



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería en Ciencias y Sistemas

**DISEÑO DE UNA APLICACIÓN PARA TOMA DE INVENTARIO EN UN ALMACÉN O
CENTRO DE DISTRIBUCIÓN UTILIZANDO DRONES**

Luis Alejandro López López

Asesorado por el Ing. César Rolando Batz Saquimux

Guatemala, abril de 2024

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE UNA APLICACIÓN PARA TOMA DE INVENTARIO EN UN ALMACÉN O
CENTRO DE DISTRIBUCIÓN UTILIZANDO DRONES**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

LUIS ALEJANDRO LÓPEZ LÓPEZ

ASESORADO POR EL ING. CESAR ROLANDO BATZ SAQUIMUX

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO EN CIENCIAS Y SISTEMAS

GUATEMALA, ABRIL DE 2024

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera (a. i.)
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Ing. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Ing. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADORA	Inga. Virginia Victoria Tala Ayerdi
EXAMINADOR	Ing. Neftalí de Jesús Calderón Méndez
EXAMINADOR	Ing. Edgar Estuardo Santos Sutuj
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

Guatemala, 20 de noviembre de 2023

Ingeniero

Carlos Alfredo Azurdia

Coordinador de Privados y Trabajos de Tesis

Escuela de Ingeniería en Ciencias y Sistemas

Facultad de Ingeniería - USAC

Respetable Ingeniero Azurdia:

Por este medio hago de su conocimiento que en mi rol de asesor del trabajo de investigación realizado por el estudiante **LUIS ALEJANDRO LOPEZ LOPEZ** con carné **9712408 y CUI 2640 87763 0101** titulado **"DISEÑO DE UNA APLICACIÓN PARA TOMA DE INVENTARIO EN UN ALMACÉN O CENTRO DE DISTRIBUCION HACIENDO USO DE DRONES"**, lo he revisado y luego de corroborar que el mismo se encuentra con un avance del 100 por ciento y que cumple con los objetivos propuestos en el respectivo protocolo, procedo a la aprobación correspondiente.

Al agradecer su atención a la presente, aprovecho la oportunidad para suscribirme,

Atentamente,



Ing. César Rolando Batz Squimux
Colegiado No. 8549

César Rolando Batz Squimux
Ingeniero en Ciencias y Sistemas
Colegiado No. 8549



Universidad San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería en Ciencias y Sistemas

Guatemala 16 de enero de 2024

Ingeniero
Carlos Gustavo Alonzo
Director de la Escuela de Ingeniería
En Ciencias y Sistemas

Respetable Ingeniero Alonzo:

Por este medio hago de su conocimiento que he revisado el trabajo de graduación del estudiante **LUIS ALEJANDRO LÓPEZ LÓPEZ** con carné **9712408** y CUI **2640 87763 0101** titulado **“DISEÑO DE UNA APLICACIÓN PARA TOMA DE INVENTARIO EN UN ALMACÉN O CENTRO DE DISTRIBUCIÓN HACIENDO USO DE DRONES”**, y a mi criterio el mismo cumple con los objetivos propuestos para su desarrollo, según el protocolo aprobado.

Al agradecer su atención a la presente, aprovecho la oportunidad para suscribirme,

Atentamente,

Ing. Carlos Alfredo Azurdia
Coordinador de Privados
y Revisión de Trabajos de Graduación





SIST.LNG.DIRECTOR.16.EICCSS.2024

El Director de la Escuela de Ingeniería en Ciencias y Sistemas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador de área y la aprobación del área de lingüística del trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE UNA APLICACIÓN PARA TOMA DE INVENTARIO EN UN ALMACÉN O CENTRO DE DISTRIBUCIÓN HACIENDO USO DE DRONES**, presentado por: **Luis Alejandro Lopez Lopez**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”



Ingeniero Carlos Gustavo Alonzo
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería en Ciencias y Sistemas

Guatemala, abril de 2024



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Decanato
Facultad de Ingeniería

24189101- 24189102

LNG.DECANATO.OIE.175.2024

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería en Ciencias y Sistemas, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE UNA APLICACIÓN PARA TOMA DE INVENTARIO EN UN ALMACÉN O CENTRO DE DISTRIBUCIÓN HACIENDO USO DE DRONES**, presentado por: **Luis Alejandro Lopez Lopez** después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. José Francisco Gómez Rivera
Decano a.i.

Guatemala, abril de 2024



Para verificar validez de documento ingrese a <https://www.ingenieria.usac.edu.gt/firma-electronica/consultar-documento>

Tipo de documento: Correlativo para orden de impresión Año: 2024 Correlativo: 175 CUI: 2640877630101

Escuelas: Ingeniería Civil, Ingeniería Mecánica Industrial, Ingeniería Química, Ingeniería Mecánica Eléctrica, - Escuela de Ciencias, Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS). Postgrado Maestría en Sistemas Mención Ingeniería Vial. Carreras: Ingeniería Mecánica, Ingeniería Electrónica, Ingeniería en Ciencias y Sistemas. Licenciatura en Matemática. Licenciatura en Física. Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas (CESEM). Guatemala, Ciudad

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE UNA APLICACIÓN PARA TOMA DE INVENTARIO EN UN ALMACÉN O CENTRO DE DISTRIBUCIÓN UTILIZANDO DRONES

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería en Ciencias y Sistemas, con fecha agosto de 2022.

Luis Alejandro López López

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por haberme dado la oportunidad de completar este objetivo.
Mi padre	Eustaquio López y López (q. e. p. d.), por haberse dedicado en cuerpo y alma a su familia y con este trabajo poder rendirle un pequeño tributo a su esfuerzo y dedicación.
Mi madre	Nohemí López Méndez, por haber sido el complemento perfecto para mi padre, juntos nos enseñaron a mí y a mis hermanos los valores que hoy rigen nuestras vidas.
Mis hermanos	Mynor, Álvaro y Wilmar López, por todas las experiencias que hemos vivido, su ejemplo y apoyo han sido muy importantes para mí.
Mi esposa	Shenny Debroy, por todo su amor, comprensión y apoyo.
Mis hijos	Ian Daniel y Hesler Helí López Debroy, por ser la alegría y motivación que me alienta día con día.
Mis sobrinos	Kelly Sophia, Kevin Josué y María Emilia con todo mi cariño.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por ser la casa de estudios que me ha permitido lograr este objetivo.

Mis amigos

Raúl Sagastume, Marvin Hernández, Saúl Flores, Vicente López, Allan Fuentes y muy especialmente a William Melvin Quijivix Cifuentes (q. e. p. d.), a todos ellos por haber sido parte importante en el logro de este objetivo y por los momentos de alegría y sufrimiento con las tareas y proyectos.

Ingenieros

A todos y cada uno de los ingenieros con los que tuve la oportunidad de aprender de su conocimiento y enseñanza, muy agradecido.

Ing. Cesar Batz

Por todo el apoyo recibido para lograr finalizar mi trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XVII
OBJETIVOS.....	XIX
INTRODUCCIÓN	XXI
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Antecedentes del problema	2
1.2. Mercado objetivo	3
1.3. Benchmark de la aplicación.....	5
1.3.1. InWareDrones.....	5
1.3.2. Aeriu	5
1.3.3. EYESEE	6
1.3.4. Infinium Scan	6
1.3.5. HighDron Chile	6
2. ESTUDIO DE LA TECNOLOGÍA Y SU IMPACTO EN GUATEMALA	7
2.1. Solución.....	7
2.1.1. Límites	8
2.1.2. Alcance	9
2.1.3. Proceso	9
2.2. Teoría que soporta la investigación.....	10
2.3. Tecnología elegida	11
2.4. Teoría y relación con la tecnología elegida	12

3.	ADMINISTRACIÓN DE ALMACENES	13
3.1.	Cadena de suministro o <i>supply chain</i>	14
3.1.1.	Etapas de la cadena de suministro o <i>supply chain</i>	14
3.2.	<i>Software</i> para la administración de almacenes	14
3.2.1.	Beneficios del uso del <i>software</i> para la administración de almacenes	15
3.2.2.	Funciones del <i>software</i> para la administración de almacenes	16
3.3.	Inventarios cíclicos	16
3.3.1.	El conteo	18
3.3.2.	Tipos de inventarios cíclicos.....	18
3.4.	IRA	19
3.4.1.	Importancia desde el punto de vista financiero	19
3.4.2.	Importancia desde el punto de vista operacional	20
3.5.	Industria 4.0	20
3.6.	Logística 4.0.....	20
3.7.	Uso de drones en almacenes.....	21
4.	DRONES.....	23
4.1.	Reseña histórica	23
4.2.	Clasificación y usos.....	24
4.2.1.	Drones de ala fija	25
4.2.2.	Drones de ala rotatoria o multirrotores	25
4.2.2.1.	Tricóptero	25
4.2.2.2.	Cuadricóptero.....	26
4.2.2.3.	Hexacópteros	26
4.2.2.4.	Octacópteros	26
4.2.2.5.	Coaxiales.....	26

4.3.	Tello Drone	27
4.3.1.	Características	27
4.3.2.	Tello SDK 2.0.....	28
5.	CUADRICOPTERO	29
5.1.	Configuración	29
5.2.	Movimientos del cuadricóptero	31
5.2.1.	Alabeo	32
5.2.2.	Cabeceo	32
5.2.3.	Guiñada	32
5.2.4.	Throttle	32
6.	VISIÓN POR COMPUTADORA	33
6.1.	Casos de uso.....	34
6.1.1.	Automoción.....	34
6.1.2.	Retail y seguridad	34
6.1.3.	Control de calidad	35
6.2.	OpenCV	35
6.3.	Marcadores ArUco.....	35
6.3.1.	Diccionarios	37
7.	DOCUMENTO DE ESPECIFICACIÓN DE REQUERIMIENTOS Y CRITERIOS DE ACEPTACIÓN DEL <i>SOFTWARE</i> – DERCAS.....	39
7.1.	Objetivo estratégico	39
7.2.	Objetivo general	39
7.3.	Lista de acrónimos y glosario de la aplicación.....	39
7.4.	Alcances	40
7.5.	Limitantes	40
7.6.	Análisis de riesgos.....	40

7.7.	Descripción de los módulos	41
7.7.1.	Configuraciones	42
7.7.2.	Operaciones	42
7.7.3.	Reportes.....	42
7.8.	Diagrama de flujo de la solución	42
7.9.	Diagrama de arquitectura.....	43
8.	DESARROLLO DE LA APLICACIÓN.....	45
8.1.	Diseño de marcadores	45
8.1.1.	Delimitadores	45
8.1.2.	Marcadores de control.....	45
8.2.	Catálogo de marcadores	47
8.3.	Lectura de marcadores	52
8.4.	Navegación del dron	55
8.4.1.	Parámetros.....	56
8.4.2.	Despegue	58
8.4.3.	Detectar siguiente ubicación	59
8.4.4.	Enfocar	59
8.4.5.	Capturar imagen.....	61
8.4.6.	Continuar.....	61
8.5.	Lectura de códigos de barra o QR	62
8.6.	Generación del listado de información recolectado.....	63
8.6.1.	Tabla de información	64
8.7.	Limitaciones encontradas.....	64
8.7.1.	Cámara de video	64
8.7.2.	Iluminación	65
	CONCLUSIONES.....	67
	RECOMENDACIONES	69

REFERENCIAS	71
APÉNDICES	73

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

Figura 1.	Tello Drone	27
Figura 2.	Configuraciones de Cuadricópteros.....	30
Figura 3.	Movimientos del cuadricóptero	31
Figura 4.	Marcadores ArUco	36
Figura 5.	Matriz para un marcador de 6x6	37
Figura 6.	Navegación del dron	42
Figura 7.	Arquitectura de la aplicación	43
Figura 8.	Diseño y uso de marcadores en los <i>racks</i>	46
Figura 9.	Marcador delimitador de extremo	47
Figura 10.	Marcador delimitador de extremo	47
Figura 11.	Marcador nivel 2	48
Figura 12.	Marcador nivel 3	48
Figura 13.	Marcador nivel 4	49
Figura 14.	Marcador nivel 5	49
Figura 15.	Marcador de cambio de dirección, arriba.....	50
Figura 16.	Marcador de cambio de dirección, abajo	50
Figura 17.	Marcador de cambio de dirección, derecha	51
Figura 18.	Marcador de cambio de dirección, izquierda	51
Figura 19.	Marcador para indicar aterrizaje	52
Figura 20.	Identificación de marcadores delimitadores.....	53
Figura 21.	Detección de marcadores por lado izquierdo y derecho	55
Figura 22.	Navegación del dron	56
Figura 23.	Ajuste por distancia al objetivo	59

Figura 24.	Ajustes para centrar la imagen: ejes xy	60
Figura 25.	Ajustes para centrar la imagen: distancia.....	61
Figura 26.	Formato identificador tarima o contenedor	63

TABLAS

Tabla 1.	Combinaciones de marcadores identificados	54
Tabla 2.	Listado de parámetros del sistema.....	56
Tabla 3.	Tabla de información recolectada	63

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
cm	Centímetros
MP	Megapíxel
m	Metro
NA	No aplica
s	Segundos

GLOSARIO

Almacén	En logística corresponde al lugar o espacio físico donde se almacenan las mercancías de una empresa, además de realizarse operaciones de recepción, almacenaje y despacho entre otras.
API	<i>Application programming interfaces</i> , significa interfaz de programación de aplicaciones, corresponden a un conjunto de definiciones y protocolos que se utilizan para permitir la comunicación entre dos aplicaciones.
Benchmark	Es un análisis detallado de los competidores que los negocios hacen con el objetivo de identificar oportunidades de mejora.
Cadena de suministro	Proceso que involucra todas las actividades que son indispensables para que un producto o mercancía llegue al cliente final, desde que se encuentra en estado de materia prima hasta su venta final.
Código abierto	Se denomina código abierto a un modelo de producción descentralizado, y su código fuente está disponible para que cualquiera pueda utilizarlo, examinarlo, modificarlo y redistribuirlo. Las innovaciones técnicas necesitan una colaboración global para evolucionar.

Conteo cíclico	Es una técnica de inventariado que consiste en contar periódicamente grupos de productos en lugar de realizar un único inventario anual.
CSV	<i>Comma separated values</i> , valores separados por comas, se le denomina archivo csv a cualquier archivo de texto en el cual los valores están separados por comas, formando una especie de tabla entre las líneas del archivo y los valores separados por un carácter específico, generalmente una coma (,).
DJI	SZ DJI Technology Co. es una empresa de tecnología china, líder en la fabricación de vehículos aéreos no tripulados, comúnmente conocidos como drones.
Dron	Es un vehículo aéreo no tripulado que se controla remotamente.
Hardware	Corresponde a todas las partes tangibles de un sistema informático.
IRA	<i>Inventory record accuracy</i> , precisión de los registros de inventario, medida utilizada para saber si los registros de inventario coinciden con las existencias físicas.
Lumen	Representa la cantidad de luz que emite una fuente sin tener en cuenta la superficie que ilumina.

Lux	Representa la cantidad de luz proyectada sobre una superficie, un lux equivale a un lumen por metro cuadrado.
Marcadores ArUco	Son imágenes utilizadas en aplicaciones que utilizan visión por computadora, están compuestas por un borde negro y una matriz binaria interna que determina un identificador.
MP	Megapíxel, en el mundo de la fotografía móvil, los megapíxeles sirven para indicar el tamaño de la foto que es capaz de sacar un dispositivo móvil.
OpenCV	Significa <i>open computer vision</i> o visión artificial abierta en español. Es una biblioteca libre de visión artificial originalmente desarrollada por Intel.
Picking	En un almacén o centro de distribución, es la actividad que se realiza para la preparación de uno o más pedidos de uno o más clientes.
Python	Es un lenguaje de programación multiplataforma y de código abierto.
Rack	Estantes dentro de un almacén o centro de distribución.

Reposición	En un almacén o centro de distribución, es la actividad de traslado de producto del área de almacenaje hacia el área de preparación o <i>picking</i> .
Retailer	Empresa que compra productos en grandes cantidades y lo vende al por menor.
SDK	Es el acrónimo de <i>software development kit</i> o kit de desarrollo de <i>software</i> en español, es un conjunto de herramientas de programación proporcionado por el fabricante de <i>hardware</i> o <i>software</i> .
Software	Programa informático que hace posible la ejecución de tareas específicas dentro de una computadora.
Tello Drone	Es el modelo más pequeño de los drones de DJI, que cuenta con una cámara de 5 MP y un kit de programación.
UDP	<i>User datagram protocol</i> , o protocolo de datagramas de usuario, protocolo de transmisión de datos en redes basadas en el protocolo de internet o IP por sus siglas en inglés.
UAV	<i>Unmanned aerial vehicle</i> o vehículo aéreo no tripulado, comúnmente conocido como dron.

Ubicación	En un almacén o centro de distribución, corresponde a cualquier espacio dentro del almacén en donde se pueda colocar producto, por ejemplo, para las áreas de almacenaje o despacho.
Wifi	Tecnología inalámbrica que permite a los dispositivos conectarse a una red sin necesidad de cables.
WMS	<i>Warehouse management system</i> o sistema de gestión de almacenes en español, es una solución de <i>software</i> que ofrece visibilidad de todo el inventario de una empresa y gestiona las operaciones diarias de un almacén o centro de distribución.

RESUMEN

En el siguiente trabajo, se presenta el diseño y el desarrollo de una aplicación escrita en lenguaje Python, que utiliza librerías de visión artificial y control de vuelo de un dron, orientada a la automatización de tareas dentro de un almacén o centro de distribución y limitándose al proceso de toma de inventarios.

Para lograr el objetivo se utiliza un Tello Drone, que es la versión educativa de un dron de la empresa DJI, que viene equipado con una cámara de alta definición y que cuenta con un set de herramientas para programación. Para el procesamiento de imágenes y detección de marcadores ArUco se utiliza la librería de código abierto OpenCV. En conjunto, ambos componentes, permiten guiar los movimientos de un dron y así lograr que siga una ruta preestablecida con los marcadores y lograr la captura de la información.

Para los desplazamientos del dron: cabeceo, guiñada y aceleración, se utiliza una librería que implementa el método de control proporcional derivativo, basado en estimaciones de distancias calculadas proporcionalmente a partir del área de los marcadores que se van detectando durante el vuelo.

OBJETIVOS

General

Desarrollar una aplicación que permita demostrar el uso del procesamiento de imágenes para dirigir los desplazamientos de un dron, a través de la interpretación de marcadores y su uso en la automatización del proceso de toma de inventario de las ubicaciones de almacenaje en una bodega o centro de distribución.

Específicos

1. Desarrollar un módulo que utilice las librerías de procesamiento de imágenes para detectar marcadores ArUco.
2. Desarrollar un módulo que permita controlar los movimientos de un Tello Drone, utilizando la versión 2 del SDK.
3. Desarrollar una aplicación que pueda controlar el vuelo de un Tello Drone en base a la detección de marcadores ArUco.
4. Capturar y procesar imágenes recolectadas durante el vuelo para extraer información de identificación de las ubicaciones y el contenido de los *racks* o estanterías en altura.
5. Exportar los datos recopilados.

INTRODUCCIÓN

Logística 4.0, término utilizado para referirse al uso de nuevas tecnologías en la optimización de los procesos logísticos, en otras palabras, aprovechar al máximo los avances en la tecnología actual para mejorar los procesos, técnicas y modelos de trabajo en la cadena de abastecimiento. Dentro de estas tecnologías podemos incluir el uso de drones y robots.

En la actualidad los drones se utilizan para realizar diferentes tareas: científicas, de vigilancia, entretenimiento y la agroindustria por mencionar algunas. Y sus aplicaciones aumentan día a día, tal es el caso de su utilización en algunas de las tareas que se llevan a cabo en la logística, dentro de las que se puede mencionar el apoyo en la gestión de inventarios.

En el mercado ya existen soluciones que permiten realizar estas tareas, tal como Eyeseer, empresa francesa que se fundó en 2015, introduciendo el concepto de utilizar un dron para realizar inventarios en almacenes. InWareDrones es otro proyecto de la empresa Imec, dedicada a la innovación tecnológica, proyecto que tiene como objetivo desarrollar un sistema de gestión de inventario basado en drones completamente autónomo.

Empresas en Latinoamérica también están innovando en esta línea, por ejemplo, High Drone Chile, es una empresa que provee soluciones aéreas mediante drones para la agroindustria, inspección técnica, mediciones y para la toma de inventarios en almacenes.

1. MARCO TEÓRICO

IRA, acrónimo de *inventory record accuracy*, que se traduce como la precisión de los registros de inventario, en el ámbito de la logística es la medida que se utiliza para saber si los registros en sistema corresponden con las existencias físicas en el almacén o centro de distribución.

La fiabilidad del inventario permite lograr que las operaciones en una empresa fluyan sin mayores contratiempos, desde la recepción hasta el despacho. Una diferencia puede provocar que no se logre completar una entrega o implique retrabajos por la búsqueda de los productos no encontrados.

El origen de las discrepancias puede deberse a errores de digitación en el sistema o bien a que el producto se encuentre mal ubicado dentro de las instalaciones. El impacto de estas diferencias se puede medir tanto monetariamente como en cantidad de unidades; al equipo de auditoría le interesaría más ver el monto del faltante o sobrante, mientras que el equipo de operaciones puede estar más interesado en la cantidad de unidades de diferencia.

1.1. Antecedentes del problema

En 2004, en un estudio realizado por el Instituto Tecnológico de Massachussets (MIT), para analizar la inexactitud del inventario en los sistemas de inventario para una empresa *retailer* en Estados Unidos, siendo un *retailer*, una empresa que compra producto en grandes cantidades y lo vende al por menor, se encontró que, en su mejor tienda sólo entre un 70 % y 75 % de los registros coincidió con el inventario físico, mientras que en otra tienda dos terceras partes de los registros fueron inexactos. Y en promedio la precisión del inventario de las tiendas de la compañía era solo del 51 % (Yun y Stanley, 2004).

La detección de las diferencias ocurre al momento de realizar la preparación de las órdenes o *picking*, en la reposición o reabastecimiento, o a través del conteo del inventario. La herramienta utilizada para la detección de diferencias son los denominados conteos cíclicos, permitiendo analizar las causas raíz y así poder solucionarlas una a una.

Regularmente la ejecución del conteo cíclico es un proceso que, dependiendo del recurso y del tamaño del almacén o centro de distribución puede tomar días o incluso meses. Dado que este proceso es realizado por el equipo de inventarios, es un proceso lento, exhaustivo, peligroso y por ser manual, está sujeto a errores.

Peligroso, debido a que se requiere equipo especial, montacargas o plataformas que permitan a los usuarios poder inspeccionar las ubicaciones en altura de los *racks* o estanterías.

De la cuarta revolución industrial o industria 4.0, se deriva el concepto de logística 4.0, que consiste en la aplicación de nuevas tecnologías y automatización a los procesos logísticos (TOTVS LATAM, 2022).

Y como parte de esta revolución y nuevas tecnologías, se encuentran los vehículos aéreos no tripulados (UAV por sus siglas en inglés), comúnmente conocidos como drones, que dentro de los usos que se les han dado, se encuentra la ejecución de tareas que para cualquier persona pueden ser peligrosas, y que para el caso específico de la logística, se están desarrollando soluciones que ayudan en la inspección de los inventarios, principalmente en las ubicaciones en las que se requiere de equipo especial para poder alcanzarlas.

Los avances en esta tecnología han permitido que los costos sean más asequibles y que al mismo tiempo existan varias librerías de código abierto que se pueden utilizar para poder extender el uso de esta.

En un estudio realizado en el año 2012, por APQC (*American Productivity & Quality Center*), se determinó, que con un incremento del 1 % en la exactitud del inventario se tienen mejoras palpables en los procesos de recepción, conteos cíclicos y en las entregas de las órdenes (Partida, 2012).

1.2. Mercado objetivo

Los procesos de verificación de la exactitud del inventario en los almacenes realizados a través de conteos cíclicos se pueden separar según se tenga o no se tenga la necesidad de utilizar equipo adicional para realizar la inspección de las ubicaciones.

- Ubicaciones a piso: son ubicaciones para las cuales el operario no necesita de equipo adicional.
- Ubicaciones en altura: son ubicaciones para las cuales el operario necesita de equipo especial para tener acceso, tales como montacargas o plataformas.

Regularmente las ubicaciones en los niveles superiores son espacios destinados para almacenaje, son las más numerosas dentro de las instalaciones y que, para grandes almacenes por temas de volúmenes y control, el contenido de cada una se reduce a un solo producto por tarima.

El proceso de revisión de estas ubicaciones en altura, por el hecho de requerir equipo para poder movilizar al usuario a cada una de las posiciones, se vuelve lento y riesgoso.

Partiendo de estas dos premisas: almacenes que cuentan con gran cantidad de ubicaciones en altura y que, en su mayoría las tarimas que se encuentran almacenadas en estas ubicaciones contienen un solo producto, son candidatos idóneos para el uso de drones en la realización de la toma de inventario, y así poder eficientizar los procesos de revisión de las existencias. Aprovechando que estos vehículos pueden contar con cámaras y se pueden desplazar con facilidad a grandes alturas.

En la actualidad existen algunas soluciones que proveen esta funcionalidad, sistemas complejos que incluso les permiten a los drones desplazarse de manera autónoma.

Teniendo en cuenta el costo beneficio de una solución de este tipo, se considera que una aplicación que sea semiautónoma puede proveer grandes beneficios a un bajo costo, siendo la propuesta una aplicación que pueda funcionar con ayuda de un usuario, que realice las tareas de colocación del dron en la posición inicial y recolección de éste al finalizar el proceso.

1.3. *Benchmark* de la aplicación

A continuación, se listan algunas de las soluciones y proyectos existentes en el mercado relacionados con toma de inventarios con drones, principalmente son empresas europeas.

1.3.1. InWareDrones

Proyecto desarrollado por IMEC, que dio inicio en el año 2018, tiene como objetivo el desarrollo de un sistema de gestión de inventario basado en drones completamente autónomo, que permita retroalimentación en vivo y que permita información de alta calidad, traducándose esto, en un ahorro de horas-hombre.

1.3.2. Aeriu

Solución que permite realizar un levantado del inventario a través de drones, básicamente permite al usuario inspeccionar los niveles superiores de los *racks* sin necesidad de montacargas o plataformas.

1.3.3. EYESEE

EYESEE es una solución de dron de inventario autónomo para almacenes. Está diseñada para leer todos los códigos de barra en estanterías y pallets, alcanzando alturas de más de 12 metros. Permite aumentar la frecuencia de los inventarios, reducir costos, tiempo y riesgos asociados con su ejecución.

1.3.4. Infinium Scan

Es un sistema de dron autónomo, que cuenta con cámaras avanzadas y robots terrestres con un cable de sujeción, para garantizar un 100 % de seguridad y un tiempo de vuelo ininterrumpido.

Los drones escanean los códigos de barra de los pallets y sus posiciones, reportan la información, la analizan y la envían hacia y desde el sistema de gestión de almacenes (WMS).

1.3.5. HighDron Chile

Empresa chilena, especializada en soluciones con drones, principalmente para uso en fumigaciones y monitoreo.

2. ESTUDIO DE LA TECNOLOGÍA Y SU IMPACTO EN GUATEMALA

Toda empresa en el ámbito nacional, según lo establecido en el numeral 3 del artículo 42 de las disposiciones del Impuesto Sobre la Renta (ISR) contenidas en el Libro I del Decreto 10-2012 y sus reformas, Ley de Actualización Tributaria, inscrita en el Régimen del ISR sobre las Utilidades de Actividades Lucrativas, debe elaborar inventarios al 31 de diciembre de cada año y asentarlos en el libro correspondiente (Coyoy, 2017).

Teniendo en cuenta esta obligación, se hace imprescindible tener bien establecido el control de inventarios dentro de las empresas, y abre oportunidades para el uso de herramientas que permitan mejorar dichos controles.

Al momento de realizar este trabajo no fue posible encontrar una estadística que permitiera establecer el uso de drones para algún proceso dentro de los centros de distribución a nivel nacional, por lo que se podría entender que su uso en la actualidad es poco o casi nulo.

2.1. Solución

La solución propuesta consiste en una aplicación, que permite utilizar un dron guiado por una serie de marcadores, que el dron tendrá que interpretar para lograr recorrer todas las ubicaciones de un *rack* por vez.

2.1.1. Límites

La propuesta consiste en permitir utilizar un dron de forma semiautónoma, es decir que parte del proceso lo debe realizar el usuario y el resto es completado por el dron.

Esto debido a la complejidad tanto en el *software* como en el *hardware* que debería tener el dron, para permitirle ser autónomo al 100 %. El alcance de este trabajo no radica en esa autonomía, sino más bien, enfocarse en el provecho que se puede obtener de las funcionalidades que tiene el dron de movimiento y captura de imágenes, y que cumpla con realizar un recorrido previamente identificado con marcadores o etiquetas, se pueda tener el impacto suficiente en el resultado, sin tener que invertir en un equipo con mayor sofisticación que por lo mismo su costo sería más elevado.

A continuación, se listan las limitaciones consideradas para la solución:

- El dron no será autónomo en sus movimientos, es necesario que un usuario coloque el dron al inicio del rack o estantería sobre la cual se va a realizar la toma de inventario.
- El usuario iniciará el proceso.
- El desplazamiento del dron será sobre una sola cara del rack o estantería a la vez.
- Al encontrar el marcador de finalización el dron descenderá y ahí concluirá el proceso o bien cuando ya no cuente con suficiente carga.

2.1.2. Alcance

El resultado esperado se limita a:

- La información por recopilar consiste en identificar dos etiquetas, una que corresponde al identificador de la ubicación y la segunda que corresponde a la identificación de la tarima, siempre que exista una tarima en la ubicación.
- Por el inciso anterior, implica que se limita a un producto por tarima, no se considera el caso de múltiples identificadores de producto.
- El resultado final consiste en un listado que va a indicar por cada registro, el identificador de la ubicación y el identificador de la tarima si se encuentra.

2.1.3. Proceso

El proceso consiste en los siguientes pasos:

- Para iniciar la operación, el dron debe ser colocado por un usuario lo más próximo a la posición inicial del recorrido de cada rack.
- El dron iniciará con la búsqueda de la etiqueta de inicio del recorrido, de no encontrarla finalizará el recorrido.
- Una vez identificada la etiqueta de inicio, enfocará la ubicación inicial del rack utilizando marcadores dispuestos en los extremos de la ubicación.

- Una vez alineado con la ubicación, tomará la foto y se desplazará a la siguiente ubicación.
- Se define un tiempo máximo para la captura de la imagen, de no localizar ninguna etiqueta se considerará como vacía la ubicación y se continuará con la siguiente ubicación.
- De encontrar una etiqueta, procederá a transmitir la foto a la aplicación para que sea procesada.
- En caso sea la última ubicación en dirección hacia arriba procederá a desplazarse hacia la izquierda o derecha según la etiqueta de dirección en esta última ubicación.
- Continuará con el recorrido en base a las etiquetas, hasta alcanzar la etiqueta de finalización, o bien se agote la batería del dron.

Una vez concluido el recorrido se podrá exportar la información recolectada.

2.2. Teoría que soporta la investigación

La teoría que se adopta para sustentar este trabajo es el Modelo de Aceptación Tecnológica (TAM) desarrollado por Davis y Davis en 1989, por ser un modelo altamente probado en predecir el uso de tecnologías de información y comunicaciones.

El Modelo de Aceptación Tecnológica (TAM) se usa para predecir el impacto del uso de un dron para toma de inventarios, basándose en dos características principales:

- La utilidad percibida, se refiere al grado en que una persona cree que, usando un sistema en particular, mejorará su desempeño en el trabajo.
- La facilidad de uso percibida señala hasta qué grado una persona cree que, usando un sistema en particular, realizará menos esfuerzo para desempeñar sus tareas.

El presente trabajo pretende crear una aplicación que permita reducir el uso de equipo para realizar la toma de inventario en altura, en las ubicaciones que están fuera del alcance de un usuario sin montacargas o plataforma, como herramienta que permita agilizar dicho proceso, permitiendo automatizar la revisión a través del procesamiento de imágenes y que al mismo tiempo reduzca los riesgos que conlleva el uso de una jaula de seguridad.

La conclusión del trabajo debe permitir establecer si la herramienta en efecto permite agilizar el proceso, y al mismo tiempo tenga un nivel aceptable en la precisión de la captura de la información, minimice los riesgos y que se pueda operar de forma segura.

2.3. Tecnología elegida

El trabajo consiste en el desarrollo de una aplicación, para la cual se utiliza el lenguaje Python y la librería de código abierto OpenCV para el procesamiento de imágenes.

El equipo a utilizar es un Tello Drone y la versión 2 del SDK de éste.

2.4. Teoría y relación con la tecnología elegida

El Modelo de Aceptación Tecnológica (TAM) se utiliza debido a que la teoría explica que creer en el uso de las nuevas tecnologías puede dar como resultado la eficiencia en la organización, y con este trabajo el resultado esperado es la mejora en la exactitud de los registros del inventario.

La tecnología va a permitir la recolección de información en cada iteración, lo que posteriormente se podrá comparar con los resultados actuales y determinar si se está logrando alguna mejora en cuanto al tiempo de ejecución y exactitud en la toma de inventario.

3. ADMINISTRACIÓN DE ALMACENES

Los almacenes como parte de la cadena de suministro o *supply chain*, juegan un papel importante, ya que además de ser el lugar donde se resguardan los bienes o mercancías, tienen entre sus objetivos:

- El aprovechamiento del espacio
- El control exacto sobre dichas mercancías
- Minimizar las devoluciones por despachos erróneos

Para así poder lograr la reducción en los tiempos de entrega y con ello obtener reducción en el costo de servir.

Entre sus principales funciones están:

- Gestionar el flujo de entradas de mercancía y asignación de rampas
- Paletización e identificación de las mercancías
- Almacenaje de las mercancías, según criterios establecidos, tales como la rotación y tipo de producto
- Gestionar el inventario
- Preparación de pedidos
- Llevar registro documental de ingresos y salidas.

3.1. Cadena de suministro o *supply chain*

Se entiende por cadena de suministro o *supply chain* al proceso que se genera desde que el cliente realiza un pedido hasta que el producto o servicio ha sido entregado y cobrado. Comprende la planificación, ejecución y control de todas las actividades relacionadas con el flujo de materiales y de información desde la compra de materias primas hasta la entrega final del producto al cliente, pasando por su transformación intermedia (Mecalux, 2019).

3.1.1. Etapas de la cadena de suministro o *supply chain*

Las fases de la cadena de suministro se pueden definir como:

- Aprovisionamiento, se refiere al cómo, dónde y cuándo se deben adquirir las materias primas para la producción.
- Producción, la obtención del producto terminado, luego del proceso de transformación de materias primas.
- Distribución, corresponde a las actividades que permiten que los productos lleguen a su destino final. Para esto es necesario contar con una red de distribuidores, almacenes, tiendas físicas o plataformas en línea.

3.2. Software para la administración de almacenes

El uso de sistemas en la administración de los almacenes mejora significativamente la productividad, reduce costos e incrementa la satisfacción de los clientes.

Esto no implica que sea obligatorio el uso de sistemas, existen empresas que llevan el control de inventarios en hojas electrónicas y cuyos procesos son totalmente manuales.

El *software* para la administración de almacenes o WMS por sus siglas en inglés (*warehouse management system*), es una aplicación que ayuda a administrar y ejecutar de manera inteligente las operaciones de un almacén o centro de distribución.

3.2.1. Beneficios del uso del *software* para la administración de almacenes

Los beneficios potenciales de contar con un *software* para la administración de los almacenes son:

- Información en tiempo real de existencias
- Medición de la productividad
- Información de existencias precisas
- Reducción de errores de preparación
- Reabastecimiento automático
- Disminución de devoluciones
- Reportería precisa
- Visibilidad de la información de forma remota
- Mejor servicio al cliente
- Reducción de papelería

3.2.2. Funciones del *software* para la administración de almacenes

Dentro de las funciones que debe incluir están:

- Recepción
- Almacenaje
- Localización de existencias
- Gestión del inventario
- Inventarios cíclicos
- Planificación de olas de preparación
- Asignación de pedidos
- Preparación de pedidos o *picking*
- Reposición o reabastecimiento
- Embalaje o empaque
- Entregas
- Gestión de mano de obra
- Gestión de equipos

3.3. Inventarios cíclicos

El inventario que no es estrictamente controlado es un pasivo para cualquier empresa (Wayman, 1995).

Una de las funciones principales en la administración de almacenes es el control del inventario, esto a través de la toma de inventarios cíclicos, que vienen a ser las tareas que permiten medir la exactitud de los registros del inventario o IRA, que como ya se mencionó anteriormente, corresponde al acrónimo para *inventory record accuracy*, qué es el indicador que en otras palabras permite visualizar la salud del inventario.

El inventario cíclico consiste en contar periódicamente grupos de productos en lugar de realizar un único inventario anual, estos grupos de productos se determinan por lo general en base a la rotación o bien a los productos más costosos.

A nivel nacional todas las empresas deben realizar por lo menos un inventario anual, que puede ser acompañado por personal de la Superintendencia de Administración Tributaria (SAT). Dicho inventario por lo general implica el cierre del almacén o centro de distribución, mientras se completa el proceso.

Una de las razones por las que no se recomienda utilizar un único conteo anual, es debido a la dificultad que representa conciliar las diferencias encontradas en operaciones que pudieron haber sucedido meses atrás.

3.3.1. El conteo

Todos los conteos necesitan de una planeación, se necesita saber quién va a realizar el proceso, saber qué se va a contar, cuándo se debe realizar el conteo, qué equipo se necesita para realizar el conteo. Por ejemplo, si se van a contar los niveles superiores, que se encuentran ubicados a una altura a la cual ya no es posible tener acceso sin ayuda, es necesario el uso de equipo, montacargas o plataformas que le permitan a los usuarios acceder a dichas ubicaciones.

El utilizar equipo implica que se debe disponer de jaulas de seguridad para poder subir a los usuarios que van a realizar el conteo, y se deben tomar todas las precauciones del caso, así como cumplir con todas las medidas de seguridad correspondientes.

3.3.2. Tipos de inventarios cíclicos

Algunos de los métodos más utilizados para la realización del inventario cíclico son:

- Conteo cíclico ABC: es el método más común, se basa en el principio de Pareto, según el cual el 20 % de los productos supone el 80 % de las ventas, tomando esto como referencia, se le asigna una clasificación a cada producto según su frecuencia de venta, siendo A la clasificación para los productos de mayor rotación y que serán contados con mayor frecuencia.

- Conteo cíclico aleatorio: en este método se eligen los productos a contar de forma aleatoria, esto por lo general se utiliza cuando no hay una diferenciación significativa entre los productos.

3.4. IRA

Acrónimo de *inventory record accuracy*, indicador de la exactitud de los registros del inventario, es la medida de que tan cerca están los registros del inventario físico. La unidad de medida puede ser monetaria o en unidades, dependiendo si se ve desde el punto de vista financiero u operacional respectivamente.

3.4.1. Importancia desde el punto de vista financiero

Algunas de las razones por las cuales es importante la exactitud del inventario son:

- Los financistas quieren saber que el valor del inventario en libros es preciso.
- Los impuestos a menudo dependen del valor del inventario. El pago en exceso reduce las ganancias y el pago insuficiente implica multas.
- La poca precisión puede ocasionar que se termine comprando inventario de más que implica a su vez más capital.

3.4.2. Importancia desde el punto de vista operacional

Algunas de las razones por las cuales es importante la exactitud del inventario son:

- Los quiebres interrumpen la producción y origina retrasos en las entregas.
- Se pierde tiempo en estar localizando producto mal ubicado o extraviado.
- Cuando hay quiebres se incrementa el inventario para compensar, el inventario innecesario ocupa espacio y capital adicional.
- Los sistemas de planeación y financieros, MRP y ERP por sus siglas en inglés, requieren una precisión alta (95 % - 99 %) para su funcionamiento correcto.

3.5. Industria 4.0

La cuarta revolución industrial, también conocida como Industria 4.0, es la transformación digital de los procesos de manufactura y producción. Implica la aparición de nuevas tecnologías, tales como la robótica, la analítica, la inteligencia artificial, nanotecnologías y el Internet de las cosas (IoT), entre otros.

3.6. Logística 4.0

Tal como la Industria 4.0, viene a ser el uso o aplicación de nuevas tecnologías enfocadas en los procesos logísticos, entre las cuales se pueden mencionar, el Internet de las cosas, el uso de drones, uso de robots, escáneres 3D, uso de realidad aumentada, entre otros.

3.7. Uso de drones en almacenes

La automatización ha sido adoptada en la cadena de abastecimiento a través de transportadores (*conveyors*), clasificadores (*sorters*), robots para almacenaje y sistemas de recuperación por mencionar algunos.

La idea de utilizar drones dentro de un centro de distribución se ha venido manejando en los años recientes, todavía están en una etapa inicial si pensamos en su uso masivo, sin embargo, ya tienen gran utilización en otras industrias, tales como la agroindustria o la construcción.

La gestión del inventario es uno de los casos de uso que tiene mayor potencial para los drones en un almacén o centro de distribución. Los drones pueden ser utilizados para auditar el inventario, conteos cíclicos, búsqueda de productos, inclusive se puede pensar para tareas de preparación o *picking*.

En los métodos de conteo físicos, un usuario se dirige a la ubicación designada en la bodega, escanea el código de barras del producto y se moviliza a la siguiente ubicación según la programación. Este método de conteo es lento, laborioso, costoso, repetitivo y peligroso, ya que las personas deben trabajar también en altura. Los drones pueden agregar valor para optimizar este proceso.

4. DRONES

Se llama dron a todo vehículo aéreo no tripulado, UAV por sus siglas en inglés para *unmanned aerial vehicle*.

4.1. Reseña histórica

Los drones fueron concebidos originalmente con fines bélicos, por lo que la idea de un vehículo no tripulado ha sido utilizada desde hace más de 100 años. Iniciando con la Primera Guerra Mundial, en donde se utilizaron por el ejército británico para capturar imágenes para la elaboración de mapas (Daly, 2020).

Nikola Tesla demostró por primera vez el mando a distancia o radio control de un vehículo a final del siglo XIX, en un estanque en el Madison Square Garden de Nueva York en el año 1898. Siendo esta la primera aplicación de ondas de radio de la historia.

Elmer Ambrose Sperry diseñó un giroestabilizador para un avión en 1909, para luego en 1915 fusionar sus ideas con Peter Cooper Hewitt con algunas de las ideas del famoso inventor Nikola Tesla, logrando en 1918 el primer vuelo de un UAV con éxito. El vehículo era un dispositivo biplano no tripulado de madera, con capacidad para transportar más de un centenar de kilogramos de carga explosiva.

A finales de 1918 se completó el desarrollo de un torpedo conocido como bicho de Kettering, creado por el inventor estadounidense Charles Kettering, era un biplano que podía volar hasta 80 km.

Aunque durante la Primera Guerra Mundial no tuvieron tanto éxito, dio inicio una nueva tecnología que tendría mayor influencia en la Segunda Guerra Mundial.

Uno de los primeros cuadricópteros apareció en 1907, cuando los hermanos Jacques y Louis Bréguet, con la ayuda del profesor Charles Richet desarrollaron un giroplano, precursor del helicóptero.

Durante la Guerra de Vietnam se vio por primera vez el uso de drones con cámaras de reconocimiento.

En la década de los años sesenta los avances en la tecnología de transistores estuvieron disponibles para los consumidores a un precio accesible, lo que resultó en una explosión de aeroplanos a radio control en Estados Unidos.

Cuando se habla de drones comerciales, generalmente se tiene en mente un cuadricóptero, este tipo de dron tal como lo conocemos en la actualidad tiene sus inicios a finales de los años noventa y principios de los años dos mil como kits de entretenimiento. El primer modelo que se considera que logró popularidad es el Draganflyer quad helicopter desarrollado por la empresa Draganfly.

Para el año 2006, Frank Wang funda la empresa DJI, que en la actualidad es el líder mundial en la fabricación de vehículos aéreos no tripulados.

4.2. Clasificación y usos

Los drones se pueden clasificar por sus características, la principal clasificación entre los tipos de drones está en función de la forma de sustentarse en el aire.

4.2.1. Drones de ala fija

Estas aeronaves necesitan de una velocidad de vuelo inicial para poder sustentarse en el aire, no son capaces de realizar un despegue por sí solos, sino que necesitan de un dispositivo o una persona que los lance. Son parecidos a un avión normal, lo que les provee una gran autonomía de vuelo.

4.2.2. Drones de ala rotatoria o multirrotores

Son las aeronaves más conocidas comercialmente y las más vendidas, consiguen la sustentación gracias a las hélices que llevan incorporadas en los extremos de cada brazo. Cada hélice está impulsada por un motor y permite una gran estabilidad durante el vuelo.

A diferencia de los drones de ala fija, los multirrotores pueden permanecer quietos sobrevolando el mismo sitio. Estos se pueden subcategorizar en base a la cantidad de brazos o motores con los que cuentan.

4.2.2.1. Tricóptero

Compuestos por tres brazos y tres motores, los dos brazos delanteros giran en dirección opuesta para contrarrestarse entre sí, y el trasero provee estabilidad en el vuelo.

4.2.2.2. Cuadricóptero

Son los más habituales y comerciales, constan de cuatro brazos y cuatro motores, dos motores giran en sentido horario (CW) por sus siglas en inglés y dos en sentido antihorario (CCW) para crear una fuerza opuesta y mantener el equilibrio.

4.2.2.3. Hexacópteros

Son los más utilizados profesionalmente, tienen muy buena estabilidad para realizar tomas aéreas de video y fotografía, son capaces de aterrizar, aunque pierdan uno de los motores durante el vuelo.

4.2.2.4. Octacópteros

Cuantos más brazos y más motores tenga un dron, más estabilidad y más potencia permitirá. Son como una versión mejorada de los cuadricópteros y hexacópteros, con mucha más capacidad de carga.

4.2.2.5. Coaxiales

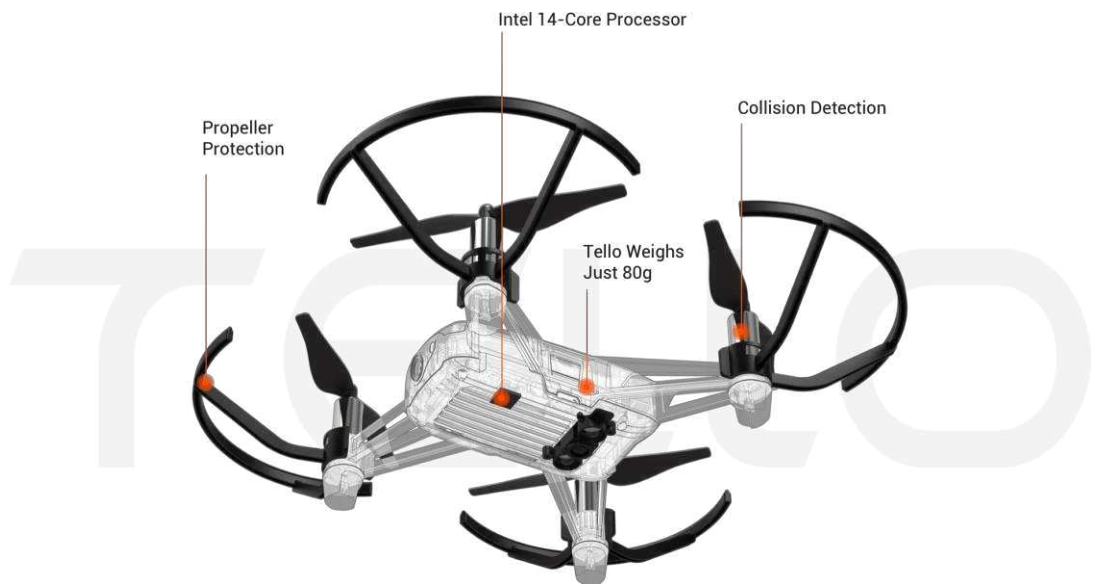
Los drones coaxiales tienen dos motores en cada brazo, por lo que son capaces de aguantar más peso que los normales, son la mejor opción para trabajos profesionales.

4.3. Tello Drone

Tello Drone, es un cuadricóptero considerado de gama baja, que entra en la categoría de entretenimiento, pero que por sus características se consideró para el desarrollo de este trabajo.

Figura 1.

Tello Drone



Nota. Características principales de un Tello Drone. Obtenido de Ryze Tech (2022). *Tello*. (<https://www.ryzerobotics.com/tello>), consultado el 20 septiembre de 2022. De dominio público.

4.3.1. Características

Es considerado un mini dron, debido a sus dimensiones físicas, longitud de 9.2 cm y una altura de 4.5 cm. Cuenta con un procesador Intel Quadcopter, que le provee de gran autonomía de vuelo y no requiere de permisos de vuelo especiales.

Es un dron fácil de maniobrar y cuenta con una aplicación compatible con Android y IOS, con la cual se puede manipular por completo y visualizar el vuelo. Cuenta con una cámara de 5 MP para fotografías y en video una resolución de 1280x720 pixeles a 30 cuadros por segundo.

El dron cuenta con una batería de Litio, con un peso de 26 gramos y en condiciones óptimas llega a los 13 minutos de vuelo, puede alcanzar una distancia de vuelo de hasta 100 metros a una altura de 35 metros, a una velocidad de 28.8 metros por segundo.

Cuenta con acceso a una plataforma de programación: Tello EDU, que incluye lenguajes de programación Scratch, Python y Swift. Y adicionalmente cuenta con un SDK (*software development kit*) para poder programar el dron.

4.3.2. Tello SDK 2.0

Kit de desarrollo para el dron Tello, que permite conectarse a la aeronave a través de Wifi utilizando un puerto UDP, permitiendo controlar el dron con comandos de texto.

El SDK incluye tres tipos de comando básicos, de control (*control* en inglés), de configuración (*set* en inglés) y de lectura (*read* en inglés).

5. CUADRICOPTERO

Un cuadricóptero es un vehículo aéreo no tripulado o UAV por sus siglas en inglés (*unmanned aerial vehicle*). Como se indicó anteriormente, un cuadricóptero consta de cuatro brazos, los cuales cuentan con un motor con una hélice al final. Son vehículos que poseen una gran estabilidad debido a los cuatro motores, que permiten realizar todas las maniobras con el movimiento en sintonía de sus cuatro motores a la vez.

Una de las grandes ventajas que tienen los cuadricópteros, es la capacidad de vuelo estacionario y vuelo vertical, características importantes para tareas de reconocimiento y en entornos difíciles de alcanzar para los humanos.

Por el contrario, entre las desventajas que tienen este tipo de vehículos, es la autonomía de vuelo, que se ve afectada por la cantidad de rotores con los que cuenta y la alta demanda de energía para su funcionamiento, lo que incide en la reducción del tiempo de vuelo.

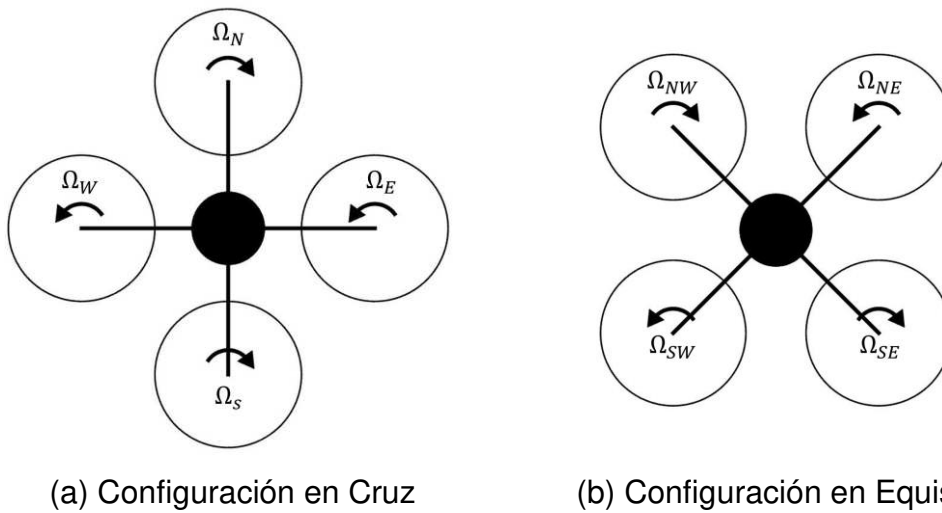
5.1. Configuración

En la actualidad los dos tipos de configuración de un cuadricóptero más comunes son, colocar de manera simétrica los motores del dron en una configuración en cruz + o en equis x, *Plus configuration* o *Cross configuration* respectivamente los términos en inglés.

En una configuración en cruz la parte delantera del dron se alinea directamente con un motor, mientras que, en la configuración en equis, la parte delantera se encuentra en medio de los dos motores delanteros, lo que a su vez permite contar con una cámara con vistas al frente.

Figura 2.

Configuraciones de Cuadricópteros



Nota. Esquematización de las configuraciones de un cuadricóptero. Obtenido de Rensselaer Polytechnic Institute. (2016). *A Comparison Between Quadrotor Flight Configurations* [Una comparación entre configuraciones de vuelo de un cuadrirrotor] (<https://move.rpi.edu/sites/default/files/publication-documents/2016-4.pdf>), consultado el 20 de septiembre de 2022. De dominio público.

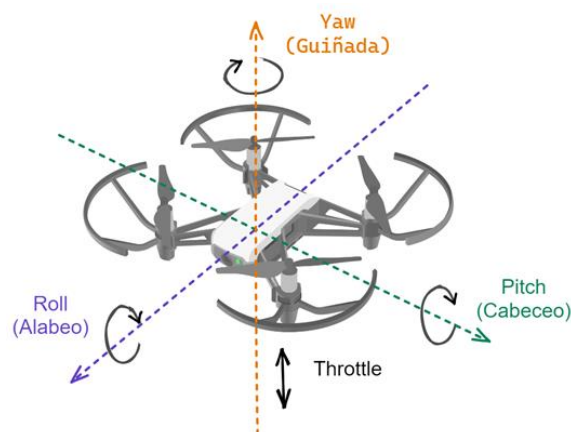
5.2. Movimientos del cuadricóptero

Un cuadricóptero, es un vehículo que posee seis grados de libertad, es decir, que tiene la capacidad de moverse en un espacio tridimensional, hacia delante/atrás, arriba/abajo, izquierda/derecha; movimientos de traslación en los ejes cartesianos (x, y, z), combinados con la rotación sobre los ejes principales que corresponde a los ángulos de Euler o mejor conocidos como ángulos de navegación, siendo estos ϕ , θ , ψ , representando el alabeo, cabeceo y la guiñada respectivamente (*roll*, *pitch*, *yaw* en inglés).

Sin embargo, sólo es posible controlar cuatro de estos seis movimientos de forma directa, estos cuatro movimientos son los ángulos de Euler y el movimiento de traslación que levanta el dron del suelo; a este movimiento se le denomina *throttle* en inglés.

Figura 3.

Movimientos del cuadricóptero



Nota. Diagrama de movimientos de un cuadricóptero, sobre imagen obtenida de Ryze Tello Drone Security. Elaboración propia realizado con Excalidraw.

5.2.1. Alabeo

Movimiento de rotación sobre el eje x, *roll* en inglés, para dirigir el dron hacia la derecha o izquierda.

5.2.2. Cabeceo

Movimiento de rotación sobre el eje y, *pitch* en inglés, para dirigir el dron hacia adelante o atrás.

5.2.3. Guiñada

Movimiento de rotación sobre el eje z, *yaw* en inglés, para girar el dron, en sentido horario, *clockwise* en inglés, o en sentido antihorario, *counterclockwise* en inglés.

5.2.4. Throttle

Movimiento para desplazar el dron sobre el eje z, con este movimiento se logra incrementar o disminuir la altura del dron, para maniobras como el despegue o aterrizaje.

6. VISIÓN POR COMPUTADORA

IBM sugiere la siguiente definición: La visión por computadora o *computer vision*, es un campo de la inteligencia artificial (IA) que permite que las computadoras y sistemas obtengan información significativa de imágenes digitales, videos y otras entradas visuales, y tomar acciones o hacer recomendaciones basadas en esta información (IBM, s.f.).

Si la inteligencia artificial permite que las computadoras piensen, la visión por computadora les permite ver, observar y comprender.

La visión por computadora es el proceso de utilizar *software* para realizar operaciones que el cerebro y la visión humanos puede realizar, tales como, el reconocimiento de objetos, detección de fallas o el control de calidad. Para esto se utilizan tecnologías como *machine learning* (ML) y *deep learning* (DL).

La visión por computadora funciona con tres pasos básicos:

- Adquisición de una imagen, en tiempo real a través de videos, fotos o tecnologías 3D.
- Procesamiento de imágenes, aplicar los modelos de aprendizaje profundo o DL (*deep learning* por sus siglas en inglés) para identificar o etiquetar.
- Análisis, es la interpretación del resultado, se identifica o clasifica.

6.1. Casos de uso

La visión por computadora es utilizada en muchas industrias, que incluyen procesos de control de calidad, automoción, seguridad, medicina, entre otros.

6.1.1. Automoción

Tesla, empresa fabricante de vehículos autónomos, apoyado completamente en la visión por computadora, en lugar de un enfoque basado en LiDAR, acrónimo de *laser imaging detection and ranging*, tecnología que emite haces de rayos de luz láser infrarroja que rebotan en los objetos.

Los vehículos de Tesla llevan instaladas decenas de cámaras, utilizando la visibilidad 360, su sistema AutoPilot tiene la capacidad de conducir el vehículo sin la supervisión humana.

6.1.2. Retail y seguridad

Amazon abrió las puertas de su primera tienda Amazon Go en enero de 2018, después de probar su tecnología Just Walk Out. El concepto de la tienda permite a un cliente ingresar a la tienda escaneando un código QR desde su aplicación de Amazon, tomar un producto y salir nuevamente, sin hacer cola para pagar en el cajero.

A través de la tecnología de visión por computadora, se detecta lo que el cliente lleva consigo, luego se le envía por correo electrónico un recibo por su compra.

6.1.3. Control de calidad

En un proceso de producción se puede utilizar para la búsqueda de defectos, que tradicionalmente estaban a cargo de un profesional que requería mantenerse atento durante largas y tediosas horas, debido a estas condiciones de trabajo, las omisiones o errores eran frecuentes.

6.2. OpenCV

Es una biblioteca de visión por computadora multiplataforma lanzada bajo licencia BSD (código abierto), que puede ejecutarse en los sistemas operativos Linux, Windows y Mac OS. Consiste en una serie de funciones en lenguaje C y un pequeño número de clases en lenguaje C++. También proporciona interfaces para lenguajes como Python, Ruby y MathLab. Implementa muchos algoritmos generales en procesamiento de imágenes y visión por computadora. El mercado de la visión por computadora es amplio y continúa creciendo.

Con esta librería se pueden realizar acciones como, reconocimiento facial, encontrar imágenes similares, seguimiento de movimiento de ojos, clasificación de acciones humanas que estén en videos, entre otros.

6.3. Marcadores ArUco

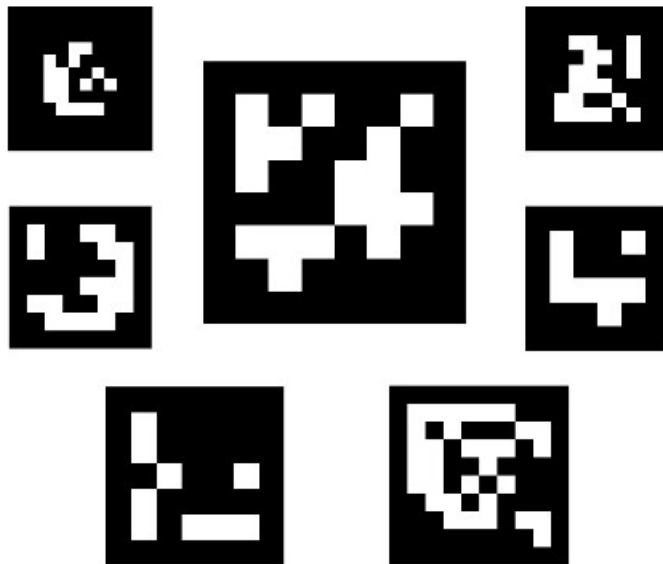
Los marcadores ArUco son marcadores de referencia, utilizados para la detección en sistemas de imágenes como puntos de referencia o de medida. Se pueden usar para estimar la posición de la cámara y su principal beneficio es que su detección es robusta, rápida y sencilla.

Un marcador ArUco es un marcador cuadrado compuesto por un borde negro ancho y una matriz binaria interna que determina su identificador o id. El borde negro facilita su rápida detección en la imagen y la codificación binaria permite su identificación y la aplicación de técnicas de detección y corrección de errores. El tamaño del marcador determina el tamaño de la matriz interna, por ejemplo, un marcador de 4x4 está compuesto por 16 bits.

El módulo de ArUco para OpenCV incluye la detección de estos marcadores y las herramientas para utilizarlos en la estimación de la posición y calibración de la cámara.

Figura 4.

Marcadores ArUco



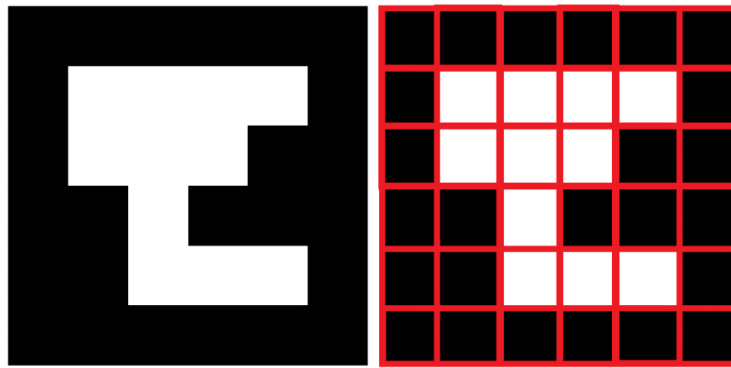
Nota. Ejemplo de marcadores ArUco. Obtenido de S. Garrido y A. Panov. (s.f.). *Detection of ArUco Markers* (https://docs.opencv.org/4.x/d5/dae/tutorial_aruco_detection.html), consultado el 20 de septiembre de 2022. De dominio público.

6.3.1. Diccionarios

Un diccionario es un conjunto de marcadores. Las propiedades principales de un diccionario son el tamaño del diccionario y el tamaño del marcador. El tamaño del diccionario es la cantidad de marcadores que componen el diccionario, mientras que el tamaño del marcador corresponde al número de bits que componen la matriz del marcador, así por ejemplo un marcador de 6x6 se interpretaría de la siguiente manera:

Figura 5.

Matriz para un marcador de 6x6



Nota. Diagrama que muestra cómo se define la matriz sobre un marcador ArUco. Elaboración propia, realizado con Paint.

El módulo de ArUco para Python incluye algunos diccionarios predefinidos, que cubren un rango de diferentes tamaños de diccionarios y marcadores, por ejemplo: 4X4_50, 4X4_100, 4X4_250, 5X5_100.

Los identificadores de los marcadores corresponden al índice del marcador en el diccionario, iniciando en 0, así por ejemplo para un diccionario 4X4_250 el último id es el 249.

7. DOCUMENTO DE ESPECIFICACIÓN DE REQUERIMIENTOS Y CRITERIOS DE ACEPTACIÓN DEL *SOFTWARE* – DERCAS

7.1. Objetivo estratégico

Implementar nuevas tecnologías para la automatización de procesos en un centro de distribución.

7.2. Objetivo general

Diseñar una aplicación para la automatización del proceso de toma de inventario del producto almacenado en una bodega o centro de distribución, utilizando drones.

7.3. Lista de acrónimos y glosario de la aplicación

- Almacén: en logística corresponde al lugar o espacio físico donde se almacenan las mercancías de una empresa, además de realizarse operaciones de recepción, almacenaje y despacho entre otras.
- Dron: es un vehículo aéreo no tripulado que se controla remotamente.
- Rack: estantes dentro de un almacén o centro de distribución.

7.4. Alcances

- Diseñar una aplicación que permita realizar el proceso de toma de inventario en las ubicaciones de almacenaje en una bodega o centro de distribución utilizando un dron.
- Definir el catálogo de etiquetas que se van a utilizar para guiar el recorrido del dron en los *racks* o estanterías.
- Utilizar un dron de gama baja.

7.5. Limitantes

- El recorrido del dron debe ser sobre un rack o estantería a la vez.
- El inicio de la operación debe ser ejecutado por un usuario.
- Las tarimas o contenedores para contar durante el proceso deben tener una única identificación.
- Solo se permite un contenedor por ubicación.

7.6. Análisis de riesgos

El uso de drones en áreas abiertas conlleva varios riesgos, al ser vehículos que son operados a distancia están expuestos a sufrir colisiones por un mal manejo, problemas propiamente en el dron o a factores del entorno.

Ahora esos riesgos se incrementan si se trata de operarlos en áreas cerradas, por lo que su uso en estos ambientes debe ser más controlado.

Teniendo en cuenta que el uso del dron se limita al proceso de levantamiento del inventario en condiciones específicas, se determina que los riesgos posibles se limitan a las colisiones que se puedan presentar debido a:

- Mal funcionamiento del *software*
- Problemas con el *hardware*, falla en los motores
- Problemas con la batería
- Daños en el dron
- Lesiones a personal de la bodega o centro de distribución

Para mitigar los posibles riesgos, se recomienda cerrar el pasillo sobre el cual se va a estar realizando el proceso de levantamiento.

Para los problemas con el *software* se necesita que para cada vuelo quede un registro en video del proceso y una bitácora de los movimientos, para tener material para su posterior análisis en caso de fallas.

Adicional se recomienda que el dron cuente con alguna característica que permita minimizar los daños a terceros o propiamente al dron en caso de algún accidente, tales como una jaula de protección.

7.7. Descripción de los módulos

La aplicación debe incluir los siguientes módulos:

7.7.1. Configuraciones

Opción para definir los parámetros y catálogos a utilizar.

7.7.2. Operaciones

Opción para ejecutar el proceso de toma de inventario a través del dron.

7.7.3. Reportes

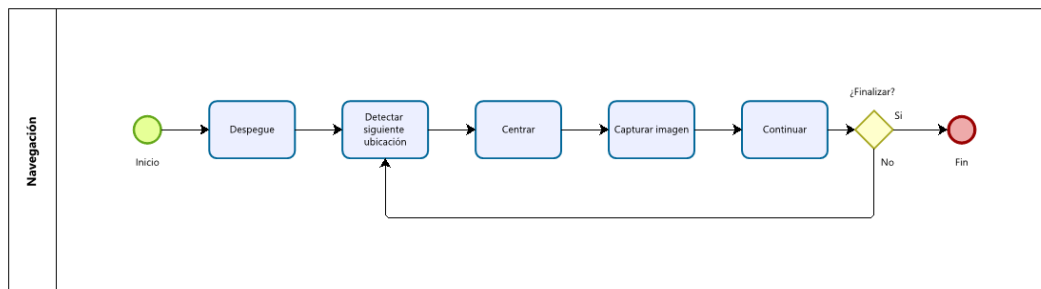
Opción para generar el listado de la información recopilada por el dron.

7.8. Diagrama de flujo de la solución

A continuación, se presenta el diagrama de flujo de la solución.

Figura 6.

Navegación del dron



Powered by
bizagi
Modeler

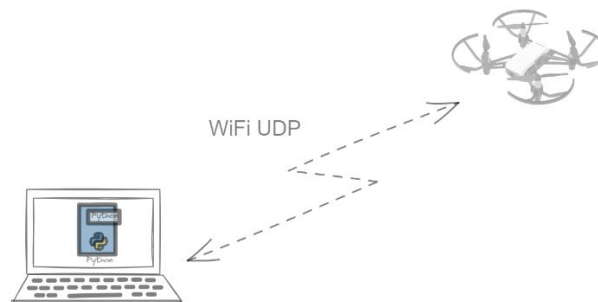
Nota. Diagrama de flujo de la navegación del dron. Elaboración propia, realizado con Bizagi Modeler.

7.9. Diagrama de arquitectura

La aplicación se debe comunicar de forma directa con el dron a través de Wifi, esto debido a que la operación se va a realizar en un espacio reducido y no se ve factible posicionamiento por GPS.

Figura 7.

Arquitectura de la aplicación



Nota. Diagrama de la arquitectura de la aplicación. Elaboración propia, realizado con Excalidraw.

8. DESARROLLO DE LA APLICACIÓN

8.1. Diseño de marcadores

Dado que el objetivo de este trabajo es poder guiar un dron de bajo costo en interiores, el cual no posee la funcionalidad de geolocalización, y que para navegar en un ambiente cerrado no es una opción viable; derivado de esto se plantea el uso de la cámara para poder guiar al dron durante el proceso.

Para lograr este objetivo se utiliza el diccionario 4X4_50 de ArUco. Se definen dos grupos de marcadores:

8.1.1. Delimitadores

El proceso se limita a realizar recorridos en *racks* o estanterías en las cuales se pueden ubicar dos tarimas entre parales, formando de esta manera dos columnas por tramo en el rack, pudiendo dividir la misma en la columna del lado izquierdo y la columna del lado derecho.

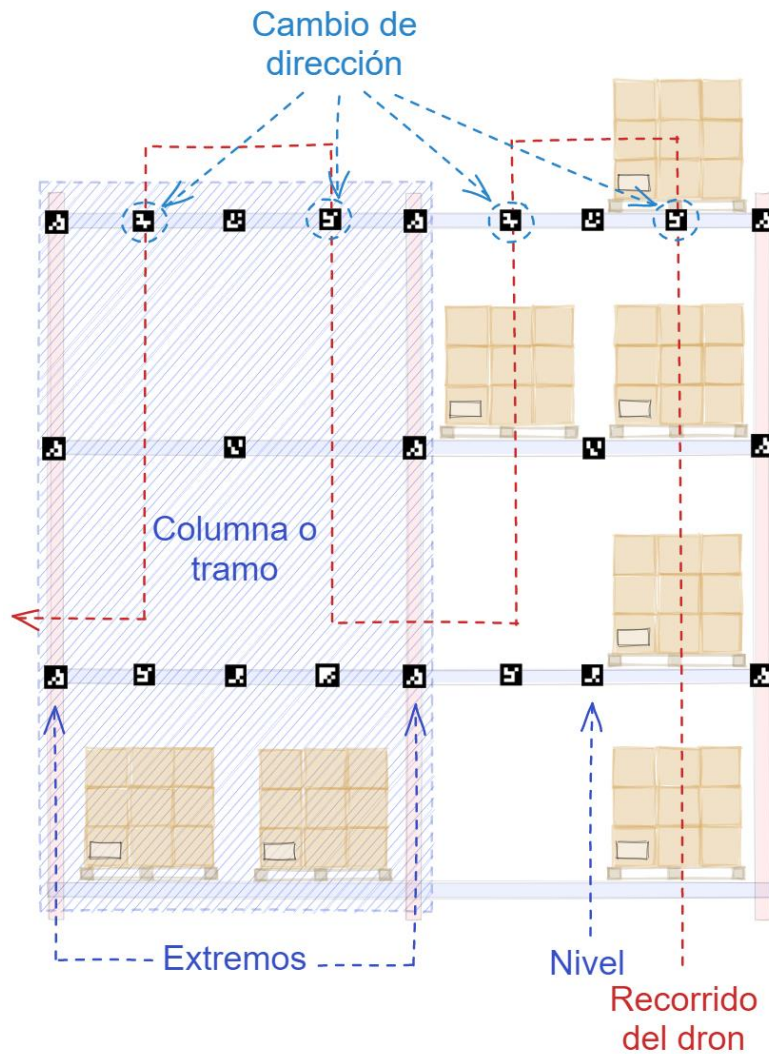
8.1.2. Marcadores de control

Grupo de marcadores para indicar cambios de dirección en el recorrido y para indicar el fin del recorrido.

Dado lo anterior se estará utilizando una serie de marcadores que se van a colocar al centro de cada tramo y que van a ser secuenciales, y un segundo marcador único para colocar en los parales, que corresponderán a los extremos de cada tramo.

Figura 8.

Diseño y uso de marcadores en los racks



Nota. Esquema de colocación de marcadores. Elaboración propia, realizado con Excalidraw.

8.2. Catálogo de marcadores

A continuación, se listan los marcadores utilizados en la aplicación:

Figura 9.

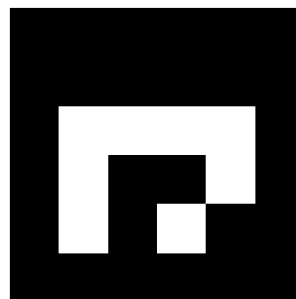
Marcador delimitador de extremo



Nota. Marcador utilizado para identificar uno de los extremos de cada rack, id 0. Elaboración propia, realizado con Kalachev

Figura 10.

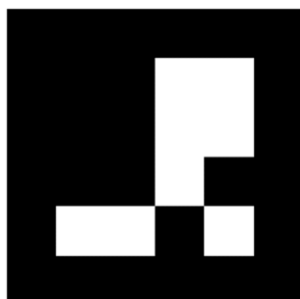
Marcador delimitador de extremo



Nota. Marcador utilizado para identificar uno de los extremos de cada rack, id 1. Elaboración propia, realizado con Kalachev

Figura 11.

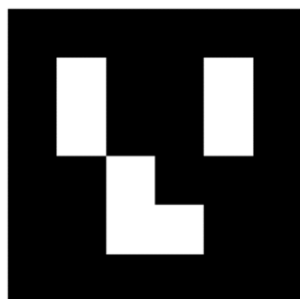
Marcador nivel 2



Nota. Marcador utilizado para identificar el nivel 2 de cada rack, id 2. Elaboración propia, realizado con Kalachev

Figura 12.

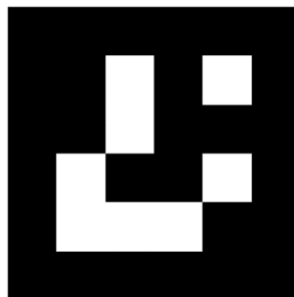
Marcador nivel 3



Nota. Marcador utilizado para identificar el nivel 3 de cada rack, id 3. Elaboración propia, realizado con Kalachev

Figura 13.

Marcador nivel 4



Nota. Marcador utilizado para identificar el nivel 4 de cada rack, id 4. Elaboración propia, realizado con Kalachev

Figura 14.

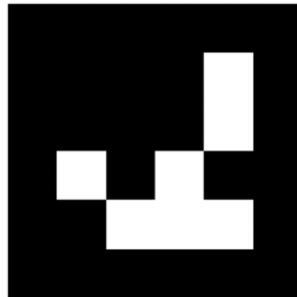
Marcador nivel 5



Nota. Marcador utilizado para identificar el nivel 5 de cada rack, id 5. Elaboración propia, realizado con Kalachev

Figura 15.

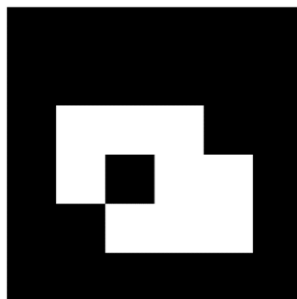
Marcador de cambio de dirección, arriba



Nota. Marcador utilizado para indicar un cambio de dirección, hacia arriba, id 11. Elaboración propia, realizado con Kalachev

Figura 16.

Marcador de cambio de dirección, abajo



Nota. Marcador utilizado para indicar un cambio de dirección, hacia abajo, id 12. Elaboración propia, realizado con Kalachev

Figura 17.

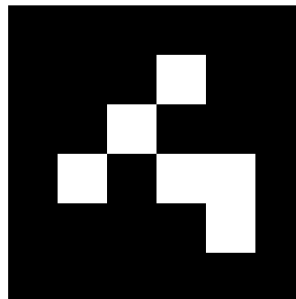
Marcador de cambio de dirección, derecha



Nota. Marcador utilizado para indicar un cambio de dirección, hacia la derecha, id 13. Elaboración propia, realizado con Kalachev

Figura 18.

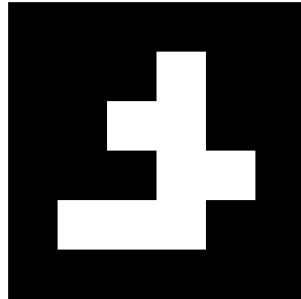
Marcador de cambio de dirección, izquierda



Nota. Marcador utilizado para indicar un cambio de dirección, hacia la izquierda, id 14. Elaboración propia, realizado con Kalachev

Figura 19.

Marcador para indicar aterrizaje



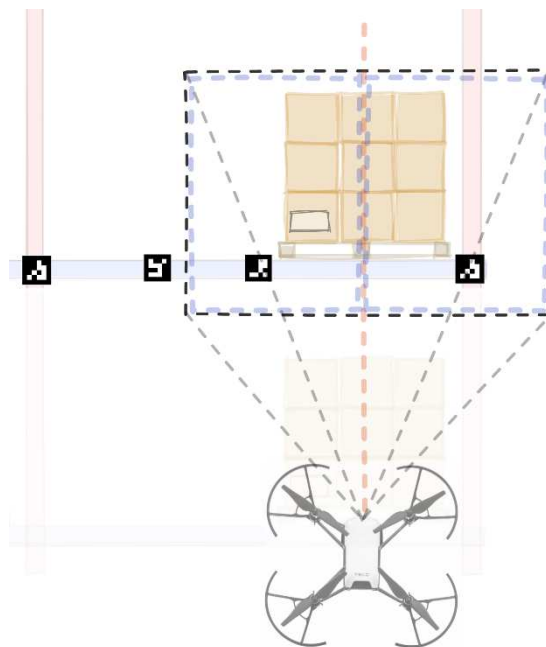
Nota. Marcador utilizado para indicar que el dron debe aterrizar, id 15. Elaboración propia, realizado con Kalachev

8.3. Lectura de marcadores

El proceso de lectura consiste en analizar cada imagen recibida desde el dron, primero filtrando los marcadores delimitadores, analizando los que se encuentren del lado derecho e izquierdo de la imagen por separado.

Figura 20.

Identificación de marcadores delimitadores



Nota. Esquema de toma de imágenes del dron. Elaboración propia, realizado con Excalidraw.

Una vez identificados se procede a determinar si la combinación cumple con las siguientes condiciones, en base a la dirección y lado del tramo o columna:

Tabla 1.*Combinaciones de marcadores identificados*

Dirección	Lado	Marcador izquierdo	Marcador derecho	¿Es válido?
Arriba	Izquierdo	Nivel	Extremo	Si
Arriba	Izquierdo	Otro	Otro	No
Arriba	Derecho	Extremo	Nivel	Si
Arriba	Derecho	Otro	Otro	No
Abajo	Izquierdo	Extremo	Nivel	Si
Abajo	Izquierdo	Otro	Otro	No
Abajo	Derecho	Nivel	Extremo	Si
Abajo	Derecho	Otro	Otro	No
Izquierda	Derecho	Extremo	Nivel	Si
Izquierda	Derecho	Otro	Otro	No
Izquierda	Izquierdo	Nivel	Extremo	Si
Izquierda	Izquierdo	Otro	Otro	No
Derecha	Izquierdo	Nivel	Extremo	Si
Derecha	Izquierdo	Otro	Otro	No
Derecha	Derecho	Extremo	Nivel	Si
Derecha	Derecho	Otro	Otro	No

Nota. Listado de posibles combinaciones de marcadores delimitadores identificados durante la navegación del dron. Elaboración propia, realizado con Word.

De ser una combinación válida, el siguiente paso consiste en centrar la imagen en la posición y capturar la foto cuando se haya centrado.

Luego se procede nuevamente a identificar los marcadores en la imagen, solo que, en esta oportunidad, filtrando por los marcadores de cambio de dirección, de encontrarse se procede a aplicar el cambio en la dirección y continuar con el recorrido.

Figura 21.

Detección de marcadores por lado izquierdo y derecho



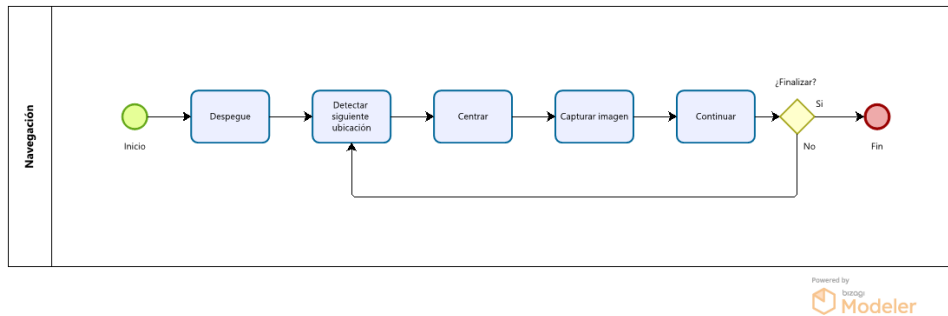
Nota. Ejemplo de la lectura del lado izquierdo y derecho de las imágenes procesadas durante la navegación del dron. Elaboración propia, realizado con Excalidraw.

8.4. Navegación del dron

Para la navegación del dron se considera el siguiente flujo:

Figura 22.

Navegación del dron



Nota. Diagrama de flujo de la navegación del dron. Elaboración propia, realizado con Bizagi Modeler.

8.4.1. Parámetros

Listado de parámetros utilizados en la aplicación:

Tabla 2.

Listado de parámetros del sistema

Parámetro	Valor inicial	Unidad de medida	Uso
Speed	18	cm/s	Velocidad promedio.
MinLevel	2	NA	Nivel mínimo del recorrido.
MaxLevel	5	NA	Nivel máximo del recorrido.
TakeOff	15	s	Tiempo máximo para encontrar el primer marcador de nivel o extremos.
Focus	25	s	Tiempo máximo para lograr enfocar la imagen.

Continuación de la tabla 2.

Parámetro	Valor Inicial	Unidad de medida	Uso
TakePicture	2	s	Tiempo máximo para encontrar los cuatro marcadores del identificador del contenedor.
FindDirections	2	s	Tiempo máximo para encontrar un marcador de cambio de dirección.
NextLocation	25	s	Tiempo máximo para encontrar el marcador del siguiente nivel o de los extremos.
MarkersRangeBegin	0	NA	Identificador inicial de los marcadores de nivel y extremos.
MarkersRangeEnd	5	NA	Identificador final de los marcadores de nivel y extremos.
LevelMarkersRangeBegin	2	NA	Identificador inicial de los niveles.
LevelMarkersRangeEnd	5	NA	Identificador final de los niveles.
NumberRangeBegin	100	NA	Identificador inicial del rango utilizado para los contenedores.
NumberRangeEnd	228	NA	Identificador final del rango utilizado para los contenedores.
Height	1.428571	NA	Ajuste para determinar la altura inicial de la imagen a procesar en la búsqueda de marcadores.
Width	0.10	NA	Porcentaje del ancho de la imagen a descartar en la búsqueda de marcadores, margen.
HeightEndFocus	1.111111	NA	Ajuste para determinar la altura final de la imagen a procesar en la búsqueda de marcadores durante el enfoque.

Continuación de la tabla 2.

Parámetro	Valor Inicial	Unidad de medida	Uso
HeightTakePicture	2	NA	Ajuste para determinar la altura inicial de la imagen a procesar en la búsqueda de marcadores para el identificador del contenedor.
HeightEndTakePicture	1.176470	NA	Ajuste para determinar la altura final de la imagen a procesar en la búsqueda de marcadores para el identificador del contenedor.
HeightEndFindDirections	1.111111	NA	Ajuste para determinar la altura final de la imagen a procesar en la búsqueda de marcadores de control para el cambio de dirección.
WidthFindDirections	0.20	NA	Porcentaje del ancho de la imagen a descartar en la búsqueda de marcadores de control para el cambio de dirección.
HeightEndNextLocation	1.111111	NA	Ajuste para determinar la altura final de la imagen a procesar en la búsqueda de marcadores del siguiente nivel o extremos.

Nota. Listado de parámetros definidos en la aplicación. Elaboración propia, realizado con Word.

8.4.2. Despegue

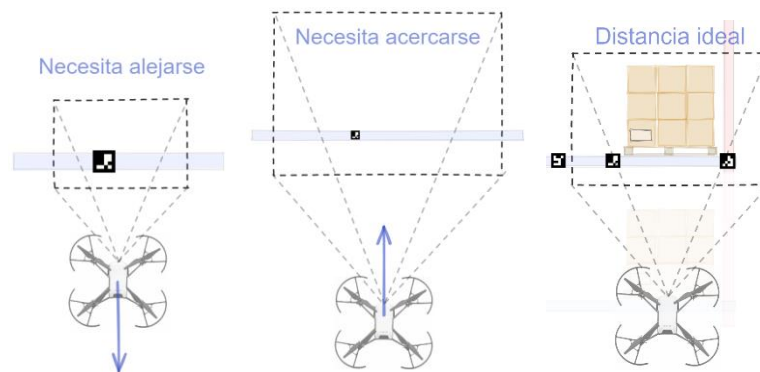
Etapa inicial del recorrido, se inicia y se continúa desplazando verticalmente con velocidad constante hasta encontrar un marcador o bien llegar al límite de tiempo de desplazamiento sin encontrar algún marcador. Tanto la velocidad y el tiempo máximo son parámetros de la aplicación.

8.4.3. Detectar siguiente ubicación

Inicia con la detección de algún marcador, dependiendo de la dirección del dron se procederá a realizar movimientos de ajuste, en los ejes xy y la distancia entre el dron y los marcadores estimada en base al área de los marcadores, se compara contra el rango establecido para la proximidad deseada hacia el objetivo.

Figura 23.

Ajuste por distancia al objetivo



Nota. Esquema de detección de proximidad al rack. Elaboración propia, realizado con Excalidraw.

Para lograr el ajuste en el eje x es necesario realizar movimientos de alabeo, (movimientos hacia la izquierda o derecha) y para ajustar la distancia, movimientos de cabeceo, (movimientos hacia atrás o hacia adelante).

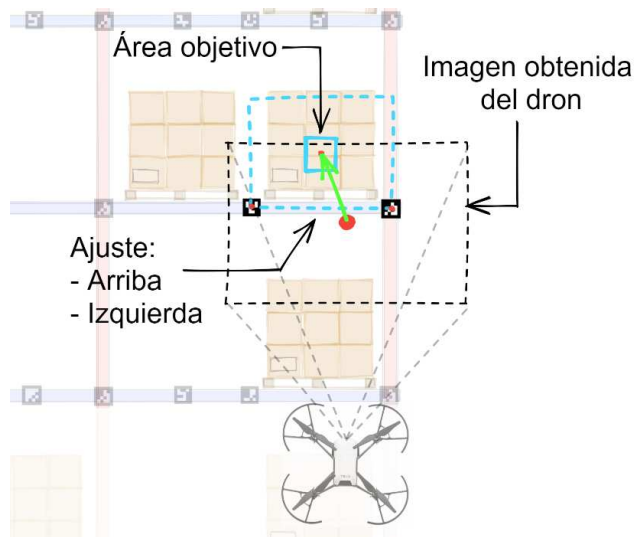
8.4.4. Enfocar

Una vez se identifiquen los marcadores delimitadores para ambos lados de la ubicación, izquierdo y derecho, se procede a comparar las coordenadas del centro de la imagen contra el centro de la ubicación, definido por un cuadrado al

centro del área del objetivo, un rectángulo que tiene como base, los marcadores identificados y la altura configurada en los parámetros del sistema. El cuadrado es concéntrico con el área objetivo y la magnitud de sus lados definida en los parámetros.

Figura 24.

Ajustes para centrar la imagen: ejes xy



Nota. Esquema del cálculo de la distancia en los ejes xy al centro de la ubicación, tomando de referencia los marcadores de delimitadores. Elaboración propia. realizado con Excalidraw.

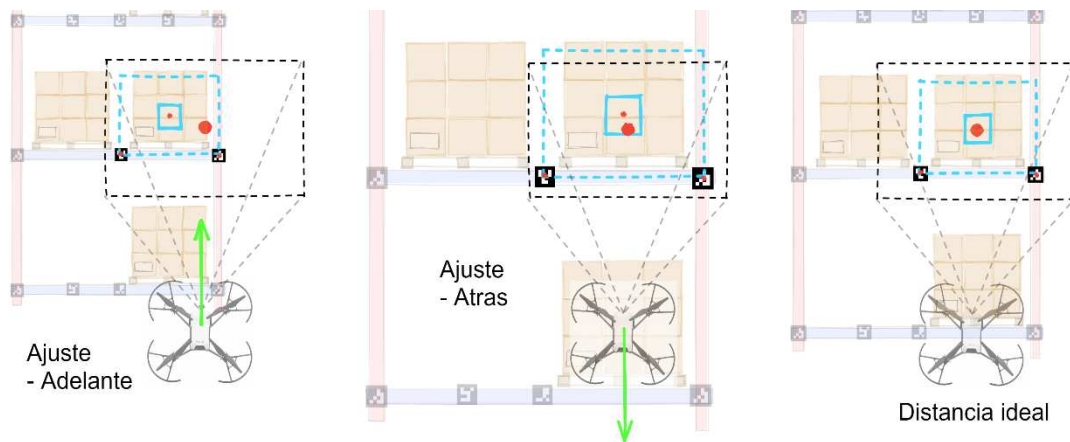
Para lograr el ajuste en el eje x es necesario realizar movimientos de alabeo, (movimientos hacia la izquierda o derecha) y para ajustar la altura, movimientos de desplazamiento vertical, (movimientos hacia arriba o abajo, *throttle* por su nombre en inglés).

Para el ajuste de la distancia, se utiliza de referencia la distancia estimada entre los marcadores delimitadores, comparando este valor contra el valor de referencia definido en los parámetros, de ser mayor es necesario alejarse y, por

el contrario, si la distancia es menor se necesita acercar al objetivo, ambos ajustes con movimientos de cabeceo (movimientos hacia atrás o adelante).

Figura 25.

Ajustes para centrar la imagen: distancia



Nota. Esquema del enfoque utilizando las imágenes procesadas durante la navegación del dron. Elaboración propia, realizado con Excalidraw.

8.4.5. Capturar imagen

Una vez se haya logrado enfocar, se procede a capturar la imagen del objetivo y se continúa con el siguiente paso.

8.4.6. Continuar

Etapa del proceso en la que se puede iniciar un nuevo ciclo o bien finalizar el proceso. Se buscan marcadores de dirección iniciando con la última imagen capturada, de no encontrar se continúa en la misma dirección hasta detectar la siguiente ubicación.

De identificar un marcador de cambio de dirección, se actualiza la dirección del dron, izquierda, derecha, arriba o abajo según se haya identificado. Y de encontrar el marcador de finalización se envía la instrucción para realizar el aterrizaje.

8.5. Lectura de códigos de barra o QR

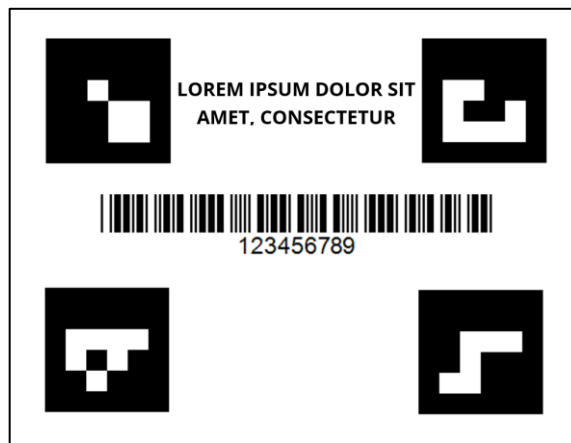
La propuesta inicial del trabajo fue detectar códigos de barra o QR dentro de cada ubicación, pero se tuvo el inconveniente de la calidad de las imágenes que se pueden obtener con la cámara del dron (Tello Drone). Debido a esto se tuvo que considerar en su lugar, utilizar una codificación con marcadores ArUco, que si son distinguibles con un tamaño aproximado de 8 centímetros por lado como mínimo.

La idea es incluir como requisito para la operación, que la identificación de las tarimas o contenedores incluyan estos marcadores, traducir el identificador de cada tarima a una nomenclatura codificada, tomando como base, 128 símbolos del diccionario de 4X4 y 250 identificadores.

Quedando el formato de la siguiente forma:

Figura 26.

Formato identificador tarima o contenedor



Nota. Ejemplo de un identificador utilizado en la aplicación. Elaboración propia, realizado con Word.

8.6. Generación del listado de información recolectado

El resultado del recorrido del dron se guarda en un archivo csv y la estructura es la siguiente:

Tabla 3.

Tabla de información recolectada

Rack	Columna	Lado	Nivel	Identificador
1	23	DER	2	562358
1	23	DER	3	0
1	23	DER	4	0
1	23	IZQ	4	458699
1	23	IZQ	3	452155

Continuación de la tabla 3.

Rack	Columna	Lado	Nivel	Identificador
1	24	IZQ	2	0
1	24	DER	2	0

Nota. Ejemplo del contenido del archivo csv generado. Elaboración propia, realizado con Word.

8.6.1. Tabla de información

La información contenida en la tabla es la siguiente:

- Rack: valor indicado al iniciar la operación
- Columna: valor indicado al iniciar la operación
- Lado: valor determinado en base a la posición de los marcadores
- Nivel: valor identificado en el rack o estantería
- Identificador: valor identificado en la ubicación, un 0 en su ausencia.

8.7. Limitaciones encontradas

Durante el desarrollo de la aplicación se encontraron algunas limitantes con el modelo del dron elegido, a continuación, las más relevantes:

8.7.1. Cámara de video

La cámara de video que incluye el Tello Drone es de 5 MP, pero no fue posible leer códigos de barra, debido a esto fue necesario replantear la propuesta con respecto a los identificadores de los contenedores ya no utilizar códigos de barra, sino que en su lugar codificar el identificador con marcadores ArUco.

8.7.2. Iluminación

Según el manual del usuario del Tello Drone, el Sistema de posicionamiento visual o VPS (*visual positioning system* por sus siglas en inglés), opera de forma eficiente en una altitud de entre 0.3 y 6 m, y con una iluminación menor a 10 lux o mayor a 100,000 lux.

CONCLUSIONES

1. Se define el catálogo de los marcadores ArUco para identificar los extremos de las ubicaciones, niveles, cambios de dirección y para el rango a utilizar en la identificación del contenido de las ubicaciones.
2. Se logra crear módulo para el procesamiento de imágenes para la detección del catálogo de marcadores ArUco definido, se procesan diferentes áreas de cada imagen para buscar los marcadores para cada una de las acciones que debe ejecutar el dron.
3. Para la operación de enfoque se utilizan las funciones de movimiento por distancia del API para el Tello Drone, estas instrucciones dieron mejores resultados en cuanto al desplazamiento del dron y su estabilidad.
4. Para la operación de búsqueda de las siguientes ubicaciones, se utiliza la función de movimiento en cuatro vías del API para el Tello Drone, instrucción con menos estabilidad pero que permitió realizar los desplazamientos en una sola dirección de forma continua.
5. No se logra la interpretación de códigos de barra, la calidad de las imágenes no permite su identificación, en su lugar se plantea el uso de marcadores ArUco para codificar las etiquetas de los contenedores a colocar en cada una de las ubicaciones.

6. Durante las operaciones de captura de los identificadores y la búsqueda de los marcadores de cambio de dirección, el dron se mantiene flotando y la posición de este se ve comprometida mientras se procesa cada una de estas operaciones, debido a esto fue necesario ejecutar el enfoque luego de cada una de estas operaciones, para ajustar la posición del dron y lograr continuar con el recorrido.
7. Durante el desarrollo del trabajo se encontró que la luminosidad fue un factor determinante en la respuesta del dron, esto debido a que según la documentación en el modo de vuelo con el sistema de posicionamiento visual del dron se recomienda un nivel mínimo de 10 lux de luminosidad, pero en la práctica se obtuvieron mejores resultados con una luminosidad por encima de los 300 lux.
8. Se logró crear una aplicación que permita guiar a un Tello Drone en un recorrido preestablecido con marcadores ArUco en condiciones ideales.
9. No fue posible obtener algún almacén o centro de distribución que tuviera la disponibilidad para realizar la validación de la aplicación, debido principalmente al costo que conlleva para una operación en vivo tener que detener la operación para realizar dicha prueba siendo en esencia un prototipo de solución, en su lugar se simuló la estructura de una estantería y sobre esta se realizó el desarrollo.

RECOMENDACIONES

1. Utilizar la operación de enfoque durante todo el vuelo, esto debido a que en el desarrollo de la aplicación se encontró que para algunas de las operaciones en las que se deja flotando el dron, mientras se realiza el procesamiento de las imágenes, siempre tendía a variar su posición y no se lograba completar el recorrido.
2. Considerar un modelo de dron más robusto en cuanto a estabilidad de vuelo y calidad en la cámara de video, derivado de las limitaciones encontradas con el Tello Drone.
3. Interpretar todos los marcadores ArUco identificados durante el vuelo, principalmente para los casos en los que el dron se desvía y así poder corregir el rumbo, considerando los marcadores previos y lograr ejecutar las acciones correctivas necesarias. En el presente trabajo se considera el caso ideal y como medida de seguridad se establecen tiempos para lograr completar cada acción y en caso de sobrepasar los límites establecidos se aborta el vuelo.
4. Incluir las funciones de rotación horario y antihorario para ajustar la posición del dron, en el presente trabajo únicamente se consideran los casos en los cuales se espera que el dron se mantenga siempre perpendicular a las ubicaciones que se están analizando, se calcula la desviación angular respecto del plano de las ubicaciones, más no se realiza acción alguna.

REFERENCIAS

- Coyoy M. (30 de enero de 2017). *Obligación de reportar los inventarios a la SAT*. Deloitte. <https://www2.deloitte.com/gt/es/pages/about-deloitte/topics/deloitte-en-medios/obligacion-de-reportar-los-inventarios-a-la-sat.html>
- Daly, D. (junio de 2020). *A Not-So-Short History of Unmanned Aerial Vehicles (UAV)* [Una historia no tan breve de los vehículos aéreos no tripulados (UAV)]. CONSORTIQ. <https://consortiq.com/uas-resources/short-history-unmanned-aerial-vehicles-uavs>
- IBM (s.f.). *What is computer vision?* [¿Qué es la visión por computadora?]. <https://www.ibm.com/topics/computer-vision>
- Mecalux (agosto, 2019). *¿Qué es la supply chain o cadena de suministro? Definición y diferencias con la logística*. <https://www.mecalux.com.mx/blog/inventario-con-drones>
- Partida B. (4 de mayo de 2012). *Inventory Accuracy Improves Performance on Logistics Metrics* [La precisión del inventario mejora el rendimiento de las métricas logísticas]. Industry Week. <https://www.industryweek.com/supply-chain/inventory-management/article/21957412/inventory-accuracy-improves-performance-on-logistics-metrics>

TOTVS LATAM. (febrero de 2022). *¿Qué es Logística 4.0 y cuál es su impacto?*

- TOTVS. <https://es.totvs.com/blog/gestion-de-logistica/que-es-logistica-4-0-y-cual-es-su-impacto/>

Wayman W. (1995). Inventory accuracy through warehouse control [Precisión del inventario a través del control del almacén]. *Production and Inventory Management Journal*, 36(2), 17.
<https://www.proquest.com/openview/7893b9fecb82f1fd186e8120d8c84d15/1?pq-origsite=gscholar&cbl=36911>

Yun K. y Stanley B. (2004). *Information Inaccuracy in Inventory Systems – Stock Loss and Stockout* [Inexactitud de la información en los sistemas de inventario – Pérdida y desabastecimiento de existencias]. Massachusetts Institute of Technology. <http://web.mit.edu/manuf-sys/www/oldcell1/papers/kang-gershwin-autoid04.pdf>

APÉNDICES

Apéndice 1.

Estructura de la aplicación

Archivo	Uso
functions.py	Funciones comunes, para dibujar información en las imágenes y los movimientos del dron.
frameProcessing.py	Funciones para identificación de marcadores.
telloVideoCapture.py	Interacción con el dron, funciones para transmisión de imágenes y control manual o automático del dron.

Nota. Listado de archivos del código de la aplicación. Elaboración propia.

Apéndice 2.

Direcciones de repositorio y videos

Recurso	Dirección
Repositorio	https://github.com/lall74/tello-inventory
Video recorrido en zigzag	https://youtu.be/2GAw-mzYSS4
Video recorrido vertical	https://youtu.be/cDS2cEPLAVI

Nota. Direcciones hacia el repositorio de la aplicación y videos del recorrido del dron. Elaboración propia.

Apéndice 3.

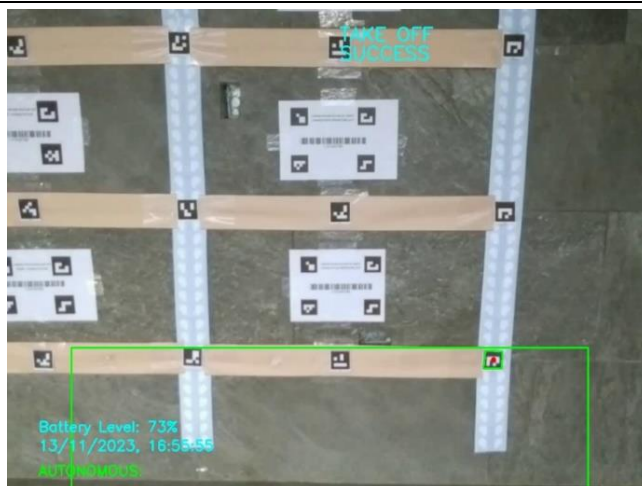
Fotografías del vuelo del dron



Título: Despegue

Foto No. 1

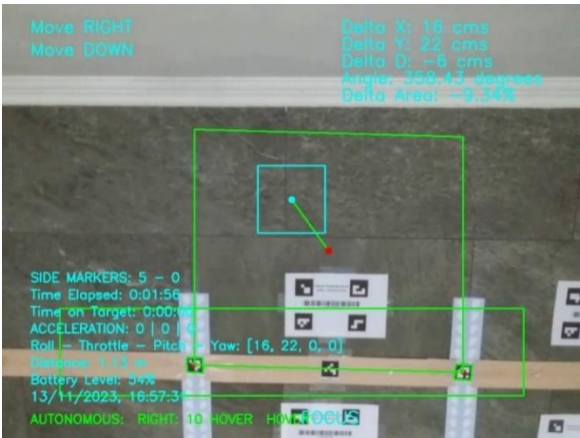
Descripción: captura de la imagen procesada por el dron en donde se visualiza el despegue.



Título: Detección de un marcador delimitador Foto No. 2

Descripción: captura de la imagen procesada por el dron en donde se visualiza la detección de un marcador delimitador.

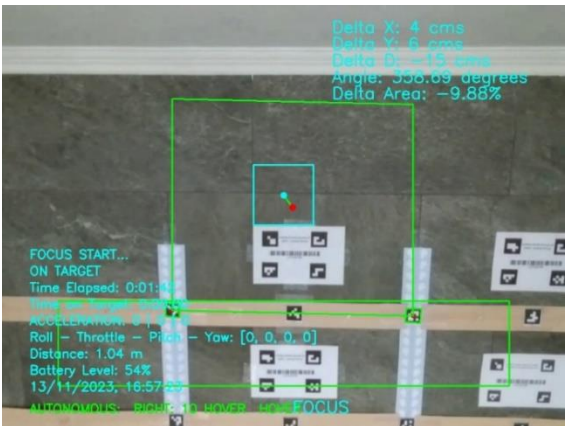
Continuación del apéndice 3.



Título: Enfoque

Foto No. 3

Descripción: captura de la imagen procesada por el dron en donde se visualiza un desfase en los ejes xy y con relación a la distancia entre los marcadores que delimitan la ubicación. Se determina que se debe desplazar el dron hacia la derecha y hacia abajo.

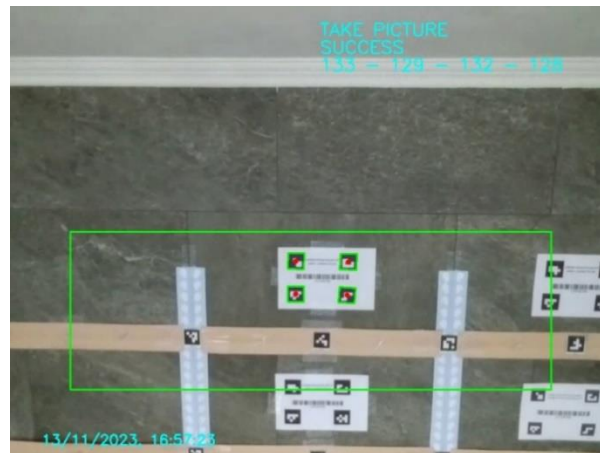


Título: Enfoque exitoso

Foto No. 4

Descripción: captura de la imagen procesada por el dron en donde se muestra el enfoque exitoso.

Continuación del apéndice 3.



Título: Contenido de la ubicación

Foto No. 5

Descripción: captura de la imagen procesada por el dron en donde se muestra la detección de los cuatro marcadores de qué se compone un identificador.



Título: Búsqueda de marcador de cambio de dirección

Foto No. 6

Descripción: captura de la imagen procesada por el dron en donde se muestra el área de la imagen en donde se espera encontrar los marcadores de cambio de dirección.

Nota. Fotografías tomadas de la cámara del dron durante el recorrido. Elaboración propia.