





PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE  
ESCUELA DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL Y SISTEMAS  
ICS1113-OPTIMIZACIÓN

## Entrega 3

---

Optimización de costos, implementado un sistema  
de repartición por drones

### Grupo 4

Miguel Andrés Chahuán Espinoza: 19639805 - Sección 2  
Martín Chaud Goldenberg: 19624018 - Sección 2  
María Verónica Cubillos Alfaro: 19642326 - Sección 2  
Diego Manuel de la Fuente González: 19625871 - Sección 2  
Andrés Felipe Marchant Soto: 19625294 - Sección 2

Fecha entrega: 26 de octubre del 2023

# Índice

<b>1. Definición del problema</b>	<b>4</b>
1.1. Contexto . . . . .	4
1.2. Descripción del problema elegido . . . . .	5
<b>2. Modelo del problema</b>	<b>8</b>
2.1. Resumen . . . . .	8
2.2. Conjuntos . . . . .	8
2.3. Parámetros . . . . .	8
2.4. Variables . . . . .	8
2.5. Restricciones . . . . .	9
2.5.1. Naturaleza de las variables . . . . .	10
2.6. Función Objetivo . . . . .	11
<b>3. Definición de datos</b>	<b>11</b>
3.1. . . . .	11
<b>4. Resolución del problema con software</b>	<b>11</b>
4.1. . . . .	11
<b>5. Validación del resultado</b>	<b>11</b>
5.1. . . . .	11
<b>6. Anexo ilustraciones</b>	<b>12</b>
<b>7. Referencias</b>	<b>13</b>

# 1. Definición del problema

## 1.1. Contexto

Un área de la logística que presenta grandes oportunidades de innovación en los procesos y optimización, corresponde al transporte de productos relacionado al e-Commerce, ya que, para 2023, en Chile sus negocios relacionados han alcanzado una valoración de US \$10.9 mil millones (Justiniano, 2023). Específicamente en Santiago, se presenta una variedad de métodos de envío en cuanto a empresas y organizaciones se refiere: Correos de Chile, Chilexpress, Starken, Bluexpress, Pedidos Ya, etc, tienen sistemas de envío que se demoran, en general, entre 1 hasta 12 días hábiles para entregar el producto (JumpSeller, 2023). Este transporte se lleva a cabo con automóvil/camión o van de carga, bicicleta o motocicleta, pero es claro que en Santiago no se ha generalizado la entrega de paquetes transportados mediante drones, un negocio que a nivel mundial ha alcanzado un 43.9 % de crecimiento en 2023, valorizándose en US \$2.1 billones (RAM Research and Markets, 2023).

Dicho crecimiento se debe a las ventajas comparativas que posee el delivery con drones en comparación con los medios comunes: menor tiempo de transporte, costo reducido, entrega autónoma y segura, fácil llegada a zonas rurales y aisladas, y beneficios en cuanto a la contaminación, ya que los drones eléctricos no presentan emisiones asociadas en dicha forma (Minhaj, 2022). En cuanto a este último punto, se proyecta que los envíos de productos con métodos comunes (asociado al e-commerce) se traduzcan, para 2030, en 3.1 billones de toneladas de CO<sub>2</sub> a nivel mundial (Perlmutter, 2023).

Es preocupante que la optimización del envío de productos, con los vehículos actuales, afecte al medio ambiente en gran magnitud, ya que “el envío rápido de productos aumenta tanto las emisiones de CO<sub>2</sub> como los costos hasta en un 15 % y 68 %, respectivamente” (Muñoz, 2021). Es por lo explicado con anterioridad, que reemplazar dichos sistemas con delivery de drones en Santiago está incentivado por razones económicas y ambientales, con lo cual se tendrá como objetivo en este proyecto, modelar una empresa de delivery de productos con drones eléctricos que implemente los beneficios mencionados anteriormente, minimizando los costos de la misma para potenciar el buen funcionamiento del sistema.

Una vez establecidas las ventajas generales del delivery por drones sobre los medios convencionales, resulta necesario un estudio más detallado del funcionamiento de la entrega por drones y su aplicación en el mundo real y actual, con el fin de comprender qué características se pueden optimizar; una vez que el pedido online es recibido por cierta compañía, se empaqueta el producto en una bodega asignada (paquete especial para colgar de un dron), el dron normalmente utiliza VTOL (vertical take off) y viaja hacia la dirección del cliente. Posteriormente viene la etapa de navegación, que se considera la etapa más crucial del delivery por drones, ya que se tiene que viajar a través de áreas pobladas; en general se utiliza GPS para la navegación, aunque algunos drones utilizan SONAR/RADAR para la navegación (por simplificación, no se considerará lo anterior para modelar el problema), lo que permite evitar obstáculos en el camino, aunque en este problema se considera que la altura de vuelo de los drones evita tener que esquivar obstáculos como edificios bajos, postes de luz, etc... . Una vez alcanzado el lugar objetivo, el dron debe dejar el paquete, y se puede lograr mediante un sistema de cuerda y paquete, que utiliza una zona con QR establecida por el cliente en la propiedad, que es identificada con cámara y el paquete bajado con cuerda; también se puede realizar una “pasada en el aire.”<sup>en</sup> la cual, el dron utiliza el GPS hasta la ubicación, se frena momentáneamente y libera el paquete, que baja en paracaídas al lugar deseado (se considerará esta forma en el problema actual), o existe la forma de aterrizaje completo, que tiene problemas dependiendo de obstáculos presentes en la ubicación en la que se lleva a cabo la entrega. Luego el dron vuelve a la bodega utilizando el sistema de navegación anterior. En la actualidad, este sistema ha sido aplicado por *Amazon* en el Reino Unido, por *Wing.com* en Australia, USA y Finlandia, etc... (Bonerjee, 2023).

## 1.2. Descripción del problema elegido

Drone Shipping Santiago (DSS) es una empresa de transporte de productos mediante drones eléctricos, que recogen los paquetes desde una bodega central y vuelan hasta una serie de ubicaciones específicas a los clientes para realizar las entregas, distribuyendo eficientemente el delivery de productos a lo largo de la capital. El contenido de los paquetes depende de la empresa que esté asociada a DSS según una previa determinación, por ejemplo si la empresa es *Falabella*, los productos transportados podrían ser ropa, pero siempre asegurando un bajo peso que permita el funcionamiento correcto del dron. Para poner en práctica las ventajas del transporte mediante drones v/s el transporte de productos con vehículos ya utilizados en la industria, se lleva a cabo un ejercicio en el cual desde una bodega A (ej: PUC campus San Joaquín), se desea llevar un paquete con un producto q hasta la ubicación de un cliente predeterminado U (ej: Parque O'Higgins), dentro de Santiago. Con la aplicación Google Maps, es posible estimar el tiempo de traslado en auto de A a U, lo que se asume similar a un vehículo, por ejemplo, de Correos de Chile, que podría estar realizando dicha entrega. El tiempo de transporte estimado por Google Maps corresponde a 17 minutos en el mejor de los casos, ya que este ejercicio se realiza a una hora donde hay poco tránsito en las calles por donde viajaría el auto. En comparación, para estimar el tiempo que demoraría un dron en realizar dicho trayecto, se utiliza la misma aplicación para notar que la distancia, en línea recta, de A a U, es de 5.07 km. Es posible que DST utilice el mismo dron de transporte que utiliza la empresa Amazon en Estados Unidos, es decir, un dron hexagonal MK27-2 (Haughey, 2023), el cual tiene una velocidad de operación de 80 km/h (Ruiz, 2022), lo que implica que el tiempo de traslado sería 3.8 min, lo que en el peor de los casos, es menos de un 25 % del tiempo que se utilizaría para dicha entrega con los servicios actuales. Además, el auto puede producir aprox. 110g/km de CO<sub>2</sub> (AutoBiz, 2021), es decir, 557.7 g de CO<sub>2</sub> en esta entrega, problema que no existe con un dron eléctrico.

Se deben considerar los beneficios y desafíos del delivery con drones utilizado en la actualidad y con miras a futuro, principalmente en USA y Reino Unido, ya que es ahí donde este concepto está más desarrollado y ha sido aplicado: como ventajas, se tiene una entrega más rápida y económica, mayor accesibilidad y flexibilidad, y como desafíos, en primer lugar se tienen temas reglamentarios y de seguridad, ya que según el área de operación, se deben tener en cuenta regulaciones de espacio aéreo, ruido, es necesaria una certificación, y se deben evitar choques con edificios u otros objetos en altura, garantizar un aterrizaje seguro, etc... La limitación a abordar en este problema, corresponde a las limitaciones técnicas y operativas, como la duración máxima de la batería de los drones, la capacidad de carga útil y el alcance de dicha carga, lo que condiciona el tipo y la cantidad de productos a entregar, y la distancia máxima a la cual los paquetes pueden ser entregados. También puede intervenir de mala manera el clima al interferir las señales, o vulnerabilidad del sistema de entrega, y adaptación del cliente a las redes sociales (Farajzadeh, 2023). Desde un punto de vista de logística, los problemas que puede abarcar y los beneficios que se pueden reforzar, corresponden a la organización del delivery en cuanto a tiempos, carga de batería, distancias a ubicaciones de clientes y almacenamiento de productos y paquetes en bodega. Se debe considerar que el costo de mantener un paquete de producto almacenado en la bodega, durante el fin de semana, es mayor a mantenerlo almacenado en un día de la semana (hábil)

Aprovechando la situación descrita anteriormente, DSS decide montar su casa matriz (bodega) en una concurrida zona de Santiago centro; por seguridad, los drones a utilizar sólo serán cargados por el personal de la bodega durante las horas laborales de cada día. Al inicio de cada día laboral, se deben tomar las decisiones de carga de drones, su distribución para viajar a las ubicaciones finales, y el inventario de productos a entregar en la bodega, por lo que la modelación del problema considera que los pedidos realizados por la página web de DSS, se organizan para su entrega siempre para el día siguiente. Además, por ser la primera empresa que emplea esta estrategia, el Gobierno de la Región Metropolitana le concede a DSS el permiso de volar sin restricciones de altura ni dirección hacia las ubicaciones de sus pedidos y de vuelta, siempre y cuando respeten la propiedad de particulares. Con fin de simplificar el funcionamiento de los drones, se considera que viajan a velocidad constante, y que en cada paquete que lleva el dron, se transporta 1 unidad de producto.

El período que se considera consiste en 2 semanas (14 días)  $t \in \{1, \dots, T\}$  se planificará la entrega de los paquetes de cada producto  $q \in \{1, \dots, Q\}$  mediante los drones  $d \in \{1, \dots, D\}$ , los cuales saldrán y volverán a la bodega dentro de las horas laborales de dicho día  $h \in \{1, \dots, 12\}$ . Cuando los drones lleven paquetes, tendrán como objetivo viajar a las ubicaciones  $f \in \{1, \dots, F\}$ , las que dependen de los clientes, quienes realizan los pedidos antes de dicho período de 2 semanas

Respecto a la bodega desde la cual salen los drones con los paquetes para realizar las entregas, esta tiene un personal que la hace funcionar e instalaciones a mantener, situación que implica un costo fijo por día  $CB$ . La bodega tiene una capacidad limitada correspondiente a  $V$  cantidad de paquetes. Además, dado que los drones tienen un tamaño específico, los paquetes están estandarizados y todos tienen el mismo volumen sin importar su contenido. También, existe un costo asociado  $C_{qt}$  por almacenar un paquete de producto  $q$  un día  $t$ .

Para poder llevar buen registro de stock, solo se pueden hacer envíos de paquetes que ya estaban en bodega. El inventario de cada producto  $q$  el día  $t$  variará diariamente dado que se debe considerar la cantidad de paquetes de producto  $q$  adquiridos entrantes al almacén  $E_{qt}$  que llegan dicho día  $t$ . El costo de adquisición de cada una de estas unidades es de  $CA_{qt}$ . Además, se deben contabilizar la cantidad de paquetes del producto  $q$  entregados ese día. También, cada producto tiene un stock inicial de  $S_q$ .

En cada hora de operación, es posible que cada dron en la bodega esté realizando entrega de productos, esté disponible (no utilizándose) o se esté cargando. Para cada entrega, un dron viaja ida y vuelta a la ubicación de entrega del paquete, el tiempo que demora este en hacer el viaje y dejar el paquete es un total de una hora. Durante el día laboral se monitorea, en la bodega, el % de batería de cierto dron para una determinada hora  $PB_{dht}$ ; si se descarga completamente, la bodega cuenta con  $c \in \{1, \dots, C\}$  cargadores para drones, para recargar el mismo, pero al hacerlo, por cada hora de recarga se obtiene un costo  $CC_h$ . Es conocido que cada dron inicia el período con el 100 % de su carga, y por hora de uso, pierde 20 % de su carga. Cada dron cuenta con un sistema de carga que implica se demora 5 horas en ser cargado.

Como política de la empresa, se define un máximo de emisiones (huella de carbono)  $ME_h$  la cual no puede ser superada en la hora  $h$ . La huella de carbono emitida por la empresa, depende de el tipo de energía que se utiliza para la carga de los drones, es decir, cuando hay sol aumenta el porcentaje de electricidad proveniente de fuentes renovables, por lo que existe una emisión menor. La empresa decide tener una cantidad de drones por lo menos suficiente para llevar todos los paquetes necesarios en cada período de 2 semanas.

DSS trabaja con una serie de productos  $q \in \{1, \dots, Q\}$  a entregar; al inicio de cada día, la demanda de cada producto,  $U_{qt}$ , se considera conocida. Por la misma política ambiental anterior, en cada hora laboral se contabilizan las emisiones de cargar cada dron (si es necesario cargarlo)  $ED_h$ ; cabe destacar que estas emisiones son propias de la bodega y el sistema de alimentación energético de la misma, por lo que es importante contabilizarlas si se quiere respetar dicha política ambiental. Por último, para cada bodega es importante contabilizar la llegada de cada unidad de producto que se compra y llega a la bodega en cierto día  $E_{qt}$ .

Conociendo todo lo anteriormente mencionado, se declara que la misión de DSS corresponde a minimizar los costos de operación de la empresa, incluyendo los costos horarios de operación de la bodega en general y de inventario, además de los costos de carga de todos los drones, considerando los cargadores disponibles, y los costos asociados a la adquisición de los paquetes a distribuir, para el horario laboral de todos los días en los cuales funciona Drone Shipping Santiago.

Como al inicio de cada periodo de 2 semanas (horizonte de planificación) se organizan las entregas para el mismo, en dicha instancia se debe determinar qué paquete deberá ser entregado por qué

dron, y para qué día y horario deberá suceder esto. Se deben también contabilizar cuántos paquetes están presentes en la bodega en cada día, y cuántos drones se necesitan para realizar entregas según el horario. Por la política ambiental antes mencionada, las emisiones totales de la carga de drones se encuentran limitadas, como también hay un stock de cargadores disponibles a ser utilizados para recargar los drones, el cual se actualiza según la situación actual. Resulta necesario explicitar que cada dron sólo puede realizar una acción a la vez, ya sea realizar una entrega o recargarse en cierto horario (cuando no está siendo utilizado no es una acción).

## 2. Modelo del problema

### 2.1. Resumen

Se plantea un objetivo para una empresa de transporte y envío de productos mediante drones en Santiago. Ese objetivo es minimizar los costos de operación, que incluyen el transporte de paquetes desde una bodega central a una serie de ubicaciones finales, además de cargar los drones y almacenarlos, junto a los productos (y su adquisición), en dicha bodega. Esto se pretende lograr mediante la toma de decisiones para un horizonte de 2 semanas, en las que se decide los días y horas de las entregas, de qué productos, la carga y utilización de drones en el inventario, inventario de productos a entregar y de drones a utilizar, análisis de la demanda, todo de forma determinística.

### 2.2. Conjuntos

$T$  : Conjunto de días (horizonte de decisión: 2 semanas) =  $t \in \{1, \dots, T = 14\}$   
 $H$  : Conjunto de horas laborales por día =  $h \in \{1, \dots, 12\}$   
 $D$  : Conjunto de drones =  $d \in \{1, \dots, D\}$   
 $C$  : Conjunto de cargadores para drones =  $c \in \{1, \dots, C\}$   
 $F$  : Conjunto de ubicaciones que solicitan entrega por dron =  $f \in \{1, \dots, F\}$   
 $Q$  : Conjunto de productos a entregar =  $q \in \{1, \dots, Q\}$

### 2.3. Parámetros

$CC_h$  : Costo de cargar un dron a una hora  $h$  (En \$ CLP).  
 $ME_h$  : Máximo de emisiones para la hora  $h \in \{1, \dots, H\}$  (En kg).  
 $U_{qt}$  : Demanda del producto  $q$  en el día  $t$  (En cantidad de unidades).  
 $CB$  : Costo fijo de operar la bodega por un día (En \$ CLP).  
 $V$  : Capacidad máxima de inventario (En cantidad de unidades).  
 $CA_{qt}$  : Costo de adquirir un paquete de producto  $q$  el día  $t$  (En \$ CLP).  
 $C_{qt}$  : Costo de mantener un paquete de producto  $q$  almacenado en la bodega un día  $t$  (En \$ CLP).  
 $ED_h$  : Emisiones (kg) generadas por la carga de un dron a una hora  $h$ .

### 2.4. Variables

$$DC_{dcht} = \begin{cases} 1 & \text{dron } d \in \{1, \dots, D\} \text{ se está cargando en cargador } c \in \{1, \dots, C\} \text{ en hora } h \in \{1, \dots, H\} \text{ del día } t \in \{T\} \\ 0 & \text{e.o.c} \end{cases}$$

$$XE_{dqhft} = \begin{cases} 1 & \text{si el dron } d \in D \text{ lleva un paquete del producto } q \in Q \text{ en la hora } h \in H \\ & \text{a la ubicación } f \in F \text{ en el día } t \in T \\ 0 & \text{e.o.c} \end{cases}$$

$PB_{dht}$ : Porcentaje (discreto) de batería restante del dron  $d \in \{1, \dots, D\}$  en la hora  $h \in \{1, \dots, H\}$  del día  $t \in \{1, \dots, T\}$ .

$I_{qt}$  : Inventario del producto  $q \in \{1, \dots, Q\}$  en el día  $t \in \{1, \dots, T\}$ .

$E_{qt}$  : Unidades del producto  $q$  que se compran y llegan a la bodega en cierto día  $t$



## 2.5. Restricciones

1. Cada paquete de  $q$  puede ser entregado a la ubicación  $f$  por a lo más un dron  $d$  a una hora  $h$  del día  $t$ .

$$\sum_{t=1}^T \sum_{f=1}^F \sum_{d=1}^D \sum_{h=1}^H XE_{dqfht} \leq 1 \quad \forall q \in \{1, \dots, Q\}$$

2. Inventario del producto  $q$  en la bodega en el día  $t$ :

$$I_{qt} = I_{q,t-1} + E_{qt} - \sum_{d=1}^D \sum_{f=1}^F \sum_{h=1}^H XE_{dqfht} \quad \forall q \in \{1, \dots, Q\}, \forall t \in \{2, \dots, T\}$$

$$I_{q1} = S_q \quad \forall q \in \{1, \dots, Q\}$$

3. Máximo de emisiones que pueden emitir en la hora  $h$ :

$$ME_h \leq \sum_{d=1}^D \sum_{c=1}^C DC_{dcht} * ED_h \quad \forall h \in \{1, \dots, H\}, \forall t \in \{1, \dots, T\}$$

4. El número de drones siendo cargados no puede superar la cantidad de cargadores:

$$\sum_{d=1}^D \sum_{c=1}^C DC_{dcht} \leq |C| \quad , \forall h \in \{1, \dots, H\}, \forall t \in \{1, \dots, T\}$$

5. El dron  $d$  puede llevar solo un paquete o estar cargándose en un solo cargador  $c$  en la hora  $h$ :

$$\sum_{q=1}^Q \sum_{f=1}^F XE_{dqfht} + \sum_{c=1}^C DC_{dcht} \leq 1 \quad \forall d \in \{1, \dots, D\}, \forall h \in \{1, \dots, H\}, \forall t \in \{1, \dots, T\}$$

6. Una vez que la batería del dron  $d$  esta cargada a su máximo, el cargador  $c$  queda desocupado:

$$DC_{dcht} + PB_{dht} < 101 \quad \forall d \in \{1, \dots, D\}, \forall h \in \{1, \dots, H\}, \forall c \in \{1, \dots, C\}, \forall t \in \{1, \dots, T\}$$

7. Carga de batería para un dron  $d \in D$  en un día  $t \in T$  a una hora  $h \in H$ :

$$PB_{dht} = PB_{d,h-1,t} + \frac{100}{5} * \sum_{c=1}^C DC_{dcht} - 20 * \sum_{q=1}^Q \sum_{f=1}^F XE_{dqfht}$$

$$\forall d \in \{1, \dots, D\},$$

$$\forall h \in \{2, \dots, H\},$$

$$\forall t \in \{1, \dots, T\}$$

8. El dron  $d$  comienza el primer día con 100 % de batería:

$$PB_{dht} = 100 \quad \forall d \in \{1, \dots, D\}, h = 1, t = 1$$

9. El dron  $d$  comienza el día  $t$  con la carga del día anterior:

$$PB_{d1t} = PB_{dH,t-1} \quad \forall d \in \{1, \dots, D\}, \forall t \in \{2, \dots, T\}$$

10. La carga de cada dron no puede superar el 100 %:

$$PB_{dht} \leq 100 \quad \forall d \in \{1, \dots, D\}, \forall t \in \{1, \dots, T\}, \forall h \in \{1, \dots, H\}$$

11. Si el dron  $d \in D$  agota su batería en la hora  $h \in H$ , este deja de poder entregar paquetes:

$$\sum_{f=1}^F \sum_{q=1}^Q XE_{dqfht} \geq 100 - PB_{dht} \quad \forall d \in \{1, \dots, D\}, \forall h \in \{1, \dots, H\}, \forall t \in \{1, \dots, T\}$$

12. Si el dron  $d$  se estaba cargando al finalizar el día anterior, este debe terminar de cargarse:

$$\sum_{c=1}^C DC_{dc1t} \geq 1 - M(1 - \sum_{c=1}^C DC_{dcH,t-1}) \quad \forall d \in \{1, \dots, D\}, \forall t \in \{2, \dots, T\}, M \gg 1$$

13. Un dron se tiene que cargar hasta el 100 % de su batería:

$$\sum_{c=1}^C DC_{dcht} \leq 100 - PB_{dht} \quad \forall d \in \{1, \dots, D\}, \forall h \in \{1, \dots, H\}, \forall t \in \{1, \dots, T\}$$

14. Un dron no se puede cargar en más de un cargador:

$$\sum_{c=1}^C DC_{dcht} \leq 1 \quad \forall d \in \{1, \dots, D\}, \forall h \in \{1, \dots, H\}, \forall t \in \{1, \dots, T\}$$

15. Cumplimiento de demanda del producto  $q$  el día  $t$ :

$$\sum_{h=1}^H \sum_{d=1}^D \sum_{f=1}^F XE_{dqhft} \geq U_{qt} \quad \forall q \in \{1, \dots, Q\}, \forall t \in \{1, \dots, T\}$$

16. No se puede almacenar una cantidad mayor a  $V$  de paquetes:

$$\sum_{q=1}^Q I_{qt} \leq V \quad \forall t \in \{1, \dots, T\}$$

17. No pueden haber menos paquetes de un producto  $q$  en inventario que demanda para cualquier día  $t$ :

$$I_{qt} \geq U_{qt} \quad \forall q \in \{1, \dots, Q\}, \forall t \in \{1, \dots, T\}$$

18. Si el dron  $d \in D$  agota su batería en la hora  $h \in H$ , este debe cargarse:

$$\sum_{c=1}^C DC_{dcht} \geq 1 - M * PB_{dht} \quad \forall d \in \{1, \dots, D\}, \forall h \in \{1, \dots, H\}, \forall t \in \{1, \dots, T\}, M \gg 1$$

19. Un dron puede llevar solo un paquete a la vez:

$$\sum_{q=1}^Q \sum_{f=1}^F XE_{dqhft} \leq 1 \quad \forall d \in \{1, \dots, D\}, \forall h \in \{1, \dots, H\}, \forall t \in \{1, \dots, T\}$$

20. No se pueden entregar más paquetes de un producto  $q$  de los que hay en inventario:

$$\sum_{h=1}^H \sum_{f=1}^F \sum_{d=1}^D XE_{dqhft} \leq I_{qt} \quad \forall q \in \{1, \dots, Q\}, \forall t \in \{1, \dots, T\}$$

21. La cantidad de drones totales es por lo menos igual a la cantidad de drones en uso o cargándose (puede haber drones en reposo):

$$\sum_{q=1}^Q \sum_{d=1}^D \sum_{f=1}^F XE_{dqhft} + \sum_{d=1}^D \sum_{c=1}^C DC_{dcht} \leq |D| \quad \forall h \in \{1, \dots, H\}, \forall t \in \{1, \dots, T\}$$

### 2.5.1. Naturaleza de las variables

$$DC_{dch} \in \{0, 1\} \quad \forall d \in D, \forall c \in C, \forall h \in H \quad (1)$$

$$XE_{dqhft} \in \{0, 1\} \quad \forall d \in D, \forall p \in P_q, \forall q \in Q, \forall h \in H, \forall f \in F, \forall t \in T \quad (2)$$

$$PB_{dht} \in \mathbb{Z}^+ : 0 \leq PB_{dh} \leq 100 \quad \forall d \in D, \forall h \in H, \forall t \in T \quad (3)$$

$$I_{qt} \in \mathbb{Z}_0^+ \quad \forall q \in Q, \forall t \in T \quad (4)$$

$$E_{qt} \in \mathbb{Z}_0^+ \quad \forall q \in Q, \forall t \in T \quad (5)$$

## 2.6. Función Objetivo

$$\min(CB * |T| + \sum_{t=1}^T (\sum_{h=1}^H CC_h * \sum_{d=1}^D \sum_{c=1}^C DC_{dcht} + \sum_{q=1}^Q (I_{qt} * C_{qt} + E_{qt} * CA_{qt})))$$

## 3. Definición de datos

### 3.1.

## 4. Resolución del problema con software

### 4.1.

## 5. Validación del resultado

### 5.1.

## 6. Anexo ilustraciones

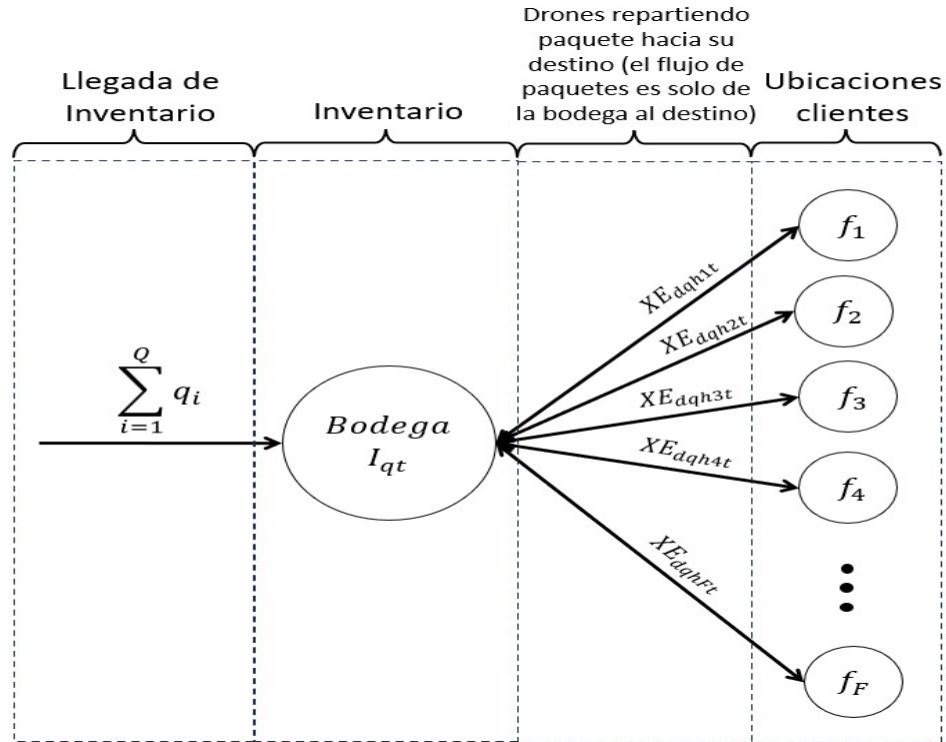


Figura 1 – Diagrama de flujo de la entrada de productos  $q$  y la salida de envíos  $XE_{dqhft}$  hacia las ubicaciones de clientes  $f_F$ . Imagen de elaboración propia.

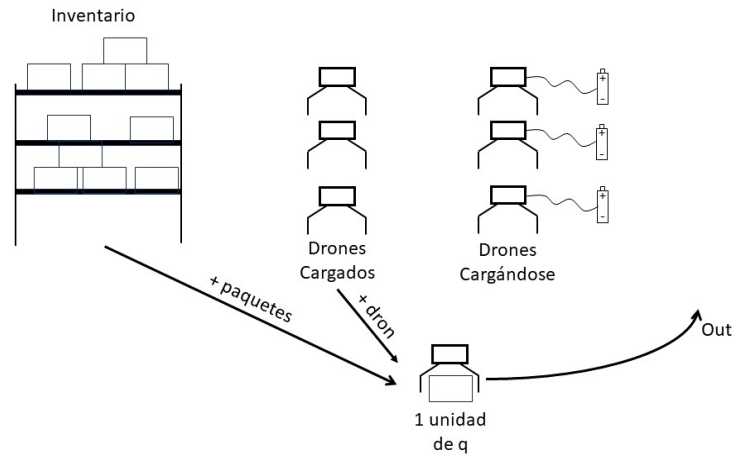


Figura 2 – Flujo de como se arma un paquete de un producto hasta que sale de la bodega. Imagen de elaboración propia

## 7. Referencias

- Justiniano (2023). *Ecommerce Chile: la guía definitiva del mercado [2023]*. Obtenido de: <https://enviame.io/ecommerce-chile/>
- JumpSeller (2023). *Cómo funcionan los medios de envíos en Chile*. Obtenido de: <https://jumpseller.cl/learn/shipping-companies-chile/>
- RAM Research and Markets (2023). *Drone Package Delivery Global Market Report 2023: Major Players Include Amazon, United Parcel Service of America, Zipline, FedEx and DHL International*. Obtenido de: <https://www.globenewswire.com/en/news-release/2023/04/19/2650350/28124/en/Drone-Package-Delivery-Global-Market-Report-2023-Major-Players-Include-Amazon-United-Parcel-Service-of-America-Zipline-FedEx-and-DHL-International.html>
- Minhaj (2022). *Benefits of Drone Delivery*. Obtenido de: <https://yourdronereviews.com/benefits-of-drone-delivery>
- Perlmutter (2023). *It's Time to Reduce Carbon Emissions from Delivery. Here's How*. Obtenido de: <https://www.bringg.com/blog/logistics/reduce-carbon-emissions/>
- Haughey (2023). *Los drones de reparto de Amazon ya son una realidad en Estados Unidos*. Obtenido de: <https://www.eleconomista.es/tecnologia/noticias/12095401/01/23/Los-drones-de-reparto-de-Amazon-ya-son-una-realidad-en-Estados-Unidos-.html>
- Ruiz (2022). *Amazon Prime Air, el servicio de entregas con drones de Amazon, comienza a operar en EE.UU.* Obtenido de: <https://marketing4ecommerce.net/amazon-prime-air-el-servicio-de-entregas-con-drones-de-amazon-comienza-a-operar-en-ee-uu/>
- AutoBiz (2021). *Las emisiones de CO2*. Obtenido de: <https://autobiz-ocasion.es/blog/consejos/las-emisiones-de-co2.php>
- FCV Fundación Chile Verde Qué Hacemos. Obtenido de: <https://fundacionchileverde.cl/que-hacemos/>
- Muñoz-Villamizar, A., Velazquez-Martinez, J., Haro, P., Ferrer, A., Mariño, R. (2021). The environmental impact of fast shipping ecommerce in inbound logistics operations: a case study in a Mexico. *Journal Of Cleaner Production*, 283, 125400. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125400
- Bonerjee (2023). *How Does Drone Delivery Work: Explore the Future*. Obtenido de: <https://ideausher.com/blog/how-does-drone-delivery-work-explore-the-future/>
- Farajzadeh (2023). *¿Cuáles son los beneficios y desafíos de usar drones para la entrega de última milla?*. Obtenido de: <https://www.linkedin.com/advice/0/what-benefits-challenges-using-drones-last-mile>