$\text{on } V_T = \text{Volum} \quad g = \text{gravetat} \quad \rho_{aigua} = \text{densitat de l'aigua}$$

$$m_t = \text{massa}$$

Perquè s'enfonsi, caldrà que el seu pes, P , sigui superior a la seva força E , per tant:

$$V_T g \rho_{aigua} < g m_t$$

Això es pot aconseguir fent que m_t augmenti i això es pot aconseguir afegint aigua als tancs de llastrat. Al fer-ho aquesta diferencia entre P i E provocarà que el submarí s'enfonsi, a més o menys velocitat depenent de la diferència

entre aquests dos valors, fins a trobar una resistència, com podria ser el terra. Per evitar això, s'hauria d'aconseguir equilibrar aquests dos valors, per tant:

$$V_T g \rho_{aigua} = g m_t$$

Un cop equilibrats, el submarí s'estabilitzaria, és a dir, ni s'enfonsaria ni emergiria.

Per omplir i buidar aquests tancs, en el cas d'aquest submarí, el compartiment no aïllat, caldria algun tipus de motor que ajudi a moure l'aigua. Els dos primers dissenys segueixen aquests principis.

Primer disseny

Per a omplir i buidar el compartiment s'utilitzaria una bomba d'extracció feta a partir d'un motor. Aquesta tindria un funcionament molt senzill i limitat ja que els motors als quals tinc accés no són gaire potents. És per això que no he utilitzat aquest disseny per al submarí.

Tot i no utilitzar aquest tipus de bomba, he volgut fer-ne una per provar la potència que podria tenir i en cas de sorprendre'm aquesta, utilitzar-la, encara que no ha sigut el cas.

Per fer aquesta bomba i provar-la només calen un motor i un generador (una pila), a més d'altres materials als quals es té fàcil accés com un tap d'ampolla o plàstic, que es pot treure de la mateixa ampolla. El muntatge de la bomba es pot veure als annexos.

Requeriríem, doncs, de dos motors per al moviment, un altre per a la direcció, la bomba d'aigua i el material per a fer el timó i el tanc de l'illustrat

Segon disseny

Aquest disseny torna a ser fet pensant en un submarí real, però aquest cop s'utilitzaria el principi de pascal per extreure l'aigua a partir d'un pistó. Aquest estaria situat al compartiment no aïllat i es mouria amb un motor com l'utilitzat per a fer la bomba.

El compartiment tindria una forat per on entraria l'aigua, el pistó separaria el costat amb el forat d'un altre sense de manera que per omplir i buidar el compartiment només caldria moure el pistó.

Si es volgués enfonsar el submarí es mouria el pistó cap a la part amb aire, fent que l'aire es comprimís i l'aigua entrés a l'altre costat(fig.25a); per fer-lo emergir només caldria fer el moviment contrari.(fig.25b)

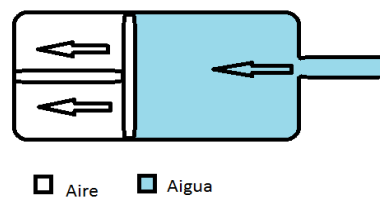


Figura 25a: Pistó fent que entri aigua

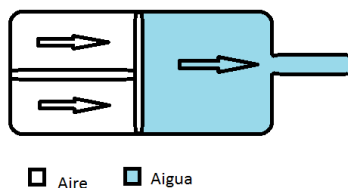


Figura 25b: Pistó fent que surti aigua

Utilitzar un pistó presenta un parell de problemes. En primer lloc, el pistó, ja que no és fàcil d'aconseguir i menys d'instal·lar-lo, i en segon, per la poca potència del motor. Al comprimir l'aire, aquest augmentaria la pressió exercida sobre el pistó dificultant el moviment d'aquest. Si el motor té poca potència, com els que jo puc utilitzar, aquesta pressió complicaria molt el moviment del pistó i potser no permetria el moviment suficient com per enfonsar el submarí.

En aquest cas, es podria trobar quin és el màxim d'aigua que pot entrar al compartiment i augmentar la massa del submarí amb pesos de manera que l'aigua necessària per enfonsar-lo estigui dins d'aquest màxim.

Per aquest disseny caldria el mateix que per al primer amb la diferència de la bomba, que la canviariem per un pistó i un altre motor.

5.1.2. Disseny amb estabilitzadors

El tercer disseny està pensat per simplificar el procés de submergir i fer emergir el submarí. En comptes de fer variar la massa del submarí, com en els dos casos anteriors, la massa serà sempre la mateixa però suficient perquè el pes sigui lleugerament superior a la força E generada pel desplaçament d'aigua. D'aquesta manera el submarí s'estaria enfonsant sempre però amb una força suficient, seriem capaços de vèncer aquesta diferència provocant que el submarí ascendeixi.

És així com funcionen, a grans trets, avions, helicòpters i *drones* (fig. 26). Aquests han de superar la força que els atrau cap al terra, que és la gravetat, i ho fan generant una altra força en sentit contrari.



Figura 26: Dron

Per a aplicar-ho al submarí caldria afegir uns motors que generin una força de sentit contrari al pes. Aquests s'haurien d'afegir als laterals del submarí per tal de donar-li estabilitat i, a més, s'haurien de cobrir per tal de protegir-los de cops.

Per aquest disseny caldrien doncs, dos motors per al moviment, quatre per a estabilitzar-lo i un últim per a la direcció. Als motors cal afegir el material per a cobrir els estabilitzadors, per a construir el timó i per a aïllar l'interior del submarí.

5.2. Disseny final

Aquest disseny simplifica l'anterior. Elimina el timó juntament amb tots els problemes que aquest comporta, com poden ser el material o la construcció. Per a fer-ho s'afegeixen dos motors per al moviment i es desplacen al costat dels estabilitzadors. D'aquesta manera es disminueix la quantitat de forats necessaris per a passar els cables, el material utilitzat per a tancar aquests i la possibilitat de que entri aigua a la zona de plaques per algun error a l'hora de tancar-los i, a més, s'augmenta la força per al moviment.

Fent això apareix un altre problema: com es pot controlar la direcció? Per a solucionar-ho he pensat en les embarcacions de rem. En aquestes, el moviment s'aconsegueix alternant les remades a ambdós costats de l'embarcació (embarcacions d'una sola persona) o remant a ambdós costats (embarcacions de més d'una persona)(fig.27). La direcció es controla remant només a un costat de l'embarcació.(fig.28)

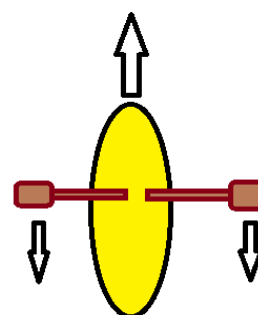


Figura 27: Remada a ambdós costats per avançar

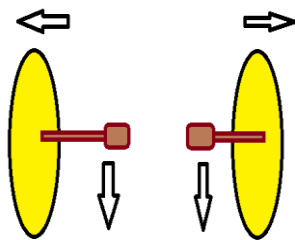


Figura 28: Remades per girar

Si pensem en el submarí, podem fer exactament el mateix fent treballar els motors d'un costat, de l'altre o alhora. Per això caldria fer que cada costat treballi en un canal diferent de l'emissor/receptor.

Aleshores, calen tres canals, dos pel moviment i un pels estabilitzadors, i per tant dos comandaments amb els seus emissor i receptor respectius, vuit motors, quatre pels estabilitzadors i dos a cada costat pel moviment, i a més, tot el material per al muntatge com cables, fusta, cinta aïllant i adhesiu.

5.2.1. Muntatge

Per començar cal pensar en les proporcions del casc. Cal que sigui petit perquè els motors puguin moure'l però suficientment gran per a poder ficar-hi les plaques i els cables. Com ja he dit abans, el tub és de 4,5 cm de radi, és a dir, 9 cm de diàmetre, pel que amb 30 cm de longitud podria ser suficient i, en cas de necessitar-ho, es podria escurçar.

El següent pas és construir les proteccions per els motors i fer els forats per connectar els motors a les plaques. Els forats estaran en dues línies paral·leles, una a cada costat, dos per costat. Cada protecció haurà de protegir dos motors, pel que caldrà tenir en compte les mesures d'aquests per construir-les. Cada motor es podria considerar com un prisma amb base 2,5 cm x 2,5 cm i longitud 3 cm. Com un dels motors haurà d'estar col·locat verticalment i l'altre horitzontalment i, a més, un al costat de l'altre, les proteccions hauran de ser de mínim, base 3 cm x 3 cm i longitud 5 cm, prenent com a base la cara paral·lela a la superfície del tub. Com cal deixar una mica d'espai entre els motors i a més cal tenir en compte que la superfície on s'enganxaran és circular, augmentarem una mica aquest mínim deixant les proporcions a, base 5 cm x 5 cm i longitud 8 cm i l'arc de radi 4,5 cm. (Dues de les cares amb arc i dues sense). Com cal connectar els motors a les plaques de l'interior, les proteccions no les construirem fins el final, quant tot estigui connectat.

Per connectar els motor només cal soldar cables als motor i a la placa ens els punts de cada canal. En el cas dels de moviment, connectarem un motor al primer punt, aquest motor al següent en sèrie i aquest al segon punt de la placa; això ho farem a ambdós costats. En el cas dels estabilitzadors, farem el mateix però connectant els quatre en sèrie(fig. 29).

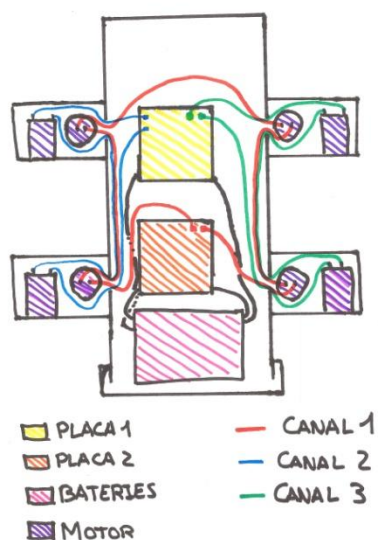


Figura 29: Esquema del circuit elèctric del submarí

Ara ja sabem com connectar-ho tot i protegir-ho així que només falta aïllar-ho. Els forats els aïllarem amb silicona adhesiva. Una de les bases la podem tapar per sempre, pel que podem enganxar una fusta amb el mateix adhesiu, però l'altra s'ha de poder obrir per revisar l'interior sempre que es vulgui. Una possible solució es utilitzar un altre tros de tub com a tap. Quan es compra un tub com aquest, un dels extrems és més ample per poder connectar-lo al següent, per tant es podria utilitzar aquest extrem per tapar

l'altre tapant un dels costats de la part ampla, de manera que es pugui utilitzar com un tap d'ampolla. Per evitar que entri aigua per l'escletxa entre els dos tubs i, a més, facilitar el moviment d'aquest tap, es pot aplicar una mica de greix.

Per últim, cal llastrar el submarí perquè s'enfonsi. En comptes de posar els llastres dins del submarí, els lligaré a un fil de manera que el pes no estigui al tub sinó més avall. D'aquesta manera s'eviten problemes d'estabilitat, ja que al ser cilíndric, podria desestabilitzar-se i girar sobre si mateix.

Amb això ja només caldria enganxar les hèlixs als motors, carregar les bateries, connectar-les a les plaques i encendre les plaques amb els respectius interruptors. Després tancar el casc i provar-lo a l'aigua.

Tot el seguiment del muntatge es pot veure a l'apartat d'annexos.

5.2.2. Llast

Per il·lustrar el submarí cal tenir en compte el principi d'Arquímedes. Per tant, necessitem saber el volum del submarí i la massa d'aquest. El volum es pot calcular dividint la forma del submarí en dues parts: el cilindre i les 4 proteccions.

El volum del cilindre de radi, 4,5 cm, i longitud 30 cm es pot calcular:

$$A_{base} \times Longitud = \pi r^2 \times L = \pi \times 4,5^2 \times 30 \approx 1907,55 \text{ cm}^3 \text{ on } r = \text{radi};$$

$$L = \text{longitud i } \pi \text{ s'aproxima a } 3,14$$

El volum de les proteccions de base 5 cm x 5 cm i longitud 8 cm:

$$4 \times A_{base} \times Longitud = 4 \times bh \times L = 4 \times 5^2 \times 8 = 800 \text{ cm}^3$$

on b i h són els costats de la base i L la longitud de les cares laterals

El volum total serà la suma d'aquests:

$$V_{cilindre} + V_{proteccions} = 1907,55 + 800 = 2707,55 \text{ cm}^3$$

Com no estem tenint en compte els arcs de les proteccions, arrodonirem el volum a 2700 cm³.

Per a la massa, s'utilitza una bàscula.(fig.30) el submarí pesa 1,250KG



Figura 30: Pesem el submarí

A continuació calcularem quant llast necessitarem utilitzant el principi d'Arquímedes. Com volem que s'enfonsi, el pes haurà de ser superior a la força generada pel volum d'aigua desplaçat, és a dir, el pes de l'aigua desplaçada però de sentit contrari. Per tant:

$$P_{submarí} + P_{llastra} > P_{aigua}$$

Com $P=mg$, deduïm que la massa total del submarí haurà de ser superior a la del volum d'aigua desplaçat. Calculem la massa d'aigua desplaçada:

$$2700 \text{ cm}^3 \times \frac{1 \text{ dm}^3}{1000 \text{ cm}^3} \times \frac{1 \text{ l}}{1 \text{ dm}^3} \times \frac{1 \text{ kg d'aigua}}{1 \text{ l d'aigua}} = 2,7 \text{ kg d'aigua}$$

Aïllem:

$$m_{\text{submarí}} + m_{\text{llastra}} > m_{\text{aigua}} \rightarrow m_{\text{llast}} > m_{\text{aigua}} - m_{\text{submarí}}$$

$$m_{\text{llast}} > 2,7 - 1,25 = 1,45 \text{ kg}$$

Com ha de ser superior a 1,45 kg, arrodonim a 1,5 kg. Aquesta serà la massa del llast.

5.2.3. Proves

La primera prova, sense llast, va ser tot un èxit: els vuit motors funcionaven i el submarí es movia, tot i que encara no s'enfonsava. A l'interior, però, vaig trobar gotes d'aigua, símbol de que hi havia una petita fuga per algun lloc.

La segona prova ja va ser amb llast. Només començar la prova, vaig veure que sortien bombolles d'una de les proteccions. Aquestes bombolles tornaven a indicar que estava entrant aigua al submarí. Vaig treure el submarí de l'aigua i al treure el tap, va sortir aigua. La placa dels motors encarregats de moure el submarí es va mullar i des d'aquell moment un dels canals va deixar de funcionar. A més, una de les proteccions seguia gotejant pel que vaig deduir que encara tenia aigua dins. En cas de que no hagués entrat aigua al cilindre i només a aquesta protecció, el submarí estaria desestabilitzat, raó per la qual seria molt difícil controlar el submarí.

A la setmana de fer al segona prova, per casualitat, vaig provar el submarí i tornava a funcionar. Per evitar que tornés a passar el mateix que a la segona prova, vaig repassar amb silicona totes les juntes. Després, vaig fer una altra prova, però un cop més, van aparèixer les bombolles(fig.31). Aquest cop, al treure el submarí de l'aigua, els motors no



Figura 31: Bombolles d'aire quan entra aigua al casc

funcionaven quan s'utilitzava el comandament però segons com agafava el submarí, funcionaven uns o altres.

Aquest va ser l'últim intent ja que, en vista de la impossibilitat de fer el compartiment totalment estanc amb els mitjans dels que disposava, vaig decidir no tornar-ho a intentar.

En aquesta decisió, a més de la dificultat d'aconseguir que l'aigua no entrés, també va afectar el fet de què, després d'assecar el submarí, els motors funcionessin només de tant en tant, sense criteri algun. Em vaig assegurar de que tots els cables estiguessin en bon estat així que el problema devia estar a les plaques.

6. Conclusions

Després de treballar en aquest projecte puc dir que, al principi, la idea del treball que volia fer era desmesurada econòmicament i tècnicament parlant. Per un costat, el material era el més econòmic possible, i per l'altre, les eines a les que tenia accés no eren les millors, a més de ser velles i desgastades. És per això que he hagut d'anar simplificant les meves idees per intentar d'adaptar-les a les meves possibilitats.

Tot i voler fer el projecte al mínim cost possible, he hagut d'invertir gairebé 100 euros en material i com ha estat fet de manera molt casolana, amb moltes hores de treball i cometent imprecisions degut a la falta de mitjans, no ha funcionat del tot bé. Tenint en compte que a aquest preu se li hauria d'afegir el preu de la càmera, caldria analitzar si es un projecte viable. Per això, caldria fer un estudi de mercat i veure si el producte realment es vendria i, en cas afirmatiu, trobar algú que vulgui costejar el projecte, ja que per a portar-lo a terme caldria augmentar el pressupost.

Amb aquesta millora del material, el preu del producte també augmentaria fins a entre 500 i 1000 euros, depenent de la càmera instal·lada. Tenint en compte que seria un objecte d'alta tecnologia, es podria dir que és un preu acceptable.

Considerant que les càmeres subaquàtiques només s'utilitzen en cites puntuals com mundial o olimpíades, crec que l'anàlisi de mercat del que parlava abans seria bastant positiu i a la llarga podria resultar un producte molt atractiu per als entrenadors de natació.

Pel que fa a la teoria, el treball m'ha fet aprofundir en temes que, en un futur, hauré de dominar durant la carrera. A més m'ha fet aprendre curiositats que mai m'havia preguntat abans com que un espanyol va ser el primer en crear un submarí.

7. Bibliografia

Per a la petita introducció històrica he utilitzat exclusivament informació extreta d'internet:

- Diccionari *online* del IEC: dlc.iec.cat
- Versió digital d'un llibre:
 - GARCÍA ZUÑIGA, E., trad. *Aforismos. Leonardo da Vinci*. 3^a ed. Madrid: Espasa Calpe, 1965
- Història dels submarins: www.submarine-history.com

Per a tota la part teòrica he utilitzat dos llibres:

- TIPLER, P.A.; MOSCA, G.P. *Physics for Scientists and Engineers*, Vol. 1, 5^a ed., Barcelona: Reverté, 2005
- SEARS, F.W.; ZEMANSKY, M.W. *Física general*, 5^a ed., Barcelona: Aguilar, 1981
- *Física I i II*, Barcelona: Grup Edebé

Per a la part pràctica he buscat ajuda a pàgines web de modelisme:

- modelismocubano.com
- www.u-modelismo.com
- camne.com.ar

8. Annexos

8.1. Bomba d'extracció

8.1.1. Material

Per a la construcció de la necessitem (fig.32):

- Un motor elèctric
- Una bateria – Piles AA
- Una canya de plàstic
- Un pal de piruleta
- Tres taps d'ampolla
- Una ampolla de plàstic
- Tisores
- *Superglue*
- Silicona adhesiva



Figura 32: Material necessari

8.1.2. Muntatge

Abans de començar a muntar la bomba, cal preparar el material:

- Taps
 - Primer tap: un forat a la part superior(fig.33) per on passi amb facilitat l'eix del motor.(fig.34)



Figura 33: Forat superior del tap



Figura 34: Provem que l'eix entri pel forat

- Segon tap: un forat a la part superior i un al lateral(fig.35), pel superior ha de poder passar el pal de piruleta i pel lateral la canya(fig.36).



Figura 36: Forats a la cara superior i al lateral



Figura 35: Provem que el pal i la canya passin pels forats

- Tercer tap: un forat a la part superior(fig.38) i dos al lateral(fig.37), pels tres ha de poder passar el pal de la piruleta fàcilment(fig.39).



Figura 38: Forat superior



Figura 37: Forats laterals



Figura 39

- Ampolla: només necessitem un tros de plàstic, així que la retallem. (fig.40)



Figura 40: Ampolla de plàstic retallada

- Del tros de plàstic obtingut, es retallen dos trossos que càpiguen dins del tap(fig.41) i es fa un petit tall a cada un al centre(fig.42) per poder ajuntar-los després com si fossin les aspes d'un molí(fig.43).



Figura 41: Trossos que capiguen al tap

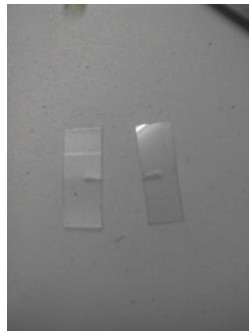


Figura 42: Tall al mig de cada tros



Figura 43: Els ajuntem com si fossin les aspes d'un molí

- Pal de piruleta: li fem quatre talls en forma de creu a un dels extrems(fig.44)

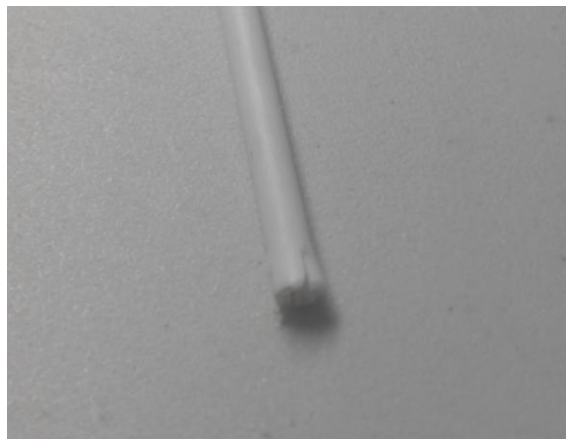


Figura 44: Pal de piruleta amb els quatre tall

Ara ja tenim tot el material llest per al muntatge. Comencem: unim les aspes formades amb el plàstic de l'ampolla amb el pal de piruleta ajudant-nos dels talls fets al pal (fig.45) i el *superglue* (fig.46).



Figura 45: Pal amb les aspes



Figura 46: Ho enganxem amb *superglue*

Tallem el pal de manera que quedi un centímetre a partir de les aspes i el passem pel forat superior del segon tap. Agafem el motor passat pel primer tap i ho ajuntem al segon tap i introduïm el piu del motor al pal, ja passat pel segon tap. Ho fixem amb la silicona adhesiva. Al forat lateral hi introduïm la canya però sense entrar massa, ja que sinó tocarà amb les aspes(fig.47); també la fixem.(fig.48)



Figura 48: Aspes dins el tap



Figura 47: Canya perquè surti l'aigua

Per últim, s'ha d'ajuntar el tercer tap. Si ho fem directament, les aspes tocaran el tap, per tant, fem un "cinturó" de plàstic, de la mateixa ampolla, i ho unim tot evitant tapar els forats del tercer tap amb el "cinturó".(fig.49 i fig.50)



Figura 49: Ho unim tot amb silicona



Figura 50: Vigilem que el cinturó no tapi el forat

8.1.3. Conclusions

Un cop acabada i provada puc dir que la bomba, tot i funcionar, no seria útil per al submarí. Per un costat, el motor no es suficientment potent i li costa fer la seva funció. Per l'altre, com a estat feta d'una manera casolana, és poc fiable.

8.2. Submarí

8.2.1. Material

Per a la construcció del submarí calen els següents materials:

- Un tub de PVC de 1 metre i radi 4,5 cm (fig.51)
- Fusta. Jo he aprofitat la d'una caixa de vins.
- 8 motors (fig.52)
- 8 hèlixs, 4 de dretes i 4 d'esquerres (fig.53)
- Dues plaques receptores amb els seus respectius emissors. (fig.54)
- Dues bateries
- Cable
- Un pal de piruleta.
- Vernís
- Pintura en esprai. (Opcional)



Figura 52: Tub de PVC



Figura 51: Motors



Figura 53: Hèlixs

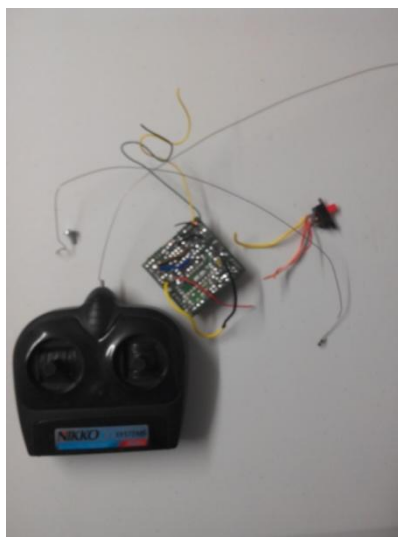


Figura 54: Placa i comandament

A més d'aquest material, també cal tenir en compte les eines que necessitem:

- Material de dibuix per dibuixar les formes a la fusta.
- Una serra o eina per tallar la fusta i el tub de PVC.
- Llima per llimar la fusta.
- Trepant per fer els forats pels cables i els motors.
- Silicona adhesiva.
- *Superglue*.
- Cinta aïllant.
- Alicates per tallar els cables i tisores per pelar-los.

8.2.2. Muntatge

Començarem preparant el casc, és a dir, el tub de PVC. Primer tallem amb la serra 30 cm, que seran la part principal del casc(fig.56), i la part més ampla del tub, que utilitzarem com a tap pel casc(fig.55).



Figura 55: Tap del casc



Figura 56: Tallem el tub



Figura 57: Llimem el tall

Com es pot observar, el tall no és gaire net. Llimem el tub per intentar que els talls quedi el més recte possible(fig.57).

El següent pas és fer els forats per passar els cables: dos a cada costat en línies paral·leles. Per això, marquem a les bases(fig.58) de manera que es puguin marcar aquestes dues línies(fig.59).



Figura 58: Marquem la base



Figura 59: Marquem les dues línies

Ara ja podem fer els forats. Els primers els farem a 5 cm d'on hem fet el tall. Aquesta serà la part davantera del submarí. Els altres dos els fem a 10 cm de l'altra base(fig.60). Si ajuntem el tub amb el tros més ample, podem veure com queda cert espai entre el tap i el forat. (fig.61)



Figura 60: Forats laterals



Figura 61: Fem els forats a certa distància del tap

El següent pas és preparar la fusta per a fer les proteccions dels motors i les tapes de les bases del tub. Les tapes són dues circumferències, la primera, la de la part frontal, de radi 4,5 cm, i la segona, la del tap, de radi 4,75 cm ja que el tub és lleugerament més ample. Les proteccions són quatre prismes de base quadrada de 5 cm x 5 cm. Les cares laterals són iguals dos a dos, és a dir, dues amb un costat de forma circular, ja que ha d'anar enganxat al tub, i les altres dues totalment rectangulars. Les quatre són rectangles de 5 cm x 8 cm amb la diferència de l'arc(fig.62).



Figura 62: Dibuixos de les peces

Un cop fets els dibuixos, es retalla i lima. (fig.63)



Figura 63: Peces tallades i llimades

Per acabar amb les fustes, només cal fer els forats per on passar l'eix del motor. Agafem quatre cares amb arc, i aprofitant la línia feta per fer l'arc, fem un forat a 2 cm del costat sense arc. També cal fer forats a quatre de les cares

sense arc. Aprofitant també la línia que les divideix en dos parts iguals, fem un forat, però aquest cop a 3,5 cm d'un costat (a 4,5 cm de l'altre).(fig.64)



Figura 64: Peces laterals amb els forats

Ara preparem el tap del submarí. Agafem la circumferència més gran i el tros de tub una mica més ample i els enganxem amb silicona adhesiva. (fig.65) És possible que hi hagi petites fuites. Per comprovar-ho, un cop ja s'ha assecat la silicona, podem ficar-hi aigua com si fos un got. Les petites fuites que pugui haver es poden tancar amb més silicona. A més, se li pot donar una capa de *superglue* per la juntura interior per acabar d'assegurar-nos que no hi ha cap fuga.



Figura 65: Enganxem el tros de tub a la fusta

Ara ja podem començar amb el cablejat. Començarem amb el dels estabilitzadors. Sabem que aquests, només ocuparan un canal de la placa, per tant, passem un cable pels diferents forats de manera que faci tot aquest recorregut. Per facilitar la diferenciació dels cables per més tard, es pot utilitzar cinta aïllant de diferents colors. (fig.66)

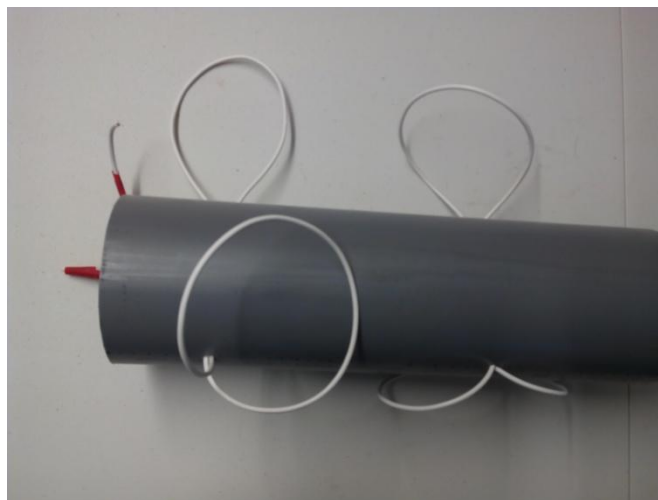


Figura 66: Marquem els cables amb cinta aïllant

Fem el mateix el motors dels dos costats, un canal per cadascun(fig.67). Aquí trobem la importància de diferenciar els cables(fig.68), ja que amb sis cables, dos de cada canal, es fàcil confondre's i això podria portar a errors a l'hora de connectar-los a les plaques.



Figura 67: Cables de tots els motors

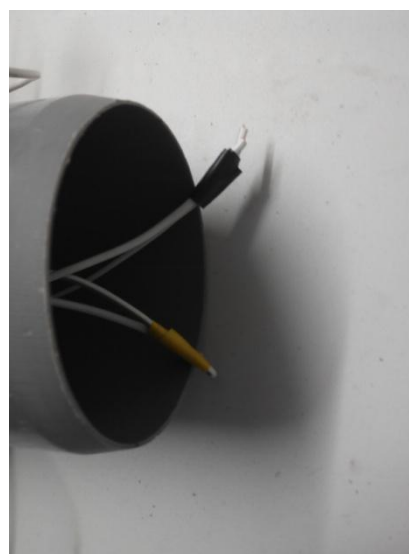


Figura 68: Cables d'un costat i l'altre

Ara ja podem connectar els cables als motors. A cada forat hi ha d'haver-hi dos, un per cada canal que hi passa. Per fer-ho tallem el cable amb les alicates, el pelem una mica per cada un dels extrems, i l'ajuntem al motor fent un nus (fig.69). La millor manera seria soldar el cable al motor, però el soldador al que tenia accés no em va servir per raons que desconec. L'estany no es quedava fos ajuntant motor i cable, sinó que es feia una capa que cobria el coure del cable que es separava al mínim contacte.

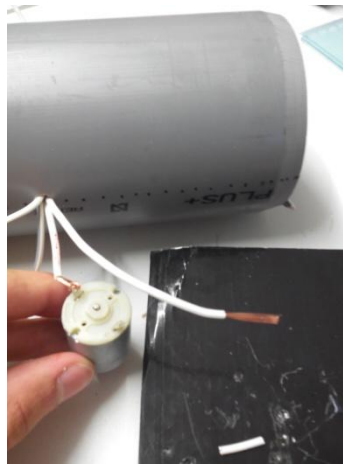


Figura 69: Unim cable i motor

Fem el mateix amb tots els motors (fig.70) i ens assegurem de que els cables arribin a la part de darrere del tub, on anirà el tap, ja que hem de tancar la part frontal i no tindrem accés als cables des d'aquell costat.

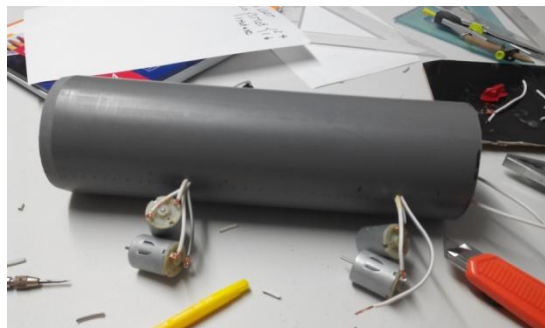


Figura 70: Tots els motors connectats

Ara ja podem connectar els motors a les plaques. A una de les plaques (fig.71) hi connectarem, a un canal, els motors de la dreta, i al segon canal, els motors de la dreta. En el meu cas, com he aprofitat les plaques de cotxes teledirigits antics, he connectat els cables dels motors a les restes de cables que quedaven a les plaques amb cinta aïllant. A la segona placa, a un dels canals, hi connectarem els cables dels estabilitzadors. A l'altre canal, com no l'hem d'utilitzar, ajuntarem els cables per tancar el circuit (fig.72).

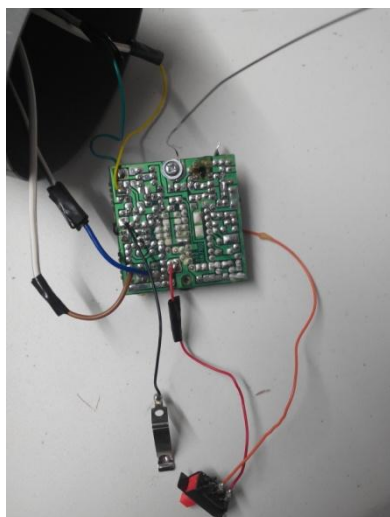


Figura 72: Placa connectada als motors

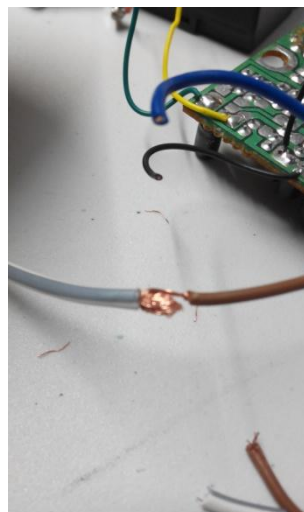


Figura 71: Unió de cables

Un cop connectades les plaques, podem provar que funcionin connectant-les a les bateries. Cal vigilar que l'antena faci contacte amb la placa perquè sinó no hi haurà manera que hi arribi la senyal.

Quan ja ens hem assegurat que funciona, fem dos forats a la part superior per a poder passar les antenes. Cal vigilar que no estigui massa lluny del forat on anirà el tap, perquè sinó serà molt difícil col·locar les bateries, ni massa a prop, ja que sinó el tap trencarà les antenes (fig.73). Un cop hem passat les antenes, podem tapar el forat amb silicona.



Figura 73: Forats per les antenes

Abans de començar a muntar les proteccions, tapem el forat frontal. Ho fem amb la circumferència de fusta de radi 4,5 cm de la mateixa manera que hem fet el tap: silicona adhesiva i *superglue*. (fig.74)



Figura 74: Tap de la part frontal

Amb el següent pas s'ha d'anar amb molt de compte, ja que un error podria comportar un retràs important en el projecte. Hem d'unir les tapes de les proteccions als motors sense obstruir-los i sense equivocar-nos. Els motors que fan la funció d'estabilitzadors s'han d'unir amb els rectangles sense arc, en canvi els que s'encarregaran del moviment, els dos canals separats, s'hauran d'enganxar als que tenen arc. Així doncs, passem el motor pel forat que hem fet abans i després l'unim. Per reduir la quantitat d'aigua que entra dins les proteccions i, a més, assegurar-me de la fixació dels motors, els he enganxat amb silicona. (fig.75)



Figura 75: Unim el motor a la protecció

Després, hem d'unir aquestes dues proteccions al tub de la mateixa manera. (fig.76) Per ajudar-nos podem fer unes marques per saber on hem d'enganxar cada fusta, a més, podem aprofitar les línies que havíem fet abans al tub i a la fusta. En aquest mateix pas, tapem amb silicona el forat per on hem passat els cables des de l'interior per evitar que hi entri aigua.(fig.77)

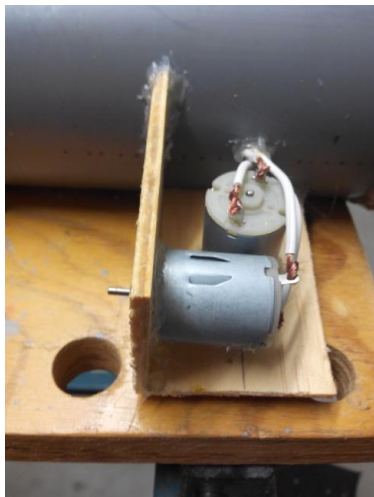


Figura 77: Protecciones unides al tub



Figura 76: Forat tapat amb silicona

Ara que ja tenim els motors fixats (fig.78), només cal acabar de tapar-lo. Seguim el mateix procés que amb les cares anteriors però sense preocupar-nos de fixar motors, ja que no hi ha més.(fig.79) La base quadrada serà l'última peça que enganxem. (fig.80)



Figura 78: Tots els motors fixats



Figura 79: Enganxem totes les cares



Figura 80: Base de la protecció

Repassem que tot estigui ben enganxat i intentem que no hi hagi cap mínima escletxa. Després donem una capa de vernís a la fusta(fig.81 i fig.82): taps i proteccions. Aquesta capa ajudarà a tancar les possibles fuites.



Figura 82: Vernís recent aplicat

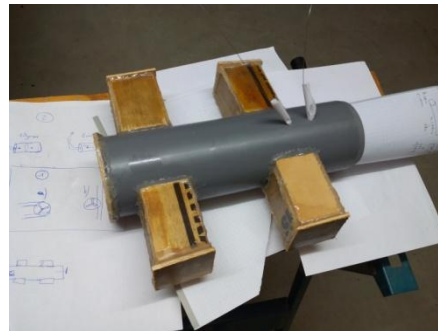


Figura 81: Vernís ja sec

El següent pas és opcional. Si volem pintar el submarí ho podem fer ara. Jo ho he fet amb pintura en esprai.(fig.83)

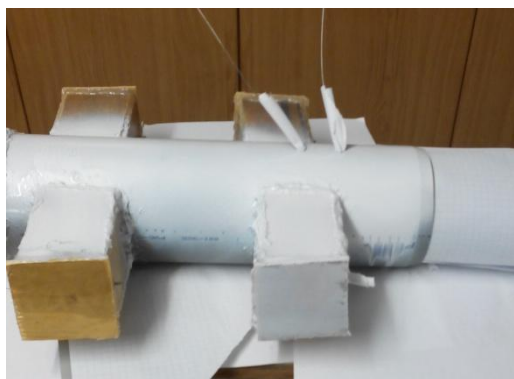


Figura 83: Pintem el submarí

Ara ja només falta enganxar les hèlix. Com l'eix del motor és molt més prim que el forat de l'hèlix, no es pot enganxar bé. Per això utilitzarem trossos de pal de piruleta per a fer més gruixut l'eix i així poder enganxar les hèlix. Tallem el pal en trossos de mig centímetre i els enganxem als eixos amb *superglue*(fig.84). Per evitar que l'adhesiu enganxi l'eix i que aquest no es pugui moure, posem el submarí en vertical per enganxar els pals als estabilitzadors, i en horitzontal per a enganxar-los als motors encarregats del moviment.

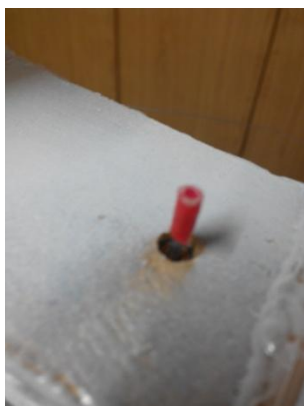


Figura 85: Pal enganxat a l'eix



Figura 84: Hèlix enganxada a l'eix

Ara ja podem enganxar les hèlix (fig.85). Cal tenir en compte que aquestes estan fetes per girar en una direcció, per tant, cal vigilar cap a quin costat gira el motor. Si tot s'ha connectat bé, els estabilitzadors haurien de girar dos cap un costat i dos cap a l'altre i els altres quatre motors, els d'un costat en una direcció i els de l'altre en la direcció contrària. En el meu cas, vaig cometre algun error a l'hora de connectar els cables i els motors i un motors laterals no girava cap on tocava. Això em va obligar a canviar una hèlix. Vaig utilitzar, doncs, 5 que giraven cap a l'esquerra i 3 cap a la dreta.

Ja hem acabat el submarí (fig.86), tot i que no s'enfonsarà ja que la massa del submarí encara no és suficient, però això ja ho hem vist a l'apartat de *Llast*. Per provar-lo només cal carregar les bateries(fig.87), connectar-les (fig.88) i provar que funcioni (fig.89). Per connectar les bateries, connectem les parts pelades dels cables a la bateria. Per mantenir el contacte amb aquestes he utilitzat gomes de pollastre.



Figura 86: Submarí acabat



Figura 87: Bateries carregant



Figura 88: Bateries connectades



Figura 89: Submarí funcionant

8.2.3. Conclusions

Després de provar-lo, queda clar que la part de les plaques funciona perfectament, però s'ha de millorar l'aïllament d'aquestes. La millor manera per aïllar perfectament el submarí seria que ho fessin màquines, ja que des de les peces fustes, que no són del tot precises, fins a les fuites provocades per un mal hermetisme, mostren el error humà, a més de la meva inexperiència, en aquest tipus de projecte.