

Design and Construction of a ROV (Remotely Operated Vehicle) Submarine USFQ Diseño y Construcción de un ROV (Remotely Operated Vehicle) Submarino USFQ

Nicolás Soria^{1*}, Daniel Cabrera¹ y Paulo Guerra¹

¹Universidad San Francisco de Quito, Colegio de Ciencias e Ingeniería, Diego de Robles
y Vía Interoceánica, Quito - Ecuador

*Autor principal/Corresponding author, e-mail: nsoria@usfq.edu.ec

Editado por/Edited by: Cesar Zambrano, Ph.D.

Recibido/Received: 15/10/2013. Aceptado/Accepted: 23/03/2014.

Publicado en línea/Published on Web: 13/06/2014. Impreso/Printed: 13/06/2014.

Abstract

In the present work, a motorized remotely operated underwater vehicle (ROV) was developed. The platform is capable of carrying navigation sensors, vision and control systems. The ultimate goal was to design and build an underwater vehicle operated by remote control which allows recording of audio and video. In a first stage of the project, research was conducted on existing ROVs. With this information and based on the design requirements of the USFQ marine research team, a detailed mechanical design of the vehicle was developed. The construction of the first Ecuadorian ROV was carried out at the USFQ robotics laboratory.

The USFQ ROV has an innovative design using a conical 60° thruster configuration. Two blocks of thruster are installed in the ROV one in the front and one in the back of the ROV. Each block has three Seabotix BTD - 150 thrusters which are aligned with 60° between each thruster. This conical thruster configuration allowed to the ROV five degrees of freedom.

The control, data acquisition and the Human Machine Interface (HMI) for the ROV was programmed using the software LabView. LabView allow the steady connection in real time between the control equipment inside the ROV and the laptop and joystick in surface. The ROV has the ability to record audio and video, capture photography's, data acquisition and a real time remotely control of the platform without interferences or control delays.

After checking the mechanical operation of the submarine and the tightness of the dry chambers, the electrical control components, motors, sensors, video camera and hydrophone were installed.

Finally, tests were done in a swimming pool to check for leaks, buoyancy and mobility. Open water tests were performed afterwards on the Ecuadorian coast. The final destination of the submarine is the Galapagos Science Center, GAIAS, located in San Cristobal Island, Galápagos. Where it will be used as a research tool by GAIAS investigators.

Keywords. ROV, thruster, degrees of freedom, buoyancy & HMI, data acquisition.

Resumen

En el presente trabajo se diseñó y construyó una plataforma submarina motorizada operada a control remoto. La plataforma es capaz de portar sistemas de control y visión, y sensores de navegación. Como primera etapa del proyecto, se realizó una investigación sobre los robots submarinos existentes. En base a información bibliográfica y considerando los requerimientos de la zona donde se emplearía el vehículo, se desarrolló un diseño mecánico detallado del vehículo. La construcción del primer ROV ecuatoriano se llevó a cabo en las instalaciones y con las herramientas del taller mecánico de la USFQ. A diferencia de otras plataformas existentes, el Submarino USFQ está diseñado con una configuración de motores cónica utilizando 60° de separación entre los motores. El ROV utilizara dos bloques de motores. Cada bloque estará equipado con 3 motores Seabotix BTD-150, y su alineación a 60° entre cada motor permitió a la plataforma alcanzar 5 grados de libertad.

La programación para el control, adquisición de datos y HMI se realizó con el programa LabView, que permitió conectar los componentes de control en la plataforma con el joystick y el computador en superficie. La plataforma es capaz de ver en tiempo real lo que sucede al frente de la plataforma, puede grabar audio, video, capturar fotografías y ser controlada desde superficie sin pérdidas de conexión.

Después de comprobar el funcionamiento mecánico del submarino y la hermeticidad de los compartimientos se procedió a instalar los componentes eléctricos de control, motores, sensores, cámara de video e hidrófono.

Finalmente se realizaron pruebas en piscina de hermeticidad, flotabilidad y movilidad para el submarino para posteriormente a realizar varias pruebas en aguas abiertas en la costa ecuatoriana. El destino final del submarino es apoyar a la investigación en la estación de GAIAS en la Isla San Cristóbal, Galápagos.

Palabras Clave. ROV, thrusters, grados de libertad, flotabilidad, adquisición de datos & HMI

Introducción

El submarino USFQ es una herramienta de investigación destinada a GAIAS, que facilitará el estudio e investigación de la flora y fauna submarina en las islas Galápagos, al igual que la exploración de lugares desconocidos o de difícil acceso, así como también el descubrimiento de nuevas especies de animales o plantas marinas. El vehículo submarino se sumergirá en un medio acuático, puede ser agua dulce o agua salada. Por lo tanto la plataforma deberá soportar diferentes fenómenos físicos, como son la flotabilidad, la presión y la hidrodinámica de los cuales dependerá su desempeño [1].

La flotabilidad neutra es el estado ideal para el funcionamiento del submarino, con esta flotabilidad el vehículo podrá moverse con más libertad en todas las direcciones y con menos esfuerzo para los motores [2]. A pesar de ello, por razones de seguridad se buscará una flotabilidad ligeramente positiva. Así se evitará que el vehículo se hunda hasta al fondo del mar en donde puede afectar la vida marina, y también se permitirá recuperar el submarino en la superficie en caso de una falla en su funcionamiento.

El agua es un fluido que pesa y ejerce una presión en todos los cuerpos sumergidos en ella, corresponde a un incremento de 1 atm por cada 10 m de profundidad [3]. Herramientas de exploración marina como los vehículos robotizados, son diseñadas para operar a una profundidad mayor a 30 m. Estas herramientas sumergibles permiten explorar las profundidades sin exponer a riesgos a los Investigadores.

Condiciones del vehículo

Todo ROV está diseñado con al menos un compartimiento que protege del exterior a los elementos de control del sumergible [4]. Sin embargo, los elementos de control tienen que comunicarse con los motores, los accesorios y la superficie. Estas conexiones se pueden implementar garantizando que no existan filtraciones de agua que pongan en riesgo la integridad de los equipos. El primer inconveniente se presenta al diseñar un compartimiento que permita un fácil acceso a los componentes en su interior y que los mantenga aislados del exterior [5]. El compartimiento debe permitir un fácil ensamblado y mantener una barrera impermeable. Las partes deben ensamblarse utilizando técnicas y elementos de sellado que soporten altas presiones [6]. El segundo inconveniente se presenta el momento de comunicar y alimentar los motores con su respectivo control y fuente de potencia. De igual forma el compartimiento de un ROV debe mantener una conexión directa con la superficie para la transmisión de datos [7]. La comunicación y alimentación entre dispositivos se realiza por medio de cables, y es necesario realizar una conexión hermética que proteja la integridad de los equipos y compartimientos.

Profundidad de Inmersión	50 metros
Autonomía	2 horas
Peso	40 kilogramos
Dimensiones	Largo 1.0 m Ancho 0.50 m Alto 0.50 m
Flotabilidad	Positiva
Velocidad	5 nudos
Maniobrabilidad	mínimo 5 DOF
Materiales	No corrosibles
Equipos	Cámara de video Hidrófono
Diseño	Ensamblaje modular

Tabla 1: Requerimientos generales.

El submarino en el agua estará en un espacio tridimensional y tendrá 6 grados de libertad (Degree of Freedom, DOF), es decir, el submarino tendrá tres movimientos de traslación y tres rotaciones independientes e individuales en cada eje del espacio. Los movimientos básicos que un sumergible debe tener son: *desplazamiento en el eje vertical, desplazamiento en los dos ejes horizontales y al menos dos rotaciones* [8]. Con la combinación de estos movimientos básicos, un ROV es capaz de movilizarse sin problemas en el medio acuático. De acuerdo a la función que vaya a cumplir cada ROV se debe determinar la movilidad [9]; se debe definir si el ROV necesita agilidad, potencia o precisión en sus movimientos. El agua es un fluido que presentará resistencia al cuerpo que trate de desplazarse en ella. Esta resistencia reducirá la velocidad de avance o de rotación del cuerpo. Mientras más grande sea el cuerpo a desplazarse mayor será la resistencia que se genere [10]. Para compensar esta pérdida de movilidad es necesario que el sumergible presente una geometría hidrodinámica. La clave del diseño se encuentra en reducir el área de contacto del cuerpo con el fluido; cada geometría presenta un coeficiente de fricción de acuerdo a su área.

Para la construcción de un ROV se debe elegir materiales que sean resistentes, y livianos [11]. Como se mencionó anteriormente, es importante que el ROV tenga una flotabilidad positiva. Para que el sumergible pueda mantenerse a flote el peso del fluido desplazado debe ser mayor al peso del sumergible. Para la construcción del compartimiento estanco deben elegirse materiales que soporten altas presiones, tengan propiedades elásticas y que impidan el paso de agua.

La Tabla 1, resume las características que el proyecto Submarino USFQ debe presentar.

Componentes electrónicos

Audio y Video

Debido a la necesidad de investigación de vida marina, el sistema de audio y visión fue de alta prioridad para la construcción del sumergible, por lo que se necesitó utilizar un hidrófono y una cámara submarina. Estos

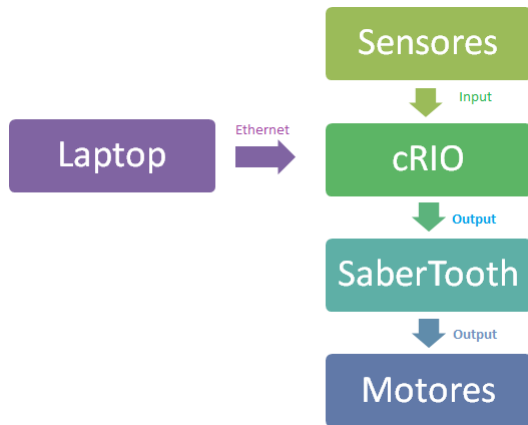


Figura 1: Esquema del Procesador.

equipos se situarán en el frente de la plataforma, para permitir al operario visualizar en tiempo real lo que está en frente del submarino [12]. Además, se requerá que el submarino tenga la capacidad de grabar videos, audio y tomar fotos durante una inmersión [13].

Motores y Controladores

Para el proyecto Submarino USFQ se eligió utilizar una combinación de 6 motores (Thrusters) Seabotix BDT-150 [14]; esta combinación permitirá realizar traslaciones verticales, horizontales, laterales y rotaciones en diferentes planos. Un thruster Seabotix BTD 150 puede generar 2.2 kgf de empuje; tiene un consumo de 4.25 amperios y trabaja con 19 Voltios dc. El thruster Seabotix BTD 150 puede trabajar a una profundidad máxima de 150 metros.

El submarino USFQ está equipado con 3 controladores Sabertooth 2x10. Un controlador Sabertooth 2x10 puede suministrar hasta 10 amperios a dos motores dc sin escobillas [15].

Procesador

Para una fácil y eficiente comunicación entre la computadora y el submarino se utilizó un sistema de control y adquisición de datos muy preciso, de alto rendimiento y fiabilidad, llamado CompactRIO (cRIO-9012) es un robusto procesador de 400MHZ y 128MB de memoria, se comunica con un puerto Ethernet 10/100 Base-T. El cRIO ejecuta LabView Real-Time lo que permite conectar y controlar a la plataforma con el computador en superficie [16].

El cRIO tiene conectado adicionalmente un módulo análogo y otro digital para recibir y procesar la señal proveniente de sensores. El modulo análogo nos permite recibir la información de los sensores de presión y temperatura, y mediante una diferencia de voltajes obtienen la información de la presión externa del vehículo y de la temperatura del agua. El procesador cRIO usa una salida digital para crear una modulación de banda amplia (*Pulse Wide Modulation, PWM*). La modulación de ancho de banda es una técnica de control para regular la

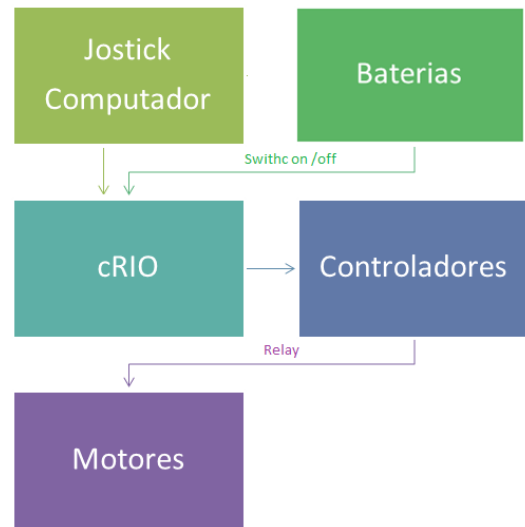


Figura 2: Comunicación de los elementos de potencia y control.

cantidad de energía que se envía a una carga; es necesario utilizar un filtro de PWM para conectar la señal al controlador Sabertooth. El filtro PWM genera una salida de voltaje análoga. Para el proyecto submarino, el procesador cRIO creará la señal PWM que entrará al filtro; la señal filtrada se conectará a una entrada del controlador Sabertooth 2x10. Cada motor Seabotix BDT-150 será controlado gracias a una señal análoga generada por el filtro PWM. Toda la información será transferida mediante comunicación de red local entre el cRIO y un computador mediante un cable de Ethernet.

En la Figura 1 se puede observar un esquema del cRIO como elemento principal de comunicación entre todos los elementos del submarino.

Cable Umbilical

La transferencia de señales y de potencia entre la superficie y el submarino se realiza mediante un cable umbilical de 50 m que tiene agrupado cuatro cables independientes más pequeños. El primero es el cable del audio que recibe la señal del hidrófono y se conecta directamente al computador. El segundo es el cable de video que recibe imágenes de la cámara y también se conecta directamente al computador. El tercer cable es el de potencia que se conecta al banco de baterías y alimenta a todos los componentes electrónicos del submarino. El cuarto es el cable de Ethernet que se conecta entre el cRIO y el computador y permite la comunicación entre el usuario y el submarino.

Dentro del compartimiento seco el cable principal se divide para alimentar por separado a cada componente: controladores y motores. Una bornera divide la energía hacia al procesador y controladores. Como elemento de seguridad se instaló un *Relay* entre la conexión del procesador y los controladores de los motores. El *Relay* impide que la alimentación llegue directamente hacia los motores; el *Relay* solo es activado cuando el cRIO se ha

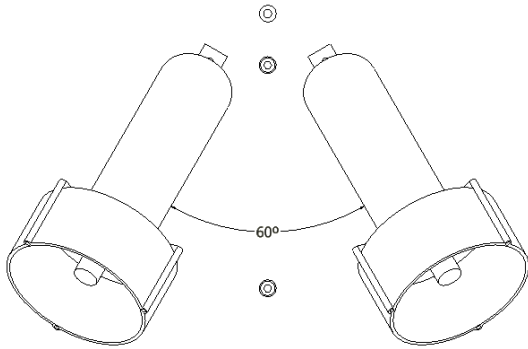


Figura 3: Ángulo de separación entre los motores superiores.

conectado con el computador en superficie y el programa de control del submarino esté funcionando. Una vez que el *Relay* es activado desde la interface del usuario, la alimentación se completa hacia a los controladores y los motores. La Figura 2 presenta como se encuentran conectados los elementos de control y potencia.

Metodología

Diseño Mecánico

El diseño de todos los elementos estructurales del submarino USFQ se realizó en el programa de diseño Autodesk Inventor 2011 y AutoCAD Mechanical 2011 [17].

Alineación de Motores

La resistencia del fluido depende principalmente de la velocidad con la que el cuerpo atraviesa el fluido, y actúa en sentido opuesto al del movimiento del cuerpo [18].

La ecuación de la fuerza de resistencia para fluidos F_D es:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho v^2 A$$

Dónde: ρ = Densidad del fluido, v = Velocidad del cuerpo, A = Área nominal del cuerpo y C_D = Coeficiente de fricción. Para el Submarino USFQ, el fluido será agua salada con una densidad de 1.028 kg/L, y el área nominal dependerá de la geometría del cuerpo. La velocidad estará dada por el fluido en movimiento y se usará una velocidad de 5 nudos como corriente de referencia. El valor del coeficiente de fricción cambia de acuerdo a la superficie que se encuentre en contacto con el fluido. Un cuerpo tendrá menor coeficiente de fricción si su geometría es más aerodinámica o hidrodinámica.

Un motor Seabotix BTD-150 tiene una fuerza de 2.2 kgf, que es equivalente a 21,57 Newton. Utilizando los 6 motores Seabotix BTD-150 en una misma dirección generarían una fuerza equivalente a 129.42 N. Sin embargo, si se alinea los 6 motores en una misma dirección el vehículo perderá maniobrabilidad. Para reducir la fuerza de fricción, se diseñó una alineación de 6 motores que permita reducir el área de contacto y el coeficiente de fricción del submarino, sin perder la maniobrabilidad y

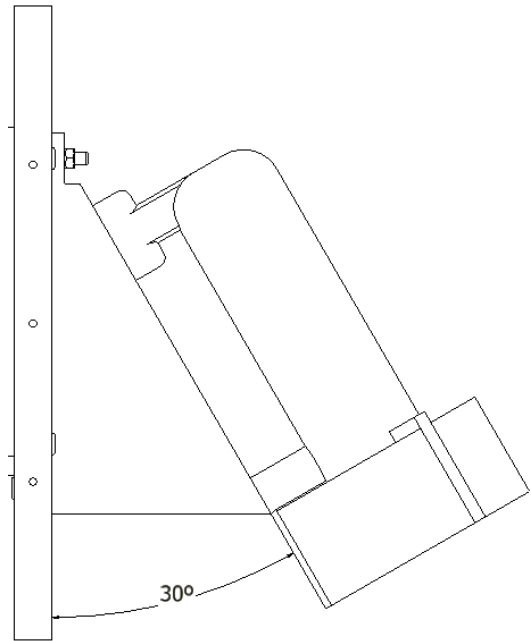


Figura 4: Ángulo de separación entre el motor inferior y la placa del módulo.

los grados de libertad. Se configuró al Submarino USFQ en dos bases de tres motores alineados en forma cónica distribuidos en la parte delantera y trasera del vehículo. Al alinear los motores en forma cónica se reduce el área frontal de contacto del cuerpo del submarino y el coeficiente de fricción disminuye. El coeficiente de fricción real de esta configuración es desconocido, pero para el modelo de las ecuaciones se usará el coeficiente de fricción de 0,82 para una geometría cilíndrica. Podemos hacer esta aproximación por la geometría cilíndrica del compartimento seco.

Cada base de motores está integrada por tres motores Seabotix BTD-150. Los motores se encuentran alineados en forma cónica, es decir, los ejes de los motores se encuentran elevados 30° sobre el eje del cono y mantienen 60° de separación entre los ejes. La alineación de motores con esta configuración no se ha documentado antes en un ROV. Dos motores se instalaron en la parte superior de la base con 60° de separación entre motores como se ilustra en la figura 3 ; los motores se encuentran elevados a 30° de separación de la base estructural. Dos motores en la parte superior optimizaran los movimientos verticales.

En la parte inferior de la base se instaló solo un motor en el medio de la placa con una elevación de 30° por debajo de la base como se presenta en la figura 4. De esta forma se mantiene una separación de 60° entre cada motor simulando una geometría cónica.

La Figura 5 presenta la base de motores ensamblados y en ella se resaltó el área frontal de contacto del vehículo.

La alineación de motores propuesta tiene un área de contacto de 0.0314 m^2 , que nos permite realizar un cálculo aproximado para la fuerza de fricción $F_D = 87,88 \text{ N}$.

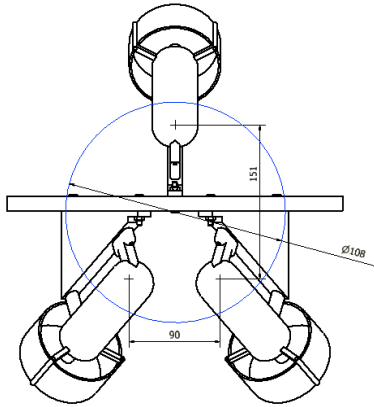


Figura 5: Base de motores vista frontal.

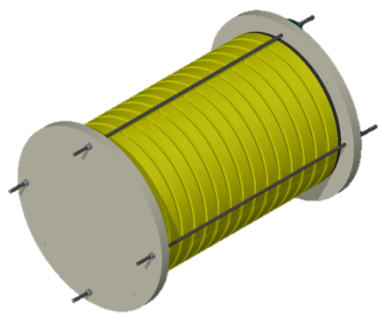


Figura 6: Compartimiento Modulo Control.

El siguiente paso fue determinar la fuerza que ejercen los motores con la alineación cónica de 60° para determinar la fuerza total del submarino [19]. Los resultados se presentan en la Tabla 2 Fuerza Motores.

La configuración y alineación cónica de motores permitirá al Submarino USFQ, tener una fuerza de empuje horizontal equivalente a 5 motores y una fuerza de empuje vertical equivalente a 3 motores. Suficiente para sumergir al ROV y vencer corrientes marinas de hasta 5 nudos.

Los bloques de motores con configuración cónica aumentarán la maniobrabilidad y agilidad del Submarino USFQ. Gracias a la programación de control, la plataforma podrá realizar combinación de movimientos horizontales, verticales y rotacionales con 5 grados de libertad como se planteó en los requisitos del proyecto.

	Fuerza (N)	Equivalencia en motores
Resistencia al movimiento	88	-
Empuje Horizontal	102	5
Empuje Vertical	65	3
Par de giro vs el eje vertical	37	1.5

Tabla 2: Fuerza Motores.



Figura 7: Base Motor.

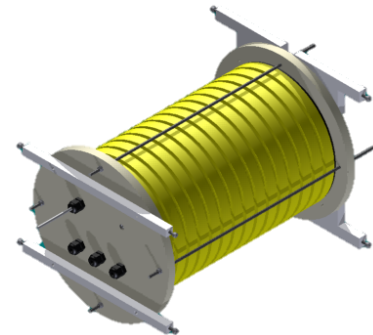


Figura 8: Compartimiento Seco.

Diseño de Compartimiento Seco

El compartimiento seco debe garantizar la integridad de los equipos de control embarcados, debe soportar la presión de una columna de agua a hasta 50 metros de altura. Los equipos de control embarcados son el procesador cRIO y tres controladores Sabertooth 2x10. Para el diseño del compartimiento se eligió la geometría cilíndrica porque tiene bajo coeficiente de fricción, su manufactura es simple [20].

Se diseñó un sistema de apriete de dos tapas para sellar el compartimiento. Las tapas para el cilindro fueron construidas en duralon y su diseño mantiene el diámetro interior del cilindro para lograr el sellado. El duralon es una poliamida de alto peso molecular que presenta una alta durabilidad y gran resistencia al impacto. El diseño de las tapas presenta dos canales en el diámetro de contacto con el cilindro. Los canales están diseñados para que un O ring pueda entrar en cada canal y aumentar el contacto entre las paredes internas del cilindro y la superficie de la tapa. El nitrilo presente en la estructura del O ring lo protege de la salinidad del mar y del desgaste de derivados de petróleo.

Para garantizar el apriete entre las tapas y el cilindro se colocó un empaque de nitrilo de 2 mm de espesor sobre cada tapa. El empaque mantuvo uniforme el contacto de superficies entre la tapa y el cilindro y optimizó el sello del compartimiento al distribuir la presión ejercida entre las dos tapas con el cilindro. La Figura 6 presenta el diseño final del compartimiento seco.

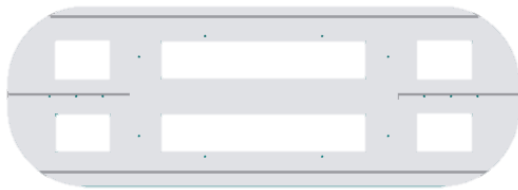


Figura 9: Perfil Estructural.

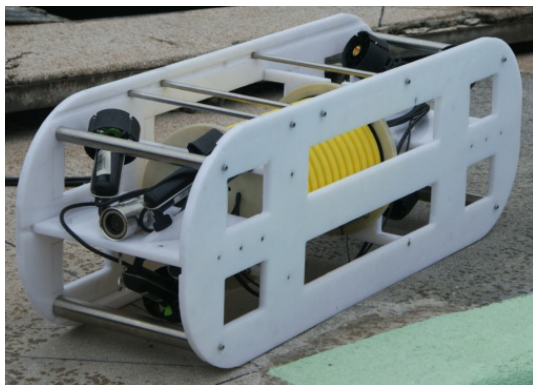


Figura 10: Submarino USFQ.

Chasis

Para el diseño y construcción de la estructura del Submarino USFQ se utilizó planchas solidas de polietileno de alta densidad HDPE (*High Density Polyethylen*). Se diseñó dos módulos; uno llamado base motor y el otro llamado compartimento seco. Cada elemento que conforma la estructura y cada módulo del submarino fueron manufacturados en el taller mecánico de la USFQ.

Para lograr los 60° de separación entre motores se diseñó un perfil triangular de HDPE con 30° de inclinación. Cada motor estuvo sujeto sobre un perfil triangular con tornillos de acero inoxidable. La cámara de video se alinea en el centro de la plancha del módulo de motores, esto permite al operador controlar los movimientos del submarino utilizando la transmisión de video desde la cámara. La figura 7 presenta el diseño de la base motor.

Se utilizaron dos barras de HDPE para sujetar el modulo en la parte delantera y dos barras en forma de T para sujetar el modulo en la parte trasera del submarino (Figura 8). Las barras alinean al compartimento en el centro de la estructura para mantener la estabilidad y flotabilidad del submarino [21].

La estructura que protege a los módulos del submarino está compuesta por dos perfiles laterales de HDPE (Figura 9) y por ejes de acero inoxidable. Los extremos del perfil presentan bordes circulares para reducir la resistencia del agua al movimiento de la estructura; en el área interior de la plancha se removió material en forma de rectángulos para reducir el peso del submarino y reducir el área de contacto del submarino con el agua.

El perfil estructural presenta 4 canales internos que son utilizados para alinear las bases de motores y los ejes

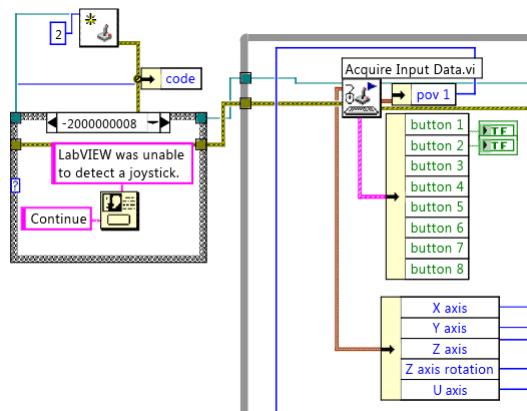


Figura 11: Programa Inicialización del Joystick.

de acero inoxidable con el perfil para armar la estructura. Los perfiles laterales presentan orificios de 6 mm de diámetro a lo largo de los canales y alrededor de los rectángulos interiores que permiten el ensamble del compartimento seco y las barras de acero con la estructura. Los ejes de acero inoxidable cumplen varias funciones: el diámetro de los ejes también varía su peso y con esto se puede controlar la flotabilidad del submarino; igualmente aumentando o reduciendo el número de ejes.

Al ensamblar las bases de motores, el compartimento seco con los perfiles de la estructura se completó el ensamble del Submarino USFQ como se presenta en la Figura 10.

Bloque de Potencia

El banco de baterías está formado por 4 baterías recargables; dos baterías de 12 V con 12 Ah, y dos baterías de 6 V con 12Ah. Las baterías se conectaron en serie y paralelo para conseguir 18 V y 24 Ah. Esta configuración permite alimentar de forma continua al procesador, controladores y motores por dos horas. El bloque de baterías tiene un interruptor ON/OFF el cual permite pasar la corriente al cRIO, controladores y motores. Para la transmisión de potencia al submarino se instaló cables de conducción eléctrica que puedan soportar una corriente aproximada de 30 Amperios.

Flotabilidad

Para lograr una flotabilidad neutra con el submarino fue necesario aumentar el peso de la estructura en 9.3 kg utilizando varios ejes de acero inoxidable. Se distribuyeron los diferentes ejes entre los perfiles laterales de la estructura para balancear el peso de la estructura y mantener la estabilidad del submarino. Al mantener una simetría al distribuir los pesos se logró posicionar el centro de gravedad del submarino en la parte inferior de la estructura; de esta manera, el submarino mantiene

Elementos	Consumo Máximo (amps)
Motores	25.26
cRIO	0.33

Tabla 3: Consumo máximo de componentes.

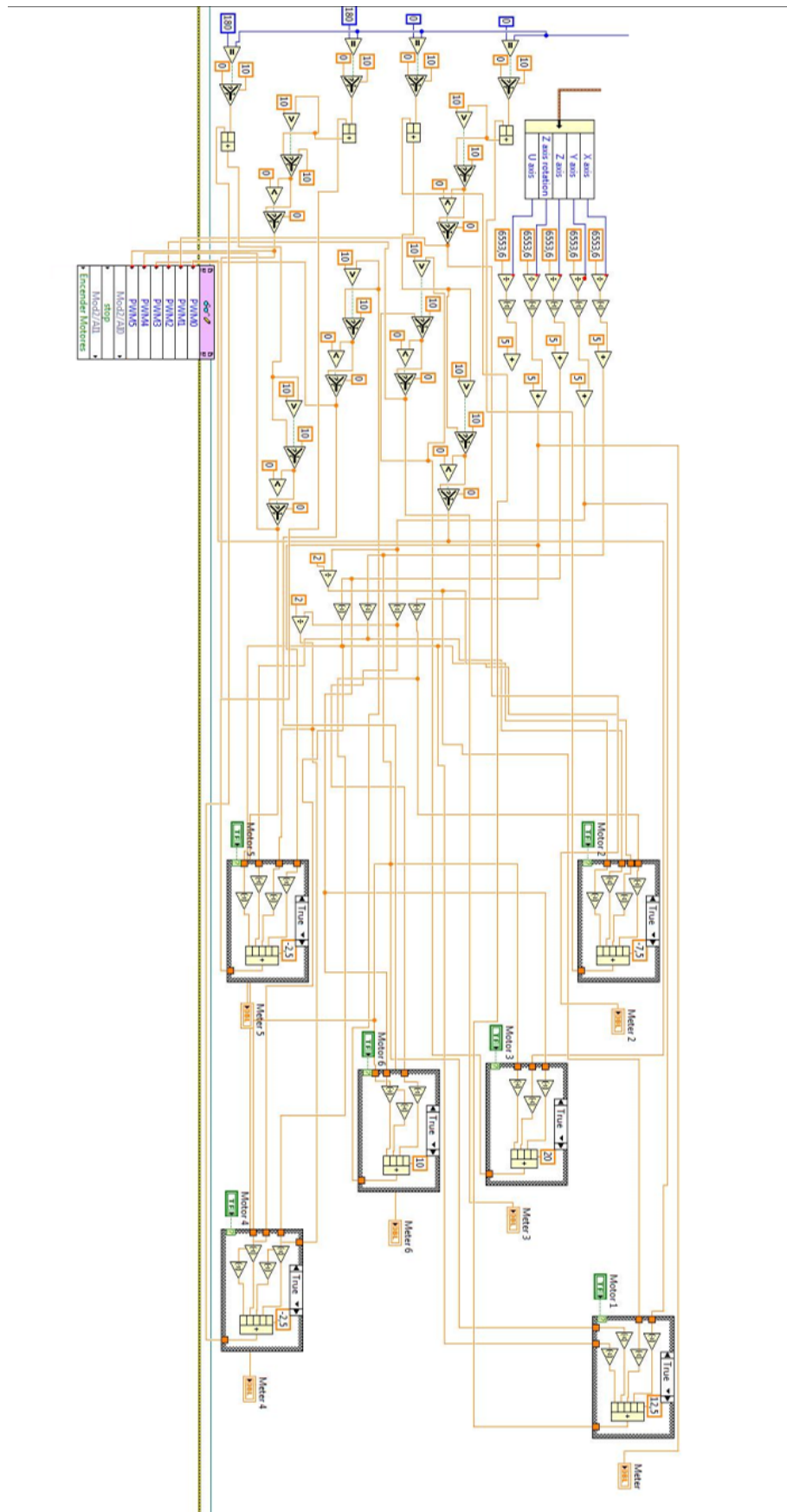


Figura 12: Subrutina para control de motores.

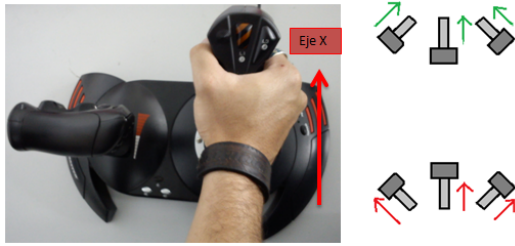


Figura 13: Movimiento horizontal.

una posición de equilibrio después de cualquier perturbación o agitación del entorno [22].

Programación e Interfaz

Control de Movimiento

Como medio de control remoto se utilizó un *Joystick* con conexión USB al computador. El *Joystick* tiene 5 ejes y 12 botones que son programables. Para controlar el movimiento del submarino, el programa relaciona las señales emitidas por el movimiento de los ejes del *Joystick* y las señales de salidas del cRIO enviadas a los controladores de motores. A cada movimiento del *Joystick* según la dirección y eje corresponde una señal enviada al controlador de cada motor permitiendo obtener un movimiento determinado.

La programación se realizó en LabView y diferentes subrutinas realizan diferentes funciones, todas fueron compiladas y cargadas al procesador cRIO. La parte del programa encargada del control de movimiento realiza una inicialización del joystick y hace un reconocimiento de todos los botones y posibles movimientos de ejes del joystick (Figura 11). Dentro del programa se utilizó 4 de los 12 botones; uno para capturar fotografías, otro para grabar el video, y también se utilizó los otros dos para subir o bajar la cola, lo que nos ayuda al control y posicionamiento del vehículo submarino. Se utilizó 3 de los 5 ejes, para moverse adelante y atrás, para subir y bajar, y el último para girar en el propio eje.

Para controlar el movimiento del submarino, el programa relaciona las señales emitidas por el movimiento de los ejes del joystick y las señales de salidas del Crio enviadas a los controladores de motores. A cada movimiento del joystick según la dirección y eje corresponde una señal enviada al controlador de cada motor permitiendo obtener un movimiento determinado (Figura 12).

La Figura 13 presenta como el movimiento del mando del joystick en el eje principal permite a la plataforma realizar movimientos de traslación en la dirección deseada.

Rotar el eje z del *joystick* permite que el submarino realice una rotación sobre el eje vertical. Los motores trabajarán en direcciones opuestas (Figura 14).

De igual manera mover el eje u del *joystick* permite que el submarino se traslade en el eje vertical. El movimiento es el resultado del trabajo en direcciones opuestas y



Figura 14: Rotación con eje vertical.

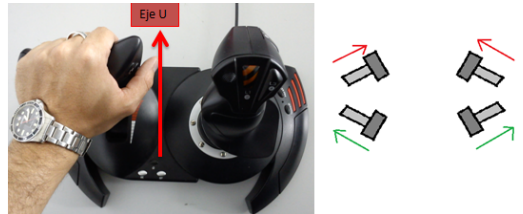


Figura 15: Movimiento vertical.

la alineación de los motores con la configuración a 60° (Figura 15).

Con la configuración de motores a 60° , el submarino puede realizar movimientos horizontales, verticales, y rotaciones sobre los 3 ejes, y cualquier combinación de los movimientos mencionados anteriormente.

Adquisición de audio y video

La subrutina encargada de la adquisición de video y sonido (Figura 16) realiza una inicialización de la cámara y recibe las imágenes de la misma. Así como también recibe el audio del micrófono.

El programa sincroniza las dos actividades, y puede grabar un video en formato AVI o tomar fotografías en formato JPG; además, reproduce el video en tiempo real en la interface para poder ver lo que está sucediendo al frente del submarino. El programa tiene un filtro para los códec de video y está definido para que el tamaño y calidad del video no sea muy exigente en términos de memoria del computador. De esta forma se garantiza que el control de la plataforma sea estable durante la inmersión y adquisición de imágenes y video.

HMI (Human Machine Interface)

La interface gráfica (Figura 17) permite la interacción entre el operario en superficie y el submarino que se encuentra bajo el agua [23]. El usuario podrá controlar y maniobrar al submarino con un dispositivo de control remoto.

El diseño permite al usuario observar en tiempo real la imagen de video capturada por la cámara de video. Un conjunto de pulsadores en la pantalla permite al usuario encender los motores, grabar video, tomar fotografías y apagar el programa [24].

Indicadores de potencia para cada motor fueron colocados con la configuración de los motores. Los indicadores permitirán al usuario de la plataforma mantener un control de velocidad y correcto funcionamiento de los motores en relación al control del Joystick.

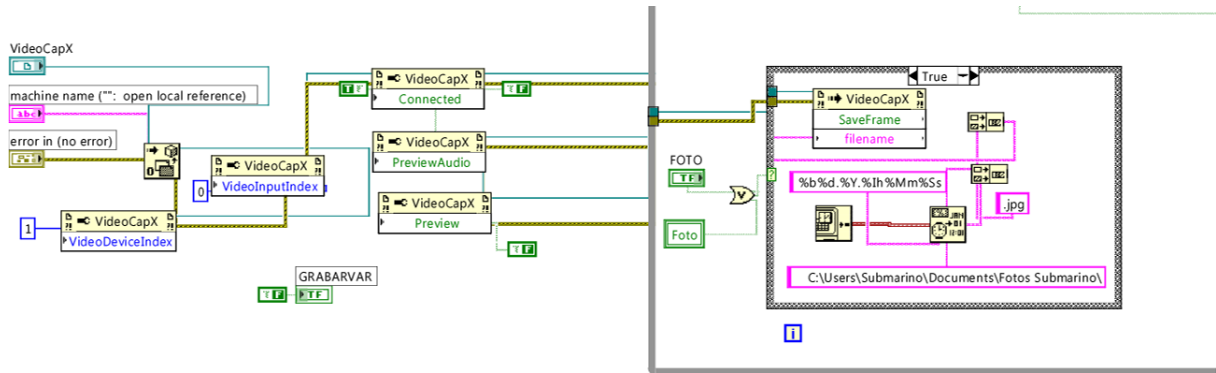


Figura 16: Subrutina para tomar fotografías.

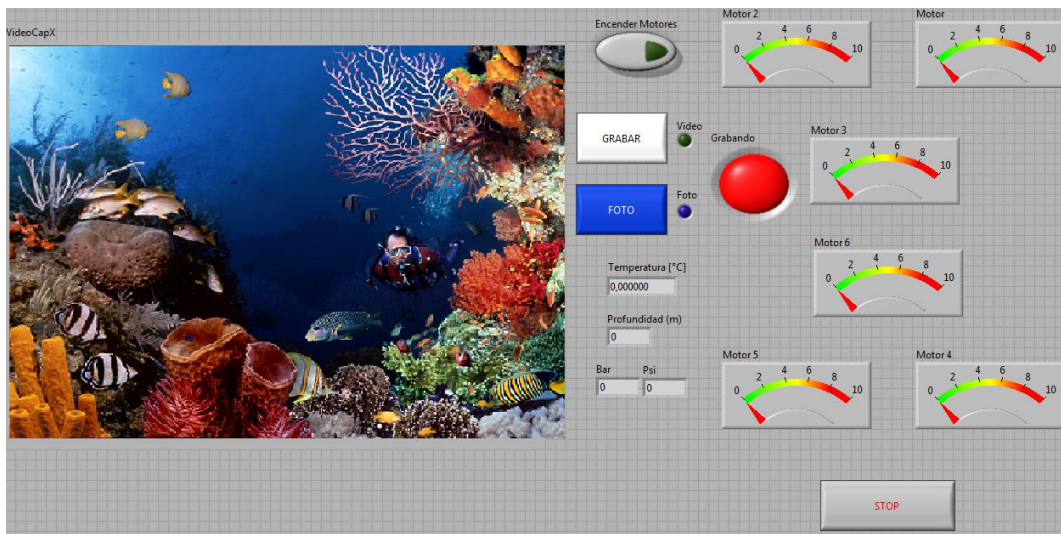


Figura 17: Interfaz Grafica.

Resultados

Pruebas en Piscina

Se realizó una prueba de velocidad con el submarino sumergido a 2 m recorriendo una distancia de 25 metros en línea recta; la segunda prueba fue una de velocidad de ascenso desde el fondo de la piscina hasta la superficie; la tercera prueba constituyó determinar el tiempo que el submarino tarda en girar 360°. Se calcularon las velocidades promedio que tiene el submarino en los distintos tipos de movimientos, y los resultados se muestran en las Tablas 4 y 5.

La velocidad obtenida en las pruebas fue menor a la velocidad esperada debido a la fricción y flotabilidad del cable de control y potencia.

Velocidad en Línea Recta				
Distancia [m]	Tiempo [sec]	Tiempo Promedio [sec]	Velocidad [m/s]	Velocidad [nudos]
25	29.4	30	0.8	1.6
25	30.5			

Tabla 4: Prueba de velocidad horizontal.

Pruebas en aguas abiertas

Para realizar las pruebas en aguas abiertas se instaló 60 metros de cable de acero inoxidable de 1/8 de pulgada como método de seguridad. Esta línea de seguridad mantiene siempre conectados al submarino con la embarcación en superficie.

Las pruebas fueron realizadas en la costa Ecuatoriana, en la Isla de Salango, sector de Puerto López, provincia de Manabí. Se realizaron 3 pruebas a diferentes profundidades para determinar cómo se comportaba el submarino en diferentes presiones. Otro objetivo era probar el funcionamiento de la cámara, hidrófono, así como también la sincronización del joystick, el programa de Lab-View y motores.

Prueba # 1 Hermeticidad del compartimiento Seco

Se llevó al submarino a una profundidad de 30 m por 20 minutos solo con la cámara funcionando pero sin com-

Velocidad de Ascenso				
Distancia [m]	Tiempo [sec]	Tiempo Promedio [sec]	Velocidad [m/s]	Velocidad [nudos]
2	10.4	10.0	0.2	0.4
2	9.7			

Tabla 5: Prueba de velocidad horizontal.

ponentes eléctricos dentro del compartimento seco. El objetivo de esta prueba era probar el funcionamiento de la cámara y el hidrófono, grabar video, tomar fotos, y determinar si el compartimento podía soportar la presión de 0.4 MPa. La prueba fue supervisada por dos buzos que iban observando si existía filtración de aire entre los conectores o tapas del compartimento seco.

Al finalizar la prueba y confirmándose que no hubieron filtraciones de agua se procedió a incluir al procesador cRIO y los demás componentes electrónicos de control dentro del compartimento seco.

Prueba # 2 Maniobrabilidad, Flotabilidad y Agilidad

Se llevó al submarino a una profundidad de 15 m durante 60 minutos.

El submarino funcionó como se había esperado en esta segunda inmersión; la sincronización entre el *joystick*, el programa de LabView y motores no presentó ningún problema. El vehículo respondía al mando del operario, la cámara e hidrófono funcionaron bien y permitieron grabar videos con audio y capturar diversas fotografías. Un inconveniente fue el peso del cable de control que disminuyó ligeramente la flotabilidad del submarino, cuando la longitud de cable desde la embarcación superaba los 20 metros.

Prueba # 3 Inmersión a 50 metros de profundidad

Se llevó al submarino a una profundidad de 50 metros durante 20 minutos. No se incluyeron ni componentes eléctricos ni supervisión de buzos en esta prueba, pero la cámara e hidrófono estuvieron funcionando. No hubo filtraciones de agua en esta prueba.

Posteriormente, se realizó una inmersión a una profundidad mayor a 50 metros, para determinar si el submarino soportaba mayores presiones.

Posterior a la recolección del Submarino se detectó que el cable de potencia se había estirado demasiado y la prensa estopa del cilindro no pudo sujetar el cable con la suficiente fuerza para impedir el movimiento del cable y evitar el ingreso de agua al compartimento seco. Es necesario para futuras pruebas evitar que el cable de potencia cargue toda la tensión de fuerzas durante la manipulación del submarino y sujetarlo en algún punto fijo fuera del compartimento seco.

Conclusiones

La estructura de submarino puede sumergirse a 50 metros de profundidad sin poner en riesgo a los componentes internos del submarino. El diseño del compartimento seco impidió que el agua ingrese al compartimento durante una inmersión a 50 metros de profundidad.

El Submarino USFQ tiene flotabilidad negativa. El peso del cable no se consideró en los cálculos de flotabilidad. Durante las pruebas en mar abierto el peso del cable

afectó la flotabilidad del submarino. Durante las pruebas en mar abierto fue necesario redistribuir los ejes de acero inoxidable para estabilizar el submarino.

La cámara de video y el hidrófono funcionaron al mismo tiempo logrando tomar fotos, grabar audio y video; y permitieron al usuario observar en tiempo real lo que sucedía al frente del submarino durante una inmersión.

La construcción modular permitió un fácil ensamblado y mantenimiento del submarino.

El cable de seguridad no distribuyó la tensión resultante del peso del Submarino. Por mala manipulación, el cable de potencia soportó toda la carga del peso y como resultado se filtró agua dentro del compartimento seco a través del cable de potencia.

El software LabView simplificó el lenguaje de programación y facilitó la integración de los diferentes componentes de control en una sola interfaz amigable para cualquier usuario.

Referencias

- [1] Bleicher, A. 2010. "Spectrum IEEE". <<http://spectrum.ieee.org/robotics/industrial-robots/the-gulf-spills-lessons-for-robotics/0>>.
- [2] Altshuler, R. 2004. "ORCA-VII: An Autonomous Underwater Vehicle". Cambridge.
- [3] White, F. 2008. "Fluid Mechanics". *Sixth Edition*. New York: McGraw-Hill.
- [4] Bernier, M.; Foley, T. 2010. "Latis II Underwater Remotely Operated Vehicle Technical Report". Maine.
- [5] Anderson, E. et al. 2004. "SEA WOLF II Autonomous Underwater Vehicle". North Carolina.
- [6] Schilling Robotics. 2010. "Schilling Robotics". <<http://www.schilling.com/Pages/default.aspx>>.
- [7] Arocha, C. et al. 2005. "Control Teleoperado del Robot Submarino de Estructura REMO" : 1.
- [8] Arcega, C.; Burch, A. 2006. "Project Janus". Carl Hayden.
- [9] Marine Technology Society. 2010. "Remotely Operated Vehicle Committee of the Marine Technology Society". <<http://www.rov.org>>.
- [10] Anderson, J. 2001. "Fundamentals of Aerodynamics". New York: McGraw Hill.
- [11] Homebuilt ROVs. 2003. <<http://www.homebuiltrovs.com/>>.
- [12] Ocean Systems, Inc. 2008-2010. "Splash Cam Underwater Video Camera". <<http://www.splashcam.com/>>.
- [13] Deep Sea Systems. 2010. "Deep Sea - Remotely Operated Vehicles (ROVs)". <<http://www.deepseasystems.com/>>.

- [14] SeaBotix. 2010. <http://www.seabotix.com/products/auv_thrusters.htm>.
- [15] LLC. 2004. "Dimension Engineering". *Dimension Engineering*. <<http://www.dimensionengineering.com/Sabertooth2x10.htm>>.
- [16] National Instruments. 2013. <<http://www.ni.com/community/esa/>>.
- [17] Autodesk. 2010. <<http://www.autodesk.com/>>.
- [18] Owens, D. 2009. "Rex 2: Design, construction, and operation of an unmanned underwater vehicle". *Tesis. Cambridge*.
- [19] Shigley, J. 2008. "Diseño en Ingeniería Mecánica". *Mexico D.F.: McGraw-Hill*.
- [20] Gonzalez, L. 2004. "Design, modelling and control of an autonomous underwater vehicle". *Tesis. Crawley*.
- [21] San Francisco Maritime National Historical Park. 2004. "The fleet type Submarine Chap 5 Bouyancy and Stability". <<http://www.maritime.org/fleetsub/chap5.htm>>.
- [22] Werneli, R. 1999. "AUV's The Maturiry of the Technology". *Paper. San Diego: Space and Naval Warfare Systems Center*.
- [23] ROVs. 2010. "Ocean Modules". *Ocean Modules*. <<http://www.ocean-modules.com/>>.
- [24] KYSTDESIGN. 2007. "Kyst-design Sub Sea Technology". <<http://www.kystdesign.no/pls/apex/f?p=10213:7120:246726178220870:::p:home>>.