

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



Profesores Patrocinantes:

Gabriel Saavedra Mondaca,
PhD.
Sebastián Godoy Medel,
PhD.

Tesis presentada en la Facultad de Ingeniería Eléctrica
para optar al grado académico de
“Magíster en Ciencias de la Ingeniería c/m en Ingeniería Eléctrica”

**Estimación de distancia por medio de un Drone
para la entrada de un buque a un dique seco**

Concepción, Mayo de 2024

Hugo Alejandro Domínguez Carvajal

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Profesor Patrocinante:
Gabriel Saavedra Mondaca, PhD
Sebastián Godoy Medel, PhD.

Estimación de distancia por medio de un Drone para la entrada de un buque a un dique seco



Hugo Alejandro Domínguez Carvajal

Inscripción de tesis de postgrado
“Magíster en Ciencias de la Ingeniería c/m en Ingeniería Eléctrica”

Mayo 2024

RESUMEN

El proceso de entrada de un buque al dique implica diversas personas, desde un práctico hasta un Dock Máster que dirige la maniobra. Durante esta operación, se aseguran las espías del buque a las bitas del dique con la supervisión del Dock Máster mediante comunicación UHF. La precisión del cálculo de la posición del buque es un desafío debido a las limitadas referencias visuales del Dock Máster. Tras el ingreso, se requieren correcciones a medida que se extrae el agua del dique. Errores en las decisiones del Dock Máster, fallos en la comunicación o reacciones lentas pueden ocasionar accidentes o daños al buque y al dique.

El uso del DRONE y las técnicas de procesamiento de imagen podrían darle al Dock Máster una visión global y superior del posicionamiento del buque, con un cálculo de distancia mucho más preciso que la estimación visual que realiza el Dock Máster.

En el presente documento se propone una metodología novedosa para apoyar visualmente al Dock Máster en la maniobra, utilizando la resolución espacial y temporal para determinar el correcto posicionamiento del buque dentro del dique. Esta metodología aplicada a un algoritmo apunta a reducir la resolución temporal del video para poder procesar un número menor de imágenes sin perder información, estimar la dirección de movimiento reduciendo la resolución espacial y aplicando el optical flow entre imágenes consecutivas y calcular la distancia al dique usando segmentación R, G, B e identificación de objetos simultáneamente. El propósito de esta metodología de variar la resoluciones temporales y espaciales es disminuir significativamente los recursos computacionales objeto acelerar el procesamiento de datos, que es crucial en aplicaciones en tiempo real.

Los resultados muestran que la metodología propuesta utilizando los ángulos obtenidos en el Optical Flow y las distancias del buque dentro del dique logran determinar el error del posicionamiento del buque durante la maniobra.

Esta metodología optimizaría el procesamiento del video, evitando procesar todos los frames, seleccionando solo los necesarios sin perder información.

ÍNDICE

RESUMEN	3
ÍNDICE	4
LISTADO DE FIGURAS	5
CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN	8
1.1. INTRODUCCIÓN	8
1.2. ESTADO DEL ARTE	12
1.3. HIPÓTESIS	21
1.4. OBJETIVOS	21
1.4.1. <i>Objetivo General</i>	21
1.4.2. <i>Objetivos Específicos</i>	21
1.4.3. <i>Limitaciones del trabajo</i>	22
CAPITULO 2. METODOLOGÍA	23
2.1. ADQUISICIÓN DE IMÁGENES	24
2.2. OPTICAL FLOW	25
2.2.1. <i>Método Lucas-kanade</i>	28
2.2.2. <i>Método Lucas Kanade Derivate of Gaussian [19]</i>	31
2.2.3. <i>Aplicación del método LKDoG en el video</i>	32
2.3. CÁLCULO DE DISTANCIAS	33
2.3.1. <i>Segmentación</i>	34
2.3.2. <i>Conteo de pixeles</i>	36
2.4. ESTRUCTURACIÓN ESPACIO -TEMPORAL	36
CAPITULO 3. RESULTADOS FINALES	39
3.1. ADQUISICIÓN DE IMÁGENES	39
3.2. OPTICAL FLOW	41
3.3. CÁLCULO DE DISTANCIAS	58
3.3.1. <i>Cálculo FOV</i>	58
3.3.2. <i>Identificación del muelle</i>	60
3.3.3. <i>Cálculo de distancias del buque al muelle</i>	65
3.4. ESTRUCTURA ESPACIO-TEMPORAL	74
CAPITULO 4. CONCLUSIONES	80
BIBLIOGRAFÍA	82

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1 Diferentes tipos de diques y sus procesos de llenado para la entrada de un buque. (a) Buque en un dique flotante [Elaboración propia]. (b) Proceso de un dique flotante [3]. (c) Buque en un dique seco [Elaboración propia]. (d) Proceso de un dique seco [1].	9
Figura 2 Ingreso de un Buque a Dique [Elaboración propia]	10
Figura 3 Buque sentado en camadas [2]	12
Figura 4 Corrigiendo la proa del buque por tensión de espías [Elaboración propia]	13
Figura 5 Sistema de posicionamiento por radares [4]	14
Figura 6 Estacionamiento automático de vehículos [7]	15
Figura 7 Estacionamiento automático de vehículos [6]	15
Figura 8 Tipos de CCD [Elaboración propia]	16
Figura 9 Comparación CC y CMOS [15]	17
Figura 10 Comparación píxel cámara con píxel imagen [12]	17
Figura 11 Distancia al objeto [8]	18
Figura 12 Cambio de perspectiva [9]	19
Figura 13 Ejemplo de cambio de perspectiva [Elaboración propia]	20
Figura 14 Diagrama general del proceso [Elaboración propia]	23
Figura 15 Drone DJI FPV [16]	24
Figura 16 Ejemplo de un objeto moviéndose entre 2 Frames [Elaboración propia]	26
Figura 17 Visualización lineal del Optical Flow [Elaboración propia]	28
Figura 18 Proceso de cálculo del Optical Flow en distintas resoluciones [Elaboración propia]	33
Figura 19 Proceso para calcular distancias [Elaboración propia]	34
Figura 20 Imagen a segmentar RGB [Elaboración propia]	35
Figura 21 Imagen RGB segmentada [Elaboración propia]	35
Figura 22 Proceso para determinar la estructuración espacio temporal [Elaboración propia]	37
Figura 23 Figura para demostrar la métrica [Elaboración propia]	38
Figura 24 Detalle de los videos grabados [Elaboración propia]	39
Figura 25: Correlación del primer frame con los primeros 500 frames sin variar la resolución temporal [Elaboración propia]	40
Figura 26 Correlación de los primeros 500 frames al variar la resolución temporal [Elaboración propia]	41
Figura 27 Optical Flow Fullframe (a) Representación del optical flow de 2 frames consecutivos. (b) Representación del optical flow de todos los frames. (c) Representación del optical flow de 1 vector por frame. (d) Representación de 1 vector por frame del video.	42
Figura 28 Gráfico de ángulos de la representación de 1 vector del Optical FLOW de todos los Frames [Elaboración propia]	43
Figura 29 Histograma de los ángulos [Elaboración propia]	43
Figura 30 Optical Flow Recortado (a) Representación del optical flow de 2 frames consecutivos. (b) Representación del optical flow de todos los frames. (c) Representación del optical flow de 1 vector por frame. (d) Representación de 1 vector por frame del video.	44
Figura 31 Gráfico de ángulos de la representación de 1 vector del Optical FLOW de todos los Frames [Elaboración propia]	45
Figura 32 Histograma de los ángulos [Elaboración propia]	45

Figura 33 Optical Flow máscara (a) Optical flow representado en 1 vector de 6 frames centrado en el origen. (b) Optical flow representado en 1 vector de todos los frames centrado en el origen.

[Elaboración propia] _____ 46

Figura 34 Gráfico de ángulos de la representación de 1 vector del Optical Flow de todos los Frames

[Elaboración propia] _____ 46

Figura 35 Histograma de los ángulos [Elaboración propia] _____ 47

Figura 36 Proceso de suma de vectores [Elaboración propia] _____ 48

Figura 37 Proceso de suma de vectores [Elaboración propia] _____ 48

Figura 38 Tabla comparación resoluciones distribución normal [Elaboración propia] _____ 49

Figura 39 Proceso entrada a dique 720p recortado [Elaboración propia] _____ 50

Figura 40 Proceso entrada a dique 720p con máscara [Elaboración propia] _____ 51

Figura 41 Proceso entrada a dique 144p recortado [Elaboración propia] _____ 52

Figura 42 Proceso entrada a dique 144p con máscara [Elaboración propia] _____ 53

Figura 43 Optical Flow 720p recortado [Elaboración propia] _____ 54

Figura 44 Optical Flow centrado en un vector 720p [Elaboración propia] _____ 55

Figura 45 Optical Flow 144p [Elaboración propia] _____ 56

Figura 46 Optical Flow centrado en 1 vector 144p [Elaboración propia] _____ 57

Figura 47 Segmentación para identificar el muelle [Elaboración propia] _____ 60

Figura 48 Segmentación para mostrar el buque [Elaboración propia] _____ 61

Figura 49 Proceso para identificar el muelle por la proa [Elaboración propia] _____ 61

Figura 50 Suma de 1's en el sector demarcado [Elaboración propia] _____ 62

Figura 51 Identificación del mínimo local [Elaboración propia] _____ 62

Figura 52 Posición del muelle por la proa a lo largo del video [Elaboración propia] _____ 63

Figura 53 Proceso para identificar el muelle por estribor [Elaboración propia] _____ 63

Figura 54 Sumas de 1's en el sector demarcado [Elaboración propia] _____ 64

Figura 55 Identificación mínimo local [Elaboración propia] _____ 64

Figura 56 Posición del muelle por estribor a lo largo del video [Elaboración propia] _____ 65

Figura 57 Suma de píxel para cálculo de distancia por la proa [Elaboración propia] _____ 66

Figura 58 Suma de 1's por la proa para cálculo de distancias [Elaboración propia] _____ 66

Figura 59 Distancia del buque al muelle en el frame 1000 [Elaboración propia] _____ 67

Figura 60 Distancia al muelle en píxel [Elaboración propia] _____ 68

Figura 61 distancia al muelle en metros [Elaboración propia] _____ 68

Figura 62 Distancia proa a estribor [Elaboración propia] _____ 69

Figura 63 Distancia centro a estribor [Elaboración propia] _____ 69

Figura 64 Distancia popa a estribor [Elaboración propia] _____ 69

Figura 65 Representación de todas las distancias a estribor [Elaboración propia] _____ 69

Figura 66 Posición del buque en el frame 233 [Elaboración propia] _____ 70

Figura 67 Distancia del buque en el frame 233 [Elaboración propia] _____ 70

Figura 68 Posición del buque en el frame 1650 [Elaboración propia] _____ 71

Figura 69 Distancia del buque en el frame 1650 [Elaboración propia] _____ 71

Figura 70 Posición del buque en el frame 3081 [Elaboración propia] _____ 72

Figura 71 Distancia del buque en el frame 3081 [Elaboración propia] _____ 72

Figura 72 Distancia calculadas con respecto al margen en el cual se debería mantener [Elaboración propia] _____ 73

Figura 73 (a) Ángulos del optical flow con la distancia a proa. (b) Ángulos del optical flow con la distancia de popa al muelle. (c) Ángulos del optical flow con la distancia del centro al muelle. (d) Ángulos del optical flow con la distancia de proa al muelle. [Elaboración propia] _____ 75

Figura 74 Distancia del centro al muelle seleccionando los frame del 1400 al 1542 [Elaboración propia]	76
Figura 75 Métrica de los frame seleccionados [Elaboración propia]	76
Figura 76 Buque entrando a dique [Elaboración propia]	77
Figura 77: Buque bien posicionado [Elaboración propia]	78



CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

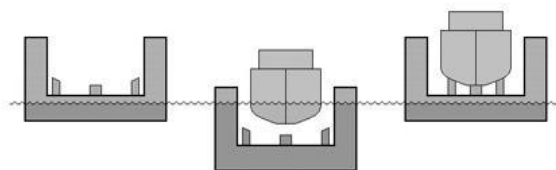
Un Astillero es una industria donde se construyen y reparan buques, ya sean buques pesqueros, yates, buques mercantes, de pasajeros o buques militares. El hecho de ocupar un buque para el propósito por el cual fue construido trae consigo un desgaste en su parte estructural, mecánica de propulsión y electrónica o eléctrica en sus sistemas, lo cual hace necesario que estos entren a un periodo de mantenimiento preventivo objeto revisar sus sistemas para encontrar y corregir problemas menores antes que estos provoquen alguna falla o un mantenimiento correctivo en caso de que una falla no permita que el buque desarrolle su propósito con normalidad. Existen sistemas vitales para la navegación de un buque que se encuentran por debajo de la línea de flotación, como son la línea de propulsión de un buque, generadores, bombas de lastre, bow thruster, hélice, timón, corredera, ecosonda, entre otros, sistemas que al navegar son constantemente monitoreados y que entregan información de relevancia al capitán de la nave objeto realizar una navegación segura. Si alguno de estos sistemas en su monitoreo presenta alguna falla estos son diagnosticado a bordo por el personal del buque, pero si esta falla es mayor, los sistemas que se encuentran por debajo de la línea de flotación deben ser diagnosticados dentro de un dique.

Un dique es una construcción donde los buques acceden para realizar mantenimiento preventivo y correctivo a sus sistemas que se encuentran por debajo de la línea de flotación. Los diques están contruidos con una estructura de fondo, laterales y una puerta que permita llenar o vaciar el dique con agua.

Existen 3 tipos de diques dependiendo del tamaño de buques que recibirá, estos pueden ser diques flotantes, diques secos y varaderos. El principio fundamental de un dique flotante y un dique seco es el mismo, el dique se llena de agua para que el buque pueda acceder a él y cuando se encuentra dentro se cierra la compuerta del dique, para posteriormente retirar el agua que se encuentra en el interior. En el caso de un dique seco, el agua es retirada por medio de bombas, hasta dejar el buque sentado en una estructura que le permitirá mantenerse estable durante todo el periodo que se encuentre dentro de él. En el caso de un dique flotante, el agua es vaciada del interior de los estanques hasta que el dique flotante vuelva a flotar.



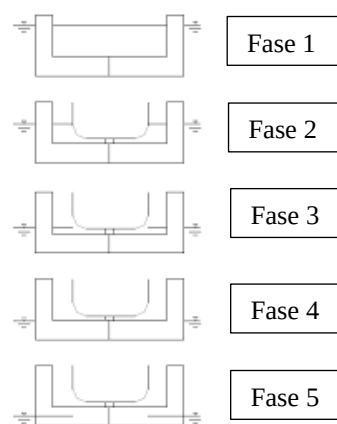
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 1 Diferentes tipos de diques y sus procesos de llenado para la entrada de un buque. (a) Buque en un dique flotante [Elaboración propia]. (b) Proceso de un dique flotante [3]. (c) Buque en un dique seco [Elaboración propia]. (d) Proceso de un dique seco [1].

A diferencia de los diques flotante o diques secos, el varadero es una especie de estacionamiento, en donde una estructura se posiciona por debajo del buque cuando se encuentra a flote, luego por medio de bombas lo retira del agua para luego acceder a un patio donde lo puede posicionar para efectuar el mantenimiento sin la necesidad de ocupar un dique seco o flotante.

La maniobra de entrada a dique es una maniobra de alta complejidad y exactitud donde participan 3 entes; en primer lugar, se encuentra el buque con su respectiva dotación, luego están los remolcadores que apoyan a posicionar el buque a la entrada del dique y en último lugar se encuentra el Astillero con el encargado de la maniobra que es el Dock Máster y el personal de apoyo para poder realizar la maniobra.

El inicio de la maniobra comienza días previo, con el posicionamiento de las camadas, que son estructuras de cemento y madera que están ubicadas en el fondo del dique y es donde el buque

finalmente quedará ubicado luego que el agua del dique se haya sacado. Estas camadas son diferentes para cada buque ya que dependen del diseño del buque. Dependiendo del horario de la maniobra de entrada al dique, que normalmente se realiza con marea alta para que el calado del buque no le afecte en el suelo del mar se comienza con el llenado del dique Figura N°1 (d) Fase 1. El llenado del dique se realiza con la compuerta del dique cerrada y abriendo válvulas para el ingreso del agua, hasta que la altura del agua sea del mismo nivel de la altura del mar que se encuentra detrás de la compuerta, dependiendo del tamaño del dique este proceso puede durar entre 3 a 5 horas. Teniendo el dique lleno de agua y con una hora de antelación se realiza el retiro de la compuerta del dique para poder realizar la maniobra.

Existen dos modalidades en las cuales los buques realizan el ingreso a dique, en primer cuando el buque no tiene propulsión y los remolcadores toman al buque desde donde se encuentre atracado y lo llevan hasta el dique y por otra parte se encuentra cuando el buque viene con propulsión y puede hacer la aproximación de manera autónoma hasta una distancia de 200 metros previo a la entrada al dique donde, los remolcadores lo tienen que asistir debido a que la corriente y viento lo afectan, hasta dejarlo presentado frente al dique.

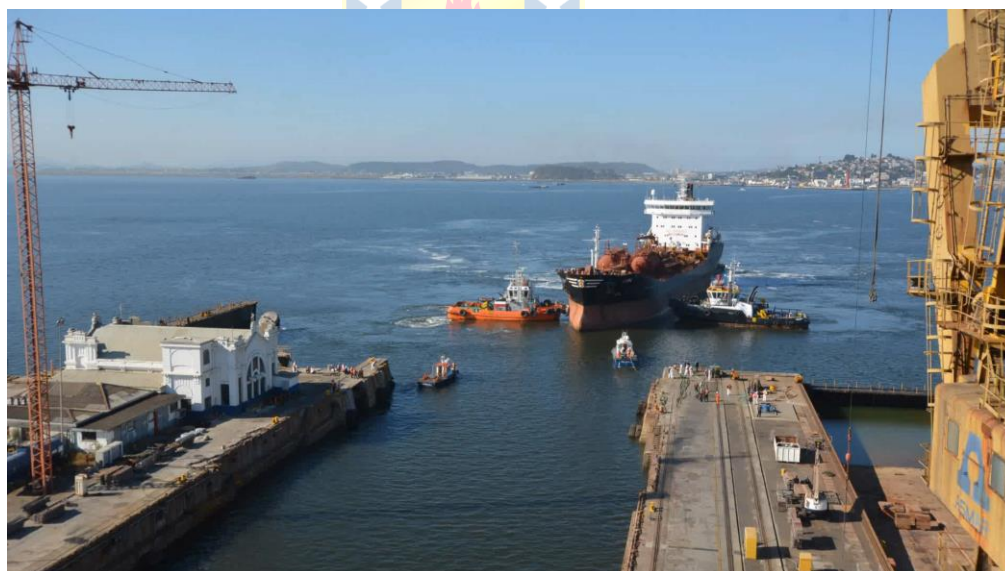


Figura 2 Ingreso de un Buque a Dique [Elaboración propia]

Cuando el buque lanza la primera espía al personal que se encuentra por los costados del dique, la responsabilidad de la maniobra recae completamente en el Dock Máster, quien toma el control de los remolcadores dando instrucciones para posicionar el buque de mejor forma. La primera espía siempre va a proa Winche para poder tractar al buque y las espías posteriores van a los costados al

personal de maniobra que tomarán las espías y seguirán las órdenes del Dock Máster de hacerlas firmes en las bitas para poder maniobrar al buque dentro del dique, toda orden que del Dock Máster al personal de maniobra se realiza en forma manual. A medida que el buque va ingresando dentro del dique, el buque va lanzando más espías al personal de maniobra hasta tener un numero de 3 espías por banda, objeto maniobrar de mejor forma la proa y la popa del buque Figura N°1 (d) Fase 2.

Las dimensiones del dique son conocidas para el Dock Máster y las dimensiones del buque las hacen llegar con días previos para poder hacer la maniobra de colocar las camadas, por lo que el Dock Máster calcula visualmente la posición en la cual debería quedar el buque dentro del dique, posicionamiento que es importante puesto que cuando se retire el agua el buque debe quedar perfectamente posicionado en las camadas para que no afecte la estabilidad cuando no haya agua y las personas estén realizando los trabajos. El proceso de posicionar el buque, en su posición final, lo realiza el Dock Máster con el personal de maniobra cuando el determina que el buque se encuentra en una posición visualmente correcta. Posterior a que el buque se encuentra dentro del dique en una posición visualmente correcta, las espías son hechas firmes en las bitas para evitar que el buque cambie de posición, momento en el cual con el apoyo del personal de maniobra y remolcadores cierran la compuerta del dique para comenzar con el vaciado del agua.

El vaciado del agua se realiza mediante bombas que se encuentran en el fondo del dique, vaciado que se realiza de forma controlada, pues a medida que se está vaciando el agua, el personal de maniobra junto con el Dock Máster, van verificando la posición del buque hasta que este se encuentre completamente sentado en las camadas Figura N°1 Fase 3. Si se identifica que el buque no quedó en una posición correcta, se detiene el vaciado y el personal de maniobra junto con el Dock Máster realizan el ajuste del buque hasta llevarlo a la posición que corresponda. Una vez el buque se encuentra sentado en las camadas, se vacía el dique completamente hasta retirar toda el agua Figura N°1 (d) Fase 4 y Fase 5, para que el personal pueda ingresar ya sea al buque o al dique para comenzar los trabajos en él.



Figura 3 Buque sentado en camadas [2]

1.2. Estado del Arte.

La mayoría de los diques en el mundo utilizan personas para realizar el posicionamiento del buque dentro del dique, realizando tensión en las espías que son lanzadas desde el buque al dique para hacerlas firmes en las bitas. La orden de posicionamiento del buque la da el Dock Máster, quien visualmente aprecia la posición del buque, por medio de comunicación UHF, comunica a los jefes de las estaciones de maniobra hacer firmes las espías en las bitas dependiendo de la posición en la que se encuentra el buque. Si el buque está avanzando muy rápido, todas las estaciones de maniobra toman las espías y las hacen firmes en bitas que se encuentran atrás de los 90° relativo de donde se encuentra la posición del buque. Si el buque tiene la proa hacia un sentido, el lado contrario realiza la tensión de la espía de proa en una bita, objeto para la inercia que lleva hacia el lado contrario, logrando con esto enderezar la proa del buque a la referencia que tiene por delante y dependiendo del tamaño del buque la espía de popa del lado donde la proa se encuentra desviada, también hace firme la espía a una bita, para enderezar de forma más rápida el buque.

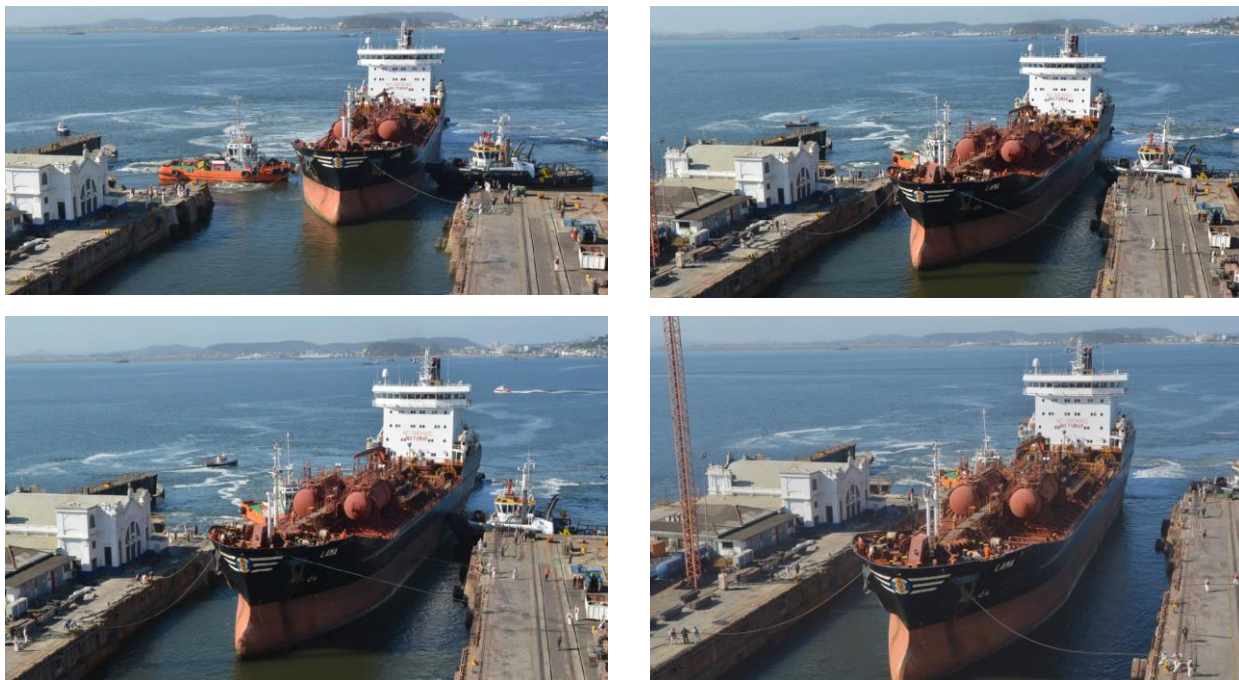


Figura 4 Corrigiendo la proa del buque por tensión de espías [Elaboración propia]

Otra forma que se ha implementado en la asistencia para el posicionamiento de los buques dentro de un dique es la de utilizar 7 radares en distintos puntos del perímetro del dique, que al emitir la onda se refleja en la estructura del dique, entregando la información de distancia y orientación del buque dentro del dique. Esta información es proyectada en una pantalla, entregando la información en forma numérica y de video de las distancias, por la proa, popa, babor y estribor del buque, que a su vez tendrán sensores de proximidad los cuales definirán ciertos umbrales para alertar al personal que opera las máquinas hidráulicas [4].

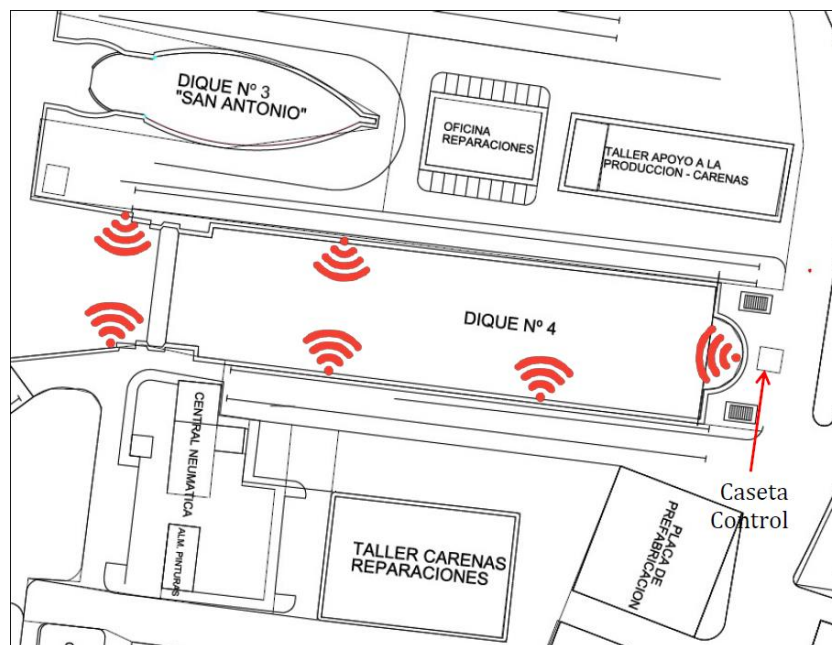


Figura 5 Sistema de posicionamiento por radares [4]

Por otra parte, y también desarrollado por la empresa Navantia, está el sistema de posicionamiento mediante DGPS [5]. Es un sistema de 3 ejes que entrega la información de la proa y los costados del buque con respecto al dique, además de la información del calado del buque con respecto a las camas en donde se debe posicionar. Este sistema móvil se instala en los buques previo a iniciar la maniobra en donde un operador configura el sistema y el software con respecto a las características del buque y del dique.

El sistema en todo momento indica la posición del buque, escora, calado y la tensión de los cables que están haciendo firme al buque dentro del dique para ayudar su posicionamiento por medio de control automático.

Entendiendo como los diques ocupan personas y otros sistemas en apoyo al posicionamiento del buque dentro del dique, que se investigó como los vehículos realizaban el estacionamiento automático y asistido, en donde nos encontramos con papers [6] [7] en donde el vehículo se posiciona a cierta distancia del auto en forma paralela y considerando los parámetros del vehículo como son el largo, ancho, tamaño de la rueda, cajón de distancia del vehículo, márgenes, el sistema calcula el movimiento que debe realizar considerando dos circunferencias que describe los dos movimientos que debe realizar para poder quedar en la posición final.



Figura 6 Estacionamiento automático de vehículos [7]

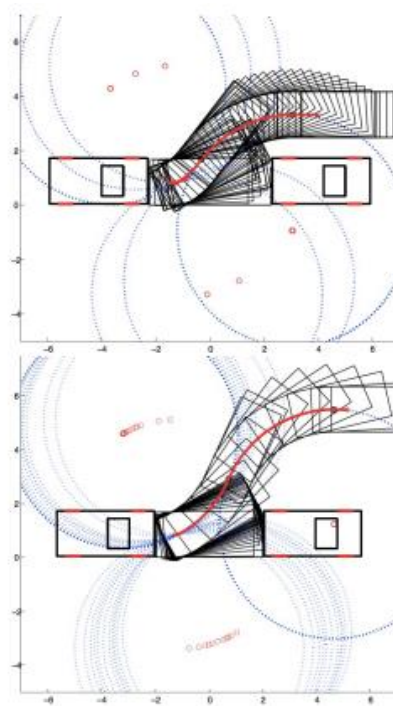


Figura 7 Estacionamiento automático de vehículos [6]

Pero al igual que en el sistema de posicionamiento de un buque en dique, estos sistemas utilizan sensores para realizar el cálculo de distancias hacia los objetos, por lo que se investigó realizar el cálculo de distancia mediante una cámara digital, en donde se encontraron papers relacionado con determinar la distancia de un objeto a la cámara [13] [14], pero sin duda un lo que más se aproximó a lo que se quiere realizar es como determinar el tamaño y la distancia de un objeto sabiendo y utilizando

el arreglo de sensores de una cámara, por lo que hay que explicar el funcionamiento de una cámara digital.

Toda cámara digital posee arreglo de sensores que pueden ser CCD o CMOS. El arreglo CCD existen 3 tipos de que son el de cuadro completo, transferencia de cuadros e interlineal.

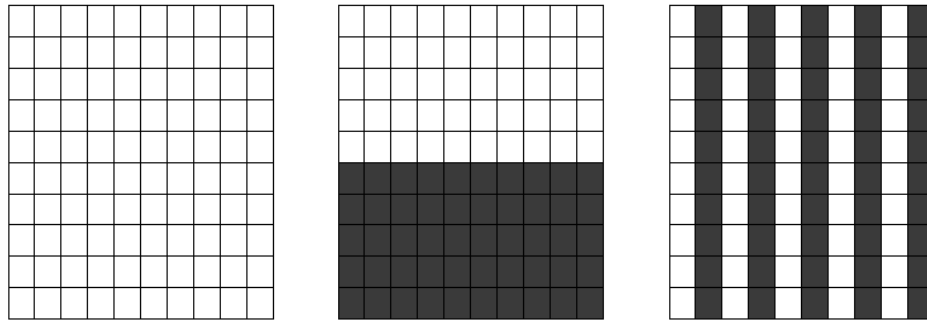


Figura 8 Tipos de CCD [Elaboración propia]

El CCD de cuadro completo, tiene una zona de captura, un registro paralelo y un registro serial, en donde la zona de captura capta los fotones y el obturador se cierra, para después ir traspasando la energía desde la zona de captura al registro paralelo fila por fila, y cada fila posteriormente se traspasa al registro serial completando la cantidad completa del arreglo. Usualmente este tipo de CCD posee pixeles más grandes por lo que tiene un campo visual más amplio, a su vez necesita un obturador para cerrar el paso de la luz entre imagen e imagen por lo que tiene un tiempo de retardo.

El CCD de transferencia de cuadro, la mitad de la zona de captura esta obturada, por lo que el arreglo capta la luz con la mitad del arreglo, mientras la otra mitad se encuentra obturada. Al igual que en el cuadro completo el proceso se realiza de la misma forma, donde la energía capturada se transfiere a un registro paralelo y posteriormente a un registro serial. En comparación con el cuadro completo los pixeles son de igual tamaño, pero la diferencia radica en la velocidad de captura, ya que la transferencia de cuadro es más rápida.

El CCD interlineal es el diseño más popular, ya que por cada columna bloqueada existe otra columna que capta la energía de los fotones, esto permite que la transferencia sea más rápida, pero con la desventaja que se pierde resolución.

A diferencia del CCD, el CMOS en cada celda incorpora un amplificador a la señal de cada fotodiodo, como también el conversor A/D por lo que no es necesario un chip que controle como lo

realiza en el CCD. Las ventajas del CMOS en comparación con el CCD, son que es más barato de fabricar, son más sensibles a la luz y la velocidad es mucho mayor ya que el procesamiento lo realiza dentro del propio sensor.

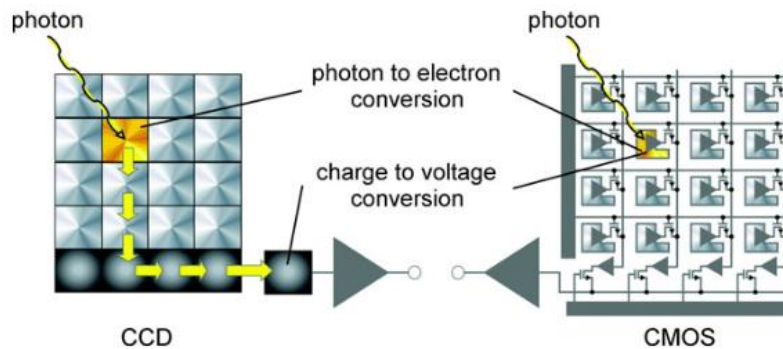


Figura 9 Comparación CC y CMOS [15]

Teniendo en consideración el funcionamiento de cada uno, el problema principal se centra en que cada píxel del arreglo represente el mismo píxel que se ve en una imagen real, pero lo que realmente sucede es que el píxel no determina la misma posición en la imagen compartiendo información entre los píxeles cercanos.

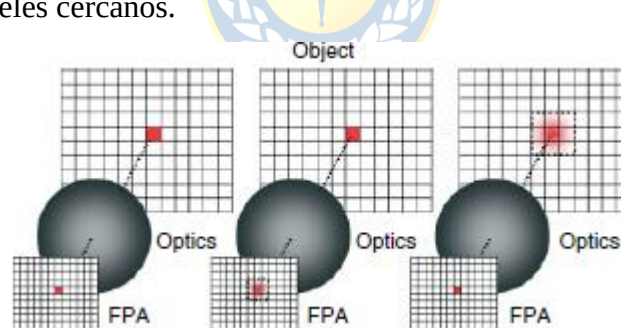


Figura 10 Comparación píxel cámara con píxel imagen [12]

El arreglo de píxeles tiene un tamaño vertical y horizontal con una cantidad determinadas de píxeles. Desde el arreglo hacia el lente existe una distancia que se denomina distancia focal y posteriormente se encuentra la distancia al objeto. A medida que el objeto se encuentre más lejos del lente, cada píxel de la imagen se ira distorsionado aún más, perdiendo la calidad de la imagen.

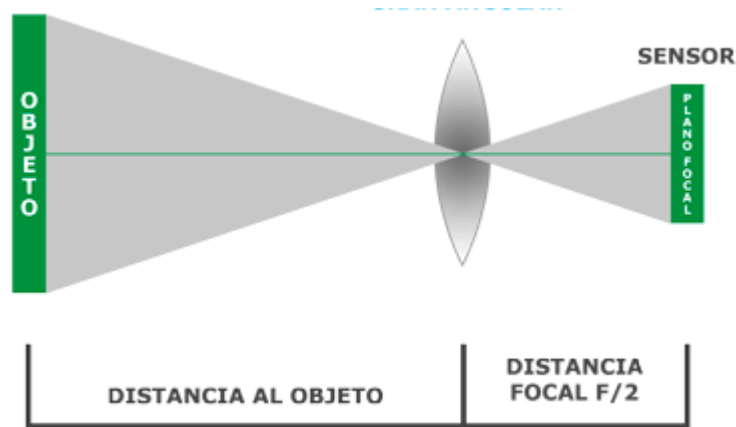


Figura 11 Distancia al objeto [8]

El tamaño del objeto a una cierta distancia puede ser calculado teniendo en consideración los ángulos de la cámara, más conocidos como FOV, que, para un arreglo cuadrado, el FOV será el mismo ya sea horizontal o vertical, mientras que, si el arreglo tiene distintas medidas, como por ejemplo más sensores verticales que horizontales, el FOV se va a diferenciar entre el HFOV y el VFOV y este ángulo corresponde al que se forma entre el lente y el objeto.

$$FOV = 2 * \arctan\left(\frac{b}{2f}\right) \quad (1)$$

Donde b representa el tamaño del sensor cuadrado, o en el caso del HFOV y VFOV se puede diferenciar con las medidas del sensor en forma vertical y horizontal.

Teniendo el ángulo de la cámara, se puede determinar entonces el tamaño de la imagen conociendo la distancia a la cual se encuentra el objeto. En donde x representa la distancia vertical u horizontal de la imagen dependiendo si el arreglo es cuadrado y D representa la distancia al objeto.

$$x = 2 * D * \tan\left(\frac{FOV}{2}\right) \quad (2)$$

Si se desea calcular que área o tamaño de la imagen puede representar un píxel del sensor, solo se debe reemplazar el tamaño del píxel por lo que es el tamaño del sensor, con esto se podrá identificar cuanto representa el píxel en la imagen y como va perdiendo la resolución, puesto que a más distancia cada píxel va incrementando su tamaño en la imagen.

Teniendo en consideración que se puede calcular el tamaño de una imagen a una cierta

distancia, eso no significa que la imagen refleje el tamaño del objeto, puesto que no todas las imágenes son capturadas frente a frente a un objeto, pues existen ocasiones en donde desde la cámara al objeto que se quiere capturar existe un ángulo de inclinación. Esto dificulta el cálculo de determinar el tamaño del objeto, debido a que lo que se capta no es lo mismo que lo que realmente es.

En la figura N°14 se puede apreciar un observado que está mirando una imagen desde un cierto ángulo, y de acuerdo con el ángulo en la imagen solo se puede apreciar una parte del sector rojo, mientras que, en la imagen de la derecha, realizando el cambio de perspectiva, se puede visualizar en una imagen en 2D lo que realmente representa el área roja.

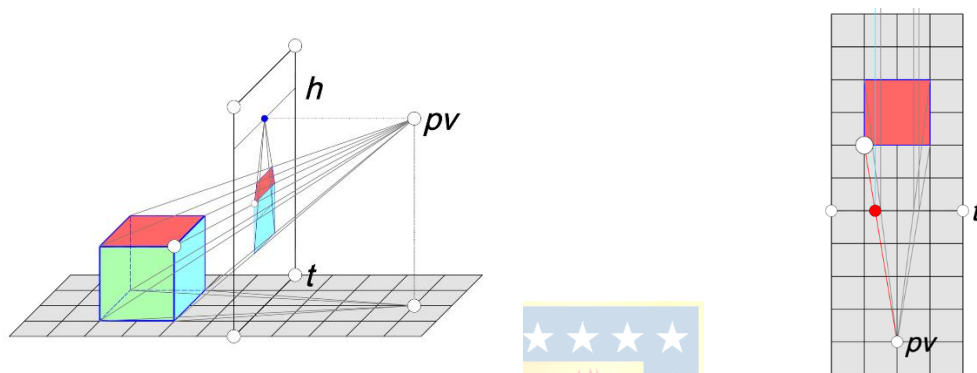


Figura 12 Cambio de perspectiva [9]

Existen técnicas para realizar la transformación de perspectiva, objeto modificar el plano de la imagen original, básicamente se trata de realizar un mapeo entre dos planos multiplicando las coordenadas del plano por una matriz [10] [11]. En donde se identifican puntos de interés, que normalmente son 4 puntos en el plano original y se realiza la transformación lineal para que los puntos elegidos en el plano original estén posicionados en otros puntos del plano en el cual se desea dejar.

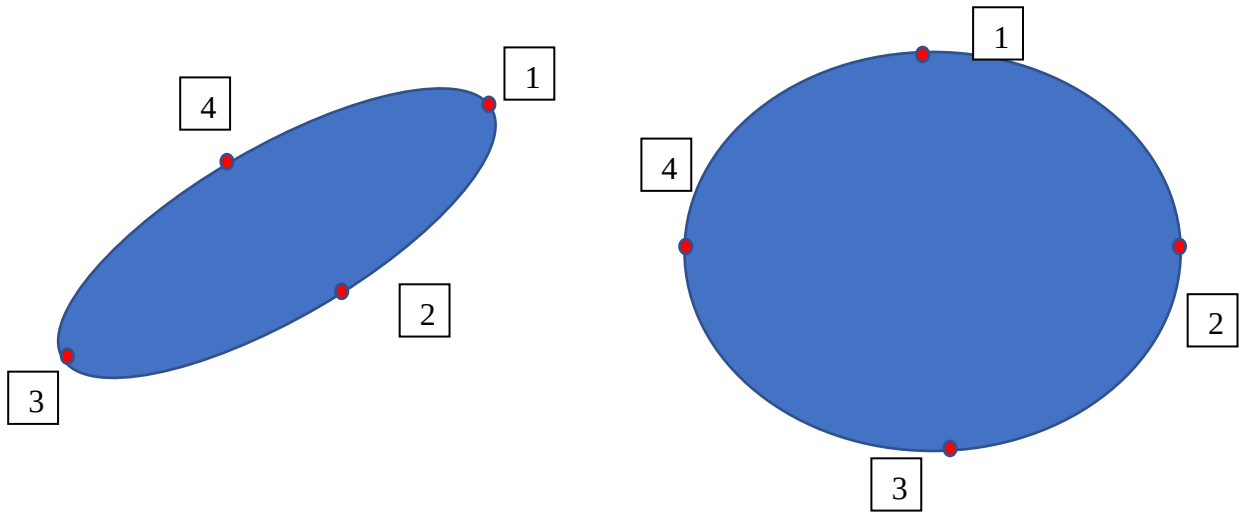


Figura 13 Ejemplo de cambio de perspectiva [Elaboración propia]

En la imagen de la izquierda el plano se llamará I con coordenadas (x,y) en donde se le aplicará una transformación T para llegar al plano de la derecha J con coordenadas (x',y'). Para esto se toman los puntos de interés de la siguiente forma.

$$x_i = a_{11}x'_i + a_{12}y'_i + a_{13} \quad (3)$$

$$y_i = a_{21}x'_i + a_{22}y'_i + a_{23} \quad (4)$$

Esto nos da dos ecuaciones con 6 incógnitas, que si se realizan los 4 puntos se tendrán 8 ecuaciones con 6 incógnitas que a través de álgebra lineal se puede encontrar las incógnitas.

Teniendo la transformación geométrica que da la solución de los cuatro puntos, lo que se realiza después es que para cada píxel de la imagen de la izquierda se realiza la transformación para poblar los píxeles de la imagen derecha. Para esto se deben conocer los píxeles de la imagen derecha, para eso si se tiene una imagen de 1000 píxeles, voy a determinar un radio de 400 píxeles, lo que quiere decir que horizontalmente el círculo tendrá un radio de 800 píxeles dejando una distancia de 200 píxeles, de igual forma verticalmente.

1.3. Hipótesis

Es posible usar un Drone utilizando técnicas de procesamiento multidimensional de imágenes para determinar dirección y posicionamiento de un buque para asistir el proceso de entrada a un dique seco.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Desarrollar y evaluar un algoritmo de que permita determina el posicionamiento del buque dentro de un dique seco, procesando los datos obtenidos por un Drone de forma espacial y temporal.

1.4.2. Objetivos Específicos

1. Realizar adquisiciones de imágenes por medio de un Drone de un buque entrando a dique.
2. Evaluar la calidad y fluidez del video en función de su resolución temporal utilizando herramientas adecuadas para medir la frecuencia de frames por segundos del video
3. Realizar el procesamiento de las imágenes tomadas por un Drone.
 - a. Implementar un algoritmo de visión por computadoras para identificar y segmentar los objetos relevantes en las imágenes capturadas por el Drone.
 - b. Desarrollar un algoritmo que utilice la información de las imágenes para calcular las distancias entre el buque y el dique durante su maniobra de entrada.
4. Evaluar la calidad y detalle de las imágenes capturadas por el Drone para determinar la viabilidad del uso de técnicas de Optical Flow.
5. Implementar un algoritmo de Optical Flow para analizar el movimiento de los objetos en las imágenes del buque entrando a dique
6. Verificar la coherencia del movimiento del buque con las expectativas de una maniobra de entrada a dique exitosa.
7. Realizar mediciones y evaluaciones detalladas de la resolución temporal y espacial de las imágenes capturadas por el Drone.

1.4.3. Limitaciones del trabajo.

- El procesamiento de datos e imágenes se realizarán en el lenguaje de programación MATLAB.
- La captura de imágenes solo se realizará con buques mercantes. No se pueden capturar imágenes de buques Armada o submarinos por confidencialidad de la información.
- El dique elegido será el dique Seco N°2 de ASMAR
- El vuelo del Drone solo será con luz diurna y con un viento inferior a 15 Nudos: Estas limitaciones se aplican por procedimiento a todas las maniobras de entrada y de salida de un dique seco en ASMAR, ya que, si se superan estas condiciones, se incrementa la posibilidad de que sufra un daño material o personal.



CAPITULO 2. METODOLOGÍA

Para poder realizar el trabajo, a grandes rasgos se dividió en 3 grandes alcances, que son la adquisición de imágenes, el cálculo de la distancia y además se realizó el Optical Flow del video para poder captar visualmente la tendencia del movimiento del buque dentro del dique.

Esta metodología que se propone se basa en procesar las imágenes capturadas por el Drone, en el tiempo, de manera que no se analicen todos los frames del video, si no que solo los que son necesarios sin perder información del video, con el fin de optimizar los recursos computacionales para el procesamiento de imágenes, reduciendo el tamaño del archivo. Junto con ello variar la resolución de los frames para poder aplicar el Optical Flow objeto conocer la tendencia del buque, como también utilizar la máxima resolución para poder determinar la distancia del buque al dique.

Al unir todo el análisis antes mencionado, se podrá saber el posicionamiento del buque dentro del dique, información que le servirá de forma visual al Dock Máster para poder tomar decisiones en cuanto a la maniobra.

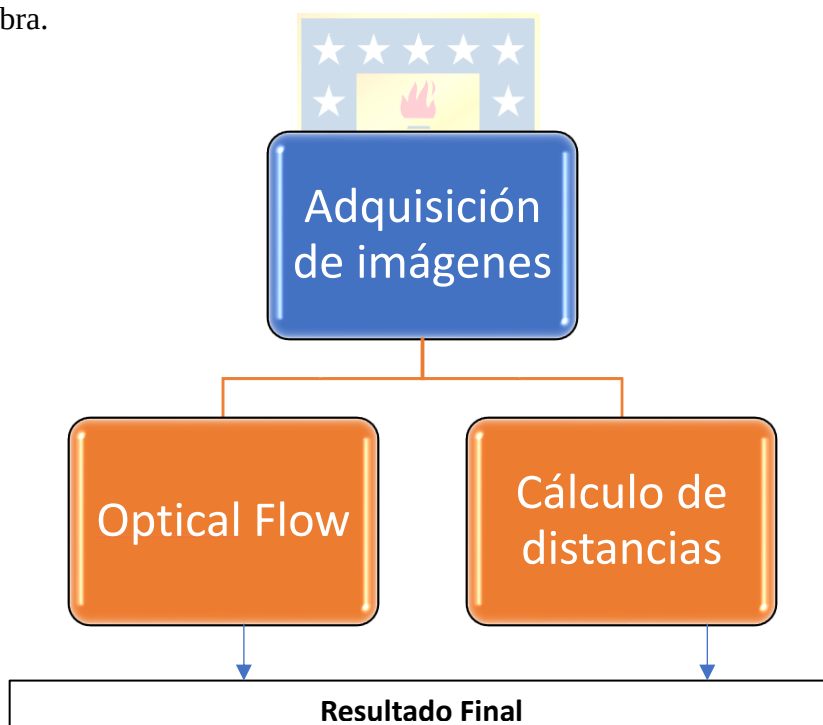


Figura 14 Diagrama general del proceso [Elaboración propia]

2.1. Adquisición de imágenes

Para realizar la adquisición de imágenes por medio de un Drone, se ocupó el Drone DJI FPV, con un sensor de 1/2.3" CMOS de 12 Megapíxeles de tamaño 6,17 x 4,55 mm y con una distancia focal de 0.6 mm [16]. Se grabó un video en resolución 4K (4096x2160 píxeles) durante toda la entrada a dique de un buque Mercante de oportunidad, que en este caso se trató del BT San Matías, cuyas características técnicas son las siguientes:

Eslora máxima: 228 metros

Manga máxima: 32.2 metros

Mientras que las características del dique Seco N°2 de Asmar Talcahuano tiene las siguientes características:

Eslora máxima: 265 metros

Manga máxima: 42 metros.



Figura 15 Drone DJI FPV [16]

La maniobra de entrada a dique tiene la restricción de realizarse siempre con un viento de hasta 15 nudos de viento, y la restricción de viento por parte del Drone es de 39 a 49 km/h de viento, si eso se lleva a nudos el Drone tiene una limitante de 21 a 26 nudos de viento, por lo que las condiciones de maniobra no significaron un impedimento para la realización del vuelo.

La altura que se utilizó para realizar la adquisición de imágenes fue de 150 metros aproximadamente y teniendo en consideración que la altura máxima del Drone es de 6000 metros, tampoco generó un inconveniente.

Dentro de la adquisición de imágenes objeto no ocupar todos los frames del video se trabajará en la resolución temporal, esto con el objetivo de no ocupar todos los frames ya que requiere menos recursos de procesamiento, disminuyendo el tamaño del archivo facilitando su manejo y almacenamiento.

Para esto se ocupará el proceso de correlación entre imágenes

$$r = \text{corr}(A_{mn}, B_{mn}) \quad (5)$$

El proceso de correlación entre las imágenes se realizó de la siguiente forma [21]:

$$r = \frac{\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A}) (B_{mn} - \bar{B})}{\sqrt{(\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})^2) (\sum_m \sum_n (B_{mn} - \bar{B})^2)}} \quad (6)$$

$$\bar{A} = \text{mean2}(A) \quad (7)$$

$$\bar{A} = \frac{1}{mn} \sum_m \sum_n (A) \quad (8)$$

$$\bar{B} = \text{mean2}(B) \quad (9)$$

$$\bar{B} = \frac{1}{mn} \sum_m \sum_n (B) \quad (10)$$

2.2. Optical Flow

Optical Flow se puede entender como el movimiento de un objeto dentro de una imagen a través de una serie consecutiva de frames, esto producto del movimiento del objeto o el movimiento de la cámara [24].

Usualmente el Optical Flow se utiliza para aplicaciones como traqueo de objetos, detección de movimientos, compresión de video y medición de disparidad en visión estereoscópica.

Para entender de mejor forma el Optical Flow se puede explicar de la siguiente forma:

Asumiendo que los pixeles tienen un nivel de intensidad constante en cada frame, un objeto que se encuentra en un frame en una posición (x, y) en un instante de tiempo t , se mueve en el siguiente frame una cantidad de pixeles (dx, dy) en un tiempo dt , por lo que la nueva posición del objeto en el siguiente frame será $(x + dx, y + dy)$ en un instante de tiempo $(t + dt)$.

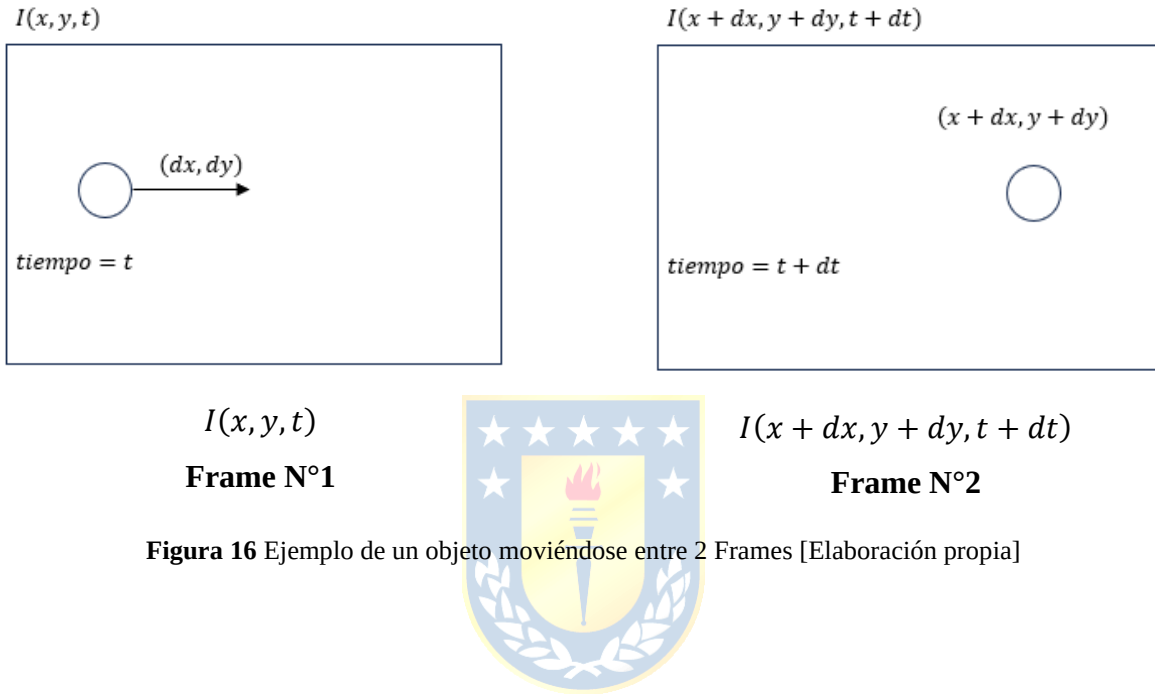


Figura 16 Ejemplo de un objeto moviéndose entre 2 Frames [Elaboración propia]

Luego, realizando la aproximación de serie de Taylor obtenemos lo siguiente [17]:

$$\begin{aligned}
 I(x + dx, y + dy, t + dt) = & I(x, y, t) + dx \frac{\partial I(x, y, t)}{\partial x} + dy \frac{\partial I(x, y, t)}{\partial y} + dt \frac{\partial I(x, y, t)}{\partial t} + \\
 & \frac{1}{2!} \left[dx^2 \frac{\partial^2 I(x, y, t)}{\partial x^2} + dy^2 \frac{\partial^2 I(x, y, t)}{\partial y^2} + dt^2 \frac{\partial^2 I(x, y, t)}{\partial t^2} + 2dx dy \frac{\partial^2 I(x, y, t)}{\partial x^2 \partial y^2} \right. \\
 & \left. + 2dx dt \frac{\partial^2 I(x, y, t)}{\partial x^2 \partial t^2} + 2dy dt \frac{\partial^2 I(x, y, t)}{\partial y^2 \partial t^2} \right] \dots
 \end{aligned} \tag{11}$$

Solo se considerará el primero término el cual se igualará a cero. Los términos de orden superior no se consideran ya que son muy pequeños y tienden a cero por lo que se consideran despreciables.

$$dx \frac{\partial I(x, y, t)}{\partial x} + dy \frac{\partial I(x, y, t)}{\partial y} + dt \frac{\partial I(x, y, t)}{\partial t} = 0 \quad (12)$$

Si dividimos la ecuación (12) por dt obtenemos lo siguiente:

$$\frac{dx}{dt} \frac{\partial I(x, y, t)}{\partial x} + \frac{dy}{dt} \frac{\partial I(x, y, t)}{\partial y} + \frac{\partial I(x, y, t)}{\partial t} = 0 \quad (13)$$

Sea:

$$u = \frac{dx}{dt} \quad v = \frac{dy}{dt} \quad (14)$$

entonces, reemplazando (14) en (13), tendremos la ecuación general del Optical Flow donde I_x, I_y, I_t representan las derivadas parciales de la intensidad del píxel en la imagen con respecto a x, y, t ; mientras que las variables u, v son los componentes del Optical Flow de x, y .

$$u \frac{\partial I(x, y, t)}{\partial x} + v \frac{\partial I(x, y, t)}{\partial y} + \frac{\partial I(x, y, t)}{\partial t} = 0 \quad (15)$$

$$u I_x + v I_y + I_t = 0 \quad (16)$$

Ahora si lo miramos la ecuación como una línea recta en el plano u, v tendríamos:

$$v = -u \frac{I_x}{I_y} + -\frac{I_t}{I_y} \quad (17)$$

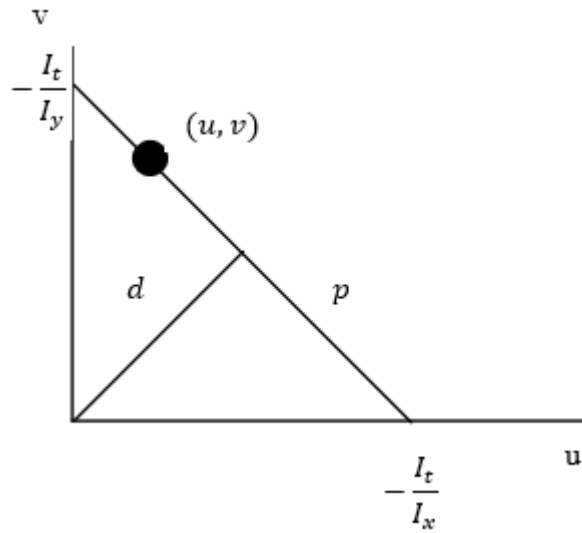
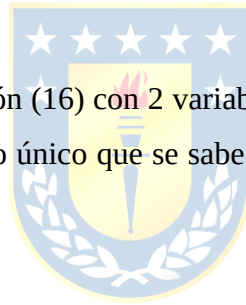


Figura 17 Visualización lineal del Optical Flow [Elaboración propia]

En este caso se tiene una ecuación (16) con 2 variables desconocida, por lo que no se conoce cuál es el Optical Flow de cada píxel, lo único que se sabe es que esta en cualquier punto a lo largo de la línea p .



2.2.1. Método Lucas-kanade

Tomando en consideración una ventana de píxeles de 3x3 en donde asumimos por la cercanía de los píxeles que la variación de un frame a otro, todos los píxeles tienen el mismo optical Flow, entonces tendríamos 9 ecuaciones en donde cada píxel tiene su componente I_x, I_y, I_t que serían las derivadas espacio temporal de la intensidad de los píxeles de la imagen y las componentes u, v que corresponden al Optical Flow horizontal y vertical respectivamente serían iguales. Entonces tendríamos 9 ecuaciones con 2 incógnitas, por lo que se puede resolver [17].

$$\begin{aligned}
 uI_{x1} + vI_{y1} + I_{t1} &= 0 \\
 &\vdots \\
 uI_{x9} + vI_{y9} + I_{t9} &= 0
 \end{aligned} \tag{18}$$

$$\begin{pmatrix} I_{x1} & I_{y1} \\ \vdots & \vdots \\ I_{x9} & I_{y9} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -I_{t1} \\ \vdots \\ -I_{t9} \end{pmatrix} \quad (19)$$

$$AU = F \quad (20)$$

Para simplificar mejor los cálculos la ecuación (19), se transforma en la ecuación (20). Si se quiere despejar la variable U, se pueden realizar operaciones matriciales con la traspuesta, pero como la matriz A es de 9x2 y la matriz F es de 9x1, no son cuadradas, se debe realizar otro procedimiento.

Para eso se debe multiplicar la matriz A por su traspuesta, en donde quedaría una matriz cuadrada, para luego multiplicarla por su pseudo inversa.

$$A^T AU = A^T F \quad (21)$$

$$U = (A^T A)^{-1} A^T F \quad (22)$$

De esta forma se pueden obtener los valores de U.

Otra forma de realizar este procedimiento y se puede obtener el mismo resultado es mediante el método del error cuadrático (Least Squares Fit), objeto minimizar el error cuadrático, siendo esta la solución óptima.

Desde la función principal del Optical Flow que es la representada en la ecuación (16) y tomando también una ventana de 3x3 se realiza el cálculo del error cuadrático, derivando la función con respecto a u y con respecto a v y posteriormente igualándolo a 0. Después de operaciones matemáticas se tendrán 2 ecuaciones con 2 incógnitas, que se podrán expresar de forma matricial. Como existe una matriz de 2x2, se realiza la operación de la inversa por ambos lados para poder despejar finalmente y obtener los valores de u y de v . [17]

$$\min \sum_i (uI_{xi} + vI_{yi} + I_{ti})^2 \quad (23)$$

$$\sum_i (uI_{xi} + vI_{yi} + I_{ti})I_{xi} = 0$$

$$\sum_i (uI_{xi} + vI_{yi} + I_{ti})I_{yi} = 0$$
(24)

$$u = \frac{\sum I_{yi}^2 \sum I_{xi} I_{ti} + \sum I_{xi} I_{yi} \sum I_{yi} I_{ti}}{\sum I_{xi}^2 \sum I_{yi}^2 - (\sum I_{xi} I_{yi})^2}$$

$$v = \frac{\sum I_{xi} I_{yi} \sum I_{xi} I_{ti} - \sum I_{xi}^2 \sum I_{yi} I_{ti}}{\sum I_{xi}^2 \sum I_{yi}^2 - (\sum I_{xi} I_{yi})^2}$$
(25)

Este método funciona para pequeños movimientos de objetos entre frame, ya que, si los objetos se mueven demasiado rápido entre frame, la intensidad de los pixeles varía mucho, afectando la condición inicial de este método que es mantener la intensidad constante. Es por esto por lo que una ventana de 2x2 o de 3x3 con objetos moviéndose muy rápido afectará a la estimación espacio temporal de las derivadas.

El algoritmo que se ocupó en MATLAB para poder calcular el Optical Flow del buque entrando a dique, fue el algoritmo opticalFlowLKDoG (Lucas Kanade derivative of Gaussian method). Este método consiste en aplicar un filtro Gaussiano a la imagen antes de aplicar el método del Optical Flow Lucas Kanade [20], esto para poder suavizar la intensidad de los pixeles, pero conservando los bordes de los objetos dentro de la imagen.

Esto se puede expresar de la siguiente forma:

$$I_x = H * (G * I)$$
(26)

$$I_x = (H * G) * I$$
(27)

En donde I representa a la imagen, G , representa el filtro Gaussiano y H la derivada. De acuerdo con la ecuación (26) se puede expresar como derivar el filtro Gaussiano aplicado en la imagen, mientras que en la ecuación (27), se puede expresar como el filtro Gaussiano derivado aplicado a la imagen, que computacionalmente es mucho más rápido. El filtro Gaussiano se puede escribir como la ecuación (28), mientras que en la ecuación (29) y (30) se expresan el filtro Gaussiano derivado en x e y .

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}$$
(28)

$$\frac{\partial G(x, y)}{\partial x} = \frac{-x}{2\pi\sigma^4} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (29)$$

$$\frac{\partial G(x, y)}{\partial y} = \frac{-y}{2\pi\sigma^4} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (30)$$

2.2.2. Método Lucas Kanade Derivate of Gaussian [19]

El método Lucas Kanade Derivate of Gaussian filter en MATLAB para calcular:

1. I_x e I_y se puede realizar de la siguiente forma:
 - a. Utilice un filtro Gaussiano para realizar un filtrado temporal, especificando las características del filtro temporal, como la desviación estándar y el número de coeficiente del filtro
 - b. Utilice un filtro Gaussiano y la derivada de un filtro Gaussiano para suavizar la imagen mediando el filtrado espacial, especificando la desviación estándar y la longitud del filtro de suavizado de la imagen
2. Calcular I_t entre los Frames 1 y 2 se deben seguir los siguientes pasos:
 - a. Utilice la derivada de un filtro Gaussiano para realizar un filtrado temporal. Especificando las características del filtro temporal, como la desviación estándar y el número de coeficiente del filtro.
 - b. Utilice el filtro descrito en el paso 1b para realizar un filtrado espacial en la salida del filtro temporal.
3. Suavice el gradiente de los componentes I_x , I_y e I_t utilizando un filtro de suavizado de degradado. Se debe especificar la desviación estándar y el numero de coeficiente de filtro.
4. Se debe resolver las ecuaciones lineales de 2x2 para cada píxel utilizando la ecuación (31) y obteniendo los valores propios de la ecuación (32).

$$A = \begin{bmatrix} a & b \\ d & c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum W^2 I_x^2 & \sum W^2 I_x I_y \\ \sum W^2 I_y I_x & \sum W^2 I_y^2 \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$\lambda_i = \frac{a + c}{2} \pm \frac{\sqrt{4b^2 + (a - c)^2}}{2}; i = 1, 2 \quad (32)$$

Cuando el algoritmo encuentra los valores propios, los compara con el umbral, τ , que corresponde al valor ingresado para la propiedad NoiseThreshold. Los resultados caen en uno de los siguientes casos:

Caso 1: $\lambda_1 \geq \tau$ y $\lambda_2 \geq \tau$

A no es singular, por lo que el algoritmo resuelve el sistema de ecuaciones utilizando la regla de Cramer.

Caso 2: $\lambda_1 \geq \tau$ y $\lambda_2 < \tau$

A es singular (no invertible), por lo que el algoritmo normaliza el flujo del gradiente para calcular u y v .

Caso 3: $\lambda_1 < \tau$ y $\lambda_2 < \tau$

El Optical Flow, u y v , es 0.



2.2.3. Aplicación del método LKDoG en el video

Para realizar el Optical Flow en el video primero se analizó cual era la mejor resolución para poder ejecutar de mejor forma y sin ocupar tantos recursos computacionales, como también verificar las diferencias entre los resultados de las distintas resoluciones.

Para esto se realizaron los siguientes pasos que se pueden visualizar en la Figura N°18 como ejemplo se tomó la resolución de 720p.

1. Por medio del comando “*resize*” de MATLAB se modificó la resolución espacial, teniendo el video en las siguientes resoluciones: 4K, 1080p, 720p, 480p, 360p, 240p, 144p.
2. Por cada resolución se realizaron 3 sub-casos, en la imagen completa, eliminando de la imagen todo lo que no sea dique o buque (imagen recortada) y aplicando una máscara a la imagen.
3. En cada uno de los 3 sub-casos, se realizó el Optical Flow con su gráfico, la representación del Optical Flow en 1 solo vector con su gráfico y el gráfico e histograma de los ángulos que representan el Optical Flow de 1 solo vector.

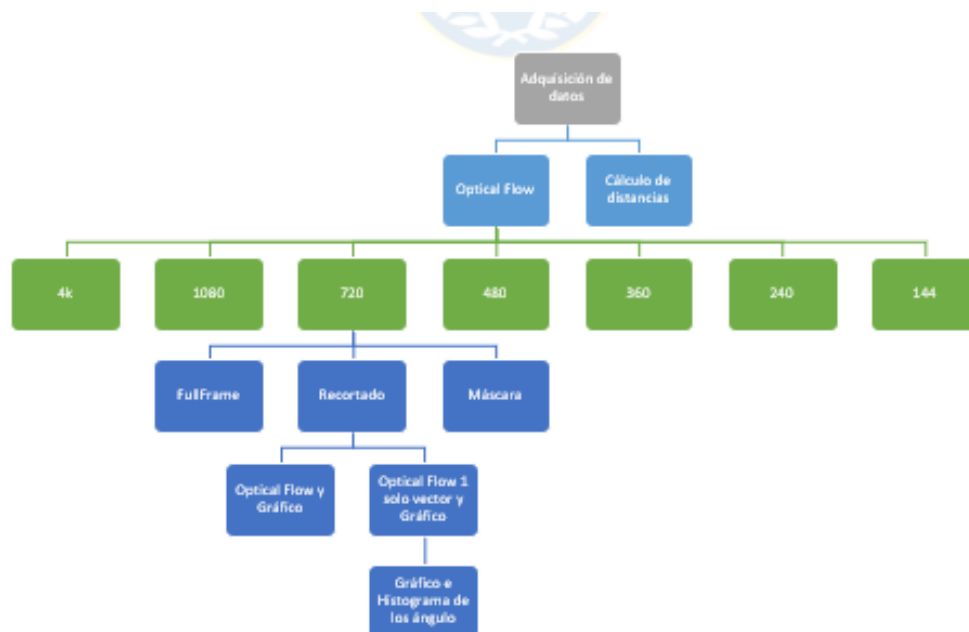


Figura 18 Proceso de cálculo del Optical Flow en distintas resoluciones [Elaboración propia]

2.3. Cálculo de distancias

Para poder realizar el cálculo de distancia, se debe primero realizar la identificación de objetos mediante una máscara, objeto diferenciar el buque, el muelle y el agua, como también se debe realizar el cálculo para determinar el valor en metros de lo que significa el píxel dentro de la imagen.

Para esto se dividirá de acuerdo con cómo se ve en la Figura N°19.

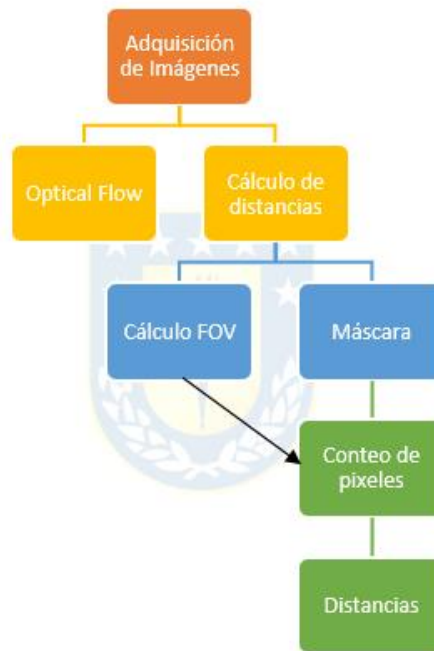


Figura 19 Proceso para calcular distancias [Elaboración propia]



2.3.1. Segmentación

La segmentación es un proceso donde se discrimina una imagen o sus píxeles, por un criterio definido para poder clasificar grupos de píxeles de interés.

Los algoritmos de segmentación se basan en 2 propiedades:

- **Discontinuidad:** se divide la imagen basándose en cambios bruscos de nivel de gris como pueden ser, detección de puntos aislados, detección de líneas o detección de bordes.
- **Similitud:** se divide la imagen basándose en la búsqueda de zonas que tengan valores similares de acuerdo con criterios establecidos, como pueden ser la umbralización o el crecimiento de regiones.

Para el caso de nuestro proyecto se ocupó la segmentación por el método de la umbralización, que consiste en diferenciar un objeto del fondo de la imagen, que básicamente se traduce a binarizar

la imagen resaltando el objeto que queremos mientras el resto de la imagen sería considerada ruido y por lo tanto se eliminaría esa información.

Este proceso se puede lograr tanto en imágenes en escala de grises como en imágenes a color. En este caso se trabajó con la umbralización de la imagen a color, en donde se realiza un histograma de los colores R, G, B de la imagen que muestra los niveles de colores rojo, verde y azul que posee cada píxel. Luego se elige un valor de acuerdo con el criterio que uno establezca (umbral) de tal forma que todo lo que esté bajo ese umbral vale cero, mientras todo lo que esté por sobre ese umbral valdría uno como se puede apreciar en la Figura N°20, en donde se tiene una figura con fondo plomo, y círculos rojo y verde y un triángulo azul, en donde se quiere aislar el círculo rojo y por lo tanto se fija un umbral objeto el resto de las figuras desaparezca y de esta forma poder aislarlo, esta imagen luego se transforma en una imagen binaria.

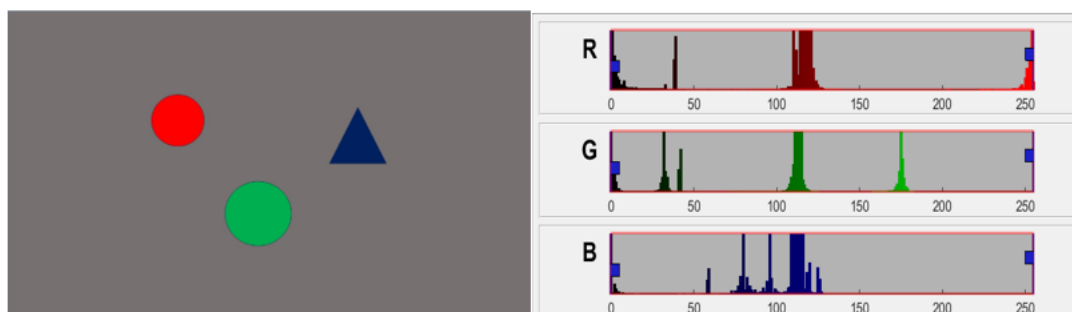


Figura 20 Imagen a segmentar RGB [Elaboración propia]

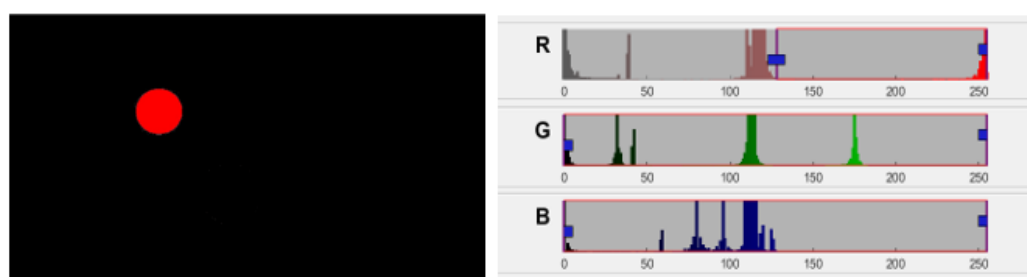


Figura 21 Imagen RGB segmentada [Elaboración propia]

2.3.2. Conteo de píxeles

El conteo de píxeles, teniendo la imagen binarizada, se realiza mediante algoritmos que permiten contar los 1's dentro de la imagen de manera horizontal y vertical con las columnas y filas. Teniendo el valor calculado anterior por cada píxel se multiplica por el conteo de píxeles y se tiene la distancia que se desea calcular con algún punto de referencia si es necesario.

2.4. Estructuración Espacio -Temporal

Para realizar el análisis, espacio vs tiempo, se analizarán los datos temporales obtenidos de la correlación de las imágenes y los resultados que fueron obtenidos en el punto 2.2 del Optical Flow, como también los datos obtenidos por el sampling espacial, mientras que para analizar los datos espaciales nos concentraremos en los resultados obtenidos al tener la máxima resolución para calcular la distancia con los píxeles.

Esto quiere decir que temporalmente nos enfocaremos en la duración, velocidad y ritmo del video al haber disminuido la cantidad de frames para analizar el Optical Flow, mientras que espacialmente nos enfocaremos en la distancia y la localización del buque en movimiento.

Estos datos serán representados en un gráfico en función de la cantidad de frames vs dirección de los ángulos de los vectores del Optical Flow y de las distancias calculadas del buque al muelle.

La elección de la resolución elegida se puede automatizar y optimizar dependiendo de las condiciones del buque que va a entrar a dique, ya sea por velocidad, características de tamaño o geometría, u otros, en donde se podrían utilizar muchas resoluciones dependiendo del frame que se va a analizar.

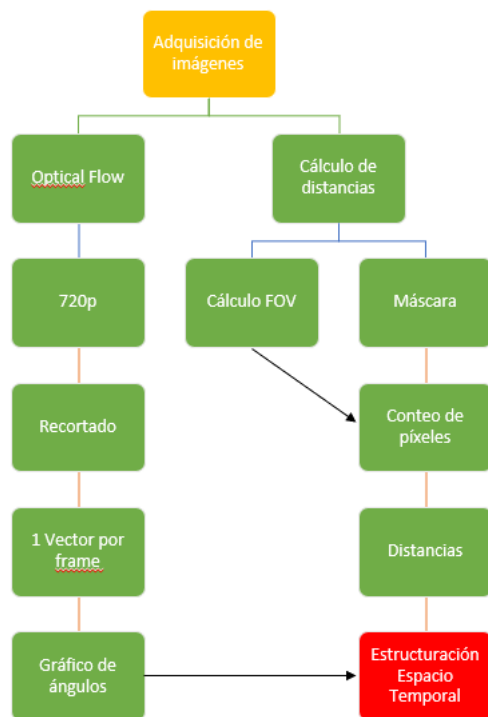


Figura 22 Proceso para determinar la estructuración espacio temporal [Elaboración propia]

La idea de realizar esta evaluación es poder analizar la factibilidad de determinar la relación entre la distancia con el ángulo que representa el Optical Flow. Para esto se tomará una muestra en un instante de tiempo en donde el buque vaya aumentando la distancia desde el muelle.

Realizaremos una métrica en función del coseno del ángulo del optical Flow con la distancia al muelle, esto dará como resultado un valor entre 0 y 1, que mientras el buque se encuentre con una dirección de 180° y a una distancia de 5 metros de estribor, estará en la posición correcta y por lo tanto tendrá un valor de 1. Mientras el ángulo sea distinto y la distancia no sean estas, el buque no estará en la posición correcta por lo que el resultado irá descendiendo del valor 1.

En la fórmula (33) se ocupará cuando la distancia de la banda de estribor al muelle es menor o igual 5, esto quiere decir que se encuentra a estribor del centro del dique. Para poder normalizar se ocupa la distancia máxima a la cual se debería encontrar para que este en la posición correcta.

En la formula (34), se ocupará cuando la distancia de la banda de estribor al muelle sea mayor a 5 metros, esto quiere decir que el buque se encontrará a babor del centro del dique. Se normaliza con respecto a los 5 metros que es a la distancia a la cual se debe encontrar.

Finalmente, al ingresar los datos de ángulos del óptico Flow y distancia al muelle, cualquier valor distinto de 1 nos dará una referencia de que el buque no se encuentra en la posición que debería estar por lo tanto hay que realizar correcciones. Mientras más cercano este el valor a 1 el buque estará en una posición casi correcta, mientras que más cercano se encuentre al valor 0, el buque estará en una mala posición o incluso con la posibilidad de haber golpeado el buque contra el muelle.

En la Figura N°23 se puede apreciar una imagen representativa de cómo se determinó la métrica, en donde el θ , representa el ángulo del optical Flow, y las flechas azules representan las distancias a muelle del buque en los 3 puntos donde se han considerado. Teniendo esas 3 distancias con el mismo valor y el ángulo con un valor de 0° , el buque se encontrará centrado en el dique con la misma distancia hacia ambos muelles.

$$\text{Métrica} = \cos(\theta) * \frac{\text{distancia al muelle}}{5} \quad (33)$$

$$\text{Métrica} = \cos(\theta) * \frac{\text{distancia al muelle} - 5}{5} \quad (34)$$

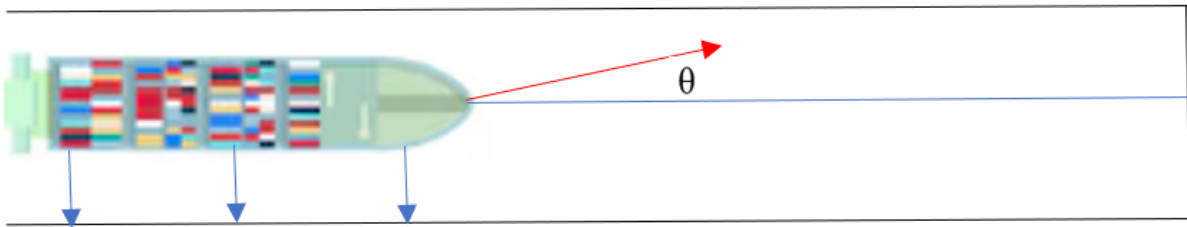


Figura 23 Figura para demostrar la métrica [Elaboración propia]

CAPITULO 3. RESULTADOS FINALES

3.1. Adquisición de imágenes

Como se comentó en el punto anterior, se realizaron tomas con un Drone DJI FPV a 150m de altura, donde se recopilaron 9 videos que en conjunto captaron el proceso completo de entrar a dique. Las características de los videos son los siguientes:

Video 1		Video 2		Video 3	
Duración	323,257	Duración	323,29	Duración	323,29
Frame Rate	29,97	Frame Rate	29,97	Frame Rate	29,97
N° Frames	9688	N° Frames	9689	N° Frames	9689

Video 4		Video 5		Video 6	
Duración	323,257	Duración	124,158	Duración	323,29
Frame Rate	29,97	Frame Rate	29,97	Frame Rate	29,97
N° Frames	9688	N° Frames	3721	N° Frames	9689

Video 7		Video 8		Video 9	
Duración	323,29	Duración	323,29	Duración	281,715
Frame Rate	29,97	Frame Rate	29,97	Frame Rate	29,97
N° Frames	9689	N° Frames	9689	N° Frames	8443

Figura 24 Detalle de los videos grabados [Elaboración propia]

De acuerdo con la Figura N°24 y sumando todos los frames de los videos capturados, tenemos un total de 79,985 frames, que representan la grabación completa del video de una duración de 44 minutos y 29 segundos y con una calidad de la imagen de 4k, esto significa que la cantidad de datos a procesar era significativa, por lo que se realizó un sampling al video de modo de acortar el video para poder probar y procesar todos los algoritmos sin que tomara mucho tiempo, en comparación con la totalidad de los datos. Debido a que el buque tiene que avanzar una cantidad de 300 *metros* y el proceso completo grabado fue de 79.985 *frames*, esto quiere decir que el buque por frame está avanzando 3.75 *mm*, por lo que no es necesario procesar tanta información, junto con ello, ocuparía una cantidad de recursos computacionales excesivos y con un tiempo de procesamiento de datos de igual forma elevados, obteniendo resultados muy similares y casi idénticos entre frames consecutivos.

Lo que se realizó para poder realizar un sampling y no utilizar todos los frames, fue realizar la correlación de las imágenes, en este caso se realizó la correlación de la primera imagen con las siguientes en la secuencia hasta que la diferencia fuera de 0.99, luego la siguiente imagen del nuevo video sería esa imagen y este proceso se repitió hasta cumplir los 79.985 *frames*. Esto nos dio como resultado un nuevo video de 3131 *frames*, con los cuales era mucho más fácil trabajar, y como se comentó anteriormente la idea era no perder información. El resultado fue un video de menos tiempo y con menos frames.

El criterio de correlación de 0.99 se estableció apoyado en el gráfico de la Figura N°25, en donde la correlación de 0.99 eran aproximadamente 30 *frames* que es básicamente es el Frame Rate y al tener un video de 3131 *frames* a una Frame Rate de 29,75 tendríamos un video de aproximadamente 105 segundos, lo cual es más rápido procesar para realizar la demostración.

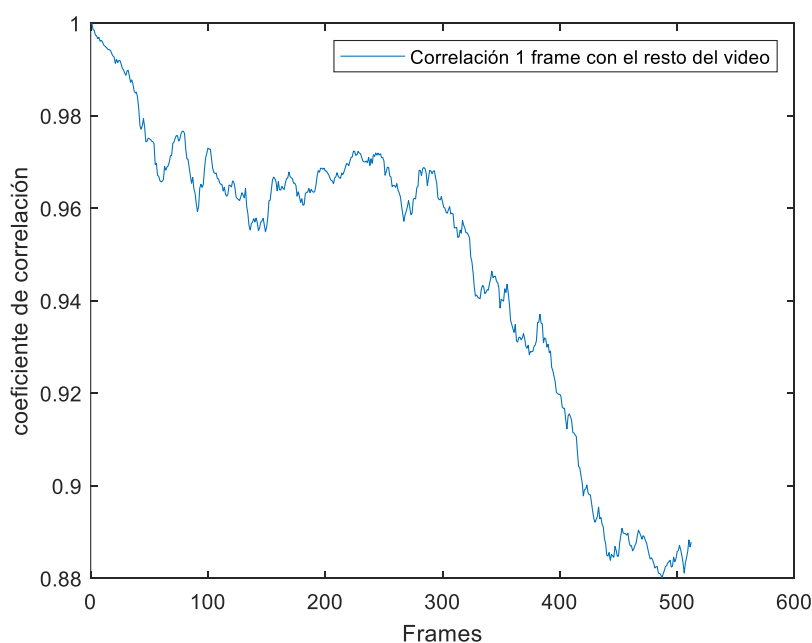


Figura 25: Correlación del primer frame con los primeros 500 frames sin variar la resolución temporal [Elaboración propia]

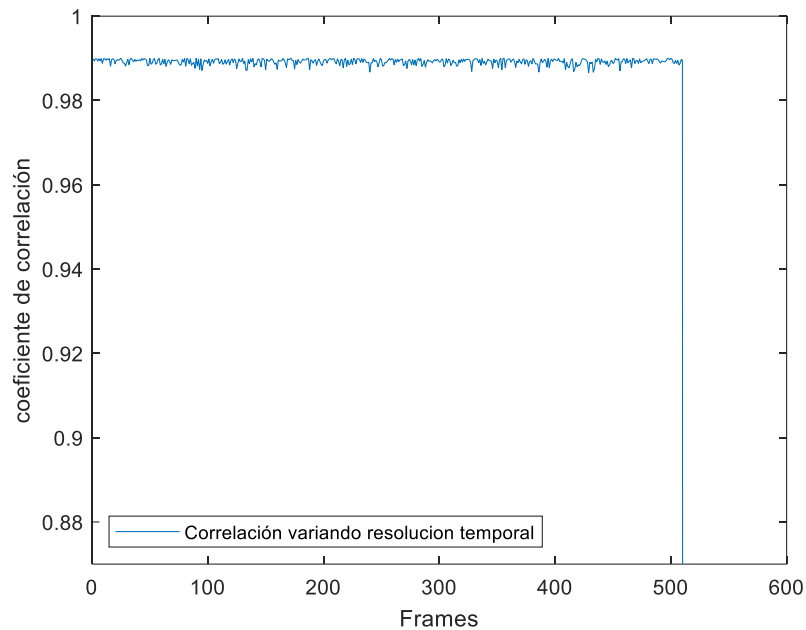


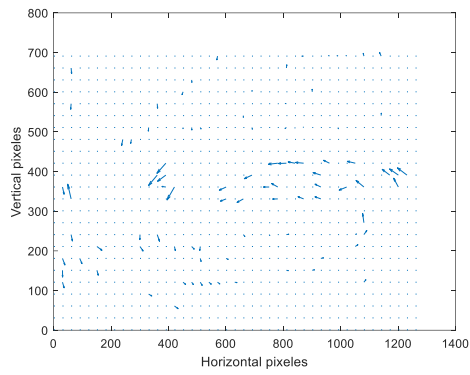
Figura 26 Correlación de los primeros 500 frames al variar la resolución temporal [Elaboración propia]

3.2. Optical Flow

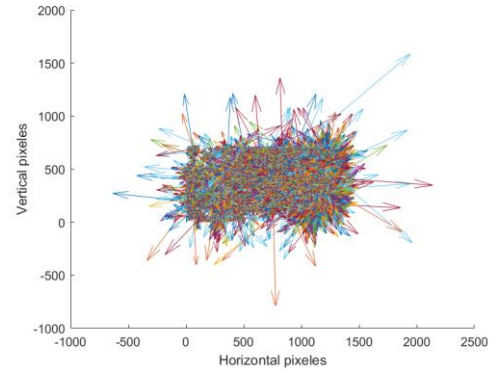
Como se planteó en el punto 2.2.3. se realizó la aplicación del Optical Flow en todas las resoluciones descritas en la Figura N°18 y además en cada resolución se aplicaron 3 sub-casos. Se graficó el Optical Flow, su representación en un solo vector y se graficó el histograma de los ángulos que generan el Optical Flow representado en 1 solo vector.

A continuación, se muestran todos los gráficos correspondientes a una resolución.

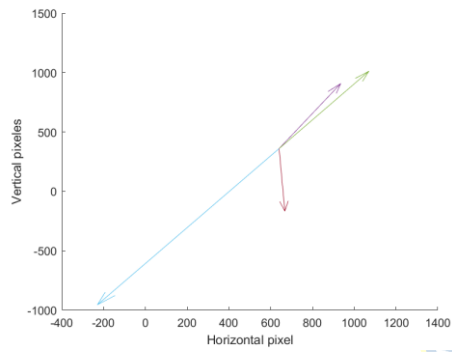
Optical Flow FullFrame



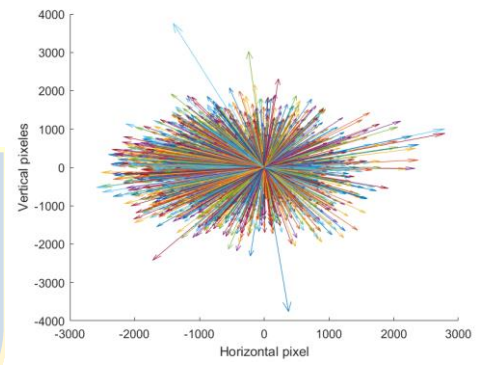
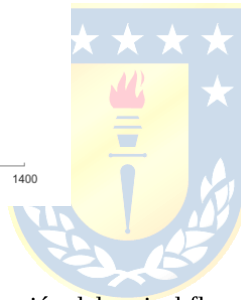
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 27 Optical Flow Fullframe (a) Representación del optical flow de 2 frames consecutivos. (b) Representación del optical flow de todos los frames. (c) Representación del optical flow de 1 vector por frame. (d) Representación de 1 vector por frame del video.

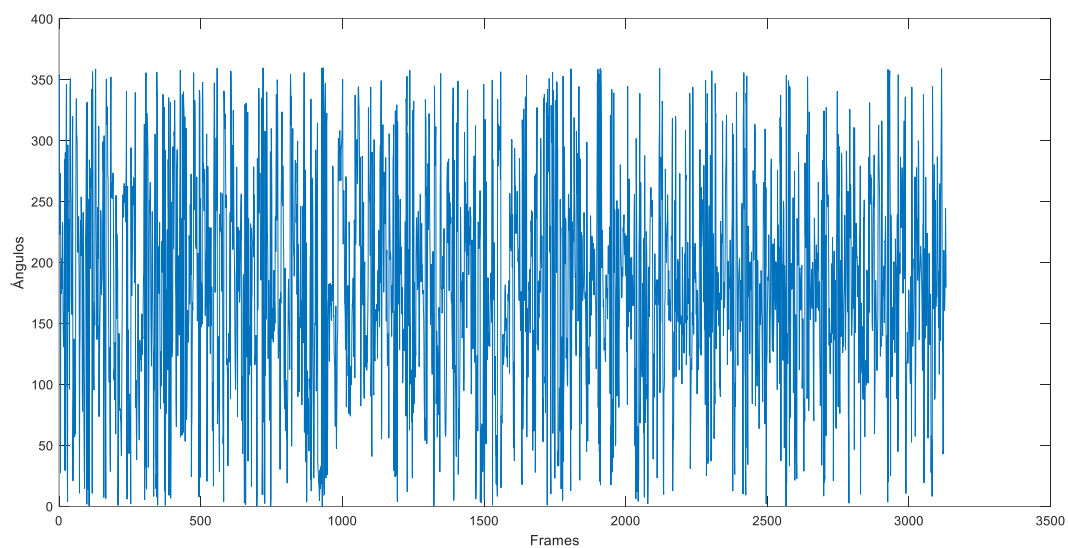


Figura 28 Gráfico de ángulos de la representación de 1 vector del Optical FLOW de todos los Frames [Elaboración propia]

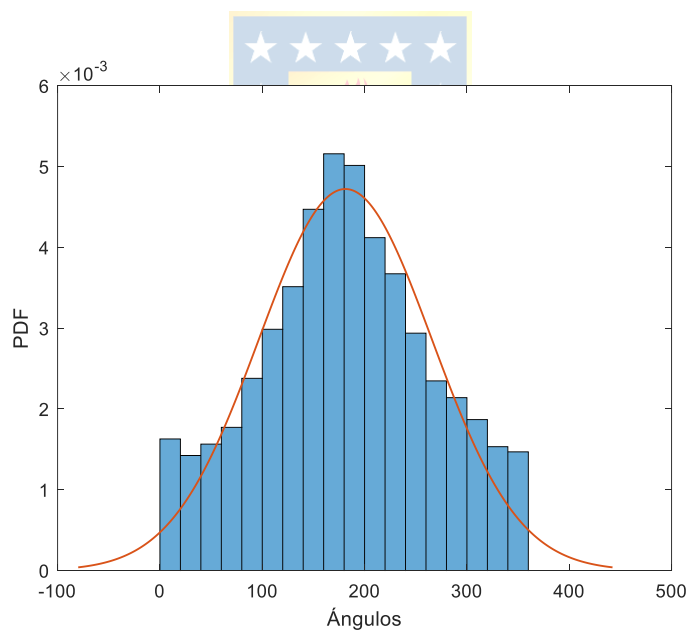
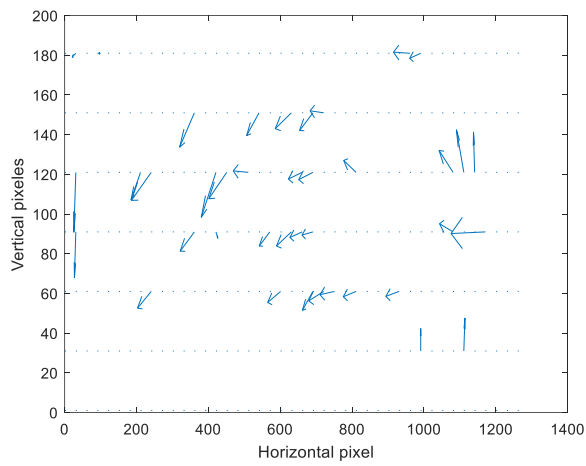
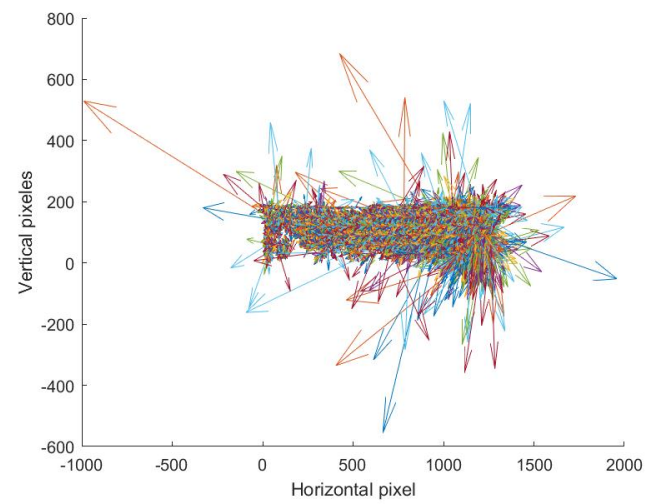


Figura 29 Histograma de los ángulos [Elaboración propia]

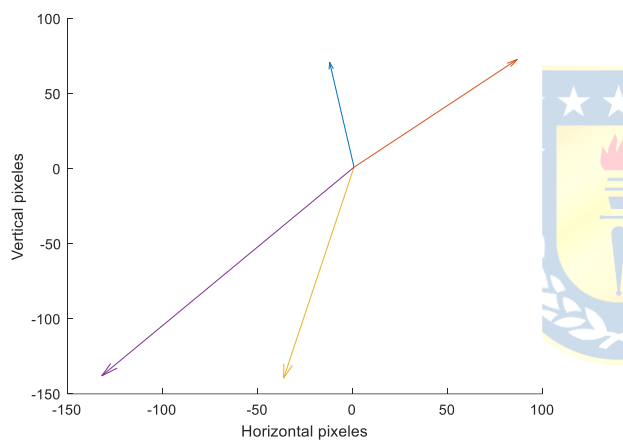
Optical Flow Recortado



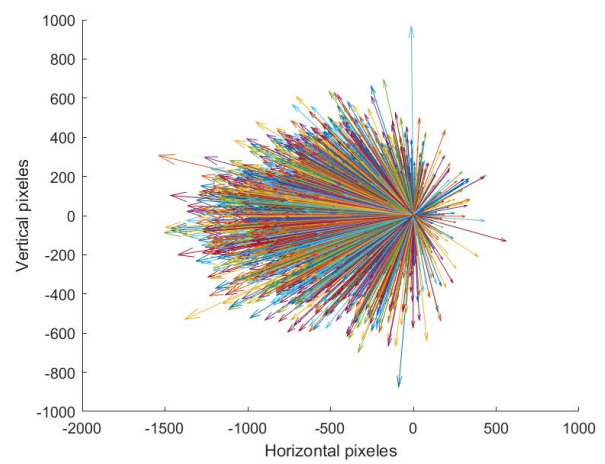
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 30 Optical Flow Recortado (a) Representación del optical flow de 2 frames consecutivos. (b) Representación del optical flow de todos los frames. (c) Representación del optical flow de 1 vector por frame. (d) Representación de 1 vector por frame del video.

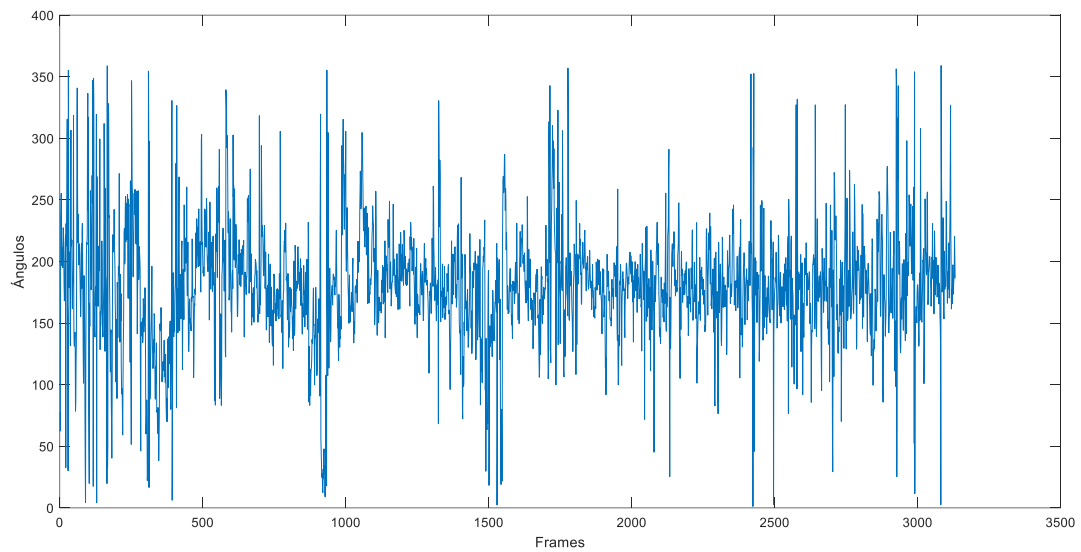


Figura 31 Gráfico de ángulos de la representación de 1 vector del Optical FLOW de todos los Frames [Elaboración propia]

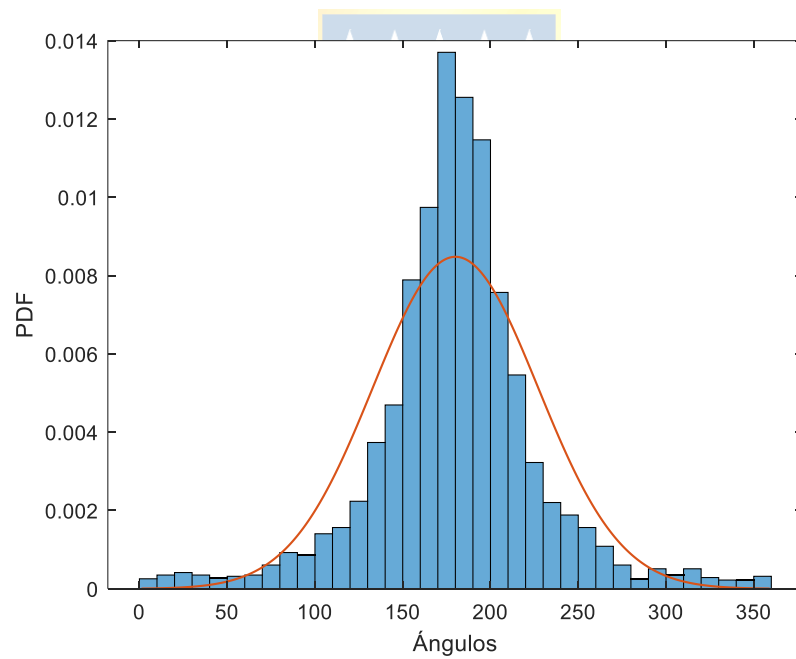


Figura 32 Histograma de los ángulos [Elaboración propia]

Optical Flow Máscara

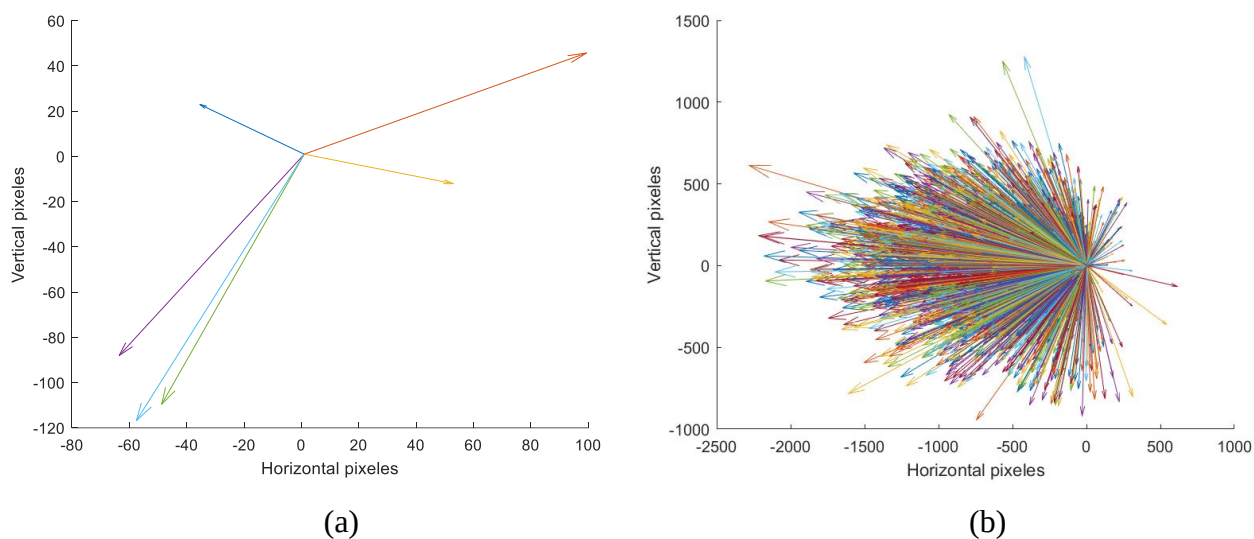


Figura 33 Optical Flow máscara (a) Optical flow representado en 1 vector de 6 frames centrado en el origen. (b) Optical flow representado en 1 vector de todos los frames centrado en el origen. [Elaboración propia]

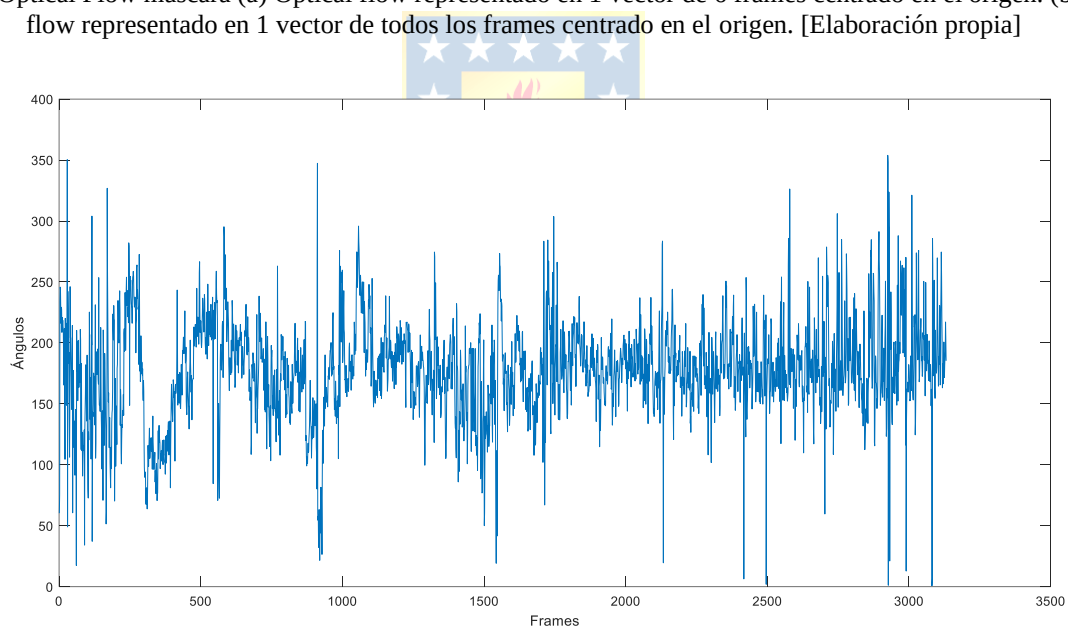


Figura 34 Gráfico de ángulos de la representación de 1 vector del Optical FLOW de todos los Frames [Elaboración propia]

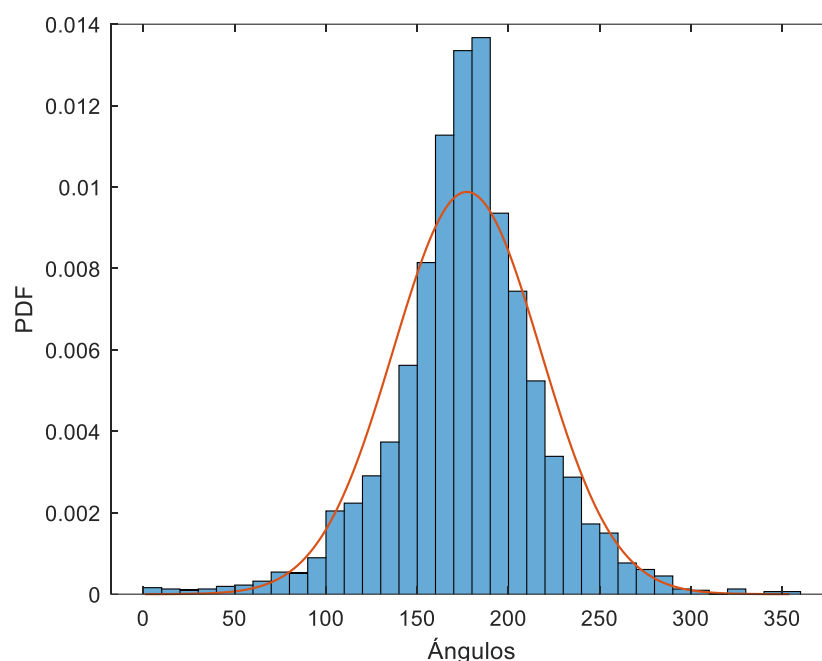


Figura 35 Histograma de los ángulos [Elaboración propia]

Para poder entender de mejor forma los gráficos, lo primero que se realizó fue aplicar el Optical Flow en cada Frame, en la imagen completa Fullframe y en la imagen recortada Figura N° 27 (a) y Figura N° 30 (a) respectivamente y lo que se aprecia en las imágenes es el de 2 Frames. Luego la Figura N° 27 (b) y la Figura N°30 (b), representa la visualización del Optical Flow aplicado a todos los Frames superpuestos. Posteriormente a cada Frame que se le aplicó el Optical Flow, se realizó las sumas de vectores para poder representar en 1 solo vector el Optical Flow, objeto ver la tendencia.

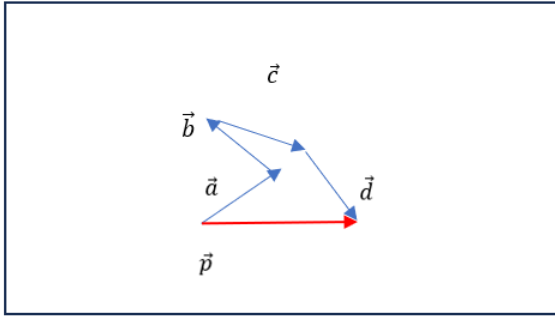


Figura 36 Proceso de suma de vectores [Elaboración propia]

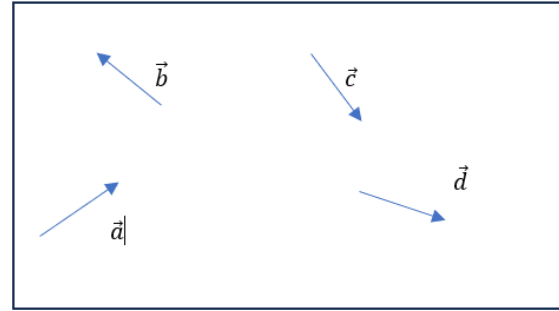


Figura 37 Proceso de suma de vectores [Elaboración propia]

En donde de acuerdo con la ecuación (35) el vector $\vec{p}$, representa la suma de todos los vectores de 1 frame luego de haber aplicado Optical Flow, este procedimiento se realizó para todos los Frames y cuya representación se puede apreciar en la Figura N°36

$$\vec{p} = \vec{a} + \vec{b} + \vec{c} + \vec{d} \quad (35)$$

Luego la representación gráfica de cada vector resultante por cada frame se puede ver en la Figura N°27 (d), en la Figura N° 30 (d) y en la Figura N°33(b) que corresponden a la imagen Fullframe, recortada y aplicada una máscara, donde se puede ver gráficamente la dirección de los vectores de cada Frame mientras que en la Figura N°28, Figura N°31 y Figura N°34, se graficaron los ángulos de los vectores, considerando un sistema cartesiano en donde el 0° se encuentra a la derecha y el 180° a la izquierda

Posteriormente se realizó un histograma de los ángulos como en la Figura N°29, Figura N° 32 y Figura N° 35, en donde podemos ver que el porcentaje más alto de ángulos está centrado entre los 150° y los 200° y tomando en consideración que el curso que debe seguir el buque para poder quedar en su posición final es de 180° , esto quiere decir que el algoritmo está funcionando bien.

Para poder comparar el desempeño del algoritmo en cada una de las resoluciones se aplicó la distribución normal objeto tener como referencia la media y la desviación estándar ecuación N° 36 de acuerdo con la Figura N°38.

$$y = f(x|\mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (36)$$

	144		240		360		480		720		1080		4k	
	mu	sigma	mu	sigma	mu	sigma	mu	sigma	mu	sigma	mu	sigma	mu	sigma
fullframe	183,4447	95,5776	182,5907	93,7044	181,8543	90,9824	181,6628	89,4300	181,2220	84,4860	182,3491	88,3350	183,7262	89,6336
recortado	180,6518	50,6033	182,6157	52,7991	182,1045	55,9704	181,3520	57,8814	180,1808	47,0733	180,8875	56,5949	181,8033	60,5497
maskara	181,8233	71,4429	181,4173	61,9537	179,4448	64,4484	180,1853	53,5248	177,3233	40,4165	180,9185	49,5622	179,2817	48,3504

Figura 38 Tabla comparación resoluciones distribución normal [Elaboración propia]

Como se puede apreciar, la diferencia de la media μ en las distintas resoluciones no varía mucho considerando que la dirección general debe ser 180° , lo que si varía es la desviación estándar σ , esto es debido a que, tanto en la máscara como en la recortado, se elimina todo el ruido que genera el Optical Flow alrededor del dique, para solo concentrarse en los vectores que genera el movimiento del buque.

Concentrándose en la opción recortado, si bien las diferencias de la desviación estándar σ no son sustantivas, el tiempo computacional que toma procesar los datos va disminuyendo a medida que disminuye la resolución.

De acuerdo a lo que se planteó en el punto 2.2 y en especial en la Figura N° 38, se decidió trabajar con 2 resoluciones y en el formato recortado, la de $720p$ debido a que tiene la menor desviación estándar y la media más cercana a 180° y con la resolución de $144p$ por tener de igual forma la segunda desviación estándar más baja y la segunda media más cercana a 180 , junto con ello coincide con ser una buena resolución de imagen ($720p$) y la menor resolución posible ($144p$), para tener en consideración con respecto al uso computacional para el procesamiento.

Teniendo el video con el cual se va a trabajar, a continuación, se muestran las imágenes en resolución $720p$ en los 3 formatos y posteriormente la resolución de $144p$ de igual forma en los 3 formatos.

720p Recortado

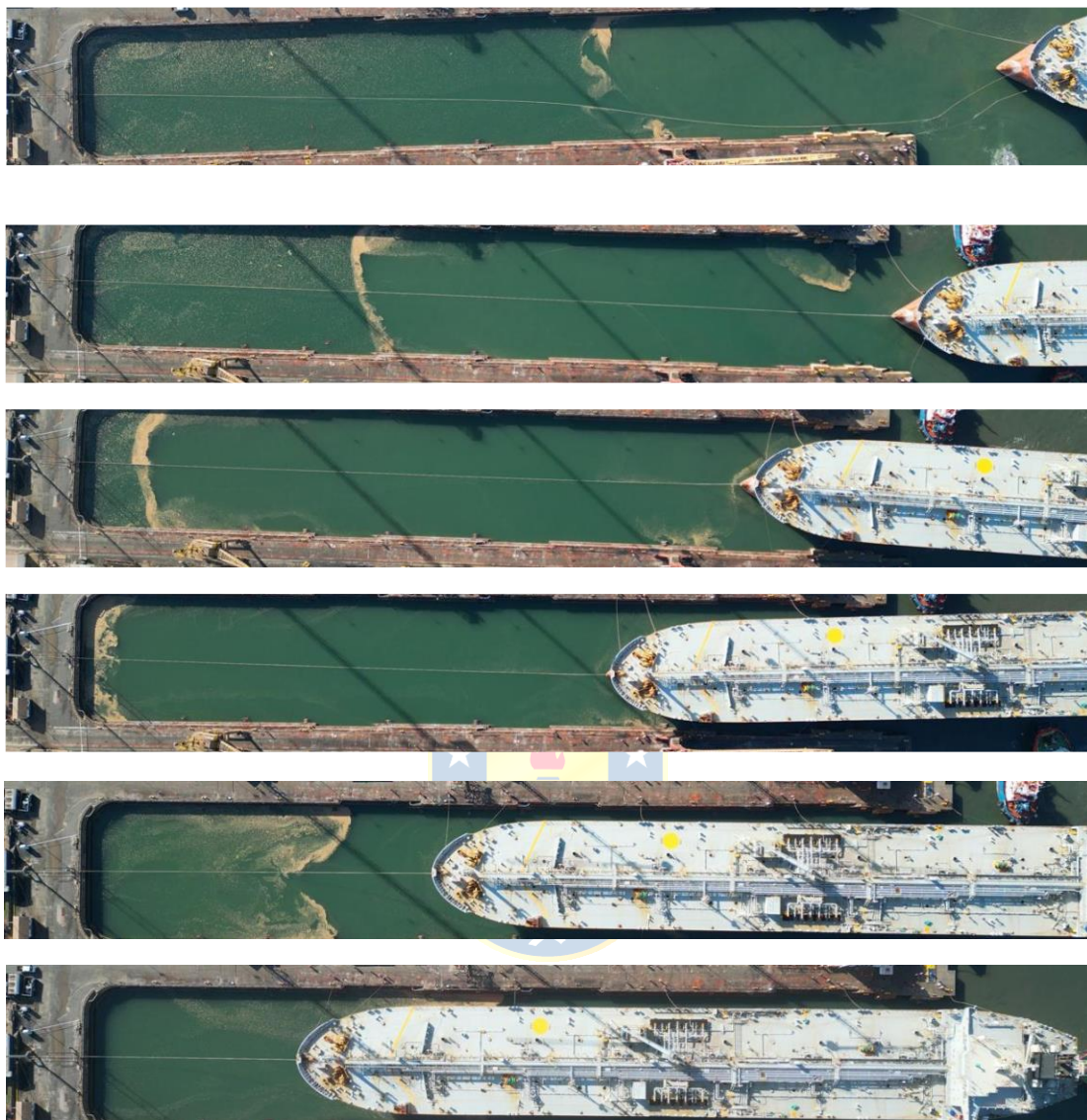


Figura 39 Proceso entrada a dique 720p recortado [Elaboración propia]

720p Máscara

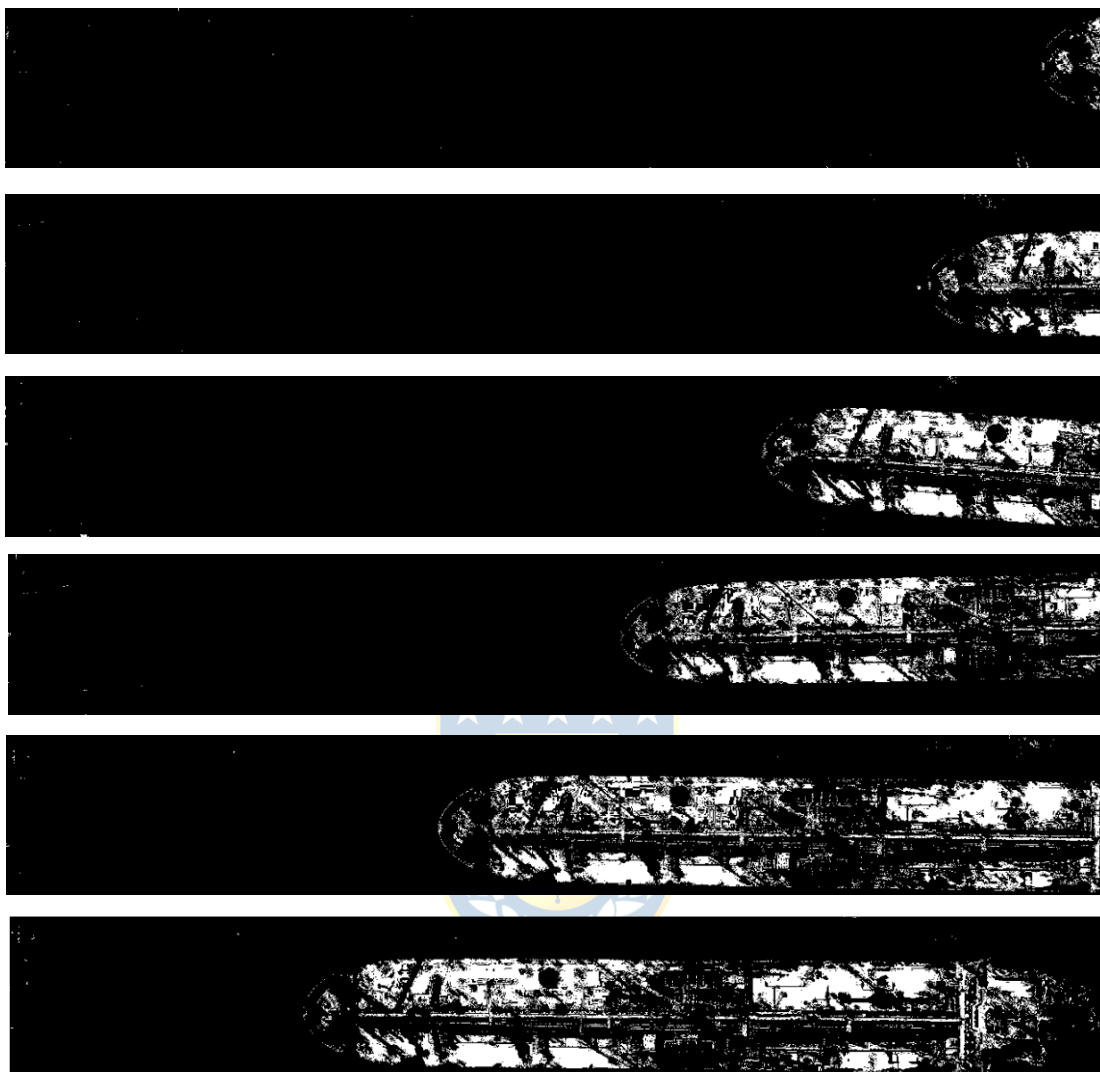


Figura 40 Proceso entrada a dique 720p con mascara [Elaboración propia]

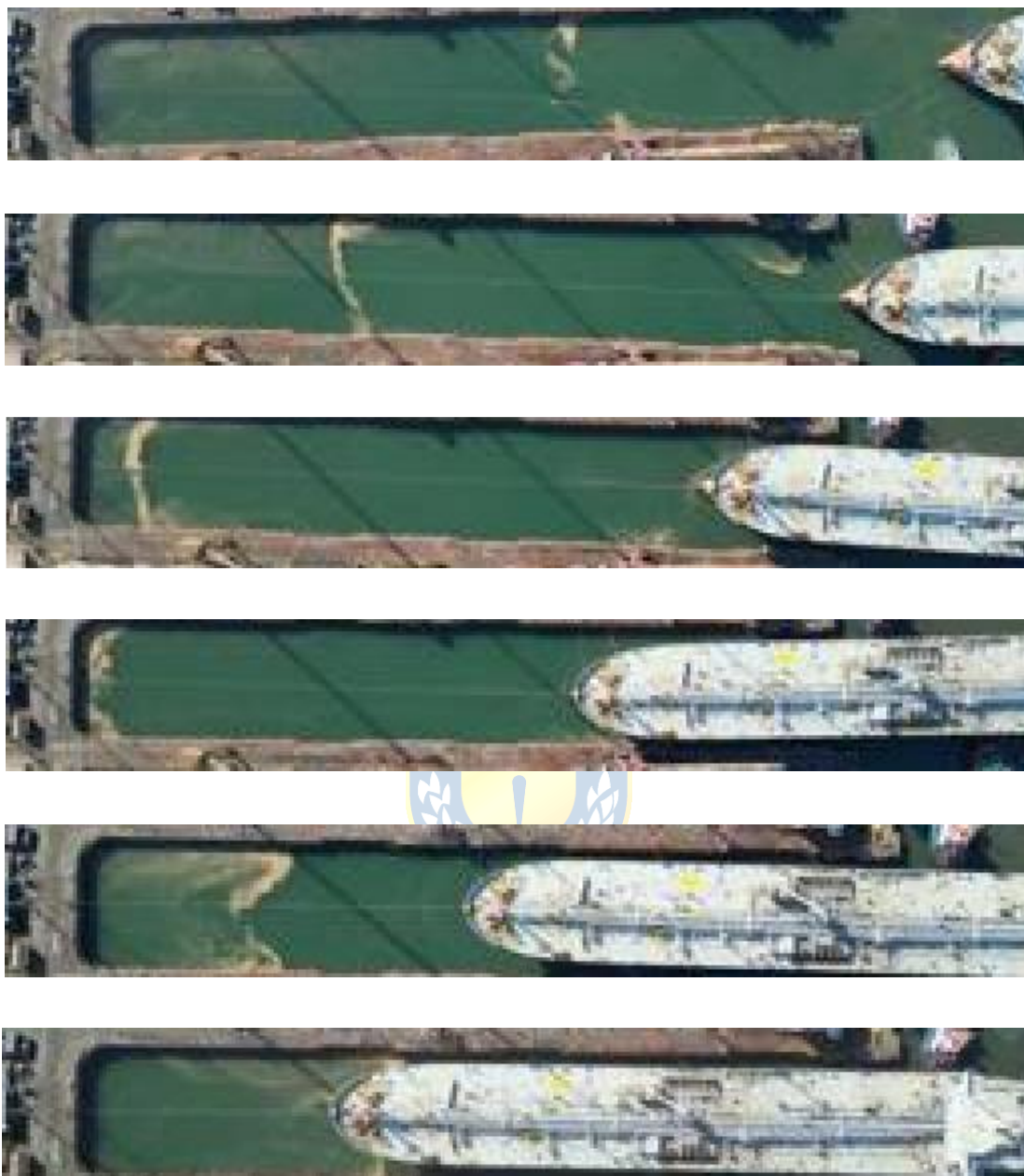
144p Recortado

Figura 41 Proceso entrada a dique 144p recortado [Elaboración propia]

144p Máscara



Figura 42 Proceso entrada a dique 144p con mascara [Elaboración propia]

Posteriormente realiza el proceso de Optical Flow en las 2 resoluciones en el formato recortado, y mostrando solo 1 vector por frame objeto ver la tendencia del buque mientras está ingresando al dique

720p Recortado

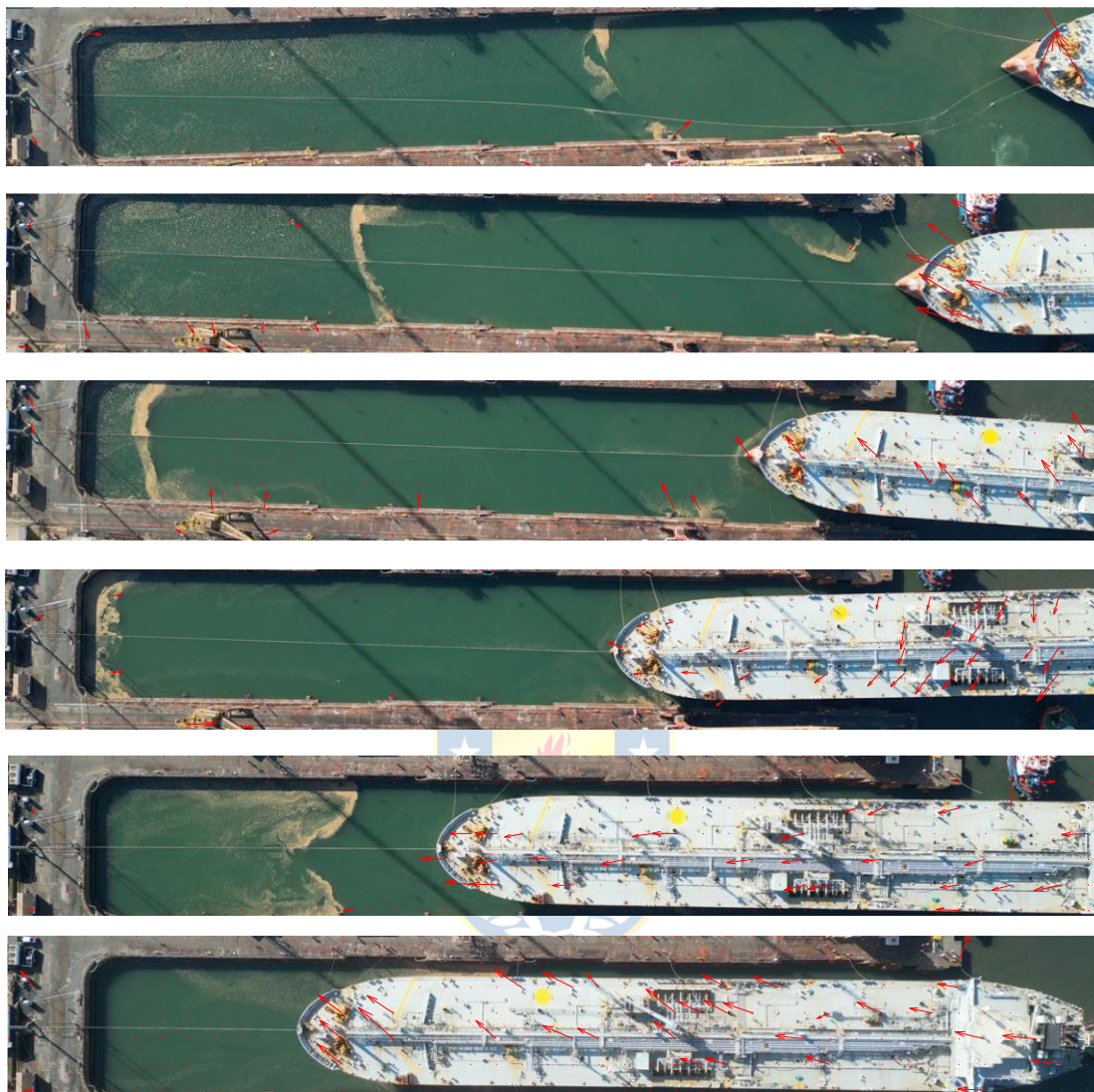


Figura 43 Optical Flow 720p recortado [Elaboración propia]

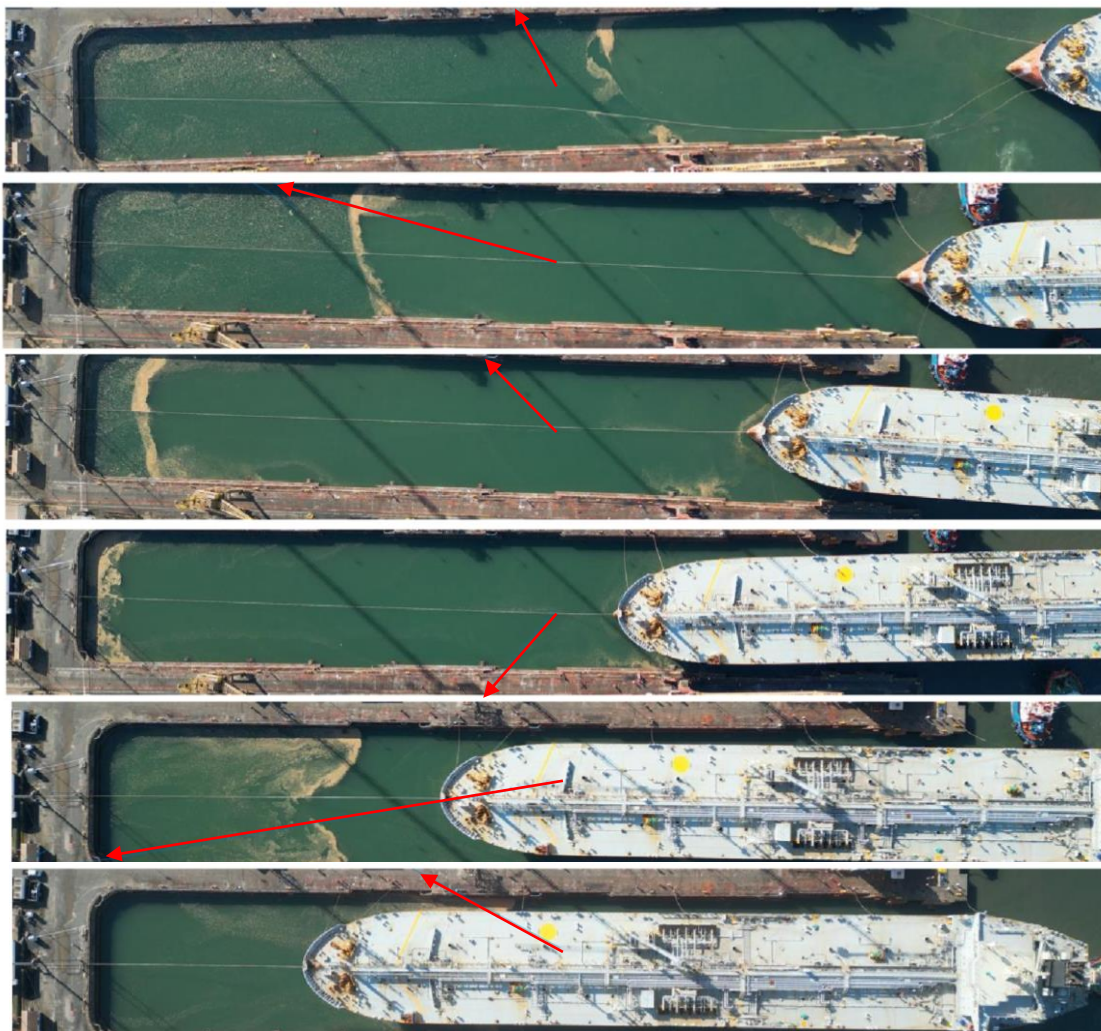


Figura 44 Optical Flow centrado en un vector 720p [Elaboración propia]

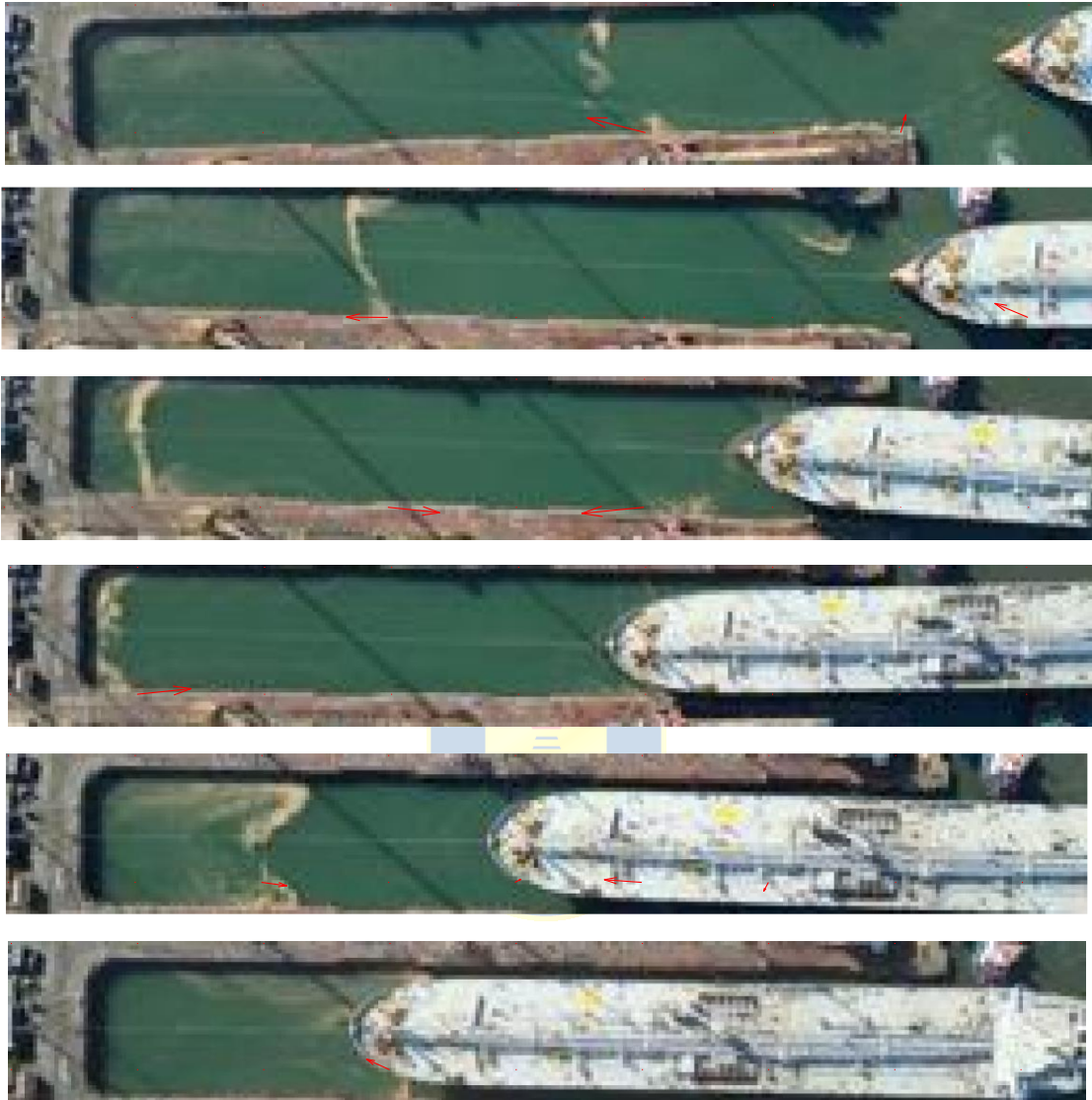
144p Recortado

Figura 45 Optical Flow 144p [Elaboración propia]



Figura 46 Optical Flow centrado en 1 vector 144p [Elaboración propia]

Teniendo en consideración que el tiempo ocupado en el procesamiento los videos en 720p y 144p es de 614,2 segundos y 388,6 segundos respectivamente por un computador con las siguientes características [22]:

Características	
Marca	ASUS
Modelo	M415D
Sistema Operativo	Windows 11 Home
Procesador	AMD Ryzen 7 3700U; 2,3 GHz
Memoria RAM	8 GB
Gráficos	Radeon Vega Mobile Gfx

Los datos e imágenes obtenidas en una resolución media como es de 720p y de una baja resolución 144p son similares, pero para efectos de procesamiento se recomienda usar el de más baja resolución por el tiempo que implica procesar los datos y los resultados similares en cuanto a tendencia mostrada con respecto a las otras resoluciones.



3.3. Cálculo de distancias

3.3.1. Cálculo FOV

Como se mencionó en el estado del arte, el FOV (Field o View) es el cálculo del ángulo visual de la cámara. El FOV depende del lente de la cámara y del arreglo de sensores FPA (Focal Plane Array). Para una capara con una distancia focal f y un arreglo de sensores FPA de longitud b el FOV puede ser calculado de la siguiente forma [12]:

$$FOV = 2 * \arctan\left(\frac{b}{2f}\right) \quad (37)$$

A una distancia D la longitud x de la imagen vista será de:

$$x = 2 * D * \tan\left(\frac{FOV}{2}\right) \quad (38)$$

Para el cálculo del FOV se tomaron las características de la cámara del Drone que usamos para realizar la grabación y adquisición de imágenes.

Sensor: 1/2.3" CMOS

Tamaño del sensor: 3840 x 2160.

Distancia focal: 4,3 mm

Altura del Drone (d): 150 m

Tamaño píxel: 2,4 μm

Por lo tanto, obtendremos lo siguiente:

$$b_x = \text{ancho del sensor} = 3840 * 2,4\mu m = 9,2mm \quad (39)$$

$$b_y = \text{alto del sensor} = 2160 * 2,4\mu m = 5,2mm \quad (40)$$

$$HFOV = 2 * \tan\left(\frac{b_x}{2 * f}\right) = 95,3043^\circ \quad (41)$$

$$VFOV = 2 * \tan\left(\frac{b_y}{2 * f}\right) = 63,3610^\circ \quad (42)$$

$$\text{Tamaño horizontal image} = x_h = 2d * \tan^{-1}\left(\frac{HFOV}{2}\right) = 2 * 150 * \tan^{-1}\left(\frac{95,3043^\circ}{2}\right) \quad (43)$$

$$\text{Tamaño horizontal image} = x_h = 329,1429 m \quad (44)$$

$$\text{Tamaño vertical image} = v_h = 2 * d * \tan^{-1}\left(\frac{VFOV}{2}\right) = 2 * 150 * \tan^{-1}\left(\frac{63,3610^\circ}{2}\right) \quad (45)$$

$$\text{Tamaño vertical image} = v_h = 185,1429 m \quad (46)$$

Esto significa que a una altura de 150m del Drone la imagen que estamos viendo tiene una distancia 329,1429m horizontalmente y de 185,1429m verticalmente. Estas distancias pueden aumentar o disminuir de acuerdo con la altura que se encuentre el Drone, mientras más alto se encuentre mayor será la distancia en la imagen que pueda captar y de igual forma si el Drone disminuye su altura, la imagen que capta será menor por lo que el área que mostrará será menor.

Es por esto por lo que para poder realizar el conteo de pixeles en la imagen y saber que distancia representa cada píxel de la imagen y poder determinar distancias tendremos que dividir la distancia horizontal y vertical con la respectiva resolución de la imagen.

$$\text{valor horizontal pixel en imagen} = \frac{\text{tamaño horizontal de la imagen}}{\text{resolución píxel}} = \frac{329,1429}{3840} \quad (47)$$

$$\text{valor horizontal del pixel en la imagen} = 0,0857m \quad (48)$$

$$\text{valor vertical pixel en imagen} = \frac{\text{tamaño vertical de la imagen}}{\text{resolución píxel}} = \frac{185,1429}{2160} \quad (49)$$

$$\text{valor vertical del pixel en la imagen} = 0,0857m \quad (50)$$

De acuerdo con las ecuaciones anteriores, podemos determinar que cada píxel en la imagen ya sea vertical u horizontal a una altura de $150m$ del Drone representa $0,0857m$, por lo que esto nos da el paso para el siguiente proceso que es realizar la identificación de objeto y posteriormente el conteo de pixeles objeto poder determinar las distancias.

3.3.2. Identificación del muelle

Para el cálculo de distancias es necesario tener la máxima resolución de la imagen objeto tener una mejor resolución espacial, y con esto medir la distancia de forma más precisa. Para esto al igual que en el punto 2.3.1., se realizó una segmentación RGB creando 2 máscaras, una que pudiera identificar el muelle del resto de la imagen y por otra parte una segmentación que pudiera identificar solamente el buque, como se pueden apreciar en la Figuras N°47 y Figura N°48 respectivamente.

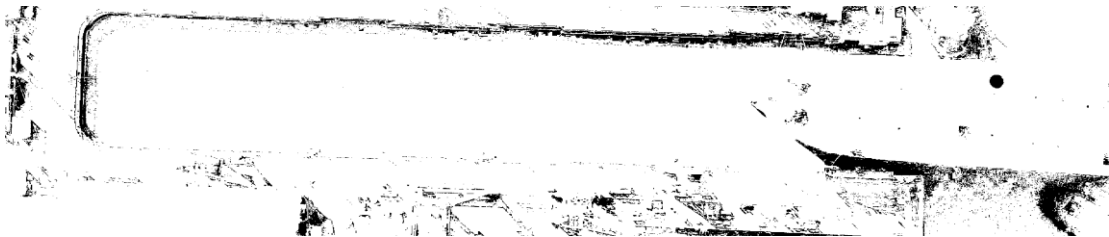


Figura 47 Segmentación para identificar el muelle [Elaboración propia]



Figura 48 Segmentación para mostrar el buque [Elaboración propia]

Luego de tener ambos objetos identificados, se realiza una operación morfológica para rellenar agujeros dentro de la imagen “*imfill*”, que consiste en rellenar los agujeros en la imagen de entrada binaria. En esta sintaxis, un agujero es un conjunto de píxeles del fondo que no se puede alcanzar el rellenado del fondo desde el borde de la imagen [23]. Luego de esta operación comienza el proceso de medir las distancias dentro del dique, para esto fue necesaria identificar desde donde comienza el muelle por la proa. Para esto se separó la imagen en 3, y se sumaron todos los 1's en forma vertical, objeto identificar la zona encerrada en un círculo en la Figura N°49. Luego aplicando la operación para determinar los mínimos locales en la región establecida entre las dos líneas rojas, se podrá identificar desde donde comienza el muelle, como se puede apreciar en la Figura N°51.



Figura 49 Proceso para identificar el muelle por la proa [Elaboración propia]

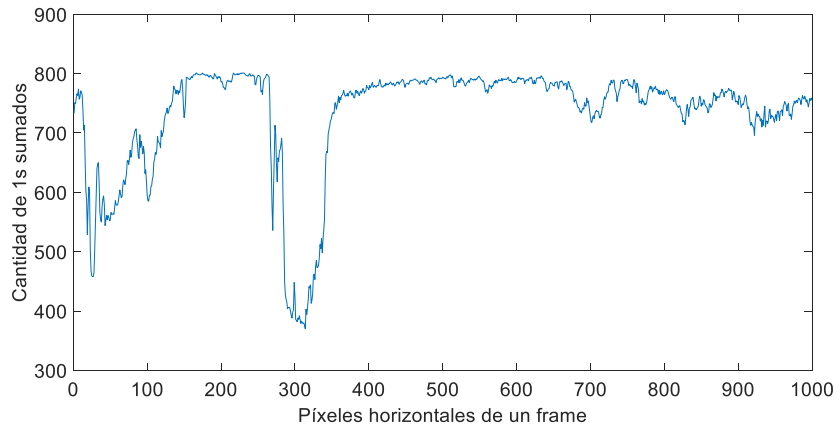


Figura 50 Suma de 1's en el sector demarcado [Elaboración propia]

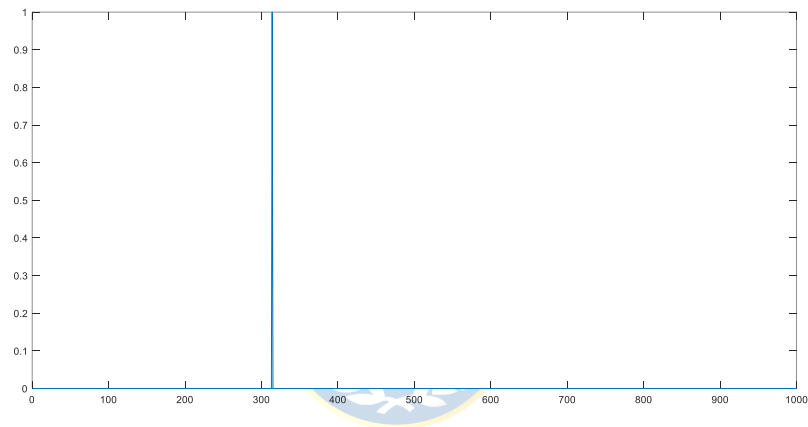


Figura 51 Identificación del mínimo local [Elaboración propia]

Este ejemplo de trata del frame 1800 del video muestra que el muelle por la proa parte en el pixel número 280, pero se aplica para todos los frames y esta posición del muelle por la proa varía de acuerdo al movimiento del Drone, pero no es relevante el desplazamiento ya que siempre el conteo va a comenzar desde donde marque que comienza el muelle.

En la Figura N°52 muestra cómo va variando la posición de donde comienza el muelle por la proa a lo largo del video, en donde la posición varía alrededor de 100 píxeles, que si se multiplica por el valor que representa cada píxel en el video de acuerdo con la ecuación (50), da como resultado que durante el video el muelle se desplaza 8,57 m.

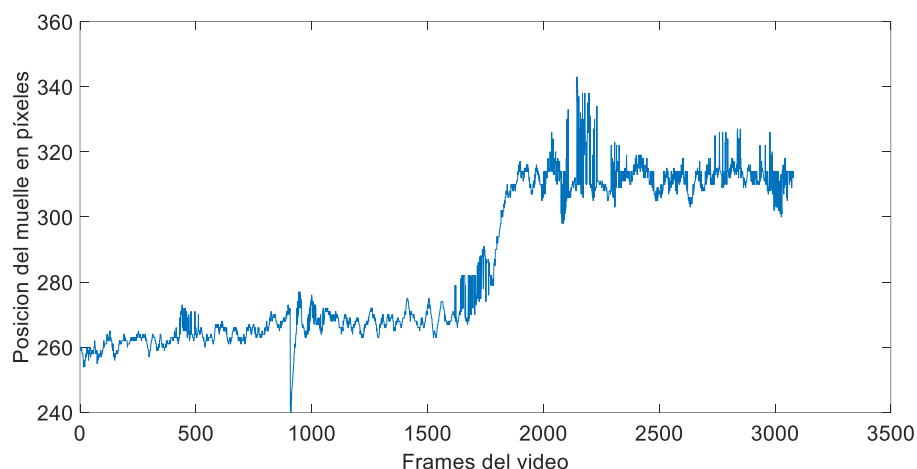


Figura 52 Posición del muelle por la proa a lo largo del video [Elaboración propia]

Posteriormente se identificó cual era el borde del muelle por la banda de estribor. Al igual que el muelle por la proa, se realizó la suma de los 1's pero en este caso en forma horizontal dividiendo la imagen en 2 y sumando las filas para identificar el mínimo local por cada frame.

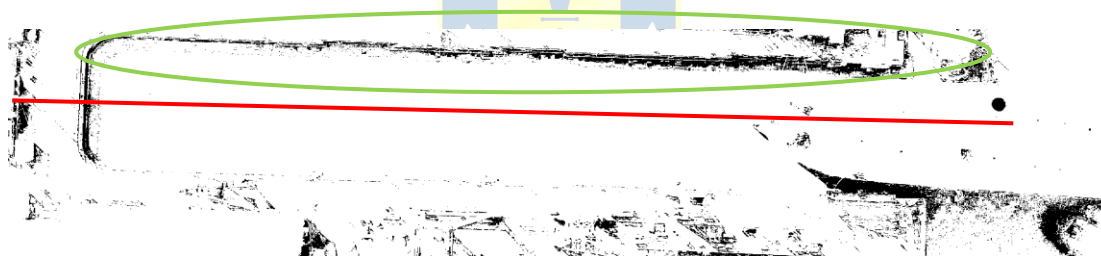


Figura 53 Proceso para identificar el muelle por estribor [Elaboración propia]

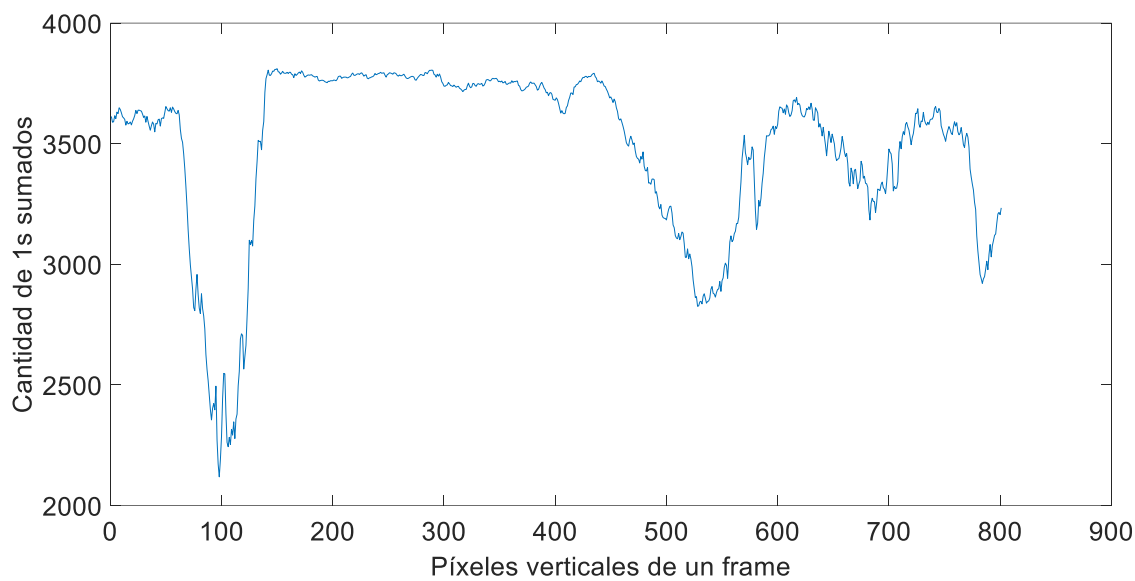


Figura 54 Sumas de 1's en el sector demarcado [Elaboración propia]

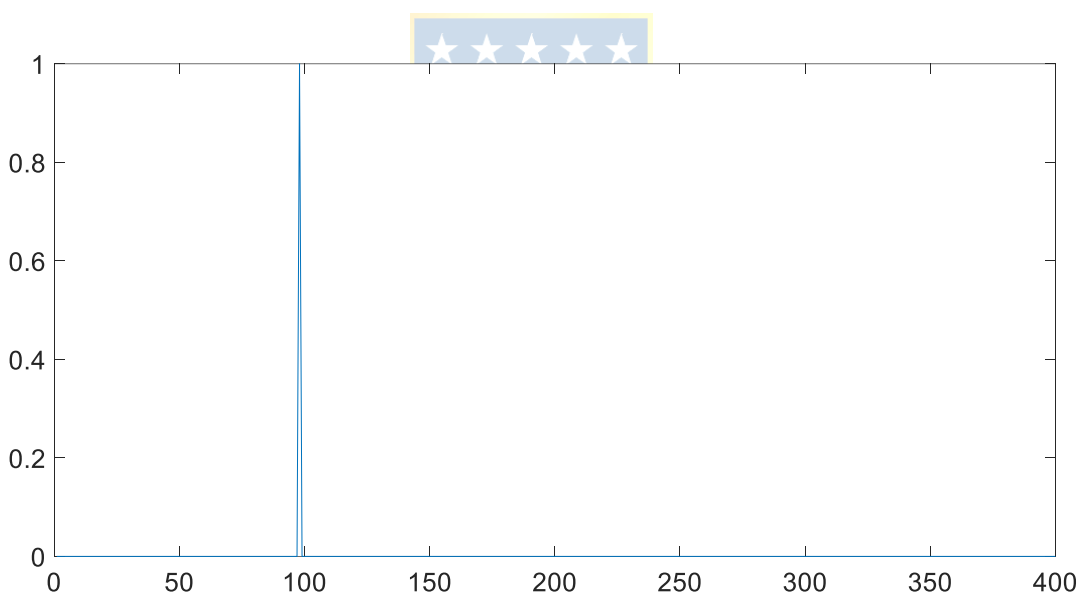


Figura 55 Identificación mínimo local [Elaboración propia]

Este ejemplo de trata del frame 1250 del video muestra que el muelle por estribor parte en el pixel número 100, pero se aplica para todos los frames y esta posición del muelle por estribor varía de acuerdo al movimiento del Drone, pero no es relevante el desplazamiento ya que siempre el conteo va a comenzar desde donde marque que comienza el muelle.

En la Figura N°56 muestra cómo va variando la posición de donde comienza el muelle por estribor a lo largo del video, en donde la posición varía alrededor de 100 píxeles, que si se multiplica por el

valor que representa cada píxel en el video de acuerdo con la ecuación (50), da como resultado que durante el video el muelle se desplaza 8,57 m.

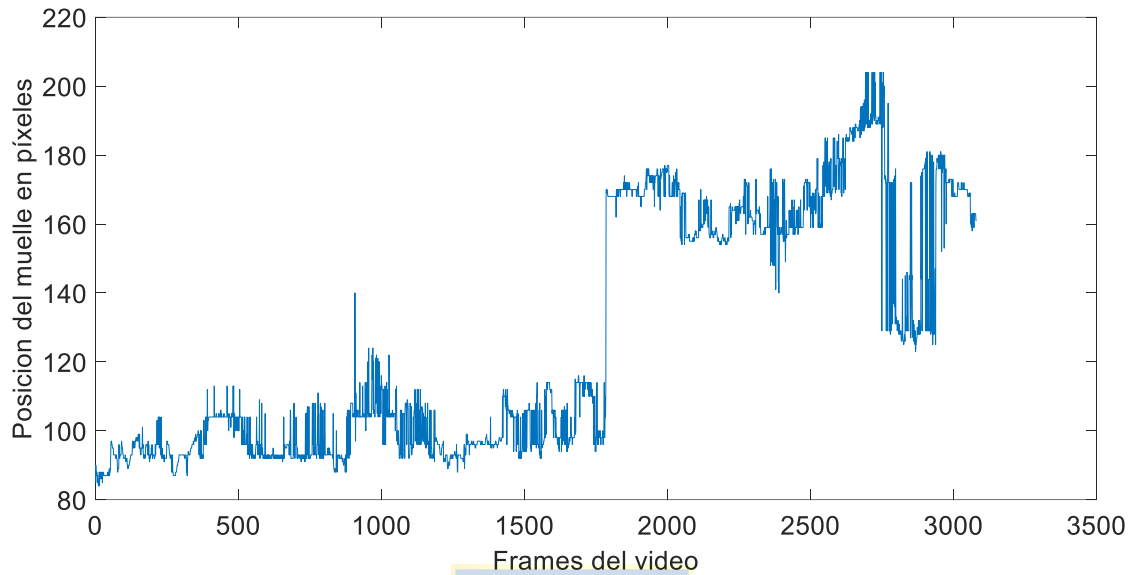


Figura 56 Posición del muelle por estribor a lo largo del video [Elaboración propia]

3.3.3. Cálculo de distancias del buque al muelle

3.3.2.1. Distancia por la Proa

Teniendo identificados el borde del muelle, se puede realizar el conteo de píxeles desde el buque al muelle. Para esto al igual que los ejemplos anteriores se tomó el frame 1800 para demostrarlo. Teniendo la posición del muelle por estribor y considerando que el dique tiene una manga de 40 m se tomó la mitad del dique. Esto quiere decir que a la posición del muelle por babor se le sumo la mitad de los píxeles que representa la manga del dique y se tiene la posición en píxeles que representa la mitad del dique en todos los frame. Esto fue necesario de realizar debido que, para calcular la distancia desde la proa del dique hasta la proa del buque, se sumaron en forma vertical los 1's desde la columna donde comienza el borde del dique por la proa hasta el buque, más menos 5 píxeles de veril en la mitad del dique, esto para que el primer peak local de la suma va a representar el comienzo del buque. En forma gráfica se puede explicar cómo en la Figura N°57.

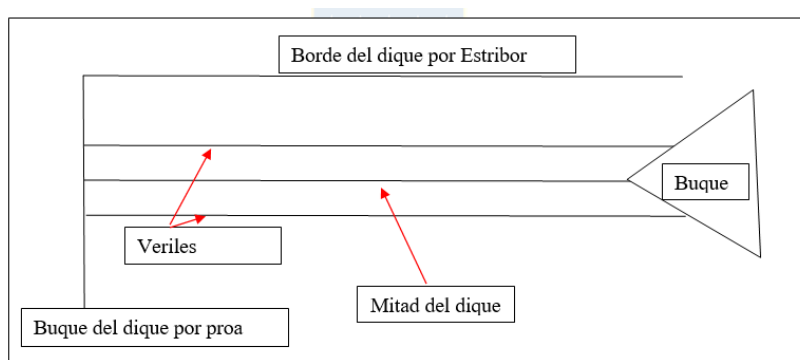


Figura 57 Suma de píxel para cálculo de distancia por la proa [Elaboración propia]

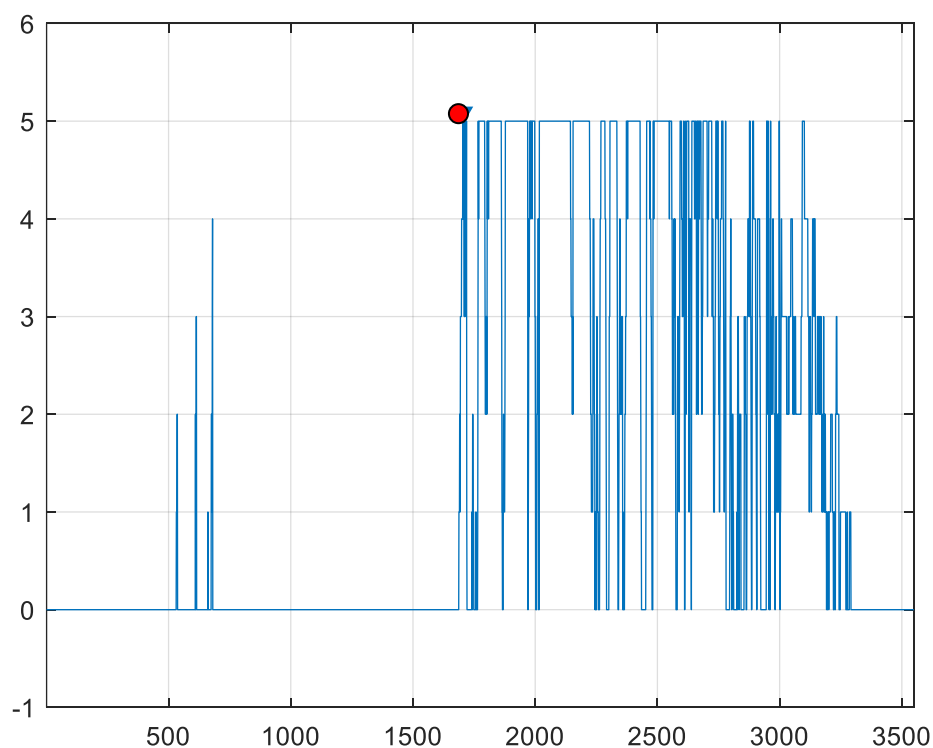


Figura 58 Suma de 1's por la proa para cálculo de distancias [Elaboración propia]

El punto rojo significa que en ese píxel de la imagen comienza el buque, esto se identifica usando la función `findpeaks` en MATLAB, el cual arroja la posición y la altura del peak. Dentro de la información que necesitamos es solo la posición, por lo que la posición del frame 1800 de donde comienza el buque puede quedar graficado como en la Figura N° 59.

Al realizar el mismo proceso para todos los frames de la imagen, podemos identificar en que píxel se encuentra la proa del buque a lo largo del video como se puede apreciar en la Figura N°60, en donde

claramente se ve que a medida que va avanzando los frames, la distancia de la proa al muelle va disminuyendo. En la Figura N°61, se puede ver la misma distancia, pero multiplicado por el factor que representado cada píxel de acuerdo con la ecuación (50).

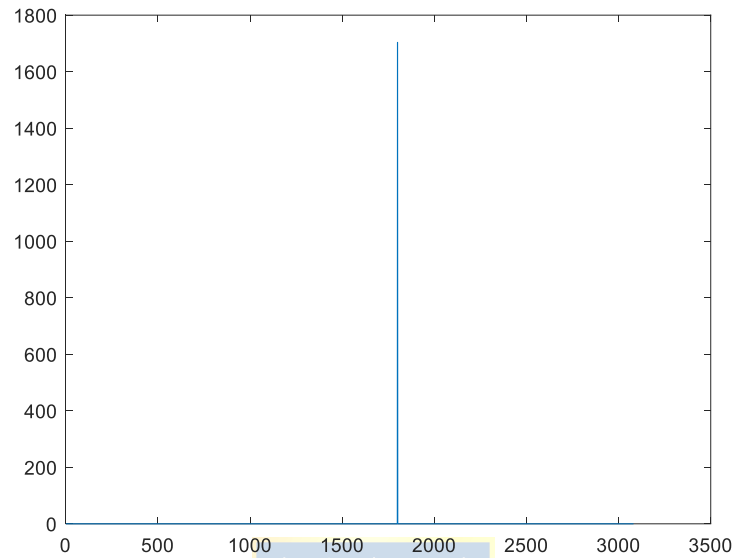


Figura 59 Distancia del buque al muelle en el frame 1000 [Elaboración propia]



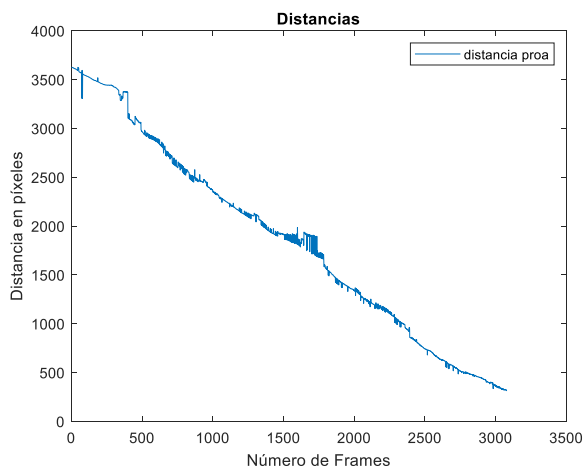


Figura 60 Distancia al muelle en pixel [Elaboración propia]

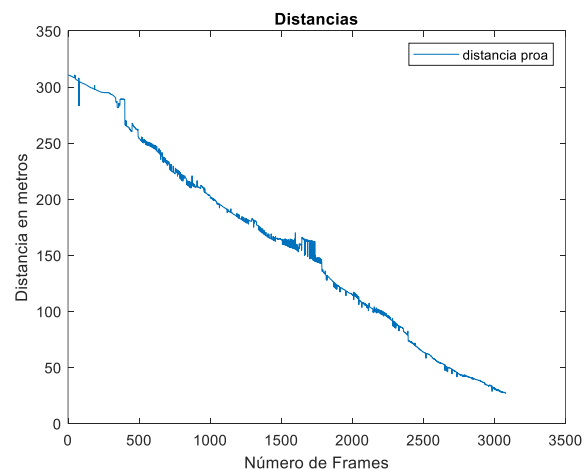


Figura 61 distancia al muelle en metros [Elaboración propia]

3.3.2.2. Distancia por estribor

Para realizar el proceso de determinar la distancia del buque al muelle por estribor, se tomaron 3 referencias del buque, por la proa, por el centro y por la popa del buque.

El proceso es similar al cálculo de la distancia que se realizó por la proa, con la diferencia que con el cálculo anterior ya se conoce cuál es la posición de la proa del buque en píxeles, por lo que en esa misma columna de píxel se puede calcular la primera distancia a estribor, que correspondería a la distancia proa a estribor. Posteriormente se conoce cuáles son las características de eslora y manga del buque y cuanto representa cada píxel en metros, por lo que se realizó la división de la eslora del buque, por lo que representa cada píxel y se tiene el largo del buque en píxel. Teniendo este largo del buque, se puede dividir en 3 partes para identificar los otros dos puntos para poder calcular las distancias al muelle que serían la de centro y la de popa.

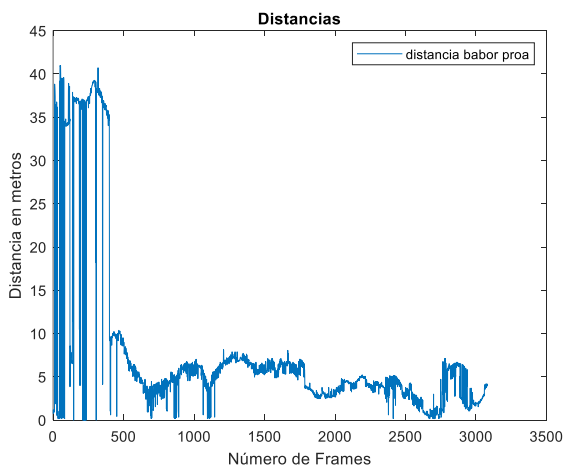


Figura 62 Distancia proa a estribor [Elaboración propia]

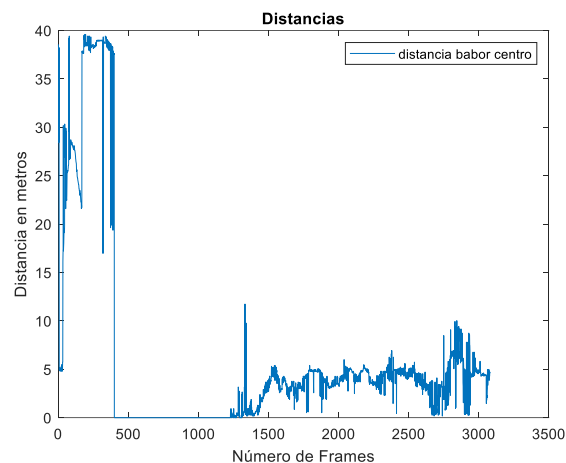


Figura 63 Distancia centro a estribor [Elaboración propia]

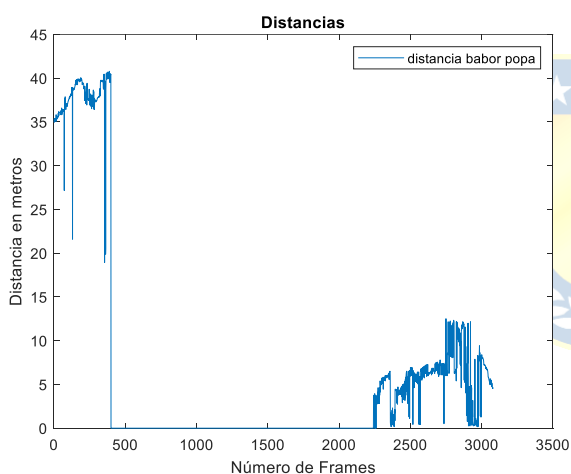


Figura 64 Distancia popa a estribor [Elaboración propia]

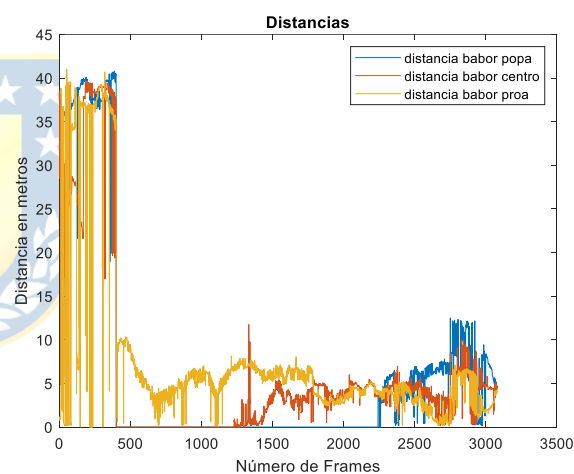


Figura 65 Representación de todas las distancias a estribor [Elaboración propia]

Los gráficos muestran que durante los primeros 490 frames el buque aun no hacia ingreso al dique por lo que las distancias no son una representación real, mientras que a partir de los 490 frames, comienza a ingresar la proa del buque al dique, en donde se va representando la imagen. Consecutivamente la distancia del centro del buque al muelle comienza a ser contabilizada a contar de los 1300 frames y luego la distancia de la popa comienza a ser registrada a contar de los 2250 frames.

Tomando en consideración las características del dique previamente mencionado de una eslora de 265 metros y una manga de 42 metros, junto con las características del buque de una manga de 32,2 metros y una eslora de 228 metros, esto quiere que por ambas bandas del buque cuando se encuentre completamente alineado, debe haber una distancia de 6,4 metros y debe llegar a una posición final en que exista una diferencia de 37 metros entre el buque y el largo del dique, vamos a analizar 3 frames para poder verificar en los gráficos.

Frame N°233

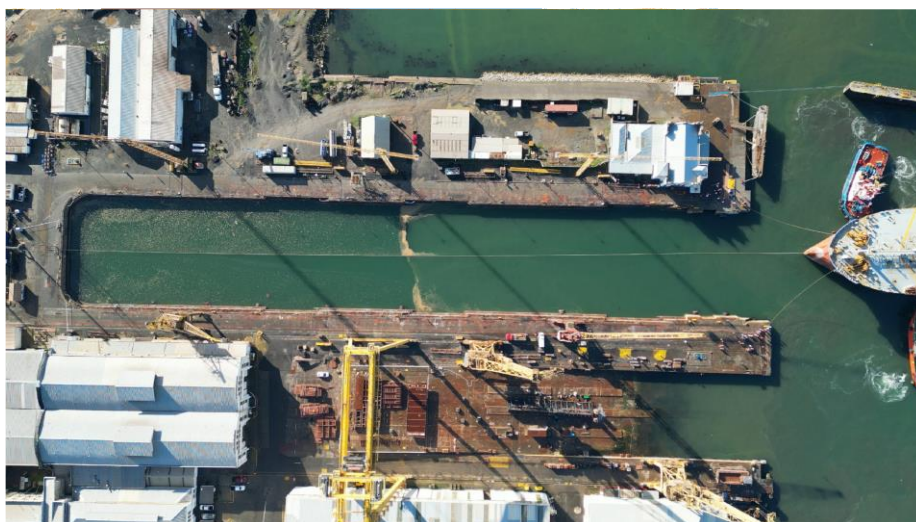


Figura 66 Posicion del buque en el frame 233 [Elaboración propia]

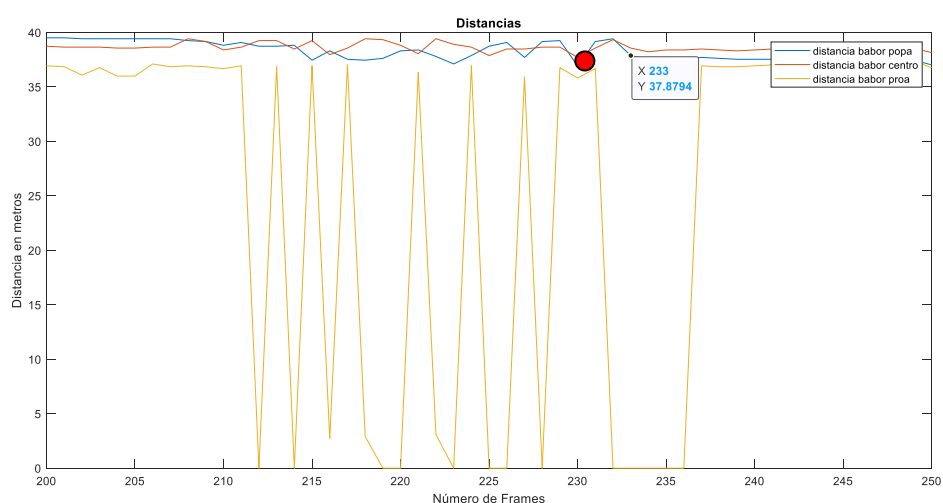


Figura 67 Distancia del buque en el frame 233 [Elaboración propia]

Si se realiza un zoom a la Figura N°65, podemos apreciar que los valores son elevados, destacando el valor de las distancias en el frame 233 demarcado con un símbolo rojo, esto quiere decir que el buque aun no entra a dique, lo que puede ser claramente visualizado en la Figura N°66.

Frame N°1650

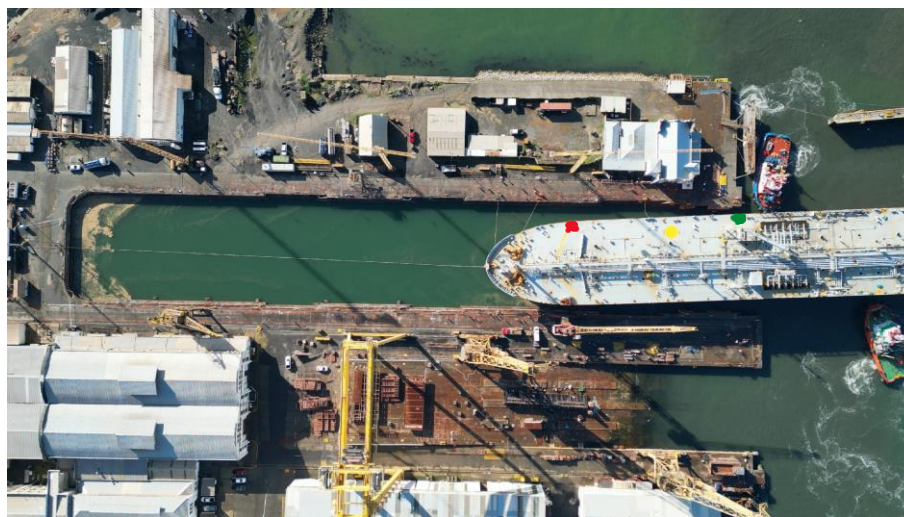


Figura 68 Posición del buque en el frame 1650 [Elaboración propia]

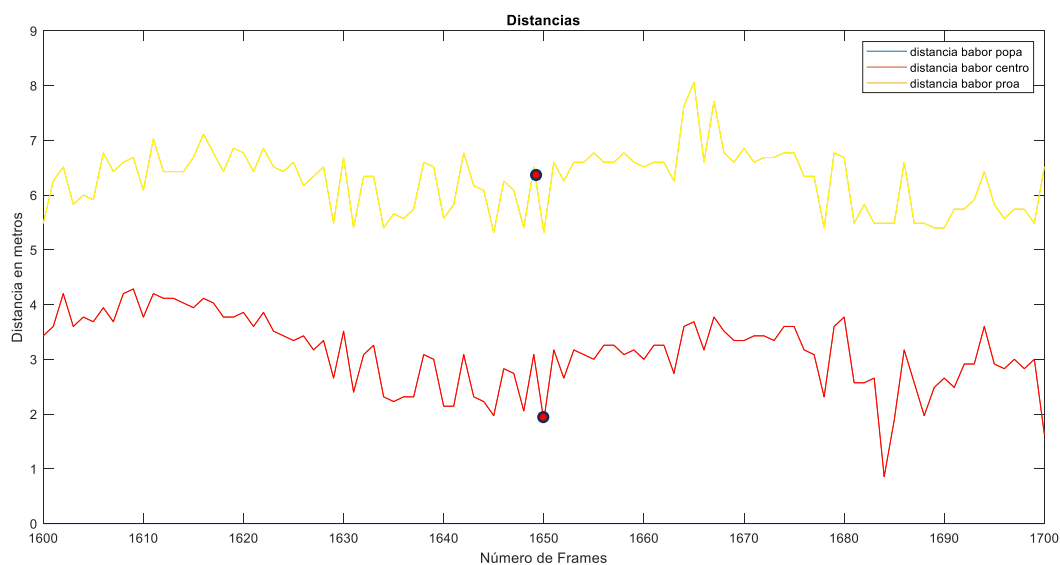


Figura 69 Distancia del buque en el frame 1650 [Elaboración propia]

Si se realiza un zoom a la Figura N°65, podemos apreciar que la proa del buque se encuentra desplazada hacia babor, mientras que en el centro del buque se encuentra muy apegada a estribor. En la figura N°68 se visualiza al buque entrada de forma incorrecta, esto si se toman en cuenta el gráfico de la Figura N°69, se aprecia que la curva superior esta alrededor de los 5 metros que representa la proa del buque demarcado en rojo en la Figura N°68, mientras que la curva inferior está en 1,8 metros, demarcado con un círculo verde.

Frame N°3081

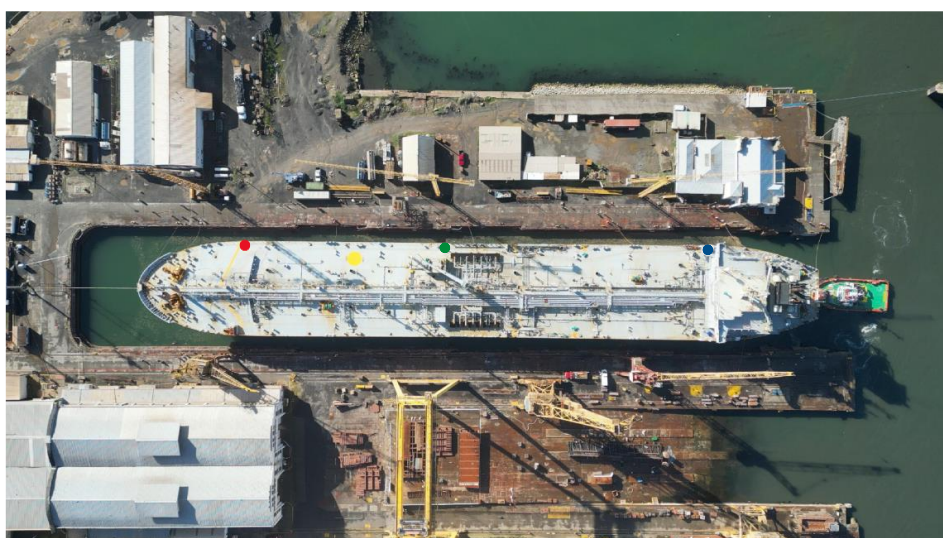


Figura 70 Posición del buque en el frame 3081 [Elaboración propia]

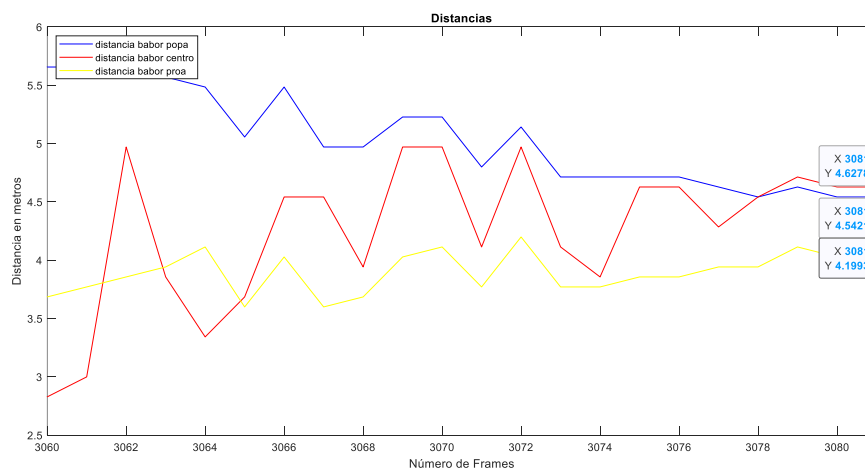


Figura 71 Distancia del buque en el frame 3081 [Elaboración propia]

Por último, en este frame, podemos ver en la Figura N°70 que el buque se encuentra de forma correcta con respecto a la posición del dique, y de igual forma podemos ver en el gráfico de la Figura N°71, que la distancia de los 3 puntos, proa, popa y centro se encuentran parejo en los 4,5 metros, esto quiere decir además que el buque se encuentra en la posición que debería estar.

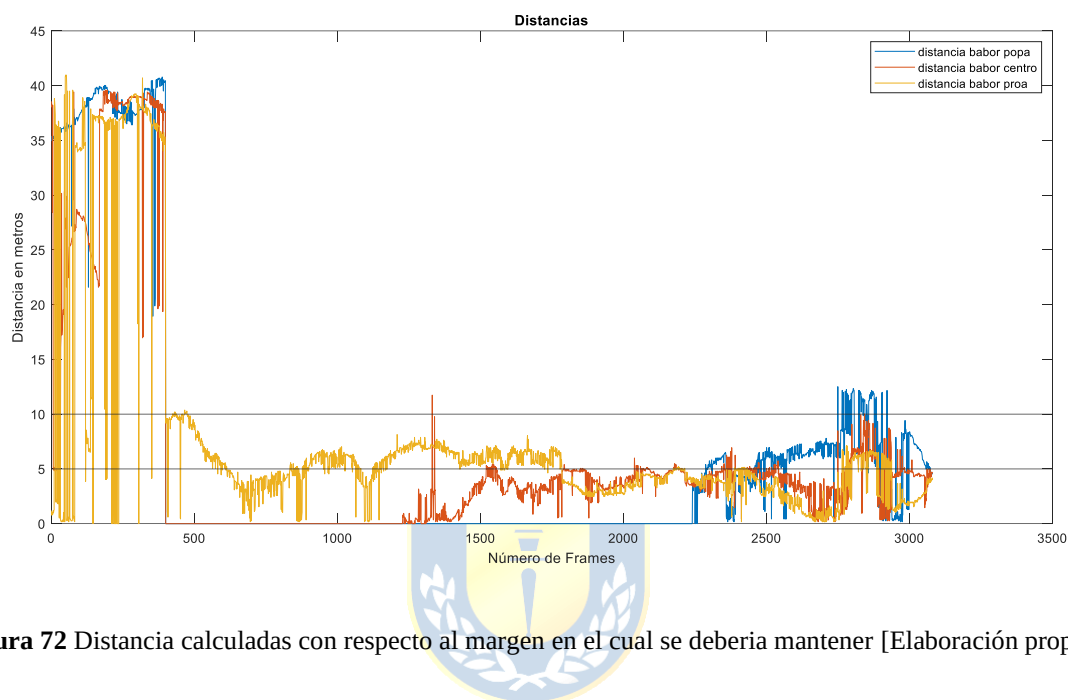


Figura 72 Distancia calculadas con respecto al margen en el cual se debería mantener [Elaboración propia]

A modo general, la línea inferior indica la posición en la cual todos los gráficos se deberían mantener para realizar una entrada a dique de forma constante, mientras que la línea superior ploma indica que, si el gráfico sobrepasa esa línea, es que el buque golpeó al muelle por la banda de babor.

Dentro del gráfico Figura N°72 (línea amarilla) se aprecia que desde el frame 800 aproximadamente y hasta el frame 1700, el buque tuvo un acercamiento por la proa considerable hacia la banda de babor, lo que se puede apreciar en el video y esto también lo podemos ver en el gráfico como la distancia del centro (línea roja) va aumentando hasta llegar a un nivel similar al frame 2000, que posteriormente ambas líneas decaen su valor aumentando la línea azul (distancia de popa), indicando nuevamente que el buque no se encuentra paralelo con respecto al muelle, lo que posteriormente se corrige, para llegar a la posición final.

3.4. Estructura espacio-temporal

La estructuración espacio temporal se realizó de acuerdo con el punto 2.4, en donde por una parte el video de la entrada a dique del buque se bajó la resolución de 4K a 720p y se aplicó el optical Flow con la suma de vectores para representarlo en un solo vector y en el formato recortado para que aparezca solo el díque, posteriormente se graficaron los ángulos obtenidos en una representación de 0° a 360° en donde el vector de los 180° representa el avance que debería tener el buque para entrar a dique.

Por otra parte, el video de la entrada a dique en la resolución de 4K se le aplicó la máscara de segmentación, identificación de objetos y en forma paralela el cálculo del FOV, para realizar el conteo de pixeles y cálculo de distancias de la proa, de la proa al muelle de estribor, el cálculo del centro del buque al muelle de estribor y de la popa del buque al muelle de estribor. Cabe destacar que los tres puntos escogidos para realizar la medición de distancia del buque a estribor fueron puntos en donde la distancia de la manga del buque fuera similar, esto debido a que en caso de golpear el buque dentro del dique son los primeros lugares en donde golpearía.

Por último, se varió la resolución temporal utilizando la correlación de los frames para mejorar la eficiencia computacional, ya que se está trabajando con un conjunto de datos que son grandes y junto con ello los cálculos que se realizan son intensivos. Básicamente la resolución temporal se ocupó para no procesar todos los datos donde los cambios entre frames eran despreciables facilitando con esto la velocidad de procesamiento del algoritmo.

Con los resultados de los procesos se graficaron las distancias y los ángulos con respecto a los frames, y esto nos dio como resultado los gráficos de la Figuras N°72.

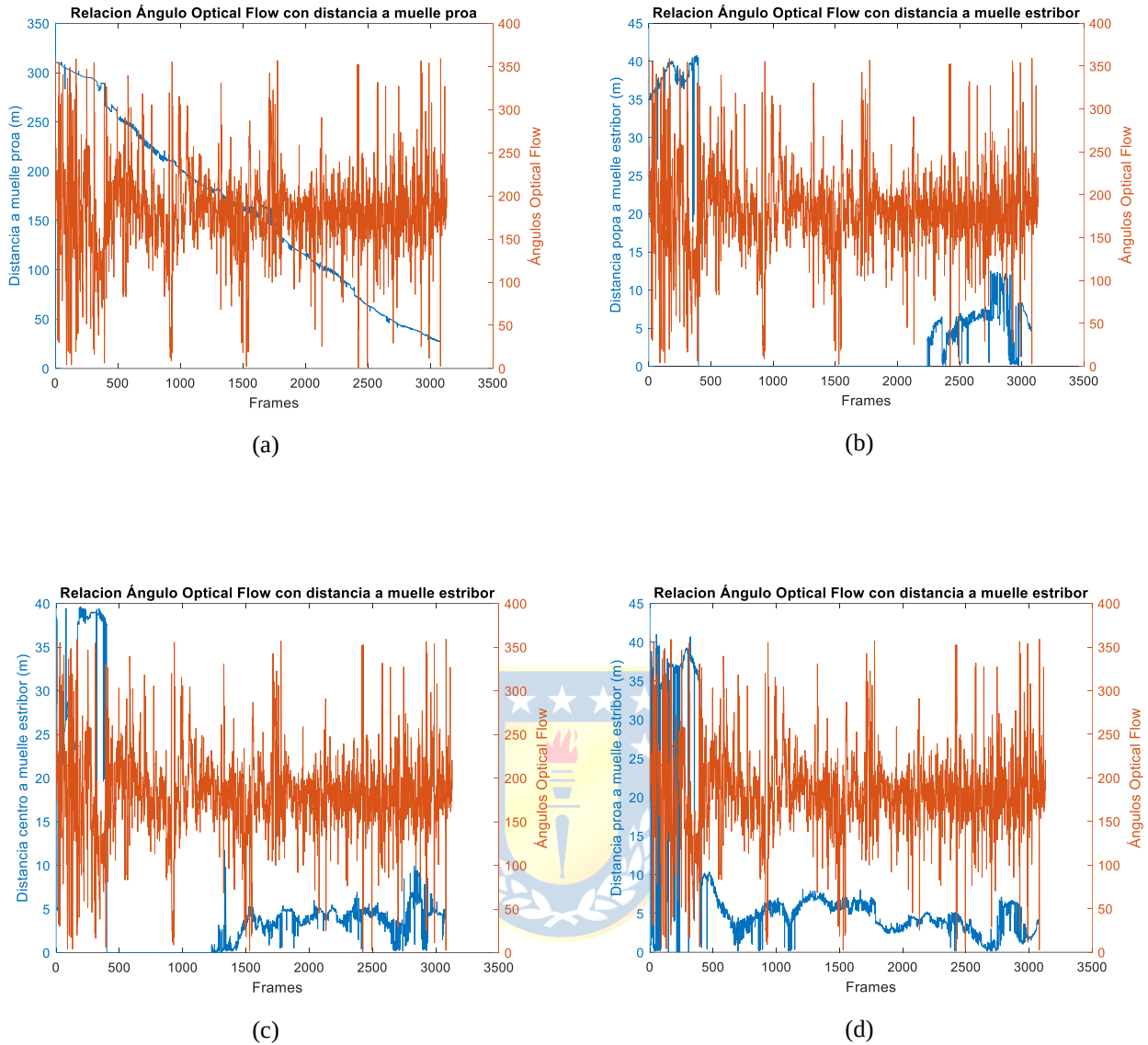


Figura 73 (a) Ángulos del optical flow con la distancia a proa. (b) Ángulos del optical flow con la distancia de popa al muelle. (c) Ángulos del optical flow con la distancia del centro al muelle. (d) Ángulos del optical flow con la distancia de proa al muelle. [Elaboración propia]

Al analizar los gráficos con una métrica que nos permita diferenciar si el buque se encuentra en una buena posición o no en relación con la distancia y el ángulo que representa el optical Flow, es que utilizamos la fórmula (33) y fórmula (34) que representa la métrica que vamos a medir.

$$\text{Métrica} = \cos(\theta) * \frac{\text{distancia al muelle}}{5} \quad (33)$$

$$\text{Métrica} = \cos(\theta) * \frac{\text{distancia al muelle} - 5}{5} \quad (34)$$

Esta métrica nos da un resultado entre 0 y 1, en donde el 1 representa que el buque se encuentra en una correcta posición, mientras que el 0 representa que el buque chocó el dique.

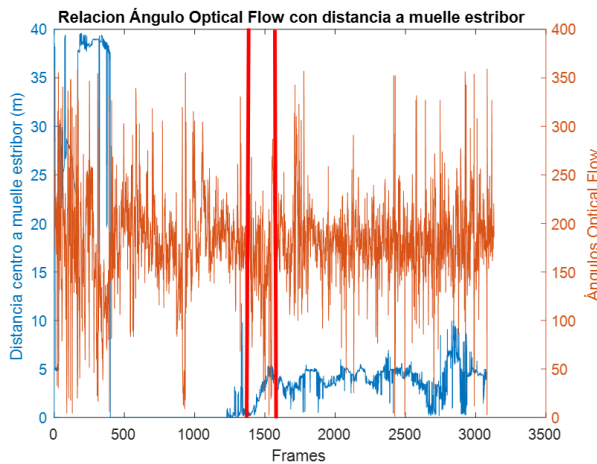


Figura 74 Distancia del centro al muelle seleccionando los frame del 1400 al 1542 [Elaboración propia]

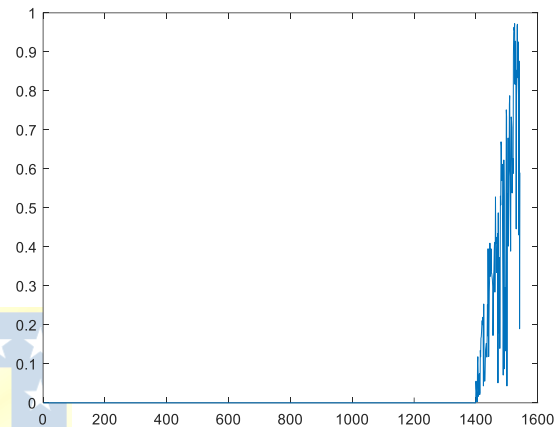


Figura 75 Métrica de los frame seleccionados [Elaboración propia]

Al tener estos valores que se pueden ir graficando en las distancias por estribor del buque, podemos ir apreciando cual es el posicionamiento del buque dentro del dique y si su trayectoria corresponde a la que debería llegar. En la figura N°74, entre los frames antes mencionado, el gráfico naranja corresponde al optical Flow de la imagen en resolución 720p y el gráfico azul corresponde a la distancia del centro del buque al muelle de estribor. Se eligió los valores de los frames para poder comparar la métrica ya que se aprecia claramente que el buque venía de una distancia muy cercana a cero, se efectúan correcciones y termina en la distancia que debería estar.

Al inicio del sector señalado, el buque en el video se encontraba con la proa muy cercano al muelle de babor y el centro del buque muy cercano al muelle de estribor. Esto quiere decir que el ángulo de incidencia con que estaba entrando el buque al dique era muy malo.

Pero a medida que se corregía la proa del buque llevándola al centro de igual forma el centro del buque corregía su posición. Esto se puede apreciar en la Figura N°74, donde la distancia del centro va

aumentando, desde casi tocar el muelle por babor hasta llegar a la distancia de 5 metros que es la posición correcta.

Aplicando la métrica a este evento de la fórmula (33), coincide con lo antes descrito, en donde la situación cuando el centro del buque se encontraba muy cercano al muelle el valor tiende a cero, mientras que la posición se va corrigiendo y la distancia va aumentando del centro del buque al muelle, de igual forma la métrica va aumentando hasta llegar al valor de 1 que es cuando se encontraría a 5 metros del muelle.

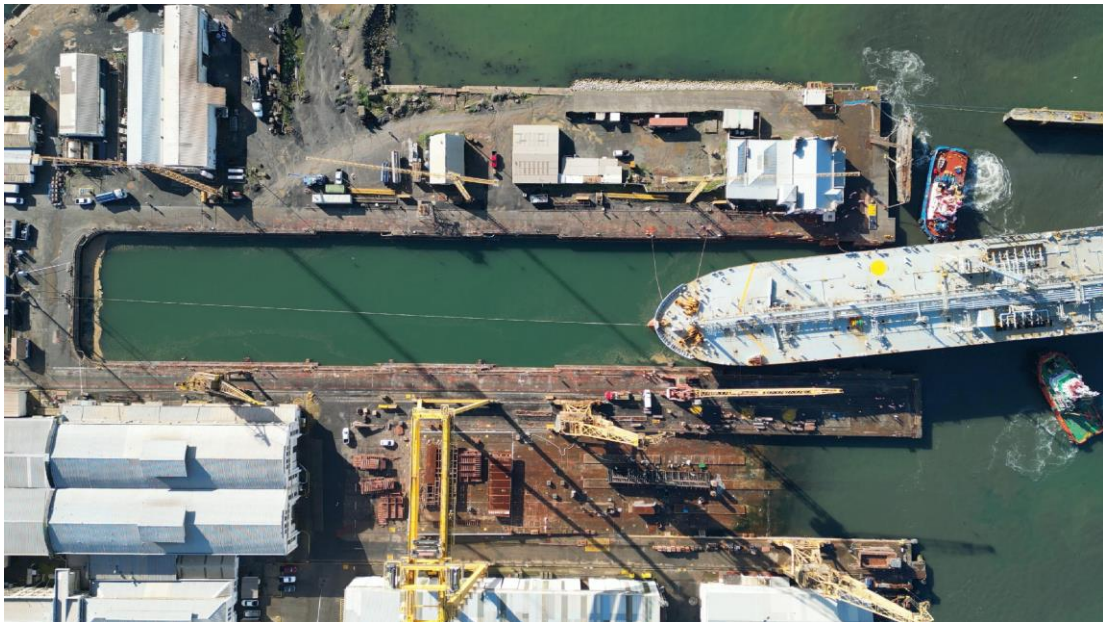


Figura 76 Buque entrando a dique [Elaboración propia]

Teniendo en consideración la Figura N°76, en donde el buque se encuentra con ángulo de incidencia que no corresponde y se puede apreciar que el buque tiende a golpear el muelle se puede calcular la métrica con los siguientes datos obtenidos:

$$\text{Métrica} = \text{abs}(\cos(\theta)) * \frac{\text{distancia al muelle}}{5}$$

$$\text{Métrica} = \text{abs}(\cos(267,89)) * \frac{7,17}{5}$$

$$\text{Métrica} = 0.05$$

Esto quiere decir que está cerca de cero por lo que el buque chocó o haya pasado muy cerca del muelle. La distancia al muelle es considerablemente alta, por lo que el espacio hacia babor es muy poco. Ahora si tomamos una imagen donde el buque este bien posicionado.

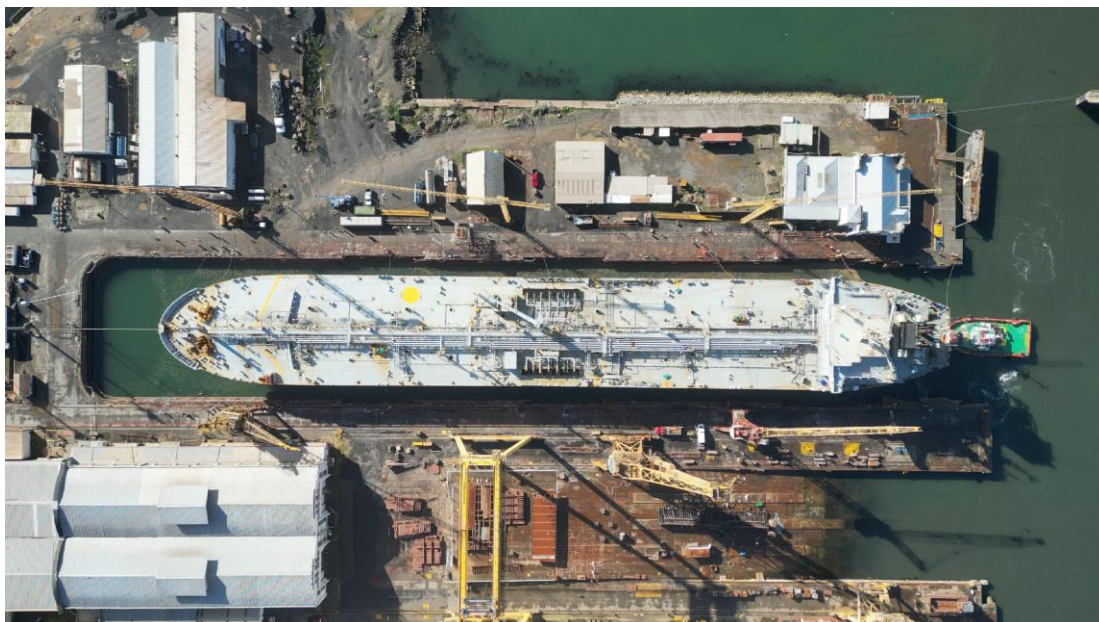


Figura 77: Buque bien posicionado [Elaboración propia]

$$\text{Métrica} = \text{abs}(\cos(\theta)) * \frac{\text{distancia al muelle}}{5}$$

$$\text{Métrica} = \text{abs}(\cos(2,63)) * \frac{4,18}{5}$$

$$\text{Metrica} = 0,84$$

La métrica está muy cercana a 1 por lo que quiere decir que el buque se encuentra en una buena posición. Está a 4 metros del muelle de babor cuando en realidad debería estar a 5. Si bien la diferencia no es mucha podemos decir que el buque está en una posición correcta dentro del dique.

Si no se hubiera efectuado el análisis temporal, los datos que procesaría el computador serían muchos y debido a que las distancias son muy pequeñas, los datos entregados serían muy parecidos o con decimales que son irrelevantes o no muy significativo en el proceso de corregir la posición del buque. Al aplicar el análisis temporal, podemos identificar patrones y tendencias en la secuencia de frames, lo que nos permite filtrar datos irrelevantes o insignificantes. Por ejemplo, pequeñas variaciones en la

posición del buque debido a la velocidad con la que hace ingreso al dique. Estas variaciones mínimas, como se comentó en puntos anteriores hay diferencias en milímetros entre un frame y otro pueden no ser relevantes y dar datos que solo generaría ruido en el análisis ya que no se podría corregir variaciones tan pequeñas a una velocidad muy baja y con buques de un tamaño considerable que es más difícil sacarlo de su inercia, por lo que pueden ser descartadas para simplificar el proceso de cálculo.

Si bien la correlación entre las imágenes la realizamos de forma arbitraria hasta 0.99 por los criterios antes mencionados, se podrían buscar otros métodos para poder optimizar esto y verificar que la información contenida en los frames que no se ocuparan efectivamente no se tenga información relevante.

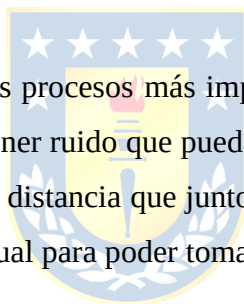


CAPITULO 4. CONCLUSIONES

Mediante la aplicación de tecnologías de vanguardia, como el uso de drones equipados con sistemas avanzado de grabación de videos, se puede lograr una detección precisa del emplazamiento de un buque dentro de un dique seco. Este enfoque innovador aprovecha el procesamiento multidimensional de imágenes para obtener datos detallados sobre la posición y el estado del buque como también adapta la resolución temporal, para optimizar el video para su visualización y procesamiento de datos, lo que proporciona una herramienta invaluable para el monitoreo y la gestión eficiente de operaciones en instalaciones portuarias y navales.

La elección de una buena resolución espacial para el procesamiento del Optical Flow, es igual de importante que ocupar la correlación para variar la resolución temporal objeto reducir el tamaño del archivo, mejorando el rendimiento de reproducción, optimizando los recursos computacionales con el propósito de procesar las imágenes.

La segmentación por RGB es uno de los procesos más importantes en el cálculo de distancias para poder realizar el conteo de pixeles sin tener ruido que pueda tergiversar los datos. Al aplicar el FOV al conteo de pixeles nos dará un dato de distancia que junto con el Optical Flow nos proporciona un posicionamiento del buque de forma visual para poder tomar decisiones.



El procesamiento multidimensional de imágenes ofrece varias ventajas significativas. En primer lugar, permite una representación más completa de los datos visuales del movimiento relativo que está teniendo el buque, objeto el Dock Máster pueda tener un mejor análisis para tomar decisiones de corrección de la trayectoria para evitar daños personales y materiales en la maniobra.

Esta metodología facilita la identificación de patrones complejos y la extracción de características importantes de las imágenes que son un aporte visual dándole al Dock Máster un panorama claro de lo que está sucediendo con el buque en tiempo real.

Además, el procesamiento multidimensional puede mejorar la resolución espacial y temporal, con el fin de disminuir la robustez del sistema que procesara los datos para mostrarlos en tiempo real.

En resumen, el procesamiento multidimensional de imágenes ofrece una poderosa herramienta para complementar visualmente la maniobra de entrada a dique como se está haciendo en la actualidad.

Los resultados obtenidos nos abren un abanico de posibilidades para seguir mejorando, como puede

ser la optimización de la resolución temporal por otro método que no sea la correlación para elegir cuales son los frames específicos que se necesitan, como también el grabar una cantidad de maniobras de entrada a dique en diferentes situaciones para poder después realizar una segmentación semántica, permitiendo un mejor conteo de pixeles y un mejor rendimiento del algoritmo.

Los datos de posicionamiento que se tienen aportan la información suficiente para hacer un análisis de que sistemas mecánicos se necesitan para corregir la posición sin tener que ocupar personas



BIBLIOGRAFÍA

- [1] Diseño de un dique flotante de 7.000 toneladas de fuerza ascensional: estudio de la estructura y de los Servicios, David Girbau Estruel, Sara Uceda Gil, Facultad de Náutica de Barcelona, septiembre 2012.
- [2] <https://www.asmar.cl/reparacion-y-calibracion-de-equipos-industriales/diques/>
- [3] <https://vadebarcos.net/2013/10/14/diques-flotantes-el-zhonghai-emeishan/>
- [4] Especificación Técnica, Instalación Sistema de mejora de posicionamiento de buques en dique 4 Navantia San Fernando, junio 2018.
- [5] E.T.C. Sistema digital de control automatic de maniobras en dique, Navantia, octubre 2019
- [6] Dominique Gruyer, Sungwoo Choi, Clément Boussard, Brigitte d'AndréaNovel, From Virtual to Reality, hoy to prototype, test and evaluate new ADAS: Application to automatic car parking, IEEE Intelligent Vehicules Symposium, 2014.
- [7] Viswanath K. Reddy, Swaroop Laxmeshwar, M.S.R.S.A.A., Design and Development of Low Cost Automatic Parking Assistance System, International Conference on Information and Communication Technologies, 2014.
- [8] <https://miguelmoron.com/la-distancia-focal/>
- [9] https://es.wikipedia.org/wiki/Perspectiva_c%C3%B3nica
- [10] Eraldo Ribeiro, Edwin R. Hancock, Improved orientation estimation for textura planes using multiple vanishing points, Department of Computer Science, University of York, February 1999
- [11] Qiang Ji, Mauro . Costa, Robert M. Haralick, Linda G. Shapiro, A robust linear least-squares estimation of camera exterior orientation using multiple geoetric features, Department of Electrical Engineering, University of Washington Seattle, november 2003
- [12] Infrared Thermal Imaging, M. Vollmer, K.P. Mollmann
- [13] Jing Zhu, Yi Fang, Learning Object- Specific Distance From a Monocular Image, New York University, USA
- [14] Ashutosh Saxena, Sung H. Chung, Andrew Y. Ng, 3-D Depth Reconstruction from a Single Still Image, Computer Science Department, Stanford University, auust 2007
- [15] <https://fotografiadslr.wordpress.com/2018/02/19/los-sensores-cmos-y-el-efecto-rolling-shutter/>
- [16] <https://www.dji.com/dji-fpv/specs>
- [17] Patel, Dhara & Upadhyay, Saurabh. (2013). Optical Flow Measurement using Lucas Kanade Method. International Journal of Computer Applications. 61. 6-10. 10.5120/9962-4611.

- [18] B.D. Lucas and T. Kanade, "An Iterative Image Registration technique, with an Application to Stereo Vision," Int'l Joint Conference Artificial Intelligence, pp. 121-130, 1981.
- [19] <https://www.mathworks.com/help/vision/ref/opticalflowlkdog.html>
- [20] Sharmin, Nusrat & Brad, Remus. (2012). Optimal Filter Estimation for Lucas-Kanade Optical Flow. Sensors (Basel, Switzerland). 12. 12694-709. 10.3390/s120912694.
- [21] <https://la.mathworks.com/help/images/ref/corr2.html>
- [22] <https://www.asus.com/cl/laptops/for-home/everyday-use/asus-m415/techspec/>
- [23] <https://la.mathworks.com/help/images/ref/imfill.html>
- [24] Horn, B. K. and Schunck, B. G. (1981). Determining optical Flow. Artificial Intelligence

