



# MODELO EN SIMIO DE LAS TAREAS DENTRO DE UN A320 POR PARTE DE LOS PILOTOS.

Memòria del Treball de Fi de Grau en Gestió Aeronàutica

realitzat per

Paula Sánchez Martin

i dirigit per

Gonzalo Martín López

**Escola d'Enginyeria**

Sabadell, Juny de 2024

El sotasignat, Gonzalo Martín López director del Treball de Fi de Grau, professor de l'Escola d'Enginyeria de la UAB,

**CERTIFICA:**

Que el treball al que correspon la present memòria  
ha estat realitzat sota la seva direcció per

Paula Sánchez Martín

I per a que consti firma la present.

Sabadell, **Juny** de **2024**

-----  
Signat: Gonzalo Martín López

## HOJA RESUMEN - TRABAJO FIN DE GRADO ESCUELA DE INGENIERÍA

|  |                          |
|--|--------------------------|
| <b>Título del trabajo de Fin de Grado</b><br>Model en SIMIO de les tasques dins d'un A320 per part dels pilots.<br>Modelo en SIMIO de las tareas dentro de un A320 por parte de los pilotos.<br>SIMIO model of the tasks inside an A320 by the pilots.   |                          |
| <b>Autor[a]:</b> Paula Sánchez Martín  | <b>Fecha:</b> Junio 2024 |
| <b>Tutor[a]/s[as]:</b> Gonzalo Martín López  |                          |
| <b>Titulación:</b> Grado en Gestión Aeronáutica  |                          |
| <b>Palabras clave:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Catalán:</b> Simulació, Simio, Vol en formació, Tasques dels pilots, Airbus, A320, Optimització de recursos.</li> <li>• <b>Castellano:</b> Simulación, Simio, Vuelo en formación, Tareas de los pilotos, Airbus, A320, Optimización de recursos.</li> <li>• <b>Inglés:</b> Simulation, Simio, Formation flight, Pilot tasks, Airbus, A320, Resource optimization.</li> </ul>  |                          |
| <b>Resumen del Trabajo Fin de Grado:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Catalán:</b><br/>           Al llarg del projecte es desitja realitzar un estudi de les tasques que realitzen els pilots dins la cabina d'un A320 quan es troben efectuant un vol en formació. L'objectiu principal és reproduir aquestes tasques mitjançant el software Simio i desenvolupar un anàlisi sobre els factors que influeixen en la càrrega de treball del pilot.         </li> <li>• <b>Castellano:</b><br/>           A lo largo del proyecto se desea realizar un estudio de las tareas que realizan los pilotos dentro de la cabina de un A320 cuando se encuentran efectuando un vuelo en formación. El objetivo principal es reproducir estas tareas mediante el software Simio y desarrollar un análisis sobre los factores que influyen en la carga de trabajo del piloto.         </li> <li>• <b>Inglés:</b><br/>           Throughout the project, a study will be conducted on the tasks performed by pilots within the cockpit of an A320 during formation flight. The main objective is to reproduce these tasks using Simio software and to develop an analysis of the factors that influence the pilot's workload.         </li> </ul> |                          |

## TABLA DE CONTENIDO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>                                | <b>6</b>  |
| <b>ÍNDICE DE TABLAS</b>                                 | <b>8</b>  |
| <b>INTRODUCCIÓN</b>                                     | <b>10</b> |
| 1. INTERÉS Y MOTIVACIÓN                                 | 10        |
| 2. OBJETIVOS  | 11        |
| 3. RIESGOS DEL PROYECTO                                 | 12        |
| <b>CAPÍTULO 1: MODELIZACIÓN DEL SISTEMA</b>             | <b>13</b> |
| 1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA                              | 13        |
| 1.1. TAREAS QUE EFECTÚAN LOS PILOTOS                    | 14        |
| 1.2. DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD                     | 21        |
| 1.3. UNIDADES DE GESTIÓN DE VUELO                       | 24        |
| 2. SIMULACIÓN DE SISTEMAS                               | 28        |
| 2.1. PROCESO DE SIMULACIÓN                              | 28        |
| 2.2. TIPOS DE SIMULACIÓN                                | 34        |
| 2.3. QUE ES SIMIO                                       | 38        |
| 2.4. FUNCIONAMIENTO                                     | 38        |
| <b>CAPÍTULO 2: CONSTRUCCIÓN Y SIMULACIÓN DEL MODELO</b> | <b>43</b> |
| 1. ENTIDADES DEL MODELO                                 | 45        |
| 2. PROCESOS DEL MODELO                                  | 46        |
| 2.1. PROCESO DE LLAMADA PRIORITARIA                     | 46        |
| 2.2. PROCESO DE ASIGNACIÓN DE TAREA                     | 48        |
| 2.3. PROCESOS DE ESPERA                                 | 49        |
| 2.4. PROCESO DE DECISIÓN Y ASIGNACIÓN DE ESTADO         | 51        |
| 2.5. ESTADOS DEL MODELO                                 | 53        |
| 2.6. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS                          | 54        |
| 2.7. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS                         | 59        |
| <b>CAPÍTULO 3: CONCLUSIONES</b>                         | <b>66</b> |
| <b>BIBLIOGRAFÍA</b>                                     | <b>68</b> |



## LISTA DE ACRÓNIMOS

| ACRÓNIMO     | DEFINICIÓN                                |
|--------------|---|
| <b>ATC</b>   | Air Traffic Control                       |
| <b>CPDLC</b> | Controller Pilot Data Link Communications |
| <b>FCS</b>   | Flight Control System                     |
| <b>FCU</b>   | Flight Control Unit                       |
| <b>FF</b>    | Flight Formation                          |
| <b>FL</b>    | Flight Level                              |
| <b>MCDU</b>  | Multipurpose Control and Display Unit     |
| <b>PF</b>    | Pilot Flying                              |
| <b>PM</b>    | Pilot Monitoring                          |
| <b>RA</b>    | Resolution Advisory                       |
| <b>RMP</b>   | Radio Management Panel                    |
| <b>RTA</b>   | Required Time of Arrival                  |
| <b>STBY</b>  | Standby                                   |
| <b>SSR</b>   | Secondary Surveillance Radar              |
| <b>TA</b>    | Traffic Advisory                          |
| <b>TCAS</b>  | Traffic and Collision Avoidance System    |
| <b>VS</b>    | Vertical Speed                            |
| <b>3D</b>    | Three Dimensional                         |

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Imagen de la aeronave A320   | 13 |
| Figura 2. Diagrama de flujo del proceso CallOut Reaching FL  | 17 |
| Figura 3. Diagrama de flujo del proceso Rendez-Vous Instructions   | 19 |
| Figura 4. Diagrama de flujo del proceso Joint-UP   | 20 |
| Figura 5. Diagrama de flujo del proceso Formation Keeping  | 21 |
| Figura 6. Fotografía 1 de la cabina de una aeronave A320, extraída del simulador Flight Simulation. Elaboración propia | 24 |
| Figura 7. Fotografía 2 de la cabina de una aeronave A320, extraída del simulador Flight Simulation. Elaboración propia | 25 |
| Figura 8. Unidad de control de vuelo de un A320 extraída del simulador Flight Simulator                                | 25 |
| Figura 9. Controller-Pilot Data Link Communications de un A320, extraído del simulador Flight Simulator                | 26 |
| Figura 10. Multipurpose Control and Display Unit de un A320, extraído del simulador Flight Simulator                   | 26 |
| Figura 11. Radio de un A320, extraída del simulador Flight Simulator   | 27 |
| Figura 12. Transponder de un A320, extraído del simulador Flight Simulator   | 27 |
| Figura 13. Esquema del proceso de simulación   | 29 |
| Figura 14. Esquema de ejemplo de la modelización por tiempo de proceso   | 30 |
| Figura 15. Gráfico de la evolución de un modelo dinámico   | 35 |
| Figura 16. Gráfico de la evolución de un modelo estático   | 35 |
| Figura 17. Gráfico de la evolución de un modelo continuo   | 36 |
| Figura 18. Gráfico de la evolución de un modelo discreto   | 36 |
| Figura 19. Gráfico de la evolución de un modelo determinista   | 37 |
| Figura 20. Gráfico de la evolución de un modelo estocástico  | 37 |
| Figura 21. Estructura del modelo en Simio (I)  | 43 |
| Figura 22. Estructura del modelo en Simio (II)   | 43 |
| Figura 23. Estructura del modelo en Simio (III)  | 44 |
| Figura 24. Estructura del modelo en Simio (IV)   | 44 |
| Figura 25. Construcción de las entidades del modelo  | 45 |
| Figura 26. Construcción del proceso de llamada prioritaria   | 47 |
| Figura 27. Construcción del proceso de asignación de tarea   | 48 |
| Figura 28. Construcción del proceso de espera (I)  | 49 |
| Figura 29. Construcción del proceso de espera (II)   | 50 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 30. Construcción del proceso de decisión y asignación de estado (I)             | 51 |
| Figura 31. Construcción del proceso de decisión y asignación de estado (II)            | 52 |
| Figura 32. Construcción de los estados del modelo                                      | 53 |
| Figura 33. Construcción de un experimento (I)  | 54 |
| Figura 34. Construcción de un experimento (II)   | 55 |
| Figura 35. Construcción de un experimento (III)  | 56 |
| Figura 36. Tabla de resultados del modelo (I)  | 57 |
| Figura 37. Tabla de resultados del modelo (II)   | 57 |
| Figura 38. Tabla de resultados del modelo (III)  | 58 |
| Figura 39. Tabla de resultados del modelo (IV)   | 58 |
| Figura 40. Tabla de las variables de control del experimento                           | 59 |
| Figura 41. Tabla de resultados del experimento (sin ejecutar)                          | 60 |
| Figura 42. Tabla de resultados del experimento   | 61 |
| Figura 43. Gráfico nivel de utilización de los procesos del sistema                    | 62 |
| Figura 44. Gráfico tiempo de proceso de las entidades                                  | 62 |
| Figura 45. Tiempo de utilización del proceso Rendez-Vous con y sin llamada prioritaria | 63 |

## ÍNDICE DE TABLAS

---

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1. Tabla de riesgos del proyecto.                       | 12 |
| Tabla 2. Tabla de las tareas ejecutadas por el PF.            | 15 |
| Tabla 3. Tabla de tareas ejecutadas por el PM.                | 16 |
| Tabla 4. Tabla de los tipos más comunes de distribución.      | 24 |
| Tabla 5. Diferencias entre modelo dinámico y estocástico.     | 35 |
| Tabla 6. Diferencias entre modelo continuo y discreto.        | 36 |
| Tabla 7. Diferencias entre modelo determinista y estocástico. | 37 |
| Tabla 8. Ventajas e inconvenientes de la simulación.          | 42 |



## INTRODUCCIÓN

---

### 1. INTERÉS Y MOTIVACIÓN

Actualmente el sector de la aviación se encuentra en constante avance tecnológico en todos los ámbitos. Ha sido notorio el crecimiento de la automatización de los instrumentos de cabina con respecto al tiempo atrás, lo que ha supuesto un aumento de la seguridad en la aviación, gracias a sistemas de alerta que conocen las localizaciones en tiempo real de las aeronaves para prevenir accidentes y actuar rápidamente delante de ellos. Y un incremento de eficiencia en las operaciones que se realizan debido a sistemas de gestión del tráfico y optimización de las rutas para la reducción de costes, combustible y emisiones que generan las aeronaves.

Hay que considerar que, pese a los avances que pueda haber en el sector, también hay contingencias relacionadas con la contaminación y las emisiones generadas. Por ello, las compañías buscan una mejora en sus operaciones y se desarrollan estudios para poder llegar a reducir las cifras de contaminación del medioambiente. Hoy en día, se han valorado algunas mejoras para poder lograr esa reducción siempre manteniendo la seguridad en la aviación.

Estos factores de innovación, mejora y solución de adversidades suponen un cambio en la forma de trabajar de los pilotos durante el vuelo. El número de actividades variará en función de la tecnología que se disponga, así como de la programación y distribución del tránsito aéreo. Los vuelos en formación son un ejemplo de redistribución del tránsito aéreo para lograr una reducción del consumo de combustible y en consecuencia la contaminación que eso produce.

Por eso me parece interesante colaborar con los avances generando una simulación de las tareas de los pilotos en un A320, siendo útil para futuras investigaciones o desarrollos en el sector aeronáutico. Además de permitir observar varios escenarios que se pueden dar en el día a día de un piloto, y cuál es el modo en la que se actúa, así como los efectos que esto supone, ya sea en aumento de tiempo de ejecución de las tareas o bien una pérdida en la eficiencia de estas.

## 2. OBJETIVOS

El objetivo del trabajo es reproducir con el software SIMIO las tareas del piloto y el copiloto durante un vuelo en formación, en un Airbus A320, y observar cómo varía el funcionamiento según las situaciones planteadas. Además de poder crear parte de una herramienta de soporte para los pilotos, donde se pueda ir siguiendo cada una de las tareas de modo que la simulación permita hacer un control sobre las actividades que el piloto va ejecutando sin que se olvide de algún paso cuando ha sido interrumpido por alguna incidencia o acontecimiento que se haya podido presentar, o bien dé un aviso al piloto cuando el tiempo de ejecución de la tarea sea superior al establecido.

Los objetivos específicos a destacar son los siguientes:

- Profundizar y ampliar el conocimiento sobre las tareas que llevan a cabo los pilotos dentro de cabina durante el vuelo en un Airbus A320, y en la metodología en que las efectúan. Junto con el análisis de posibles escenarios que se puedan dar en el día a día y evaluar de qué manera afecta a los factores tiempo y eficiencia principalmente.
- Desarrollar una simulación exacta en Simio sobre las actividades de los pilotos durante el vuelo considerando distintas circunstancias.
- Observación y evaluación de la eficiencia y eficacia de cada tarea según el evento que se presente mediante la simulación.
- Identificación de mejora en la ejecución de las tareas del piloto y copiloto.
- Optimización de los recursos que se disponen para lograr una mayor seguridad y eficiencia en el vuelo.
- Ayudar en futuras investigaciones o desarrollos en el sector gracias al trabajo elaborado.

### 3. RIESGOS DEL PROYECTO

En esta sección, se presenta una evaluación de posibles riesgos que se pueden dar durante el desarrollo del proyecto, de modo que se tenga un conocimiento de estos y mitigar su impacto.

| N.º RIESGO | DESCRIPCIÓN   | NIVEL DE RIESGO | MITIGACIÓN   |
|------------|---|-----------------|--|
| #R_001     | La representación de un modelo de gran tamaño puede dar pie a la exclusión de variables contempladas en el sistema real y en consecuencia no ser preciso.   | BAJO            | Se simplifica el modelo de forma que solo se representará lo significativo para obtener los resultados deseados.   |
| #R_002     | Pueden existir limitaciones en el software que se vaya a usar (en este caso Simio) para desarrollar el modelo, de modo que la representación no sería precisa.  | MEDIO           | Antes de iniciar el desarrollo del modelo, se analiza que el software cuente con las funciones requeridas. Si no se puede aplicar, hay que recibir una formación básica sobre la alternativa del software.   |
| #R_003     | Al codificar los procesos se pueden generar errores que deriven a un mal funcionamiento del modelo, representando mal el sistema real y, en consecuencia, el tiempo de desarrollo del proyecto y planificación se vea alterado. | ALTO            | Para ello, el modelo se desarrolla por procesos verificando cada uno de estos por separado, de modo que si se detecta algún error se pueda identificar el origen. En caso de no solucionar el error y el tiempo de desarrollo sea justo, se contemplan dos alternativas, adaptar el modelo o bien contactar con expertos del software. |
| #R_004     | Existe la posibilidad de no tener la capacidad para representar el modelo en cuestión.  | ALTO            | Como en el #R_003, se valoraría la posibilidad de contactar con un experto que ofrezca algunos conocimientos básicos para poder llevar a cabo el proyecto.   |

Tabla 1. Tabla de riesgos del proyecto.



## CAPÍTULO 1: MODELIZACIÓN DEL SISTEMA

---

Los pilotos juegan un rol importante en la ejecución de las tareas que se deben llevar a cabo a lo largo del vuelo, lo que va a permitir avalar seguridad, eficiencia y eficacia. Por ello, es imprescindible que conozcan la metodología de efectuarlas, así como los tiempos y posibles escenarios para lograr una actuación frente a estos lo más rápida y efectiva posible.

La simulación puede ser importante dado que es un soporte para los pilotos durante la actividad con el objetivo de llevar un control sobre esta. En caso de que no se cumpla, el sistema cuenta con la capacidad de emitir una notificación para que los pilotos sean conscientes o bien de que el tiempo de ejecución ha excedido o que, por una distracción, una de las tareas no se ha efectuado.

### 1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

Durante el vuelo, en la cabina de la aeronave se llevan a cabo distintas tareas que abarcan desde la comunicación con el ATC hasta la garantización de la seguridad teniendo en todo momento un control de las aeronaves que se encuentran en fase de vuelo dentro del mismo radio.

El sistema que se modela en el proyecto consiste en representar las tareas de los pilotos en un vuelo de formación (siendo la aeronave “follower”) llevadas a cabo en la cabina de un Airbus A320. Este avión fue desarrollado por Airbus en el 1987 y operado por primera vez en el 1988 por la compañía AirFrance [1]. Su capacidad es de entre 140 y 180 pasajeros, ajustable según lo desea la aerolínea, por lo que se destina a hacer rutas de corta y media distancia ofreciendo comodidad y eficiencia al cliente [2].



Figura 1. Imagen de la aeronave A320. [1]

---

<sup>1</sup> Imagen extraída de Airbus A320. (s. f.). Airbus. Recuperado 27 de febrero de 2024, de <https://www.airbus.com/en>

Se entiende como un vuelo en formación cuando llegado a un acuerdo entre los pilotos y el ATC varias aeronaves vuelan conjuntamente y operan como una sola. Para esta actividad se nombra un avión líder que tiene como función la coordinación y la comunicación con las otras aeronaves, además de tomar las decisiones pertinentes. El resto de las aeronaves que siguen al líder son consideradas como aeronaves “followers” [3].

A continuación, se presentan diversos conceptos claves que se trabajarán a lo largo del proyecto, los cuales pueden resultar de gran interés para el desarrollo de proyectos similares o con características comunes.

### 1.1. TAREAS QUE EFECTÚAN LOS PILOTOS

Para ver de manera clara las actividades que conforman el sistema desde el punto de vista de una aeronave “follower”, se indica en la

Tabla 2, las tareas del PF junto con el tiempo en función de una distribución normal, la actividad que le precede y las herramientas que se usan para su desarrollo. Lo mismo se refleja en la Tabla 3, que hace referencia al PM.

| TAREAS EFECTUADAS POR EL PILOT FLYING (PF) |                                 |         |             |                  |
|--|---------------------------------|---------|-------------|------------------|
| N.º  | TAREA                           | TIEMPO  | PREDECESORA | HERRAMIENTAS     |
| <b>1.-1 CallOut reaching FL</b>            |                                 |         |             |                  |
| 2  | 1.-1.1 Check                    | (3,1)   | 2.-1.1      | RADIO/ AU        |
| <b>1.-2 Rendez-Vous Instructions</b>       |                                 |         |             |                  |
| 3  | 1.-2.1 ATC message to PM (hear) | (10,3)  | ATC_CALL    | CPDLC/ AU/ VI    |
|  | 1.-2.2 Wait (PM is confirming)  | -       | 2.-2.1      | -                |
| 5  | 1.-2.3 Select FL                | (7,1.6) | 2.-5.1      | FCU/ VI/ HM/ VO  |
| 6  | 1.-2.4 Push switch FL           | (2,0.5) | 1-2.3       | FCU/ VI/ HM      |
| 8  | 1.-2.5 Select Direct TO         | (3,1.1) | 2.-2.3      | MCDU/ VI/ HM/ VO |
| 9  | 1.-2.6 Select WP                | (4,0.8) | 1.-2.5      | MCDU/ VI/ HM/ VO |
| 10   | 1.-2.7 Confirm to PM            | (2,0.4) | 1.-2.6      | VO               |
|  | 1.-2.8 PF Waiting               | -       | 1.-2.7      | -                |

|                      |                                 |         |          |                  |
|----------------------|---------------------------------|---------|----------|------------------|
| 13                   | 1.-2.9 Click EJECT              | (1,0.3) | 2.-2.5   | MCDU/ VI/ HM/ AU |
| 14                   | 1.-2.10 Select RTA              | (3,1.1) | 1.-2.9   | MCDU/ VI/ HM/ VO |
| 15                   | 1.-2.11 Select time             | (4,1.5) | 1.-2.10  | MCDU/ VI/ HM/ VO |
| 16                   | 1.-2.12 Confirm to PM           | (2,0.4) | 1.-2.11  | VO               |
|                      | 1.-2.13 PF Waiting              | -       | 1.-2.12  | -                |
| 19                   | 1.-2.14 Click EJECT             | (1,0.3) | 2.-2.7   | MCDU/ VI/ HM/ AU |
| <b>1.-3 Joint-UP</b> |                                 |         |          |                  |
| 20                   | 1.-3.1 ATC message to PM (hear) | (3,0.9) | ATC_CALL | CPDLC/ AU/ VI    |
| 22                   | 1.-3.2 Select FL                | (7,1.6) | 2.-3.2   | FCU/ VI/ MH/ VO  |
| 24                   | 1.-3.3 Vertical Speed Pull      | (2,0.1) | 2.-3.3   | FCU/ VI/ HM      |
| 25                   | 1.-3.4 Select OFFSET            | (3,1)   | 1.-3.3   | MCDU/ VI/ HM/ VO |
| 27                   | 1.-3.5 Select Value             | (4,0.8) | 1.-3.4   | MCDU/ VI/ HM/ VO |
| 28                   | 1.-3.6 Confirm to PM            | (2,0.4) | 1.-3.5   | VO               |
|                      | 1.-3.7 PF Waiting               | -       | 1.-3.6   | -                |
| 30                   | 1.-3.8 Click EJECT              | (1,0.3) | 2.-3.5   | MCDU/ VI/ HM/ AU |

Tabla 2. Tabla de las tareas ejecutadas por el PF.

| TAREAS EFECTUADAS POR EL PILOT MONITORING (PM) |                                      |          |              |                         |
|--|--------------------------------------|----------|--------------|-------------------------|
| N.º  | TAREA                                | TIEMPO   | PREDECESORA  | HERRAMIENTAS            |
| <b>2.-1 CallOut reaching FL</b>                |                                      |          |              |                         |
| 1  | 2.-1.1 PM message                    | (3,1)    | Flight_event | RADIO/ VO               |
| <b>2.-2 Rendez-Vous Instructions</b>           |                                      |          |              |                         |
| 3  | 2.-2.1 ATC message to PM             | (10,3)   | ATC_CALL     | CPDLC/ AU/ VI           |
| 4  | 2.-2.2 Reply PM                      | (5,1.8)  | 2.-2.1       | CPDLC/ VI/ HM           |
| 7  | 2.-2.3 Check FL                      | (5,2)    | 1.-2.4       | FCU/ VI                 |
| 11   | 2.-2.4 Check info MCDU WP            | (10,3)   | 1.-2.7       | MCDU/ VI                |
| 12   | 2.-2.5 Reply to PF                   | (2,0.4)  | 2.-2.4       | MCDU/ VI/ VO            |
| 17   | 2.-2.6 Check info MCDU RTA           | (10,3)   | 1.-2.12      | MCDU/ VI                |
| 18   | 2.-2.7 Reply to PF                   | (2,0.4)  | 2.-2.6       | MCDU/ VI/ VO            |
| <b>2.-3 Joint-UP</b>                           |                                      |          |              |                         |
| 20   | 2.-3.1 ATC message to PM             | (3,0.9)  | ATC_CALL     | CPDLC/ AU/ VI           |
| 21   | 2.-3.2 Reply PM                      | (2,0.4)  | 2.-3.1       | CPDLC/ VI/ HM           |
| 23   | 2.-3.3 Check FL                      | (5,1.2)  | 1.-3.2       | FCU/ VI                 |
| 26   | 2.-3.4 Check info MCDU OFFSET        | (10,3)   | 1.-3.6       | MCDU/ VI                |
| 29   | 2.-3.5 Reply to PF                   | (2,0.4)  | 2.-3.4       | MCDU/ VI/ VO            |
| <b>2.-4 Formation Keeping</b>                  |                                      |          |              |                         |
| 31   | 2.-4.1 PM leader contact PM follower | (3,0.8)  | PM CONTACT   | RADIO/ AU               |
| 32   | 2.-4.2 PM leader share info F-PLAN   | (10,3)   | 2.-4.1       | RADIO/ VI/ VO           |
| 33   | 2.-4.3 PM follower confirm same info | (13,3.5) | 2.-4.2       | RADIO/ AU/ VO           |
| <b>2.-5 Disconnect TCAS</b>                    |                                      |          |              |                         |
| 34   | 2.-5.1 Change RA/TA to ALT/ON        | (3,0.8)  | 2.-2.2       | TRANSPONDER/ VI/ HM/ AU |

Tabla 3. Tabla de tareas ejecutadas por el PM.

Tal y como se ha observado en las tablas, las tareas de los pilotos en FF siguen un orden, ya que unas sobre otras tienen prerequisite, es decir, no es posible efectuar una sin haber realizado la tarea anterior. De la misma manera, hay tareas que no se pueden cumplir hasta que no se recibe un mensaje por parte del ATC.

Para ello, hay cuatro diagramas de flujo con una breve explicación correspondientes a cada proceso del vuelo, compuestos por actividades que desarrollan tanto el PF como el PM.

## 1. CallOut Reaching FL

En este proceso únicamente se avisa al PF de que se está alcanzando el nivel de vuelo seleccionado.

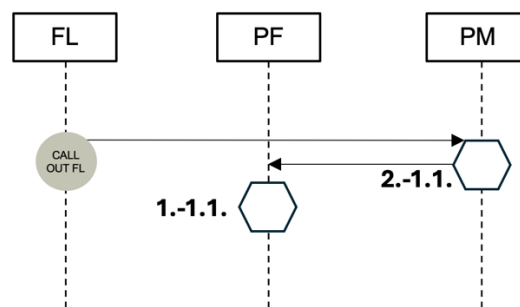


Figura 2. Diagrama de flujo del proceso CallOut Reaching FL [2].

## 2. Rendez-Vous Instructions

En el proceso Rendez-Vous participan tres elementos (ATC, PF, PM) y se divide en cuatro tareas.

La primera parte consiste en escuchar el mensaje recibido por parte del ATC, donde se indica un nuevo punto de ruta y se solicita la hora de llegada. Este mensaje lo escuchan ambos pilotos, repitiéndolo en voz alta el PM y confirmando al ATC la instrucción recibida.

Tras la primera parte, el PM desactiva el TCAS. Este, se trata de un sistema que permite ver las aeronaves que se encuentran cerca y emite una alerta en caso de posible colisión. El

<sup>2</sup> Imagen de creación propia.

piloto en este caso pasa a desconectar el TCAS que se encuentra en modo RA/TA (en caso de que exista una aeronave cerca el sistema emitirá una alerta de "Traffic Traffic", junto con la acción resolutive para evitar la colisión) a activar el modo ALT/ON, de manera que la aeronave únicamente emita su estado de altitud.

Una vez se ha desconectado el TCAS deseado, el PF introduce en el FCU el nuevo FL indicado por el ATC, mientras que el PM va verificando los pasos del piloto.

En la tercera parte, el PF selecciona el WP en el MCDU y el PM va verificando que los datos introducidos son los correctos.

Finalmente, igual que se selecciona el WP, el PF selecciona el RTA y el PM verifica que los datos son correctos.

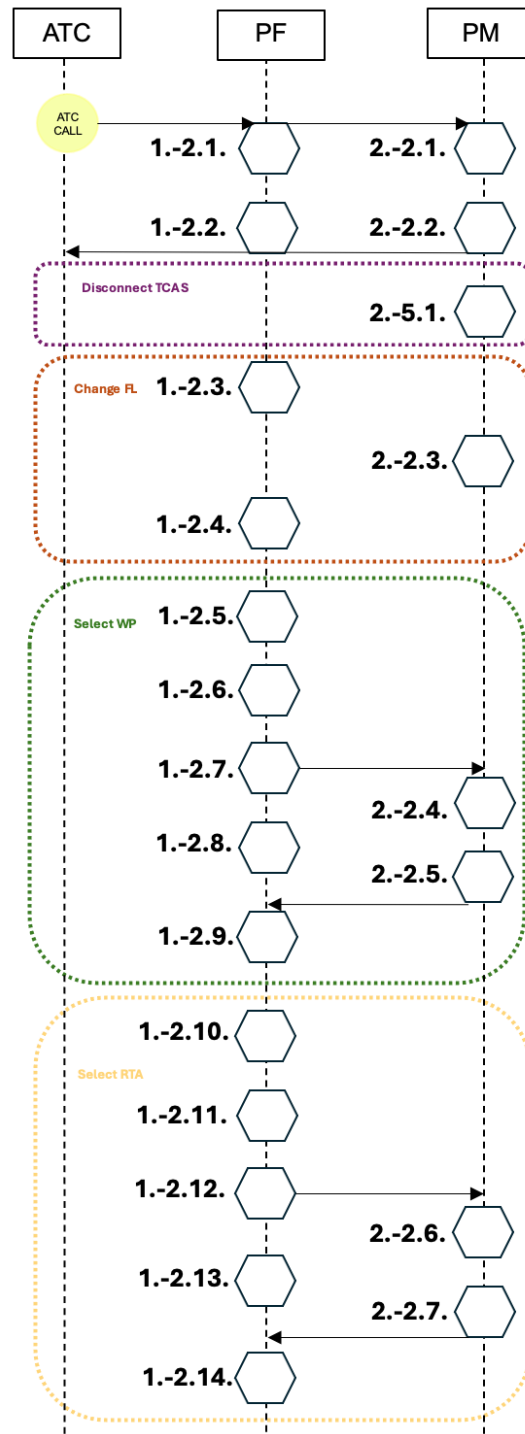


Figura 3. Diagrama de flujo del proceso Rendez-Vous Instructions [3]

<sup>3</sup> Imagen de creación propia.

### 3. Joint-UP

Durante el proceso de Joint Up se llevan a cabo tres tareas distintas. La primera consiste en escuchar y leer el mensaje transmitido por el ATC, el cual el PM confirma la recepción de este.

En la segunda parte, el PF cambia el FL y la VS y el PM lo verifica. Finalmente, el PF selecciona el OFFSET en el MCDU, y de mientras el PM va verificando que la información introducida por el piloto sea correcta.

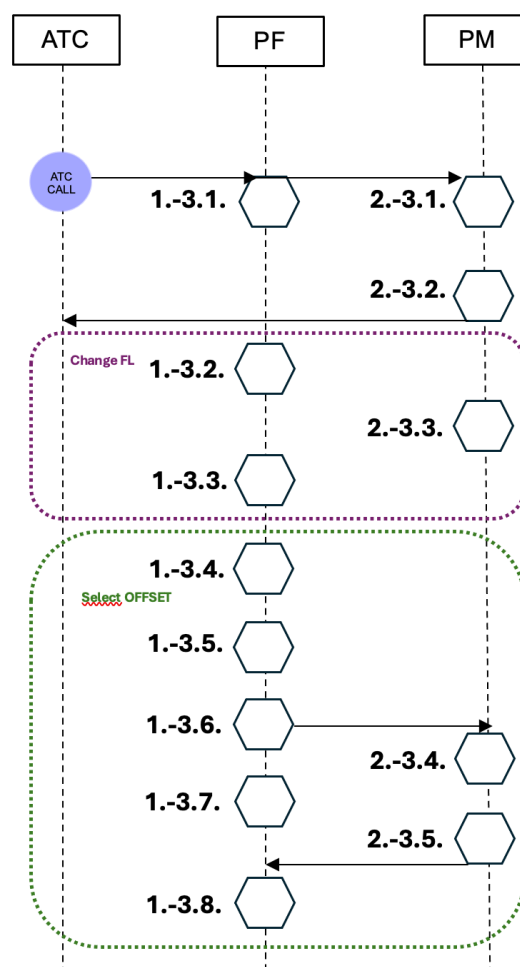


Figura 4. Diagrama de flujo del proceso Joint-UP [4]

<sup>4</sup> Imagen de creación propia.



#### 4. Formation Keeping

Por último, en este proceso se realiza un intercambio de información entre la aeronave líder y la “follower” con el objetivo de que ambos tengan los mismos puntos de ruta. Para ello, el PM líder envía el plan de vuelo y espera la confirmación de los datos por parte del PM “follower”.

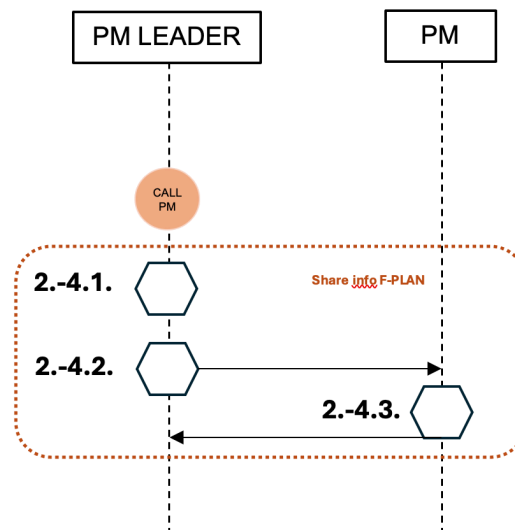


Figura 5. Diagrama de flujo del proceso Formation Keeping [5]

#### 1.2. DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD

Cuando queremos modelar sistemas, observamos que existen fenómenos caracterizados por la aleatoriedad, de manera que no se pueden predecir al completo los resultados que se van a obtener. En estos casos, se aplica lo conocido como distribuciones de probabilidad que permite determinar la probabilidad de que ocurra un evento dentro del sistema [4].

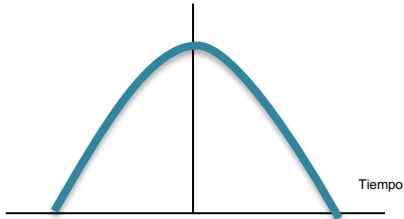
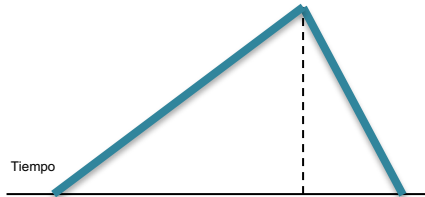
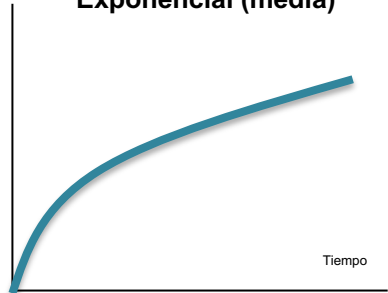
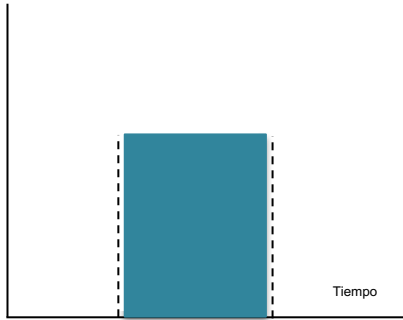
Existen dos categorías de variables, las variables discretas, donde el valor que se le asigna está determinado por un intervalo finito, como puede ser el número de caras que contine un dado o el número de hermanos que puede tener una persona. En cambio, las variables continuas toman valores de un intervalo infinito, como es el caso de la altura de una persona o la temperatura de una zona [4].

<sup>5</sup> Imagen de creación propia.

Según el contexto, se debe usar una distribución u otra de manera que se adapte a la realidad del sistema, por ello a continuación se muestra una tabla (Tabla 4) con algunos de los tipos que se suelen usar de manera más común.

En nuestro caso, emplearemos una distribución normal para representar el tiempo de ejecución de las tareas, dado que el tiempo no siempre es uniforme y puede existir una desviación tanto hacia arriba como hacia debajo de la media común.

En cambio, para la activación de la entrada de llamadas, el tiempo no se basará en una distribución de probabilidad, sino que será determinado en segundos y modificado a partir de los experimentos que se van a desarrollar.

| TIPOS DE DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD |   |   |
|---|---|---|
| DISTRIBUCIÓN                            | DESCRIPCIÓN   | GRAFICA   |
| <b>Normal</b>                           | La distribución normal es la media de la muestra, junto con su desviación estándar, o sea, cuanto se puede desviar la media hacia su izquierda o derecha [5].   | <b>Normal (media, desvEstandar)</b>       |
| <b>Triangular</b>                       | Los parámetros que conforman esta distribución son el mínimo valor recogido en la muestra, el máximo y la moda, es decir, el valor más repetido [5].  | <b>Triangular (mínimo, moda, máximo)</b>  |
| <b>Exponencial</b>                      | La distribución exponencial solo considera el valor de la media de la muestra realizada sobre el sistema. Este tipo de distribución es el más común para simular el tiempo de llegada entre las entidades [5].  | <b>Exponencial (media)</b>               |
| <b>Uniforme</b>                         | La función de la distribución uniforme tiene dos parámetros, el valor máximo y el mínimo, así que la probabilidad de que salga cualquiera de los valores que se encuentran dentro del rango es la misma. Esta distribución puede ser muy útil cuando se desea generar números aleatorios [5]. | <b>Uniforme (mínimo, máximo)</b>        |
| <b>Poisson</b>                          | El parámetro considerado a la hora de aplicar la distribución Poisson es la media de eventos que transcurren en una unidad de tiempo, de modo que este valor  | <b>Poisson (media de eventos)</b>   |

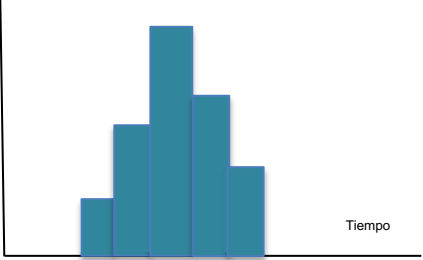
|  |   |  |
|--|---|--|
|  | <p>nunca podrá ser negativo. Esta expresión se usa cuando se desea conocer la probabilidad de que ocurra unos eventos en un tiempo determinado [5].</p> |  |
|--|---|--|

Tabla 4. Tabla de los tipos más comunes de distribución.

### 1.3. UNIDADES DE GESTIÓN DE VUELO

Tal y como se ha observado en la descripción de las tareas y en sus respectivas tablas, para la ejecución de estas, es necesario contar con unas unidades que faciliten al piloto su desarrollo aportando información y control.

A continuación, se detalla la funcionalidad de cada una de estas unidades:

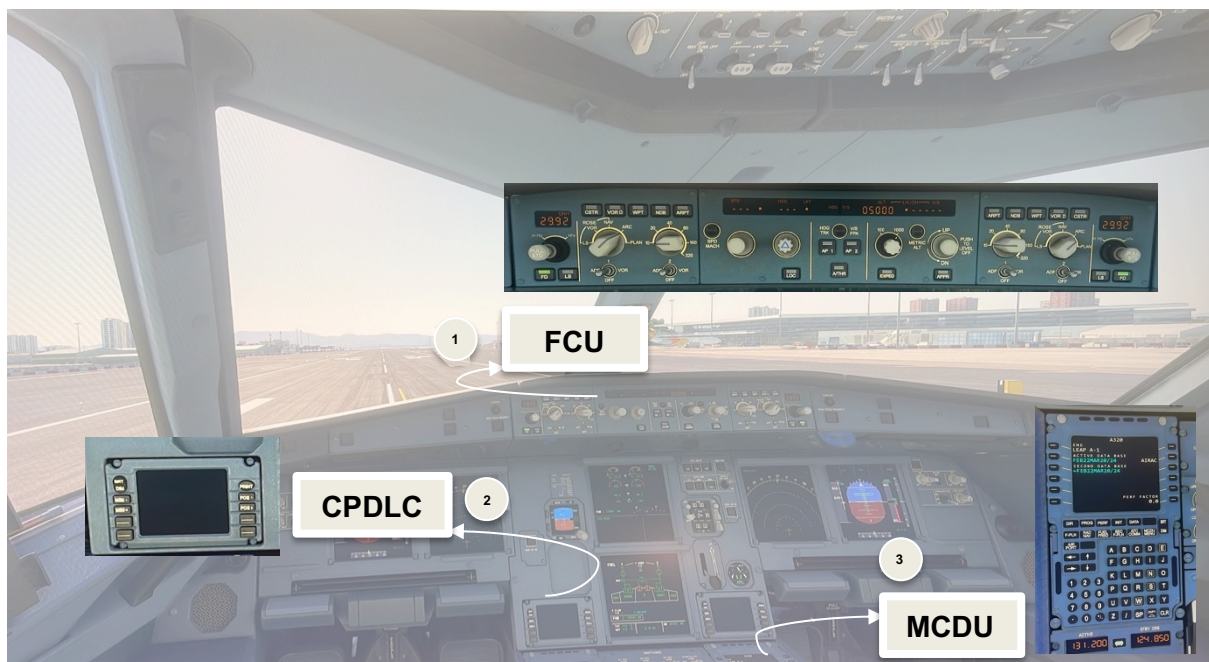


Figura 6. Fotografía 1 de la cabina de una aeronave A320, extraída del simulador Flight Simulation. Elaboración propia [6].

<sup>6</sup>Imagen I de creación propia con el uso del simulador Flight Simulator.



Figura 7. Fotografía 2 de la cabina de una aeronave A320, extraída del simulador Flight Simulation. Elaboración propia [7].

## 1. FCU

La unidad de control de vuelo se trata de una herramienta esencial situada en la parte superior central de la cabina de la aeronave, donde ambos pilotos tienen acceso a esta. El objetivo principal es proporcionar una gestión del vuelo gracias a la integración con el FCS, ofreciendo a los pilotos la capacidad de ajuste e introducción eficiente y precisa de los parámetros de vuelo, que luego se envía al sistema de control de vuelo encargado de realizar los movimientos indicados a través de la unidad [6].

Además, en la unidad del FCU, se pueden realizar diversas funciones, como es la indicación del nivel de vuelo al que debe encontrarse la aeronave.



Figura 8. Unidad de control de vuelo de un A320 extraída del simulador Flight Simulator [8].

<sup>7</sup> Imagen II de creación propia con el uso del simulador Flight Simulator.

<sup>8</sup> Imagen de creación propia con el uso del simulador Flight Simulator.

## 2. CPDLC

El CPDLC es un sistema que facilita las comunicaciones entre piloto y ATC mediante mensajes de texto a través de enlaces de datos. Este sistema, se puede usar como un complemento o alternativa a las comunicaciones por radio, mejorando la seguridad y claridad al reducir de manera significativa los errores de comprensión [7].



Figura 9. Controller-Pilot Data Link Communications de un A320, extraído del simulador Flight Simulator [9].

### 3. MCDU

En las aeronaves de gran tamaño, la unidad MCDU se considera un sistema de gestión de vuelo indispensable. Esta unidad permite introducir datos del vuelo, como la ruta planeada, la altitud, la velocidad y el rendimiento de la aeronave, además de proporcionar información relevante para el vuelo tales como advertencias o datos de navegación [8].



Figura 10. Multipurpose Control and Display Unit de un A320, extraído del simulador Flight Simulator [10].

<sup>9</sup> Imagen de creación propia con el uso del simulador Flight Simulator.

<sup>10</sup> Imagen de creación propia con el uso del simulador Flight Simulator.



#### 4. RMP (RADIO)

La radio al igual que la unidad CPDLC, es un componente indispensable, ya que permite la comunicación entre los pilotos de distintas aeronaves o bien entre el piloto y la estación en tierra o ATC, ofreciendo mayor seguridad y eficiencia durante el vuelo. Para ello, desde el panel mediante el uso de la rueda gris se introducen las frecuencias deseadas en la sección “STBY CRS”, que serán transferidas para que se activen [9].

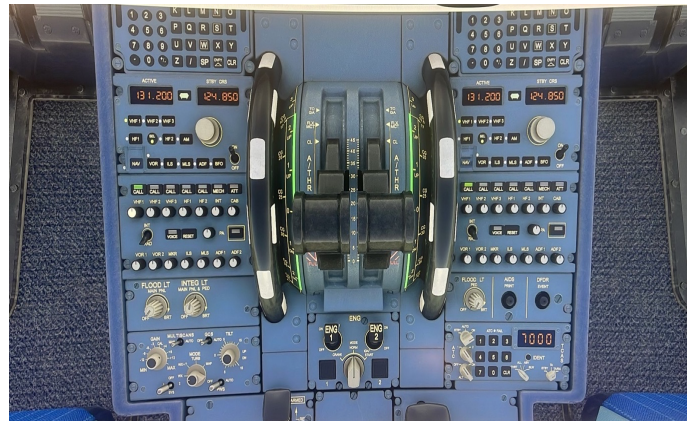


Figura 11. Radio de un A320, extraída del simulador Flight Simulator [11].

#### 5. TRANSPONDER

Finalmente, el transponder es un dispositivo que responde automáticamente las señales de interrogación emitidas por el radar secundario (SSR) para conocer con precisión la posición de la aeronave y mejorar la eficiencia y seguridad del vuelo [10].



Figura 12. Transponder de un A320, extraído del simulador Flight Simulator [12].

<sup>11</sup> Imagen de creación propia con el uso del simulador Flight Simulator.

<sup>12</sup> Imagen de creación propia con el uso del simulador Flight Simulator.

## **2. SIMULACIÓN DE SISTEMAS**

Se conoce como simulación a la creación de un modelo que reproduce exactamente un sistema real, en el cual se representan eventos discretos y controlan variables específicas. Además, se refleja el comportamiento de las entidades y se realizan análisis detallados frente a situaciones críticas [11].

Cuando se habla de eventos discretos en simulación, se consideran actividades que ocurren en momentos específicos y discontinuos durante el desarrollo del proceso. Además, estos eventos suponen unos cambios y unas alteraciones en el sistema de manera que afecta al comportamiento del proceso en los instantes en los que se dan [12].

En otras palabras, son las actividades fundamentales del sistema que se quiere representar y que, según las características que el usuario asigne, el sistema tendrá un comportamiento u otro. Algunos ejemplos de eventos discretos del sistema que se va a modelar podrían ser, la llegada de una llamada prioritaria por parte del ATC, la activación del proceso “*Joint Up*” o bien la entrada de comunicación con el avión líder.

Actualmente, hay softwares como Arena o Simio en el mercado que permiten simular los procesos críticos y evaluar con variables de control seleccionadas distintos escenarios que muestran los resultados obtenidos y que son soporte para la toma de decisiones en las organizaciones. No obstante, favorece en la eficiencia del uso de los recursos disponibles y en la reducción de riesgo, ya que gracias a los escenarios que se pueden generar no hay que realizar modificaciones de prueba en el sistema real y suponer un riesgo para la compañía. En este proyecto se usa el simulador Simio para reflejar las tareas que deben realizar los pilotos estableciendo unos atributos y unas características. Por ello, se presenta el software con sus elementos para conocer la herramienta y comprender el desarrollo completo del modelo realizado.

### **2.1. PROCESO DE SIMULACIÓN**

El proceso de simulación es una herramienta fundamental cuando se quiere simular sistemas, independientemente del software que se vaya a usar, puesto que permite crear modelos y enfrentarse a nuevos desafíos y situaciones complejas de manera más efectiva.

Por ello, a continuación, se comentarán los pasos fundamentales dentro del proceso.



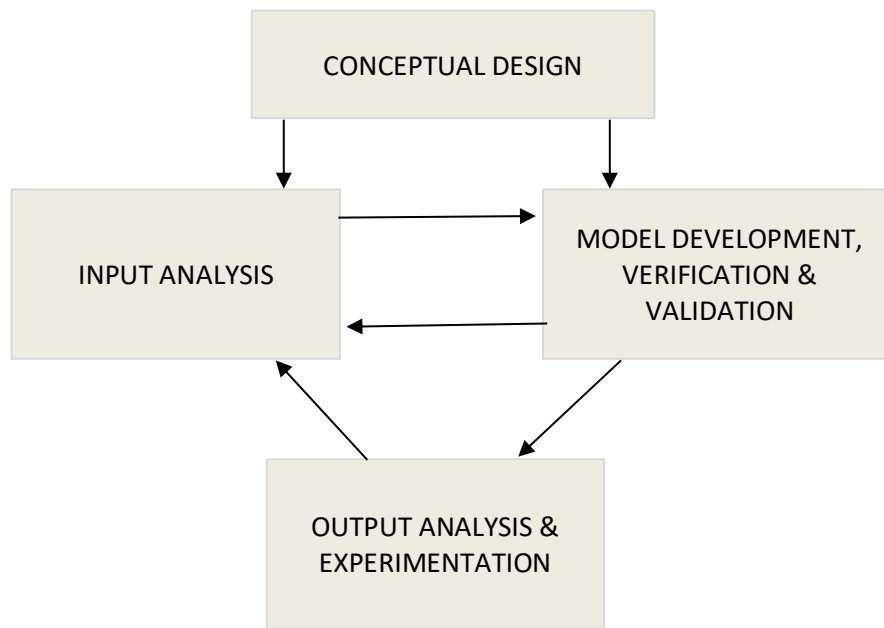


Figura 13. Esquema del proceso de simulación [13].

### Diseño conceptual (Conceptual Design):

La fase de diseño conceptual es la etapa inicial del proceso de simulación, que consiste en determinar objetivos, identificar eventos críticos y definir una estructura general en base a una comprensión detallada del sistema, garantizando el propósito de la simulación del modelo inicial [13].

No obstante, se debe determinar el software sobre el que se va a trabajar según las restricciones presentadas, ya que hay existen herramientas más intuitivas que otras.

Para describir la estructura general, conviene contemplar los posibles enfoques de modelado que podrían existir y dedicar un tiempo crucial en dicha fase, ya que una mala planificación supone un aumento de tiempo en el proyecto final [13].

<sup>13</sup> Imagen extraída de Simio and Simulation - Modeling, Analysis, Applications - 6th Edition. (2021, 1 agosto). Simio. Recuperado 5 de marzo de 2024, de <https://textbook.simio.com/SASMAA/index.html>

En el caso de la simulación de tareas de los pilotos, tal y como se ha mencionado, el software que se usará es Simio, ya que tiene características de interés para su desarrollo y cumple con las restricciones del sistema.

Además, existen diversas metodologías para desarrollar el sistema gracias a las diversas herramientas que ofrece el programa, aunque se debe seleccionar el modo más apropiado según los resultados que se quieran obtener.

Algunas de las maneras de modelar el sistema son las siguientes:

### 1. Tiempo de proceso.

Desarrollo del sistema mediante el tiempo de proceso de cada tarea y con el uso de los conectores como restricción, de manera que el tiempo que se establece de proceso de la entidad sea el mismo que el que se le asigne al conector TimePath, es decir, el tiempo de recorrido que efectúa la otra entidad de un proceso a otro. Con esto se consigue un modelo continuo y determinista, el cual detrás de una tarea se realiza otra sin que pueda interrumpirse por eventos no deseados.

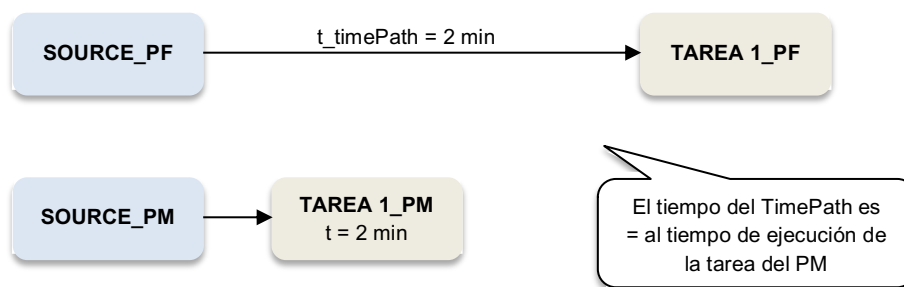


Figura 14. Esquema de ejemplo de la modelización por tiempo de proceso [14].

### 2. Asignación de procesos.

La asignación de procesos permite codificar las restricciones del sistema para que una tarea no se pueda efectuar hasta que la predecesora termine. Para ello, se deben crear unos procesos dentro del modelo y asociarlos a los elementos según sea conveniente dado que cumplirán con la codificación indicada.

Realizando esta simulación, se permite ver la variación en los puntos críticos del sistema cuando este se vea interrumpido, además de tener la posibilidad de asignar tiempos aleatorios para que se asemeje más a la realidad. A este tipo de modelos se les denomina discretos y estocásticos.

<sup>14</sup> Imagen de creación propia.

### 3. Work Schedule.

La función horario de trabajo o "*Work Schedule*", consiste en asignar a cada proceso un horario. Esto permite que si la tarea 1 se activa a las 11:00 horas, la tarea sucesora pueda ser programada para que se active a las 11:00 horas + el tiempo de ejecución de la tarea 1 (el tiempo de proceso de la tarea es determinista).

Con el uso de este método, se consigue un sistema parecido al primero ya que se denominaría continuo y determinista.

Para el desarrollo se utilizará el método de asignación de procesos, ya que es el que mejor se ajusta a las condiciones reales cumpliendo con los tiempos aleatorios y contemplando la posibilidad de ocurrencia de eventos no deseados (llamadas prioritarias por parte del ATC).

### **Análisis de entrada (Input Analysis):**

En esta fase, se determina cuál será la información de entrada según el análisis y la recopilación de los datos del sistema para garantizar que se plasme y se obtengan los resultados deseados [13].

Para analizar los datos, hay que estudiar el sistema con un nivel de detalle, ya que después se usarán para elaborar el modelo.

Hay veces que analizar los datos de un sistema resulta un desafío complicado debido a la complejidad de este, por lo que es recomendable seleccionar las herramientas adecuadas y contar con expertos que puedan abordar la dificultad [13].

El proceso estudia la sensibilidad de las salidas generadas por el modelo con respecto a las entradas seleccionadas, o sea, se observa cómo varían los resultados obtenidos según los cambios generados en las variables de entrada [13].

En este estudio, permite ver el efecto de cada entrada en las salidas y valorar las variables críticas del sistema.

En cuanto al análisis de datos del sistema tratado en el proyecto, las variables de entrada que se consideran en la simulación son las siguientes:

- Pilotos

Los dos pilotos que contiene el sistema, ya que hay algunas tareas que las ejecuta el PF (Pilot Flying) y otras el PM (Pilot Monitoring).

Resulta de gran interés observar cómo afecta el rendimiento de un piloto cuando el otro se encuentra frente a un imprevisto.

- Tiempo de proceso de las tareas

El tiempo proceso de las tareas que realiza tanto el PF como el PM son entradas críticas, dado que cuando se modifica el tiempo de una actividad supone un efecto en el resultado final, generando un escenario atractivo de estudiar. Estos datos han sido proporcionados de estudios previos como el proyecto de E-PILOTS o Geese.

- Eventos aleatorios de vuelo

La entrada de eventos aleatorios permite identificar cuáles son los puntos críticos del sistema que se ven alterados por la variable.

- Entrada de las llamadas por parte del ATC

Dependiendo de la carga de trabajo que exista en el área de control, el tiempo de recepción de la llamada por parte de este y en consecuencia de inicio de los procesos, el tiempo total de la simulación se puede ver afectado con una incrementación significativamente.

## **Desarrollo de modelos, verificación y validación (Model development, verification and validation):**

Dentro de esta fase del proceso de simulación se tratan los siguientes puntos:

### **1. Desarrollo del modelo**

El propósito principal es pasar el modelo conceptual que se elabora al inicio del proceso, a una simulación ejecutable. Durante este proceso, mediante el uso de las herramientas que ofrece el programa, se definen los elementos, entidades, recursos, eventos, etc, codificándolos junto con la información que le caracteriza a cada uno de ellos e interrelacionándolos entre sí con el fin de representar de manera precisa el sistema real [13].

Es necesario conocer el uso del programa que se utilizará para simular, ya que, un buen conocimiento de las herramientas y su funcionalidad permite una mejor comprensión y aporta eficiencia durante la simulación. Por otro lado, el entendimiento facilita el proceso de selección de las variables adecuadas y la interrelación, así como la capacidad de detectar errores y realizar las correcciones convenientes para mejorar el sistema [13].

## **2. Verificación**

La fase de verificación consiste en garantizar que el modelo que se simula sea preciso y cumpla con los requisitos establecidos por el cliente. Para cumplir con este punto, se hace una revisión estructural del modelo junto con las codificaciones e interrelaciones establecidas para detectar posibles errores [13].

Finalmente, se comprueba que tanto las variables de entrada como de salida sean las correctas en función de los datos analizados en el sistema.

## **3. Validación**

La validación dentro del proceso tiene un papel fundamental puesto que garantiza que el modelo que se ha simulado es preciso y válido en relación con el sistema real. Se asegura que los resultados obtenidos son confiables y, en consecuencia, se pueda usar con seguridad para la toma de decisiones y análisis [13].

Para asegurar la validez del modelo, se evalúa la precisión y exactitud de los resultados obtenidos de la simulación junto con la vivencia de los expertos dentro del sistema.

### **Análisis de salida y experimentos (Output Analysis and experimentation):**

Cuando se habla de análisis de salida y experimentación de un modelo se entiende como, el proceso de comprensión de los resultados que se obtienen con la ejecución y la generación de posibles escenarios para la elaboración de un análisis.

Al principio, se analizan los resultados generados por el modelo de manera exhaustiva y se verifica su validez para asegurar su precisión y que resulten representativos. Además, se interpretan para determinar los puntos críticos del modelo y posibles mejoras que se podrían realizar.

La experimentación trata de modificar las variables de entrada del modelo y si es conveniente la estructura para investigar las configuraciones del sistema y analizar la sensibilidad junto con informes que describen los resultados, que posteriormente servirán para la toma de decisiones [13].

En este caso, se quieren observar las características de las variables de salida cuando se produzcan variaciones en el sistema, como una modificación en el tiempo de proceso o bien la entrada de un evento espontáneo que no se encuentre dentro de la lista de chequeo de las tareas de los pilotos.

## **2.2. TIPOS DE SIMULACIÓN**

En el ámbito de la simulación, se encuentran varios tipos, que se aplicarán dependiendo de las necesidades y complejidades que requiera el modelo en cuestión.

### **Modelos estáticos / Modelos dinámicos**

La principal característica de los modelos estáticos es que las variables no presentan cambios a lo largo del tiempo, sino que se mantienen constantes en él. Por ello, estos modelos resultan útiles para analizar el comportamiento de un sistema en un momento sin considerar la evolución de las variables [14].

Por lo que se refiere a modelo dinámico, permite analizar la evolución de las variables a lo largo del tiempo, así como las interrelaciones entre ellas. Con el tiempo, las variables que conforman el sistema toman valores, igual que, según las restricciones establecidas, las relaciones que existen pueden variar [14].

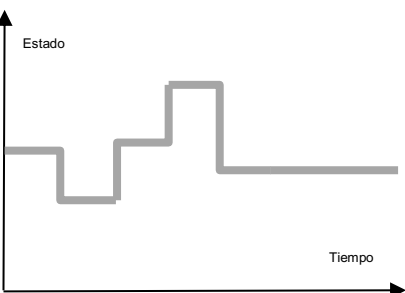
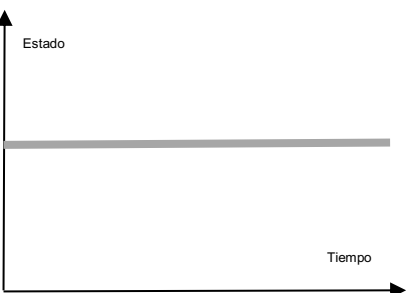
| MODELO DINÁMICO   | MODELO ESTÁTICO  |
|---|--|
|  <p>Figura 15. Gráfico de la evolución de un modelo dinámico [15].</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Representación de sistemas complejos.</li> <li>• Las variables evolucionan a lo largo del tiempo.</li> <li>• Las interrelaciones entre las variables cambian con el tiempo.</li> </ul> |  <p>Figura 16. Gráfico de la evolución de un modelo estático [16].</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• El sistema que se modela es más simple.</li> <li>• Las variables que forman el sistema son constantes con el paso del tiempo.</li> <li>• Las relaciones que existen entre las variables se mantienen fijas.</li> </ul> |

Tabla 5. Diferencias entre modelo dinámico y estocástico.

### Modelos continuos / Modelos discretos

Los modelos continuos son sistemas donde sus variables evolucionan gradualmente pasando por cada valor del intervalo definido, es decir, los valores varían sin saltos o interrupciones bruscas, como un aumento en la temperatura o en la presión [14].

En cambio, los modelos discretos se caracterizan porque las variables toman valores de un conjunto finito y discreto en unos intervalos de tiempo concreto siguiendo un patrón estocástico, es decir, aleatoriamente. Por eso, estos sistemas permiten modelar y analizar individualmente cada elemento que lo componen [14].

<sup>15</sup> Imagen de creación propia.

<sup>16</sup> Imagen de creación propia.

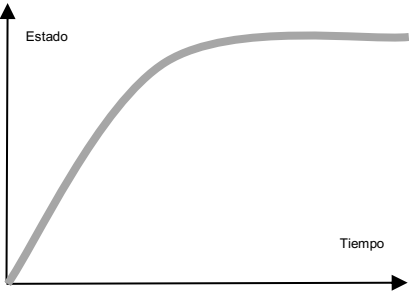
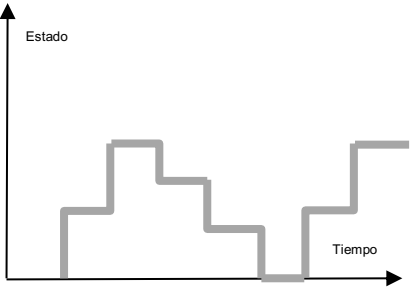
| MODELO CONTINUO  | MODELO DISCRETO   |
|--|---|
|  <p>Figura 17. Gráfico de la evolución de un modelo continuo [17].</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Las variables del sistema son continuas.</li> <li>• Evolución de manera gradual.</li> </ul> |  <p>Figura 18. Gráfico de la evolución de un modelo discreto [18].</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• En estos modelos las variables pueden ser tanto discretas como continuas.</li> <li>• Las variables evolucionan de manera estocástica o determinista.</li> <li>• Se pueden simular los eventos del sistema de manera independiente.</li> </ul> |

Tabla 6. Diferencias entre modelo continuo y discreto.

### Modelos deterministas / Modelos estocásticos

El modelo determinista es aquel donde las constantes son fijas y no variables, es decir, el comportamiento de las variables del sistema se predice y, en consecuencia, el resultado de la simulación se puede conocer si se entienden las variables de entrada [14].

En cambio, un modelo estocástico se singulariza por la aleatoriedad del sistema, de modo que la evolución de las variables será aleatoria, conozcan o no las condiciones de entrada. Eso hace que no se tenga idea del estado final de la simulación debido a la incertidumbre y aleatoriedad que existe [14].

<sup>17</sup> Imagen de creación propia.

<sup>18</sup> Imagen de creación propia.



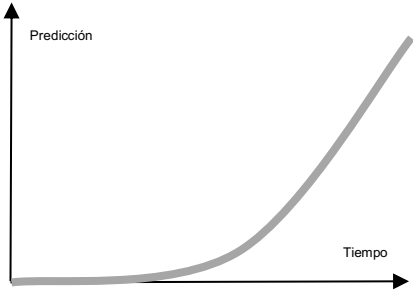
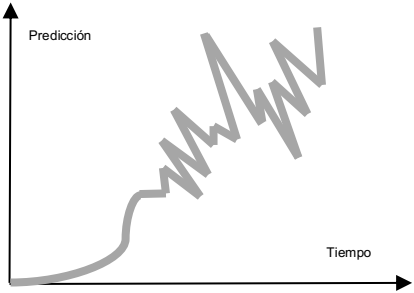
| MODELO DETERMINISTA   | MODELO ESTOCÁSTICO  |
|---|---|
|  <p>Figura 19. Gráfico de la evolución de un modelo determinista <sup>[19]</sup>.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Se determinan los valores de las variables</li> <li>• Se puede conocer el estado final del sistema</li> </ul> |  <p>Figura 20. Gráfico de la evolución de un modelo estocástico <sup>[20]</sup>.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La asignación del valor de las variables presenta aleatoriedad e incertidumbre</li> <li>• No es posible predecir el resultado final de la simulación</li> </ul> |

Tabla 7. Diferencias entre modelo determinista y estocástico.

El sistema que se desarrolla en el proyecto se trata de un modelo dinámico, ya que los valores de las variables que lo forman se modifican con el tiempo, así como las relaciones establecidas entre estas.

Además de considerarse dinámico, comprende características tanto de modelos discretos como estocásticos, ya que el piloto no está ejecutando tareas continuamente, de la misma manera que no se puede predecir el estado final porque existe la incertidumbre de que el modelo se interrumpa por un factor externo (eventos aleatorios de vuelo).

<sup>19</sup> Imagen de creación propia.

<sup>20</sup> Imagen de creación propia.

## **2.3. QUE ES SIMIO**

Simio es un software de simulación nacido de la empresa Simio LLC, con sede en Sewickley, Pittsburgh, Pensilvania. Su misión es ofrecer a los usuarios las mejores herramientas de simulación y programación de la producción, para modelar eventos discretos, dar soporte en la toma de decisiones y ayudar en la reducción de riesgos y costes de las organizaciones [15]. Otra característica del software es su capacidad de representación de los sistemas en 3D para ver visualmente un modelo más dinámico y atractivo.

Este sistema lo usan organizaciones como en logística, en desarrollos industriales o en el sector servicios, ya que gracias a su flexibilidad es adaptable a muchos procesos realizados en las entidades [16].

## **2.4. FUNCIONAMIENTO**

Simio, se trata de un software muy intuitivo, lo que facilita el desarrollo de los modelos y su uso. Cuenta con varias funciones de creación, así como opciones para programar el comportamiento de los elementos según unas restricciones y unos atributos. Asimismo, también permite generar escenarios e informes con los resultados obtenidos para poder evaluar dicho sistema.

### **2.4.1. FUNCIONES DE SIMIO**

El software, cuenta con distintas opciones de creación, como son los objetos, los procesos, los estados, los resultados, etc. A continuación, se presentan las principales herramientas que se deben conocer para la comprensión y creación del modelo.

#### **2.4.1.1. LIBRERÍA ESTÁNDAR (*STANDARD LIBRARY*)**

Simio ofrece una librería estándar con objetos que pueden configurarse y relacionarse para lograr un modelo detallado y preciso.

### ModelEntity



La entidad (*ModelEntity*) representa los elementos que se están modelando en el sistema. A estos objetos, con identidad propia, se les puede asignar tanto atributos como estados, además de poder establecer interrelaciones con otros elementos del modelo, como los procesos que ejecutan o en los que son ejecutados [17].

### Source



La entrada (*Source*), genera las entidades que entran en el modelo a lo largo de un tiempo determinado. Esta entrada puede estar configurada por parte del experto según unos intervalos de tiempo o mediante restricciones de capacidad. Asimismo, permite asignar estados y atributos a las entidades [17].

### Sink



La salida (*Sink*), representa el final del sistema, donde se eliminan todas las entidades del modelo que han sido procesadas [17].

### Server



El servidor (*Server*) se encarga de procesar las entidades del modelo, pudiendo limitar la capacidad de objetos procesados simultáneamente, establecer un tiempo de proceso “random” o estipulado por el experto y asignar propiedades para determinar el funcionamiento. Así pues, la función del objeto es simular las actividades o eventos del sistema real [17].

### Combiner



Un combinador (*Combiner*), tiene como función principal la unión de entidades, es decir, convierte distintos flujos de entidades en un único flujo. Esto puede resultar útil cuando

se quieren procesar distintos objetos en un mismo instante de tiempo [17].

### Separator



El separador (*Separator*), realiza lo contrario del combiner, de un único flujo de entidades lo divide en varios. Esta herramienta permite procesar las entidades por separado y analizar su comportamiento de manera individual [17].

### BasicNode



La función principal del “*BasicNode*”, es modelar el flujo de entidades, de tal manera que el experto decide si el objeto en esa ubicación debe esperar, procesarse o dirigirse hacia otro elemento [17].

### TransferNode



Por otro lado, el “*TransferNode*”, tiene una función parecida al objeto descrito anteriormente, con la característica de que no se trata de una ubicación en el modelo, sino que únicamente gestiona el movimiento de las entidades dentro de este [17].

### Connector



El conector busca establecer relaciones entre los elementos del modelo, definiendo una ruta que permite el movimiento de la entidad a lo largo del modelo y una mayor visualización del flujo en el sistema [17].

### Path



Existen varias formas de establecer conexiones entre los elementos según las características del modelo a representar. El “*Path*” es un tipo de conector en el que el movimiento que realiza la entidad se basa en una longitud

específica, es decir, se asigna al conector características de la longitud que debe recorrer el objeto [17].

### TimePath



Parecido al elemento anterior, el “*TimePath*”, también es considerado como un conector el cual se le asigna la característica del tiempo de duración del recorrido de la entidad a lo largo del modelo [17].

## 2.5. VENTAJAS E INCONVENIENTES DE TRABAJAR CON SIMULACIÓN SIMIO

| VENTAJAS [18]   | INCONVENIENTES [18]  |
|---|--|
| Refleja el funcionamiento y los procesos internos con detalle de un sistema.  | Es necesario invertir gran cantidad de tiempo en el estudio del sistema real.  |
| La simulación permite predecir el comportamiento del sistema cuando se somete a cambios sin suponer un riesgo y reduciendo los costes y el tiempo, puesto que no es necesaria la implementación para determinar si se trata de modificaciones adecuadas o no. | En sistemas complejos puede suponer un reto observar todo el proceso con detalle.  |
| Permite evaluar distintos escenarios generados para optimizar al máximo el sistema.   | Para que los datos obtenidos sean confiables y se puedan tomar decisiones, es necesario realizar una validación precisa del modelo.  |
| Es posible simular sistemas estocásticos que presentan aleatoriedad e incertidumbre.  | Implementar un modelo puede suponer un gran coste.   |
| Proporciona información útil que ayuda en la toma de decisiones.  | La representación de un sistema mediante la simulación no será igual de confiable que el sistema real.   |
| Se trata de una herramienta flexible y adaptable a una amplia gama de sectores.   | No siempre se podrá realizar una validación y verificación del sistema, de modo que el análisis para la toma de decisiones contemplará un riesgo. No siempre se podrá realizar una validación y verificación del sistema, de modo que el análisis para la toma de decisiones |

|  |                               |
|--|-------------------------------|
| <p>Aporta mayor conocimiento y aprendizaje sobre los sistemas.</p> <p>Es una herramienta intuitiva y sencilla para modelar</p> | <p>contemplará un riesgo.</p> |
|--|-------------------------------|

Tabla 8. Ventajas e inconvenientes de la simulación.

## CAPÍTULO 2: CONSTRUCCIÓN Y SIMULACIÓN DEL MODELO

A lo largo de este capítulo se describe en detalle el proceso de construcción del modelo junto con imágenes y anotaciones breves para facilitar la comprensión de este.

Por otro lado, se presentan los resultados de la simulación y un análisis de estos según los objetivos planteados, además de mencionar el experimento realizado destacando las características relevantes de este.

A continuación, se expone la estructura del modelo creado con Simio.

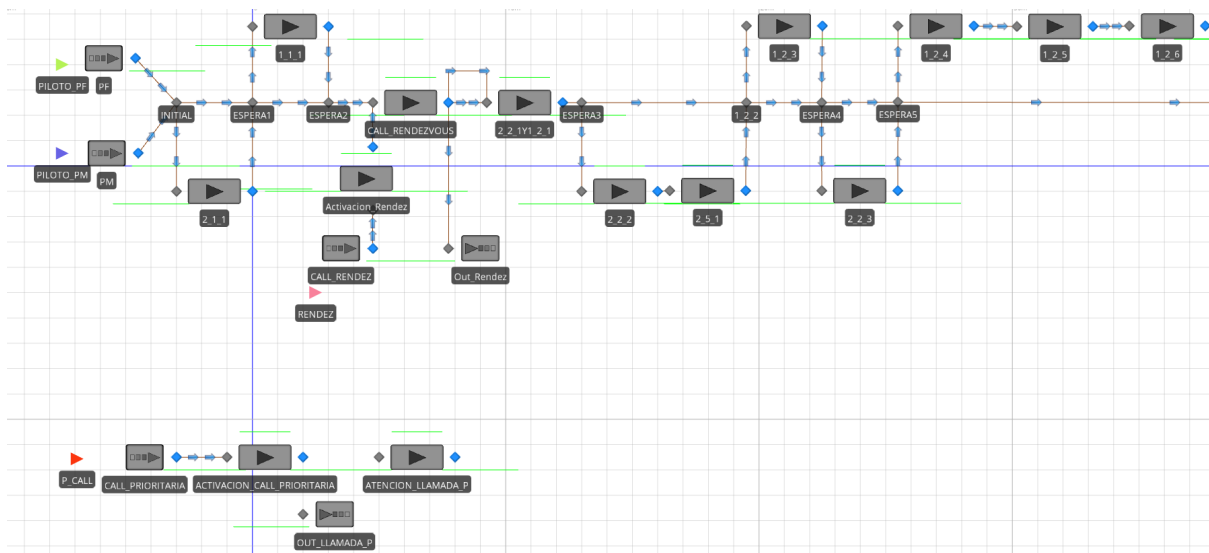


Figura 21. Estructura del modelo en Simio (I) [21].

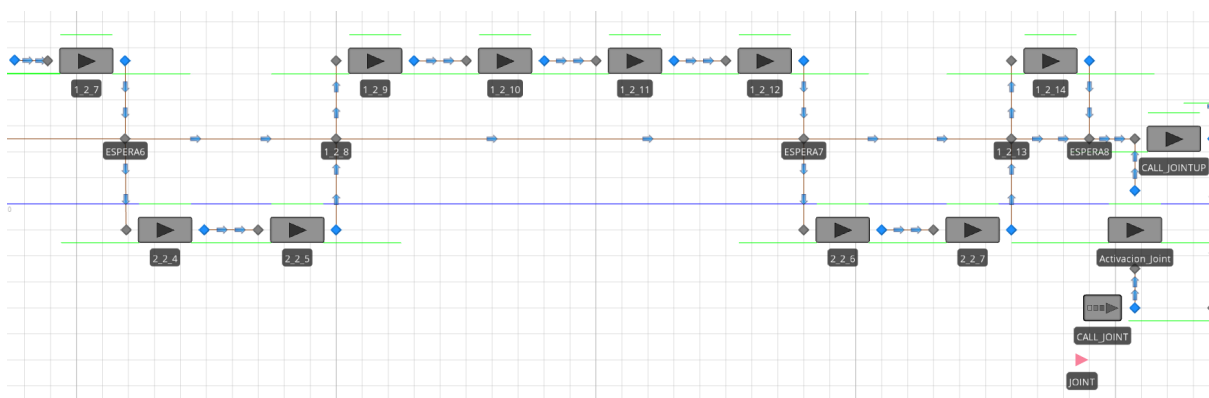


Figura 22. Estructura del modelo en Simio (II) [22].

<sup>21</sup> Imagen de creación propia con el uso del software Simio.

<sup>22</sup> Imagen de creación propia con el uso del software Simio.

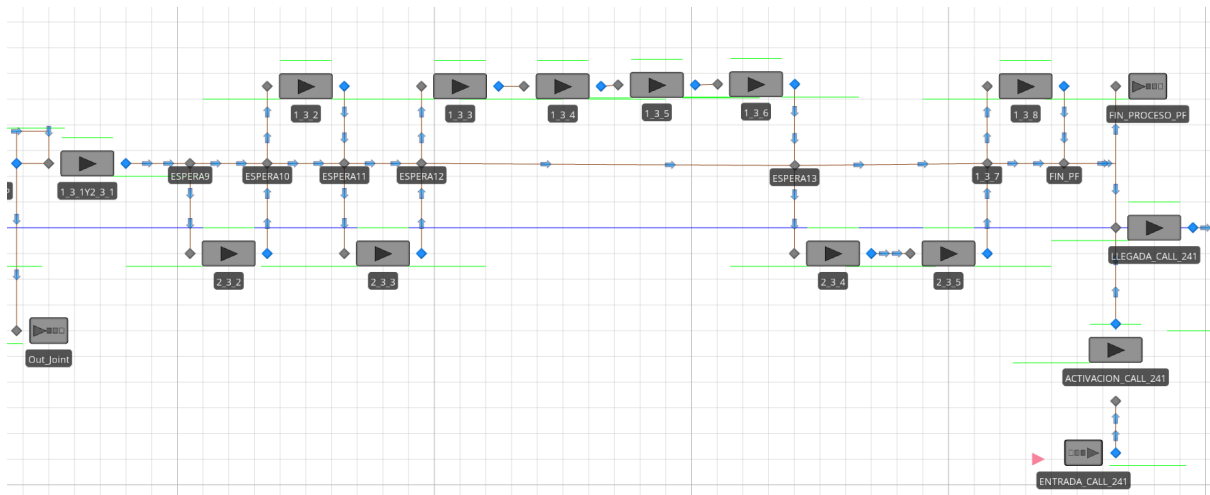


Figura 23. Estructura del modelo en Simio (III) [23].

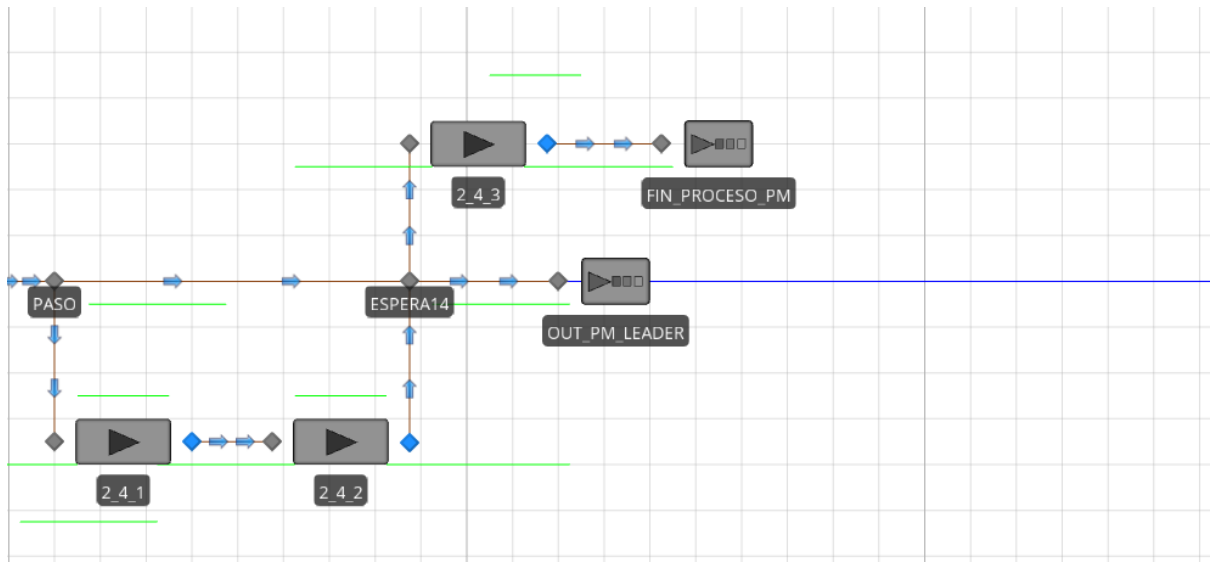


Figura 24. Estructura del modelo en Simio (IV) [24].

<sup>23</sup> Imagen de creación propia con el uso del software Simio.

<sup>24</sup> Imagen de creación propia con el uso del software Simio.



## 1. ENTIDADES DEL MODELO

En el modelo se representan las siguientes 6 entidades:

- **PILOTO\_PF** : Representa el piloto encargado de ejecutar las tareas correspondientes al PF.
- **PILOTO\_PM** : Representa el piloto encargado de ejecutar las tareas correspondientes al PM.
- **P\_CALL** : Entidad que representa la llamada prioritaria en el modelo.
- **JOINT** / **RENDEZ** / **PM\_LEADER** : Representan las llamadas de cada uno de los procesos correspondientes al Rendez-Vous Instructions, al Joint-UP i al Formation Keeping,

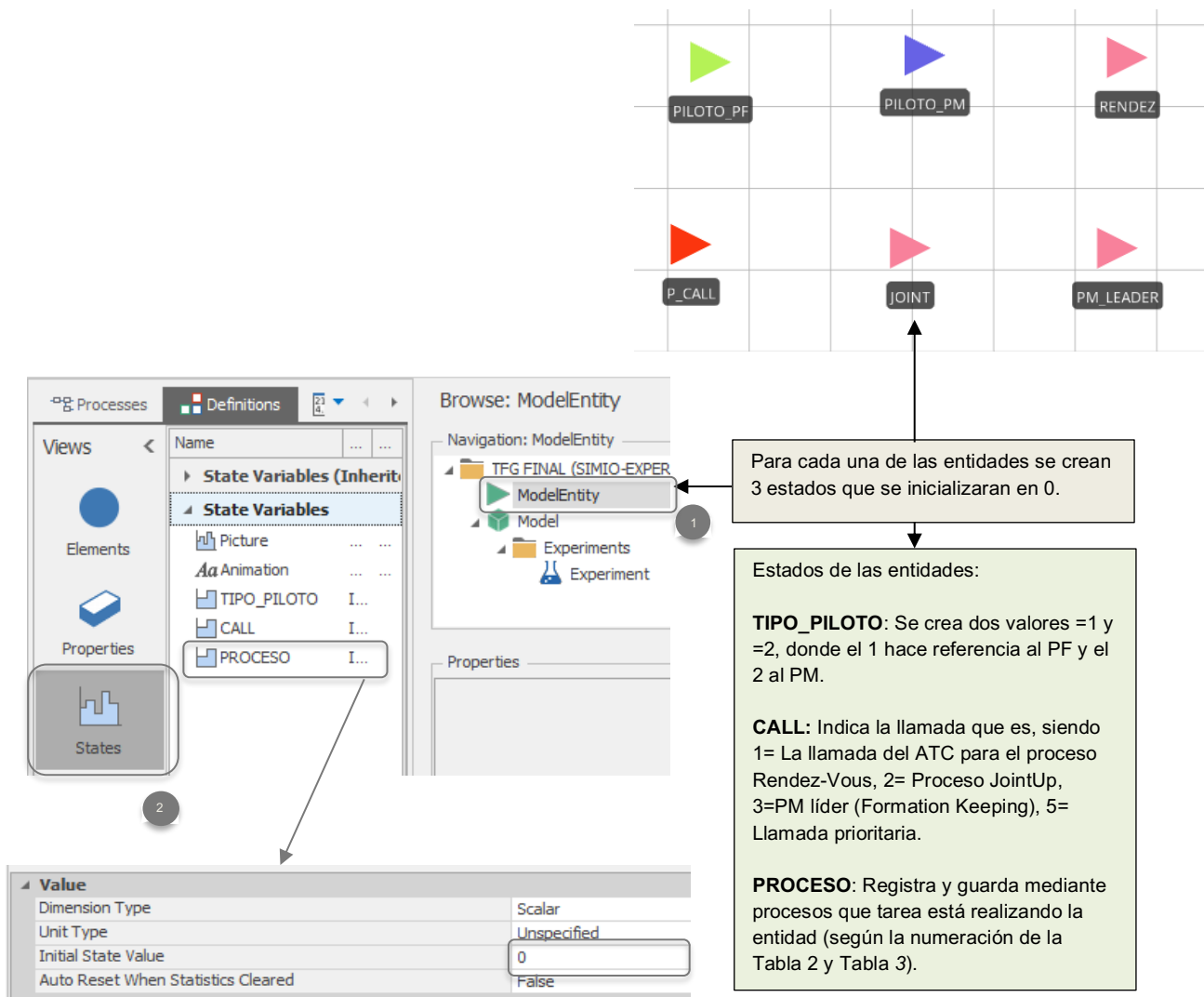


Figura 25. Construcción de las entidades del modelo [25].

<sup>25</sup> Imagen de creación propia con el uso del software Simio.

## **2. PROCESOS DEL MODELO**

Muchos sistemas que solemos ver cuentan con restricciones. Por ello, cuando se desea modelar el sistema previamente se estudia si está sujeto por estas restricciones. Si es así, para representarlo de manera precisa en el software, se utilizan procesos que permiten la imposición de restricciones y asignación de nuevos valores, entre otras funciones.

Para el desarrollo del modelo se han tenido que codificar unos procesos de modo que impongan las restricciones existentes del sistema real y obtener un análisis minucioso para la toma de decisiones óptima.

### **2.1. PROCESO DE LLAMADA PRIORITARIA**

Durante la ejecución de las tareas en cualquier momento los pilotos pueden recibir una llamada por parte del ATC advirtiéndolo o informando de posible tráfico o adversidades que se puedan encontrar en la ruta. Por ello, se crea el proceso de la llamada prioritaria, el cual se activa según el tiempo determinado por el usuario en el Server "ACTIVACION\_CALL\_PRIORITARIA". Esta llamada interrumpe procesos que se están llevando a cabo, de modo que cuando se activa, se modifica el estado de la entidad de manera inmediata deteniendo el proceso actual para atender la llamada. Una vez atendida, el piloto retoma la tarea en la que se había quedado y sigue con el proceso.

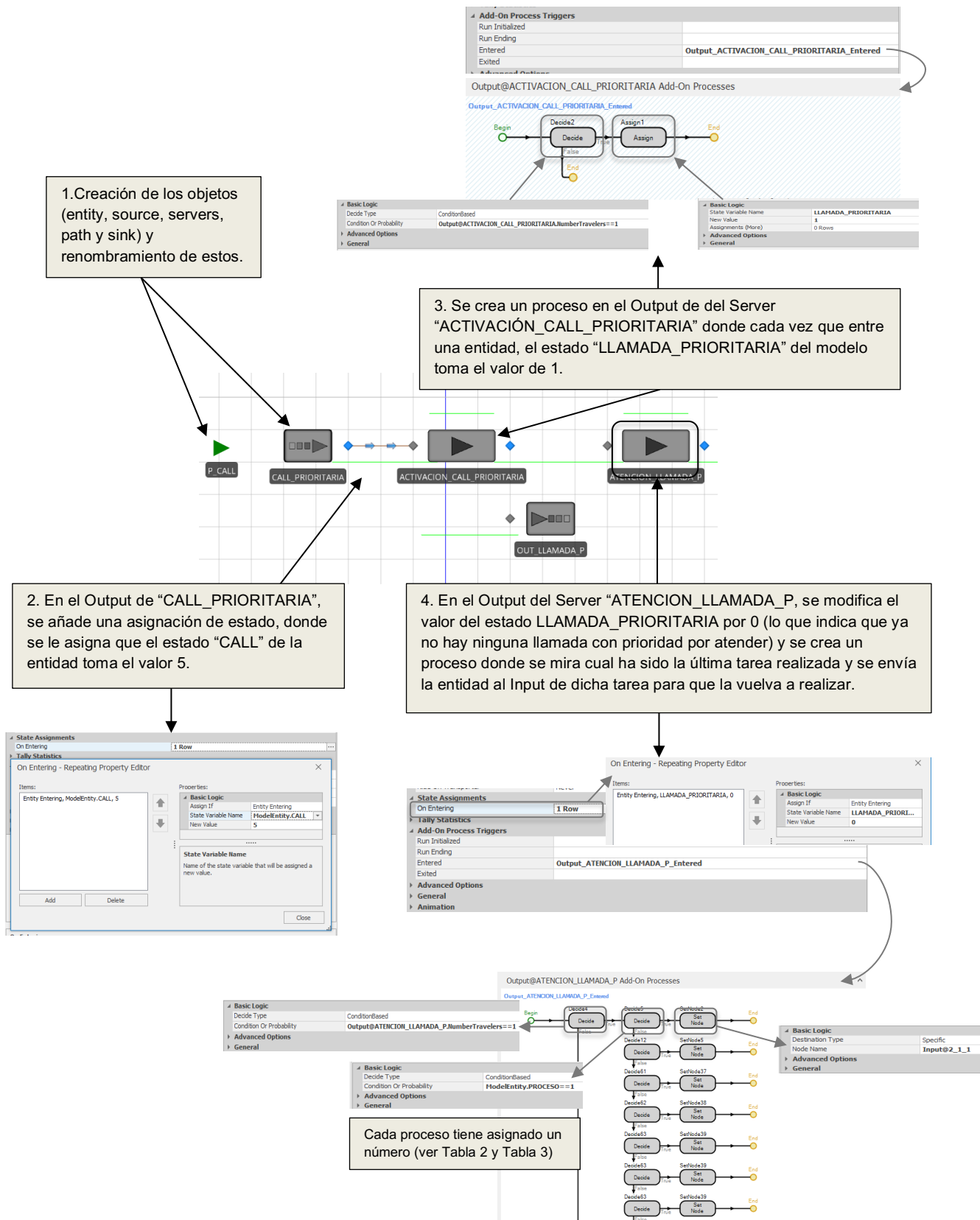


Figura 26. Construcción del proceso de llamada prioritaria [26].

<sup>26</sup> Imagen de creación propia con el uso del software Simio.

## 2.2. PROCESO DE ASIGNACIÓN DE TAREA

En el proceso de atención de llamada prioritaria se verifica que tarea ha sido la última que ha realizado la entidad, de manera que cuando acabe de atender esa llamada pueda volver a ejecutar de nuevo la última tarea procesada. Para representar dicha acción en el modelo, en cada una de las tareas (Servers) se crea un proceso en el cual se le asigna el número de tarea (ver Tabla 2 y Tabla 3). A continuación, se muestra un ejemplo:

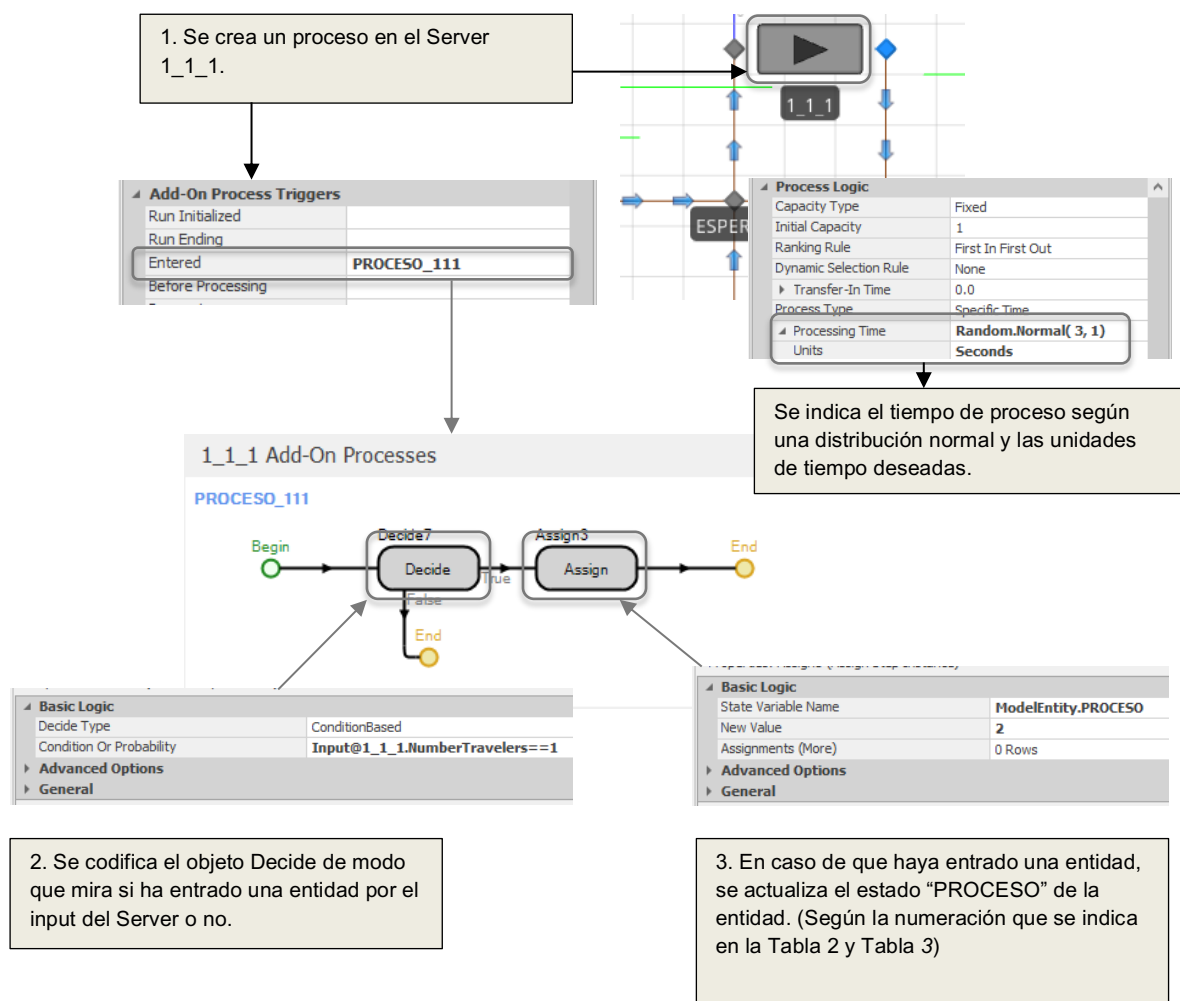


Figura 27. Construcción del proceso de asignación de tarea [27].

<sup>27</sup> Imagen de creación propia con el uso del software Simio.

### 2.3. PROCESOS DE ESPERA

Como se ha descrito en el apartado de DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA, hay tareas que no se pueden realizar hasta que el otro piloto haya terminado las suyas, de forma que uno de los pilotos queda en espera. Para forzar a que el sistema cumpla con dicha restricción únicamente cuando el usuario lo desee se plantea de la siguiente manera:

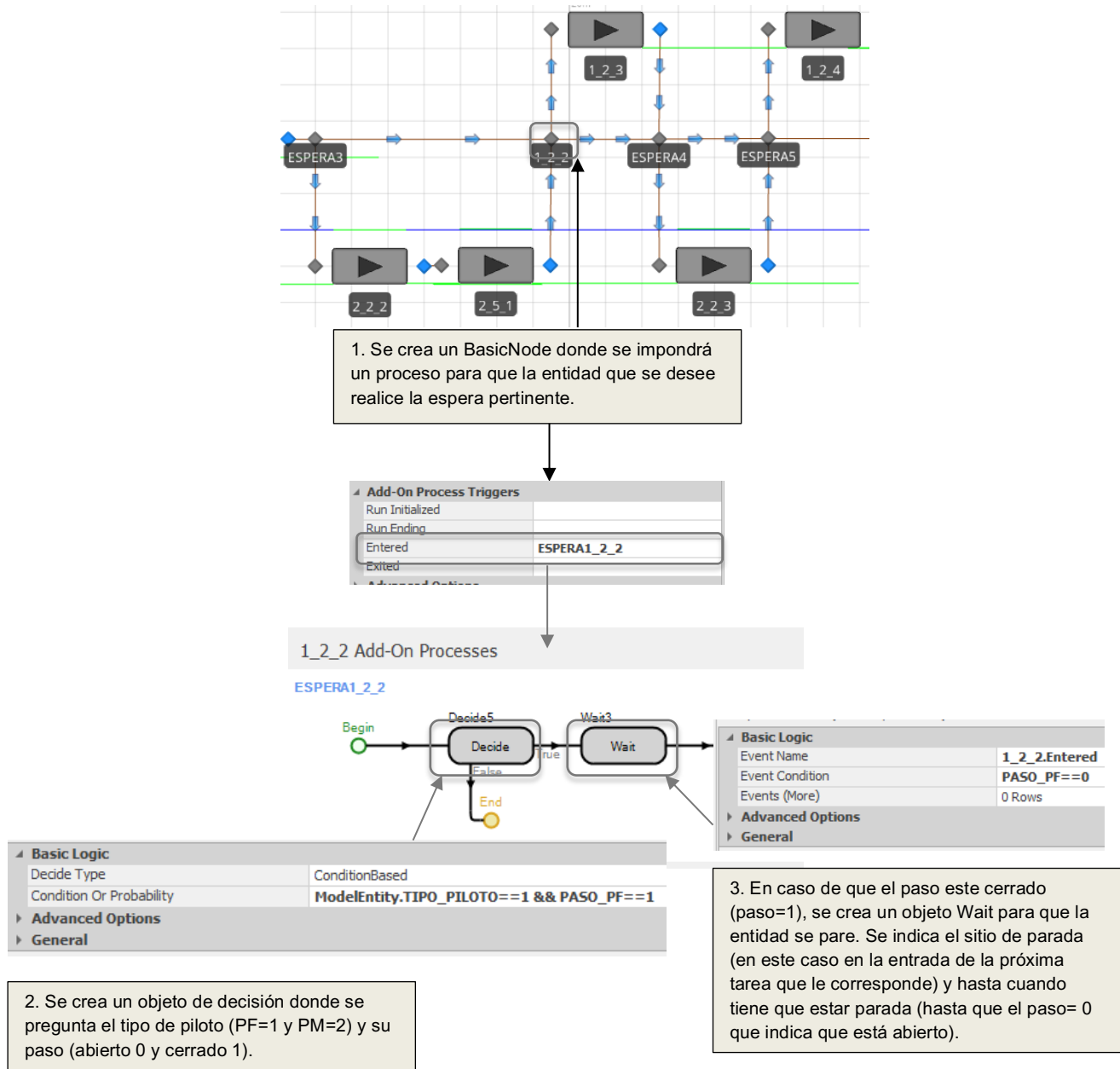


Figura 28. Construcción del proceso de espera (I) [28].

<sup>28</sup> Imagen de creación propia con el uso del software Simio.

Existe otro tipo de espera en el modelo, dado que para que se pueda inicializar uno de los procesos (Rendez-Vous Instructions, Joint-UP o Formation Keeping) es necesario recibir una llamada por parte del ATC o en caso del proceso Formation Keeping por parte del piloto de la aeronave líder. De modo que no podrán establecer comunicación entre ellos si las 3 entidades (PF, PM y la llamada) no están disponibles, por ello existe un Server en cada proceso donde se impone la restricción (CALL\_REDEZVOUS, CALL\_JOINTUP y LLEGADA\_CALL\_241).

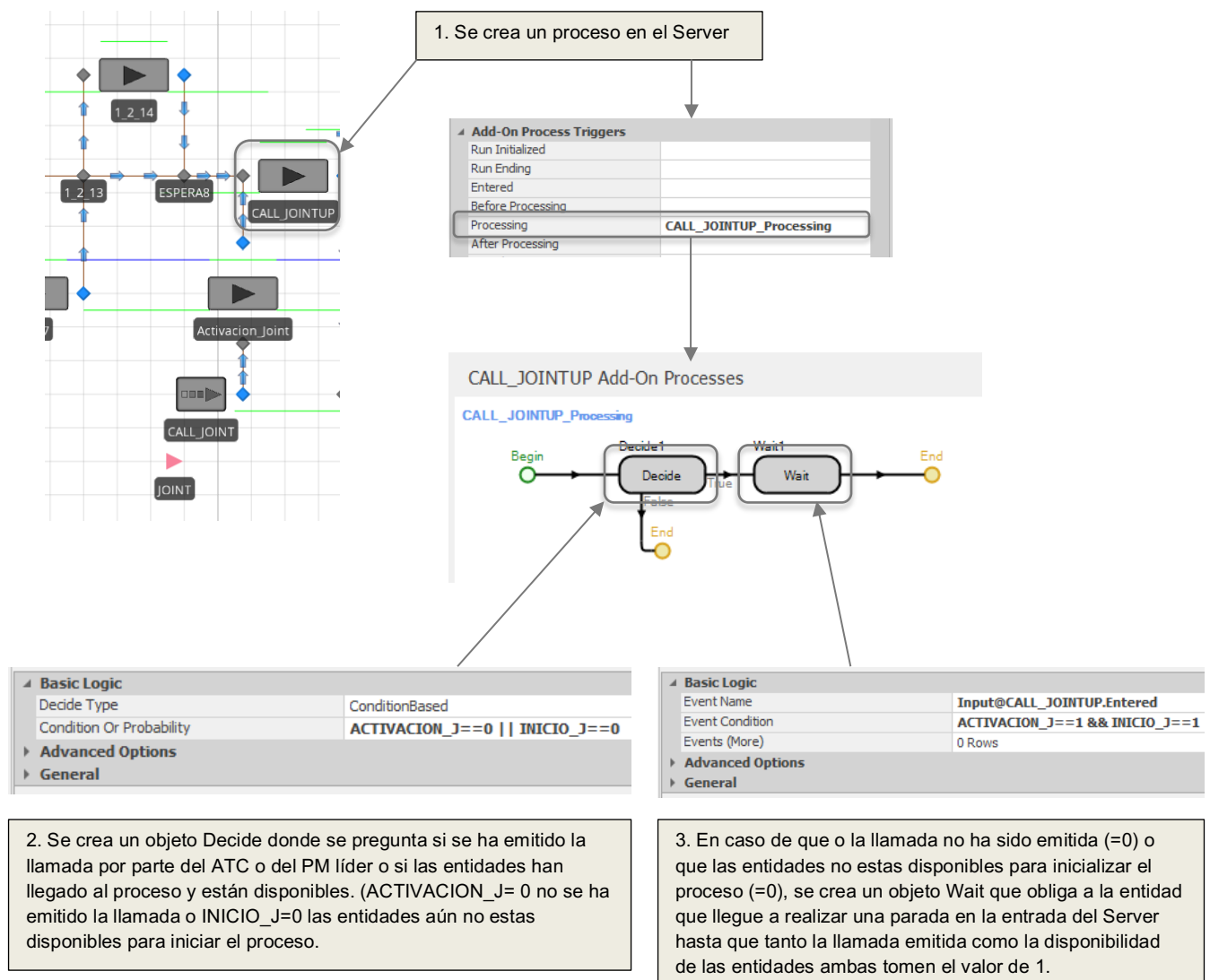


Figura 29. Construcción del proceso de espera (II) [29].

<sup>29</sup> Imagen de creación propia con el uso del software Simio.

## 2.4. PROCESO DE DECISIÓN Y ASIGNACIÓN DE ESTADO

Al contar con un evento aleatorio, una llamada, que debe atenderse prioritariamente con respecto a las demás tareas, una vez finalizada, se revisa si existe alguna llamada de este tipo mediante un proceso.

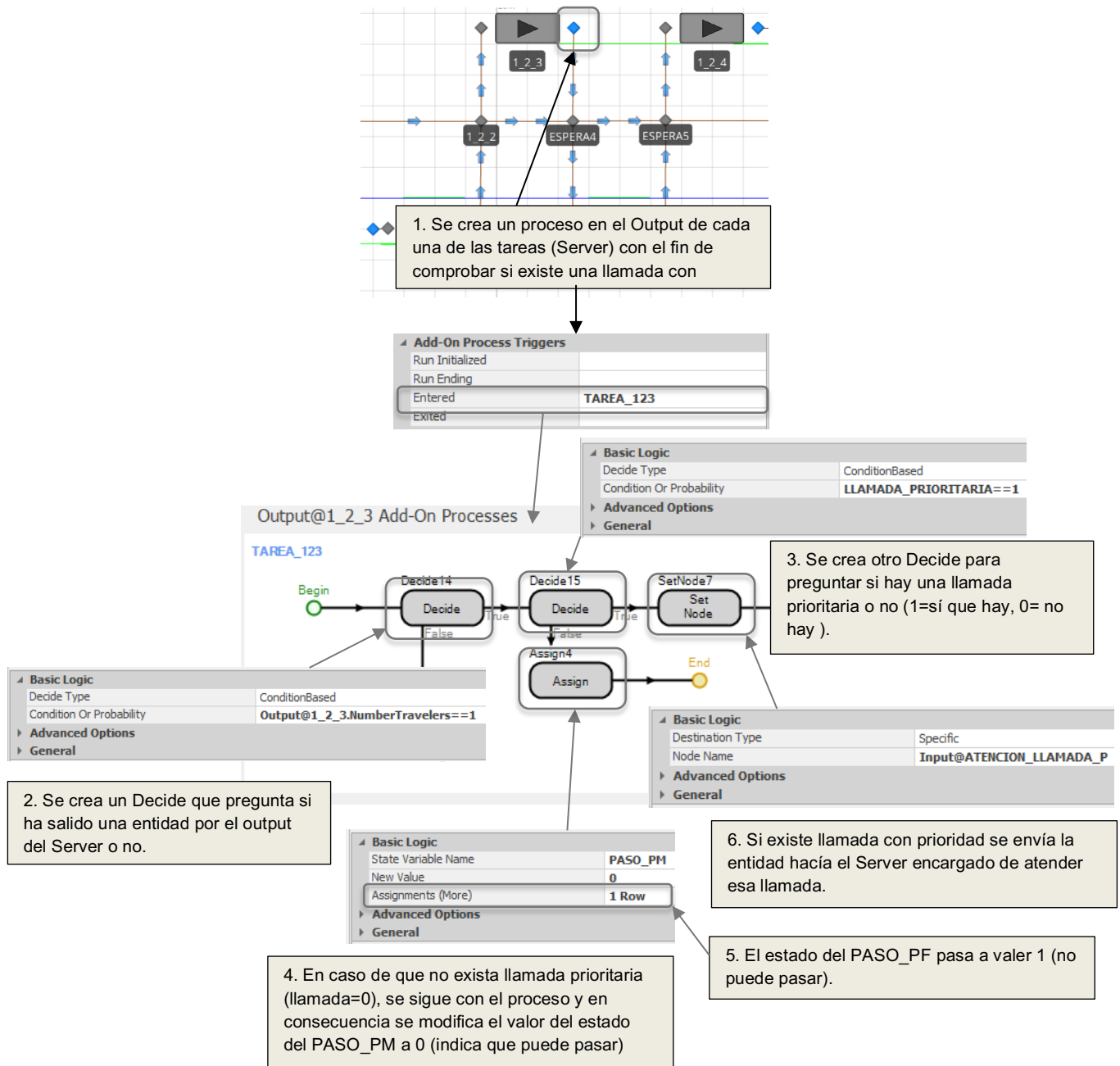


Figura 30. Construcción del proceso de decisión y asignación de estado (I) [30].

<sup>30</sup> Imagen de creación propia con el uso del software Simio.

Por otro lado, como se ha dicho, no se puede inicializar un proceso hasta que se reciba una llamada por la entidad correspondiente (ATC o PM líder) y las entidades que lo ejecutan estén disponibles. Para saber cuándo se ha recibido una llamada por parte del ATC o del PM líder se crea un proceso en el conector Path el cual cuando pase la llamada por este modifique el valor del estado correspondiente. (Ver el ejemplo siguiente para una mayor comprensión).

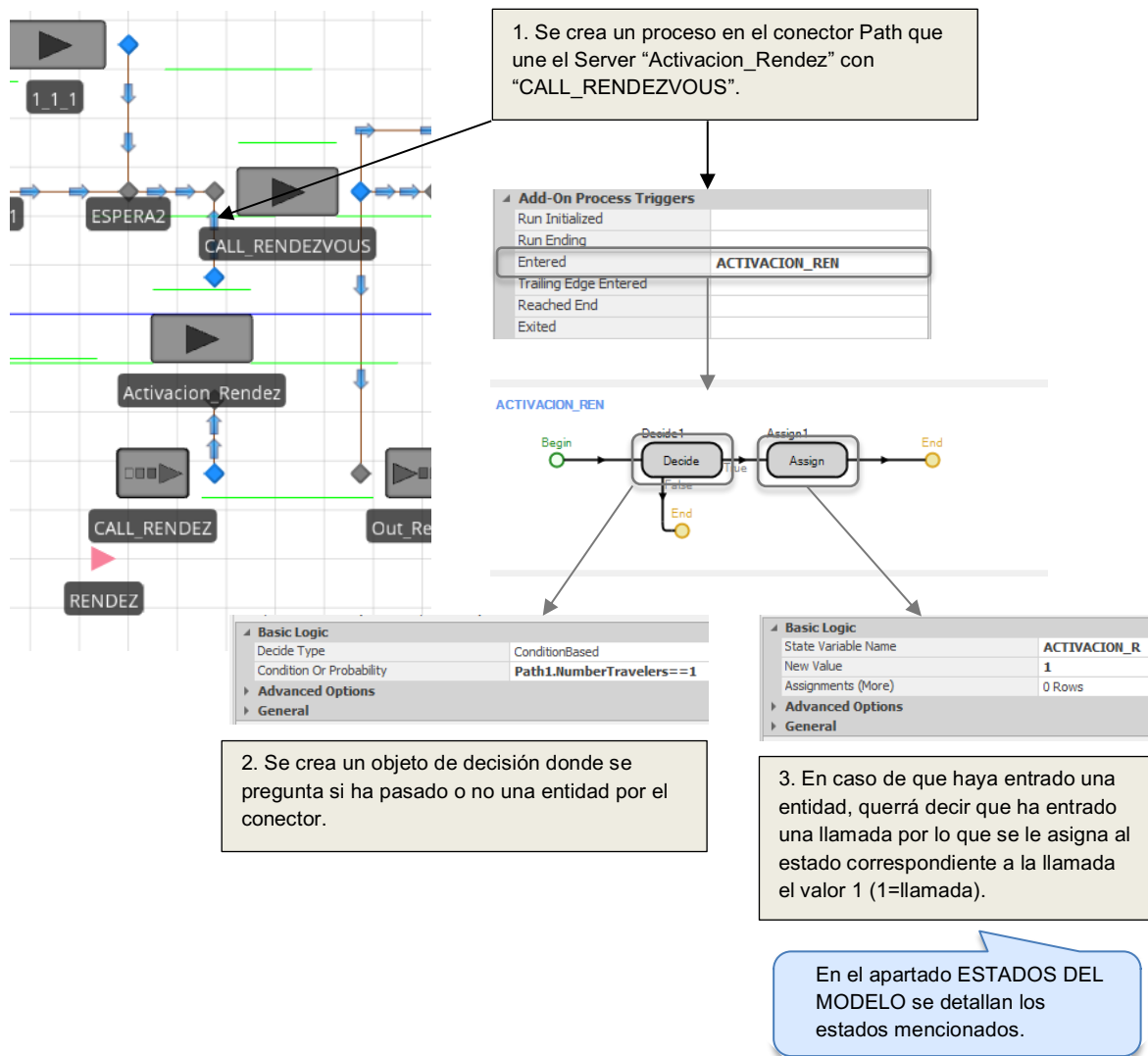


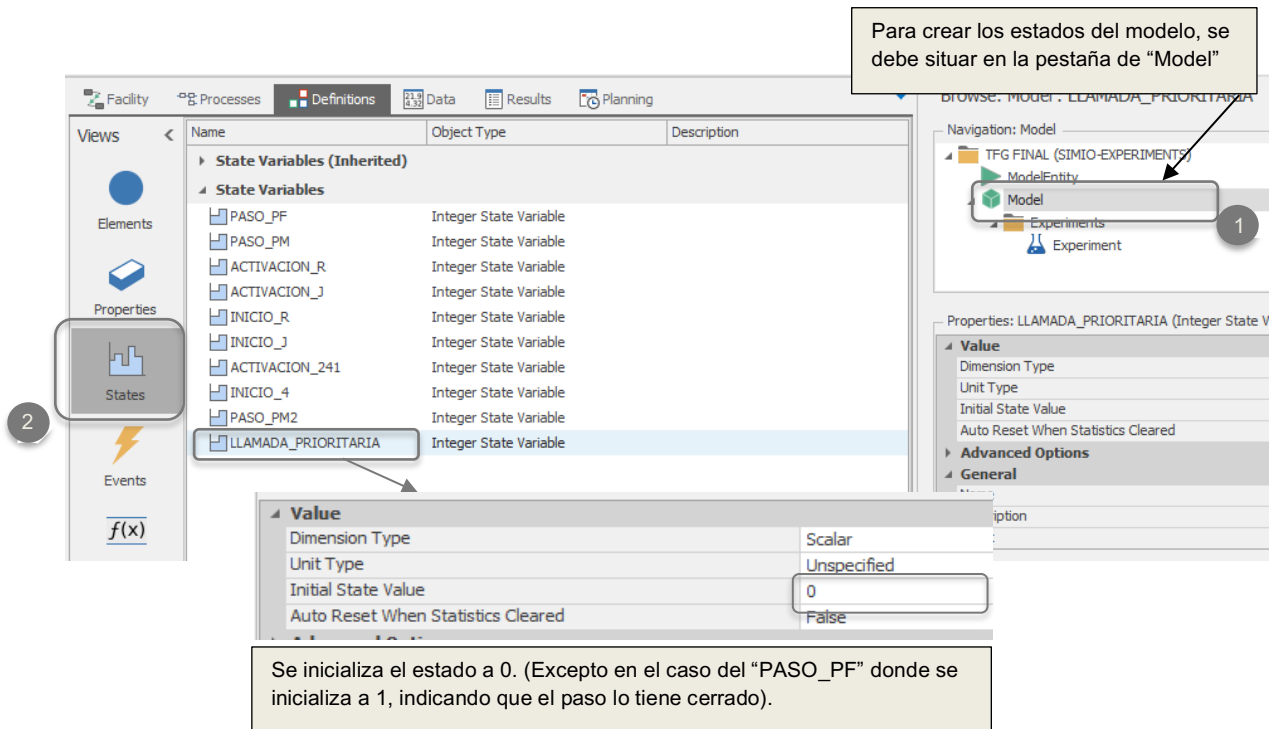
Figura 31. Construcción del proceso de decisión y asignación de estado (II) [31].

<sup>31</sup> Imagen de creación propia con el uso del software Simio.



## 2.5. ESTADOS DEL MODELO

Tanto en las entidades como en el propio modelo se crean unos estados que permiten asignar unas características. Los estados creados en el modelo son los siguientes:



Los estados del modelo que se construyen son los siguientes:

**PASO\_PF:** Indica si el paso del PF está abierto (=0) o cerrado (=1).

**PASO\_PM:** Indica si el paso del PM está abierto (=0) o cerrado (=1).

**ACTIVACION\_R:** Indica si se ha recibido la llamada o no por parte del ATC en el proceso Rendez-Vous. (=0, no se ha recibido; =1, sí se ha recibido).

**ACTIVACIÓN\_J:** Tiene la misma función que el estado anterior pero referente al proceso Joint-UP.

**ACTIVACIÓN\_241:** Indica si se ha recibido la llamada por parte del PM líder en el proceso Formation Keeping. (=0, no se ha recibido; =1, sí se ha recibido).

**INICIO\_R:** Indica que las entidades que realizan el proceso Rendez-Vous están o no disponibles para ello. (=0, no están disponibles; =1 sí están disponibles).

**INICIO\_J:** El objetivo es el mismo que el estado anterior, pero haciendo referencia al proceso Joint-UP.

**INICIO\_4:** Al igual que el anterior, pero para realizar el Formation Keeping.

**PASO\_PM2:** Indica si el paso del PM líder está abierto (=0) o no (=1).

**LLAMADA\_PRIORITARIA:** Indica si existe una llamada que debe ser atendida con prioridad o no. (=0, no hay ninguna llamada; =1, sí existe una llamada para atender).

Figura 32. Construcción de los estados del modelo [32].

<sup>32</sup> Imagen de creación propia con el uso del software Simio.

## 2.6. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

Un objetivo del proyecto era realizar un experimento para observar distintos escenarios y buscar soluciones óptimas al realizar las tareas de los pilotos durante un vuelo en formación. Simio ofrece la posibilidad de estudiar distintos casos y observar los resultados para analizar y llegar a una conclusión, sirviendo de recurso para la toma de decisions. A continuación, se presenta la creación de dicho experimento con los resultados obtenidos una vez realizada la simulación.

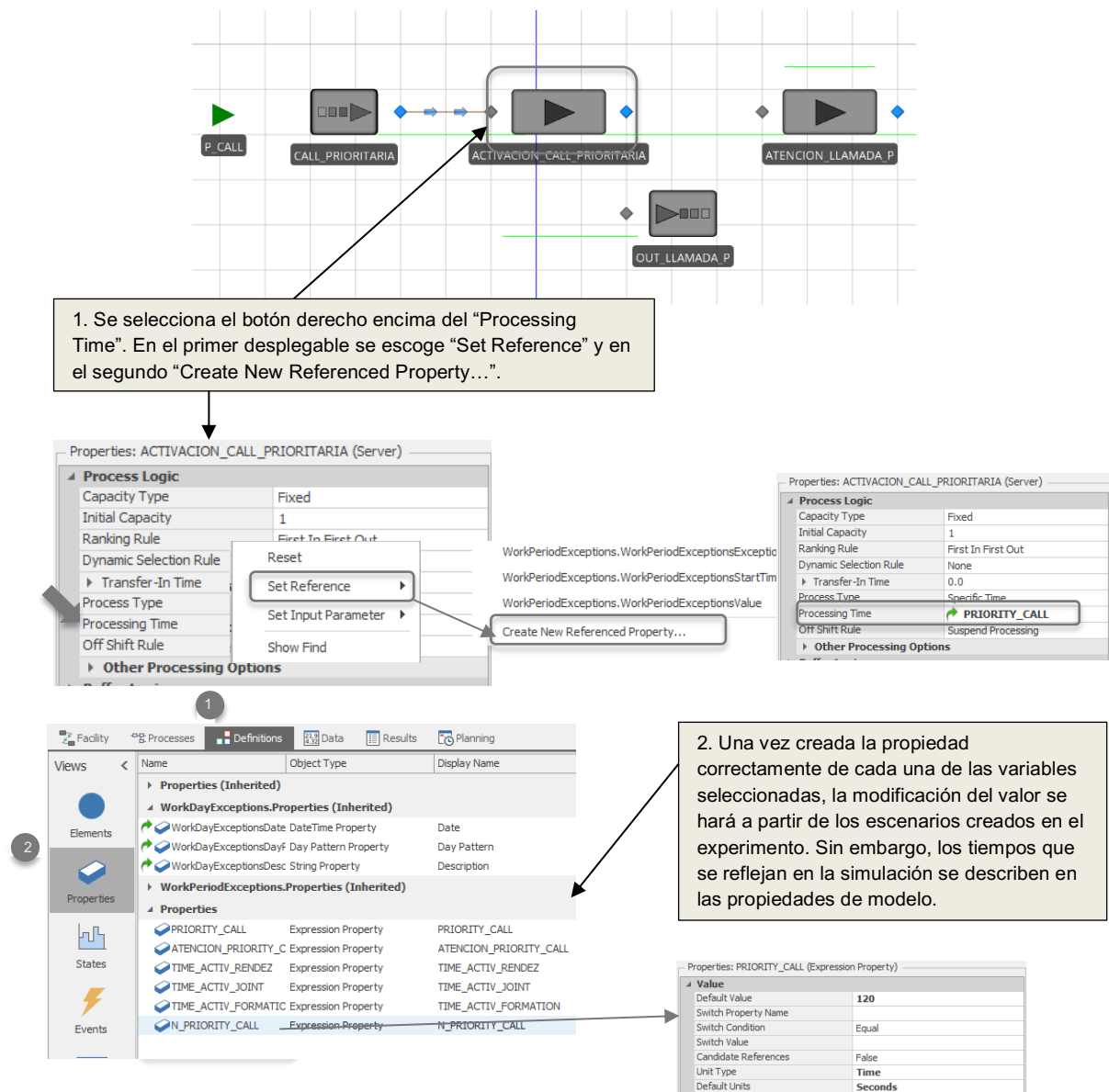
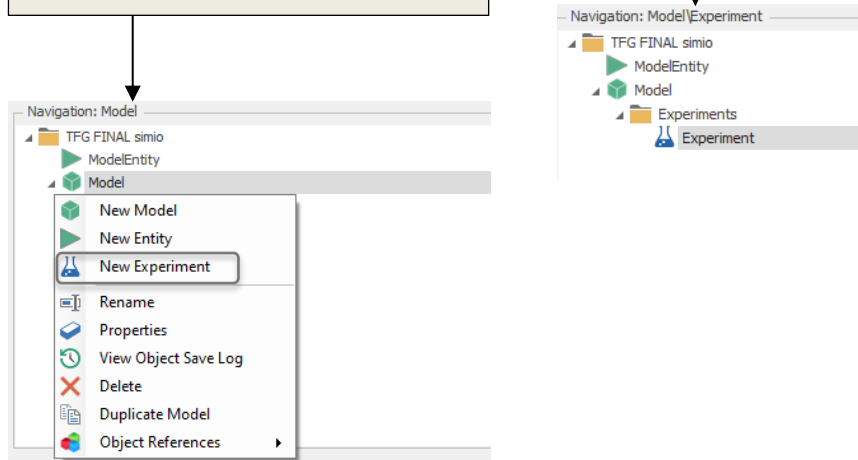


Figura 33. Construcción de un experimento (I) [33].

33 Imagen de creación propia con el uso del software Simio.

3. Para la creación de un nuevo experimento se selecciona el botón derecho encima de la pestaña "Model" y seguidamente "New Experiment"

4. Para ver el experimento se selecciona la nueva pestaña del menú "Experiment"



El experimento se divide en dos partes. La parte azulada hace referencia a las propiedades creadas anteriormente y la parte naranja son los resultados que el usuario desea analizar para tomar una decisión.

| Design                              |   |        |          |              |                         |                                  |                             |                            |                                |                 | Response Results |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Pivot Grid |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Reports |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Dashboard Reports |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Input Analysis |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|-------------------------------------|---|--------|----------|--------------|-------------------------|----------------------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------------------|-----------------|------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|---------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|-------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|----------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| Scenario                            |   |        |          | Replications |                         | Controls                         |                             |                            |                                |                 |                  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |            |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Name  | Status | Required | Completed    | PRIORITY_CALL (Seconds) | ATENCION_PRIORITY_CALL (Seconds) | TIME_ACTVY_RENDEZ (Seconds) | TIME_ACTVY_JOINT (Seconds) | TIME_ACTVY_FORMATION (Seconds) | N_PRIORITY_CALL |                  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |            |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ▶                                   | <input checked="" type="checkbox"/> Scenario1 | Idle   | 10       | 0 of 10      | 0                       | 0                                | 300                         | 600                        | 900                            | 0               |                  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |            |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                     | <input checked="" type="checkbox"/> Scenario2 | Idle   | 10       | 0 of 10      | 120                     | 30                               | 60                          | 214                        | 324                            | 1               |                  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |            |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                     | <input checked="" type="checkbox"/> Scenario3 | Idle   | 10       | 0 of 10      | 0                       | 0                                | 45                          | 150                        | 250                            | 0               |                  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |            |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                     | <input checked="" type="checkbox"/> Scenario4 | Idle   | 10       | 0 of 10      | 120                     | 30                               | 60                          | 214                        | 324                            | 3               |                  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |            |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                     | <input checked="" type="checkbox"/> Scenario5 | Idle   | 10       | 0 of 10      | 300                     | 60                               | 200                         | 214                        | 324                            | 1               |                  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |            |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                     | <input checked="" type="checkbox"/> Scenario6 | Idle   | 10       | 0 of 10      | 0                       | 0                                | 20                          | 50                         | 120                            | 0               |                  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |            |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                     | <input checked="" type="checkbox"/> Scenario7 | Idle   | 10       | 0 of 10      | 120                     | 30                               | 60                          | 214                        | 324                            | 0               |                  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |            |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| *                                   |   |        |          |              |                         |                                  |                             |                            |                                |                 |                  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |            |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

[illegible]

Properties: TIME\_PF (Response)

**General**

|               |   |
|---------------|---|
| Name          | TIME_PF                                   |
| Display Name  | TIME_PF                                   |
| Description   |   |
| Expression    | PILOTO_PF.Population.TimeInSystem.Maximum |
| Unit Type     | Time                                      |
| Display Units | Minutes                                   |
| Objective     |   |
| Lower Bound   |   |
| Upper Bound   | None                                      |

5. Para la creación de los resultados se selecciona la opción "Add Response"

6. Se indican las expresiones según el resultado que se quiera obtener.

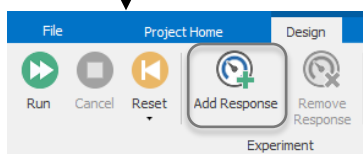


Figura 34. Construcción de un experimento (II) [34].

<sup>34</sup> Imagen de creación propia con el uso del software Simio.

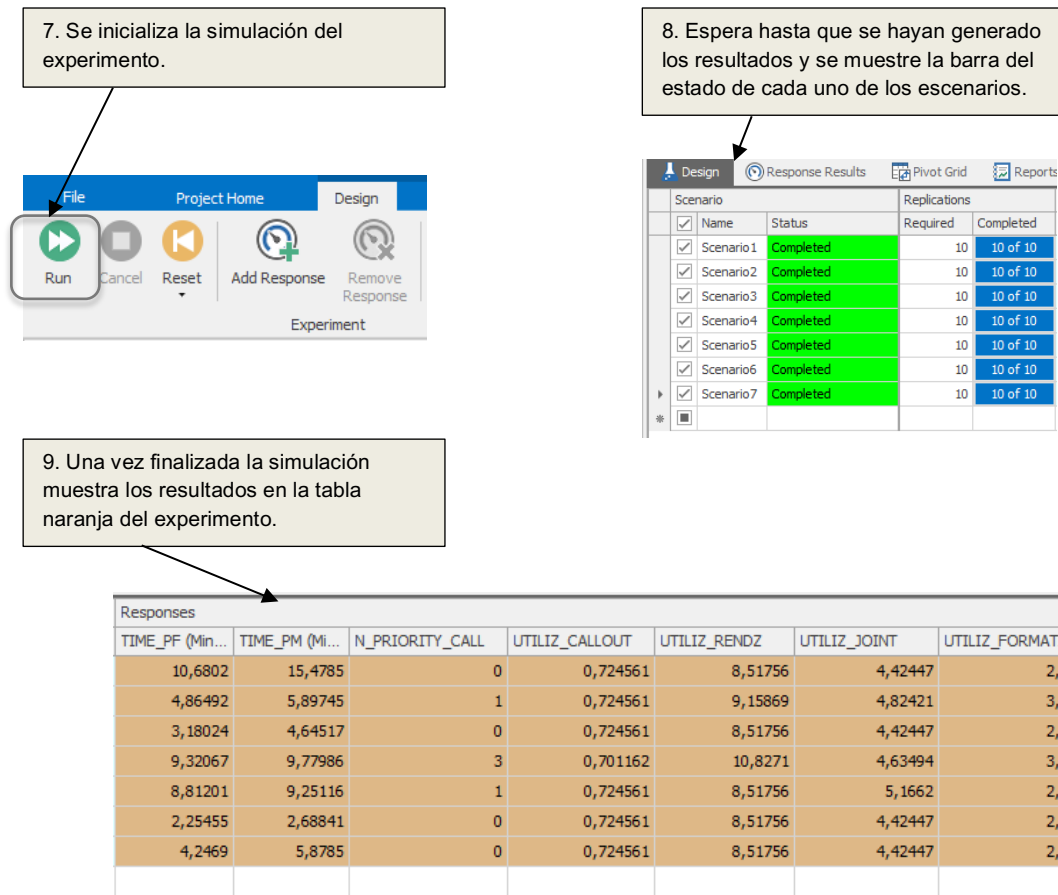


Figura 35. Construcción de un experimento (III) [35].

Por otra parte, si en vez de simular el experimento simulamos el modelo, obtenemos una tabla como la siguiente que muestra los resultados sujetos a cada objeto del modelo.

<sup>35</sup> Imagen de creación propia con el uso del software Simio.

| Processes Definitions Data Results Planning |             |              |            |                 |                 |               |
|---|-------------|--------------|------------|-----------------|-----------------|---------------|
| Drop Filter Fields Here                     |             |              |            |                 |                 |               |
| Average                                     |             |              |            |                 |                 |               |
| Object Type                                 | Object Name | Data Source  | Category   | Data Item       | Statistic       | Average Total |
| ModelEntity                                 | JOINT       | [Population] | Content    | NumberInSystem  | Average         | 0,0028        |
|   |             |              |            |                 | Maximum         | 1,0000        |
|   |             |              | FlowTime   | TimeInSystem    | Average (Hou... | 0,0666        |
|   |             |              |            |                 | Maximum (Ho...  | 0,0666        |
|   |             |              |            |                 | Minimum (Hou... | 0,0666        |
|   |             |              |            |                 | Observations    | 1,0000        |
|   | P_CALL      | [Population] | Throughput | NumberCreated   | Total           | 1,0000        |
|   |             |              |            | NumberDestroyed | Total           | 1,0000        |
|   |             |              | Content    | NumberInSystem  | Average         | 0,0014        |
|   |             |              |            |                 | Maximum         | 1,0000        |
|   |             |              | FlowTime   | TimeInSystem    | Average (Hou... | 0,0338        |
|   |             |              |            |                 | Maximum (Ho...  | 0,0338        |
|   |             |              |            |                 | Minimum (Hou... | 0,0338        |
|   |             |              | Throughput | NumberCreated   | Total           | 1,0000        |
|   |             |              |            | NumberDestroyed | Total           | 1,0000        |

Figura 36. Tabla de resultados del modelo (I) [36].

|        |       |              |               |                      |                 |         |
|--------|-------|--------------|---------------|----------------------|-----------------|---------|
| Path   | Path1 | [Travelers]  | Content       | NumberOnLink         | Average         | 0,0000  |
|        |       |              |               |                      | Maximum         | 1,0000  |
|        |       |              | FlowTime      | TimeOnLink           | Average (Hou... | 0,0003  |
|        |       |              |               |                      | Maximum (Ho...  | 0,0003  |
|        |       |              |               |                      | Minimum (Hou... | 0,0003  |
|        |       |              | Throughput    | NumberEntered        | Total           | 1,0000  |
|        |       |              |               | NumberExited         | Total           | 1,0000  |
| Server | 1_1_1 | [Resource]   | Capacity      | ScheduledUtilization | Percent         | 0,0032  |
|        |       |              |               | UnitsAllocated       | Total           | 1,0000  |
|        |       |              |               | UnitsScheduled       | Average         | 1,0000  |
|        |       |              |               | UnitsScheduled       | Maximum         | 1,0000  |
|        |       |              | UnitsUtilized | UnitsUtilized        | Average         | 0,0000  |
|        |       |              |               | UnitsUtilized        | Maximum         | 1,0000  |
|        |       |              | ResourceState | TimeProcessing       | Average (Hou... | 0,0008  |
|        |       |              |               |                      | Occurrences     | 1,0000  |
|        |       |              |               |                      | Percent         | 0,0032  |
|        |       |              |               |                      | Total (Hours)   | 0,0008  |
|        |       |              | TimeStarved   | TimeStarved          | Average (Hou... | 11,9996 |
|        |       |              |               |                      | Occurrences     | 2,0000  |
|        |       |              |               |                      | Percent         | 99,9968 |
|        |       |              |               |                      | Total (Hours)   | 23,9992 |
|        |       | InputBuffer  | Throughput    | NumberEntered        | Total           | 1,0000  |
|        |       |              |               | NumberExited         | Total           | 1,0000  |
|        |       | OutputBuffer | Throughput    | NumberEntered        | Total           | 1,0000  |
|        |       |              |               | NumberExited         | Total           | 1,0000  |
|        |       | Processing   | Content       | NumberInStation      | Average         | 0,0000  |
|        |       |              |               |                      | Maximum         | 1,0000  |
|        |       |              | HoldingTime   | TimeInStation        | Average (Hou... | 0,0008  |
|        |       |              |               |                      | Maximum (Ho...  | 0,0008  |
|        |       |              |               |                      | Minimum (Hou... | 0,0008  |
|        |       |              | Throughput    | NumberEntered        | Total           | 1,0000  |
|        |       |              |               | NumberExited         | Total           | 1,0000  |

Figura 37. Tabla de resultados del modelo (II) [37]

<sup>36</sup> Imagen de creación propia con el uso del software Simio.

<sup>37</sup> Imagen de creación propia con el uso del software Simio

|      |                |                     |            |               |                 |        |
|------|----------------|---------------------|------------|---------------|-----------------|--------|
| Sink | FIN_PROCESO_PF | [DestroyedEntities] | FlowTime   | TimeInSystem  | Average (Hou... | 0,0762 |
|      |                |                     |            |               | Maximum (Ho...  | 0,0762 |
|      |                |                     |            |               | Minimum (Hou... | 0,0762 |
|      |                |                     |            |               | Observations    | 1,0000 |
|      |                | InputBuffer         | Throughput | NumberEntered | Total           | 1,0000 |
|      |                |                     |            | NumberExited  | Total           | 1,0000 |
|      |                |                     |            |               |                 |        |
|      |                |                     |            |               |                 |        |
|      | FIN_PROCESO_PM | [DestroyedEntities] | FlowTime   | TimeInSystem  | Average (Hou... | 0,0962 |
|      |                |                     |            |               | Maximum (Ho...  | 0,0962 |
|      |                |                     |            |               | Minimum (Hou... | 0,0962 |
|      |                |                     |            |               | Observations    | 1,0000 |
|      |                | InputBuffer         | Throughput | NumberEntered | Total           | 1,0000 |
|      |                |                     |            | NumberExited  | Total           | 1,0000 |
|      |                |                     |            |               |                 |        |
|      |                |                     |            |               |                 |        |
|      | Out_Joint      | [DestroyedEntities] | FlowTime   | TimeInSystem  | Average (Hou... | 0,0666 |
|      |                |                     |            |               | Maximum (Ho...  | 0,0666 |
|      |                |                     |            |               | Minimum (Hou... | 0,0666 |
|      |                |                     |            |               | Observations    | 1,0000 |
|      |                | InputBuffer         | Throughput | NumberEntered | Total           | 1,0000 |
|      |                |                     |            | NumberExited  | Total           | 1,0000 |
|      |                |                     |            |               |                 |        |
|      |                |                     |            |               |                 |        |
|      | OUT_LLAMADA_P  | [DestroyedEntities] | FlowTime   | TimeInSystem  | Average (Hou... | 0,0338 |
|      |                |                     |            |               | Maximum (Ho...  | 0,0338 |
|      |                |                     |            |               | Minimum (Hou... | 0,0338 |
|      |                |                     |            |               | Observations    | 1,0000 |
|      |                | InputBuffer         | Throughput | NumberEntered | Total           | 1,0000 |
|      |                |                     |            | NumberExited  | Total           | 1,0000 |
|      |                |                     |            |               |                 |        |
|      |                |                     |            |               |                 |        |
|      | OUT_PM_LEADER  | [DestroyedEntities] | FlowTime   | TimeInSystem  | Average (Hou... | 0,0934 |
|      |                |                     |            |               | Maximum (Ho...  | 0,0934 |
|      |                |                     |            |               | Minimum (Hou... | 0,0934 |
|      |                |                     |            |               |                 |        |

Figura 38. Tabla de resultados del modelo (III) [38]

|        |                  |              |             |                 |                 |        |
|--------|------------------|--------------|-------------|-----------------|-----------------|--------|
| Source | CALL_JOINT       | OutputBuffer | Throughput  | NumberEntered   | Total           | 1,0000 |
|        |                  |              |             | NumberExited    | Total           | 1,0000 |
|        |                  | Processing   | Throughput  | NumberEntered   | Total           | 1,0000 |
|        |                  |              |             | NumberExited    | Total           | 1,0000 |
|        | CALL_PRIORITARIA | OutputBuffer | Throughput  | NumberEntered   | Total           | 1,0000 |
|        |                  |              |             | NumberExited    | Total           | 1,0000 |
|        |                  | Processing   | Throughput  | NumberEntered   | Total           | 1,0000 |
|        |                  |              |             | NumberExited    | Total           | 1,0000 |
|        | CALL_RENDEZ      | OutputBuffer | Throughput  | NumberEntered   | Total           | 1,0000 |
|        |                  |              |             | NumberExited    | Total           | 1,0000 |
|        |                  | Processing   | Throughput  | NumberEntered   | Total           | 1,0000 |
|        |                  |              |             | NumberExited    | Total           | 1,0000 |
|        | ENTRADA_CALL_241 | OutputBuffer | Throughput  | NumberEntered   | Total           | 1,0000 |
|        |                  |              |             | NumberExited    | Total           | 1,0000 |
|        |                  | Processing   | Throughput  | NumberEntered   | Total           | 1,0000 |
|        |                  |              |             | NumberExited    | Total           | 1,0000 |
|        | PF               | OutputBuffer | Content     | NumberInStation | Average         | 0,0000 |
|        |                  |              |             |                 | Maximum         | 1,0000 |
|        |                  |              | HoldingTime | TimeInStation   | Average (Hou... | 0,0012 |
|        |                  |              |             |                 | Maximum (Ho...  | 0,0012 |
|        |                  |              |             |                 | Minimum (Hou... | 0,0012 |
|        |                  | Throughput   |             | NumberEntered   | Total           | 1,0000 |
|        |                  |              |             | NumberExited    | Total           | 1,0000 |
|        |                  |              |             |                 |                 |        |
|        |                  |              |             |                 |                 |        |
|        | PM               | OutputBuffer | Throughput  | NumberEntered   | Total           | 1,0000 |
|        |                  |              |             | NumberExited    | Total           | 1,0000 |
|        |                  | Processing   | Throughput  | NumberEntered   | Total           | 1,0000 |
|        |                  |              |             | NumberExited    | Total           | 1,0000 |

Figura 39. Tabla de resultados del modelo (IV) [39]

<sup>38</sup> Imagen de creación propia con el uso del software Simio

<sup>39</sup> Imagen de creación propia con el uso del software Simio

\*La simulación del modelo que genera estos resultados toma los valores asignados en las propiedades creadas anteriormente.

## 2.7. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Tras elaborar el modelo y el experimento, se ha ejecutado y generado resultados que pueden resultar de gran interés para estudiar en que procesos habría que invertir en investigación.

Las variables de control que se han considerado son las siguientes:

| Design   Response Results   Pivot Grid   Reports   Dashboard Reports   Input Analysis |            |        |              |           |                         |                                  |                             |                            |                                |                 |
|---|------------|--------|--------------|-----------|-------------------------|----------------------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------------------|-----------------|
| Scenario  |            |        | Replications |           | Controls                |                                  |                             |                            |                                |                 |
| ✓   | Name       | Status | Required     | Completed | PRIORITY_CALL (Seconds) | ATENCION_PRIORITY_CALL (Seconds) | TIME_ACTIV_RENDEZ (Seconds) | TIME_ACTIV_JOINT (Seconds) | TIME_ACTIV_FORMATION (Seconds) | N_PRIORITY_CALL |
| ✓   | Scenario 1 | Idle   | 10           | 0 of 10   | 0                       | 0                                | 300                         | 600                        | 900                            | 0               |
| ✓   | Scenario 2 | Idle   | 10           | 0 of 10   | 120                     | 30                               | 60                          | 214                        | 324                            | 1               |
| ✓   | Scenario 3 | Idle   | 10           | 0 of 10   | 0                       | 0                                | 45                          | 150                        | 250                            | 0               |
| ✓   | Scenario 4 | Idle   | 10           | 0 of 10   | 120                     | 30                               | 60                          | 214                        | 324                            | 3               |
| ✓   | Scenario 5 | Idle   | 10           | 0 of 10   | 300                     | 60                               | 200                         | 214                        | 324                            | 1               |
| ✓   | Scenario 6 | Idle   | 10           | 0 of 10   | 0                       | 0                                | 20                          | 50                         | 120                            | 0               |
| ✓   | Scenario 7 | Idle   | 10           | 0 of 10   | 120                     | 30                               | 60                          | 214                        | 324                            | 0               |

Figura 40. Tabla de las variables de control del experimento [40].

### PRIORITY\_CALL:

Se trata del tiempo que tarda en activarse la entidad de la llamada prioritaria, de manera que contra menor sea el tiempo más llamadas habrá que atender durante el proceso y, en consecuencia, mayor será la carga de trabajo del piloto puesto que se le irán acumulando un proceso sobre otro.

### ATENCION\_PRIORITY\_CALL:

Esta variable representa el tiempo que se tarda en atender la llamada prioritaria. Se considera un punto importante puesto que en el caso de tratarse de una advertencia en la que se tuviese que realizar una resolución de conflicto el tiempo sería mayor por lo que retardaría el tiempo de todos los procesos restantes.

<sup>40</sup> Imagen de creación propia con el uso del software Simio

### **TIME\_ACTIV\_RENDEZ:**

Relacionado con la primera variable, se trata del tiempo que tarda en activarse la llamada por parte del ATC en el proceso Rendez-Vous. Contra más tiempo se le asigne más se tardará en realizar dicho proceso y los pilotos deberán mantenerse parados de modo que no estarán amortizando el tiempo.

### **TIME\_ACTIV\_JOINT:**

Es como en el caso anterior, pero controlando el tiempo de activación de la llamada en el proceso Joint-UP.

### **TIME\_ACTIV\_FORMATION:**

En este caso, la variable controla el tiempo en que tarda el PM líder en ponerse en contacto con el PM follower (nuestro caso). El efecto que puede suponer esta variable es el mismo mencionado en el caso anterior.

### **N\_PRIORITY\_CALL:**

Finalmente, se ha considerado como decisiva la variable que controla el número de llamadas prioritarias permitidas para entrar en el sistema. Este factor puede interesar si se quieren estudiar los tiempos sin que entre ninguna llamada u observar que sucede con la entrada de X llamadas.

Por otro lado, los resultados que se han decidido estudiar son los siguientes:

| Responses       |                |                 |                |              |              |                  |
|-----------------|----------------|-----------------|----------------|--------------|--------------|------------------|
| TIME_PF (Min... | TIME_PM (Mi... | N_PRIORITY_CALL | UTILIZ_CALLOUT | UTILIZ_RENDZ | UTILIZ_JOINT | UTILIZ_FORMATION |
|                 |                |                 |                |              |              |                  |
|                 |                |                 |                |              |              |                  |
|                 |                |                 |                |              |              |                  |
|                 |                |                 |                |              |              |                  |

Figura 41. Tabla de resultados del experimento (sin ejecutar) [41].

### **TIME\_PF:**

Se trata del tiempo medio en minutos que esta la entidad PF dentro del sistema.

### **TIME\_PM:**

Se trata del tiempo medio en minutos que esta la entidad PM dentro del sistema.

<sup>41</sup> Imagen de creación propia con el uso del software Simio



### **N\_PRIORITY\_CALL:**

Muestra el número de llamadas prioritarias que se han atendido durante el proceso completo.

### **UTILIZ\_CALLOUT:**

Calcula el tiempo de utilización del proceso CallOut reaching FL, para ello se suma el tiempo de utilización de cada una de las tareas que lo componen.

### **UTILIZ\_RENDZ:**

Calcula el tiempo de utilización del proceso Rendez-Vous, para ello se suma el tiempo de utilización de cada una de las tareas que lo componen.

### **UTILIZ\_JOINT:**

Calcula el tiempo de utilización del proceso Joint-UP para ello se suma el tiempo de utilización de cada una de las tareas que lo componen.

### **UTILIZ\_FORMATION:**

Finalmente, el cálculo del tiempo de utilización del proceso Formation Keeping para ello se suma el tiempo de utilización de cada una de las tareas que lo componen.

Los resultados del experimento obtenidos son los siguientes:

| Responses       |                |                 |                |              |              |                  |
|-----------------|----------------|-----------------|----------------|--------------|--------------|------------------|
| TIME_PF (Min... | TIME_PM (Mi... | N_PRIORITY_CALL | UTILIZ_CALLOUT | UTILIZ_RENDZ | UTILIZ_JOINT | UTILIZ_FORMATION |
| 10,6802         | 15,4785        | 0               | 0,724561       | 8,51756      | 4,42447      | 2,89717          |
| 4,86492         | 5,89745        | 1               | 0,724561       | 9,15869      | 4,82421      | 3,02873          |
| 3,18024         | 4,64517        | 0               | 0,724561       | 8,51756      | 4,42447      | 2,89717          |
| 9,32067         | 9,77986        | 3               | 0,701162       | 10,8271      | 4,63494      | 3,07309          |
| 8,81201         | 9,25116        | 1               | 0,724561       | 8,51756      | 5,1662       | 2,93394          |
| 2,25455         | 2,68841        | 0               | 0,724561       | 8,51756      | 4,42447      | 2,89717          |
| 4,2469          | 5,8785         | 0               | 0,724561       | 8,51756      | 4,42447      | 2,89717          |
|                 |                |                 |                |              |              |                  |

Figura 42. Tabla de resultados del experimento [42].

<sup>42</sup> Imagen de creación propia con el uso del software Simio

Para una mayor comprensión y análisis de los resultados mostrados anteriormente, se elabora un gráfico de sectores que permite observar el proceso con un porcentaje de utilización mayor y que en consecuencia se le dedica más tiempo, por lo que sería un punto clave para la reducción de carga de trabajo del piloto mediante la inclusión de nuevas tecnologías y futuras investigaciones. Así como la diferencia de tiempo de dedicación de cada piloto que permitirá acotar en que puntos es clave esa dedicación de innovación.

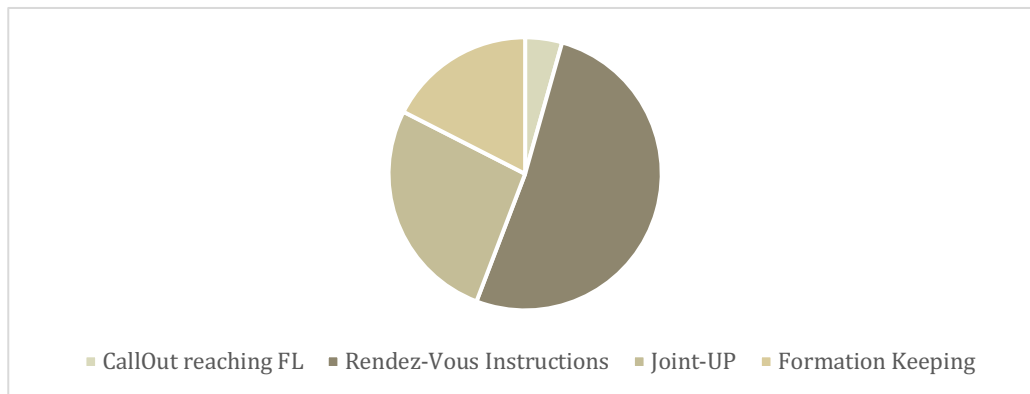


Figura 43. Gráfico nivel de utilización de los procesos del sistema [43].

El gráfico de la Figura 43 representa el porcentaje de utilización de los procesos, donde el que requiere más tiempo de dedicación es el Rendez-Vous Instructions, debido a que se trata de un proceso largo donde especialmente el PF debe realizar muchas tareas, entre otras un cambio de rumbo. Por lo contrario, el proceso de alcance del nivel de vuelo especificado se trata de una tarea corta donde la carga de trabajo para ambos pilotos es menor.

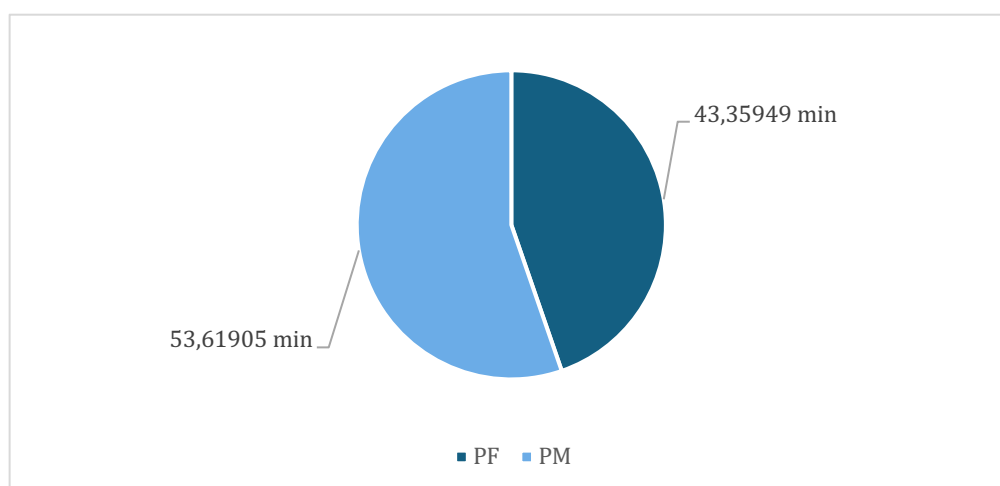


Figura 44. Gráfico tiempo de proceso de las entidades [44].

<sup>43</sup> Gráfico de creación propia.

<sup>44</sup> Gráfico de creación propia

Con respecto al gráfico de la

Figura 44, se representa el tiempo de proceso de las entidades dentro del modelo. En él, se observa como el PM tiene un tiempo de dedicación de 10 minutos mayor debido a que las tareas de Formation Keeping van asociadas únicamente a ese piloto.

Finalmente, es de gran interés estudiar el efecto que se produce al recibir una llamada de emergencia. A continuación, se muestra un gráfico de barras donde se puede observar cual es la variación de tiempo con la entrada de una llamada y manteniendo los mismos tiempos en las variables de control (se estudia únicamente el proceso en el que entra la llamada, en este caso Rendez-Vous).

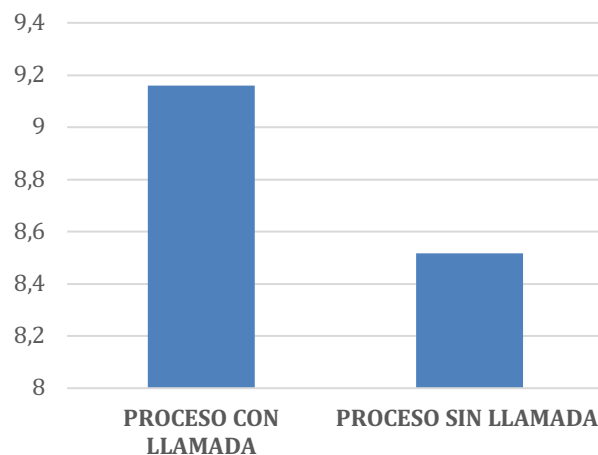


Figura 45. Tiempo de utilización del proceso Rendez-Vous con y sin llamada prioritaria [45]

Tal y como se observa, la llamada de emergencia por parte del ATC entra en el proceso Redez-Vous y en consecuencia se incrementa el tiempo de utilización de este. En el caso presentado, el tiempo de atención de la llamada es bajo y la diferencia de tiempo no es notoria, pero pueden presentarse casos donde la atención requiera un mayo tiempo y esfuerzo, originando un incremento de tiempo mayor en el proceso.

Las soluciones que se proponen a investigar estudiando los resultados son los siguientes:

<sup>45</sup> Gráfico de creación propia.

### **Solución #1: La simulación como una herramienta de entrenamiento.**

Simular las tareas de los pilotos puede resultar una herramienta útil para ellos al formarse, ya que permite perfeccionar el comportamiento frente a las actividades para aumentar la eficiencia y reducir el estrés causado por la carga de trabajo presente en un intervalo de tiempo reducido.

La aplicación de esta solución consistiría en que los pilotos realizaran un entrenamiento con la simulación creada, de forma que con el paso de tiempo el estrés que supone realizar procesos sea menor.

Observando los resultados del modelo creado en este proyecto, la herramienta de soporte estaría interesante aplicarla en el proceso donde los pilotos dedican más tiempo (Rendez-Vous) y analizar si causa resultados positivos, para en un futuro poder aplicar dicha solución a cualquier proceso con sobre carga de trabajo.

### **Solución #2: Coordinación y comunicación entre tripulantes.**

Durante la efectuación de las tareas existe una comunicación y coordinación entre los distintos elementos que participan en la actividad. Este se considera un punto crítico puesto que no es posible realizar un vuelo si no existen estos dos factores.

Para iniciar los procesos Rendez-Vous y Joint-UP, es necesario haber recibido una instrucción por parte del ATC. Sin embargo, el ATC únicamente puede atender una sola aeronave en un mismo instante de tiempo, lo que puede causar retrasos en la ejecución de las tareas. Esto se debe a que, hasta que el ATC no esté disponible, no contactará con los pilotos.

Para gestionar el tiempo de dedicación del ATC a cada aeronave, se propone repartir control entre más personal de ATC, de modo que el tiempo de espera de los pilotos para iniciar las tareas sea menor y la carga de trabajo no se acumule. Por lo cual, la simulación puede resultar una herramienta útil que permite estudiar el impacto que supone un aumento de personal de control de tránsito aéreo, así como la optimización de los recursos disponibles.

### **Solución #3: Optimización de horarios de trabajo**

Los pilotos están en constante alerta y verificación durante el vuelo, de manera que afecta a la eficiencia a la hora de trabajar. La repartición de las tareas en el espacio tiempo puede resultar una solución para disminuir el estrés. Por ello, con la simulación se puede hacer un estudio sobre los horarios de trabajo de los pilotos para analizar el horario en el que la eficiencia es mayor y el estrés junto con la carga de trabajo menor.

### **Solución #4: Simulación de escenarios de emergencia**

Por último, un punto crítico del modelo, debido a que causa un aumento del tiempo de ejecución, es la atención de la llamada de emergencia que emite el ATC y que debe ser atendida con prioridad por parte de los pilotos.

Estas llamadas no son tareas usuales, por lo que el tiempo de resolución por parte del piloto es mayor al que realmente debería ser. Con ese propósito, la simulación permite entrenar a los pilotos frente a casos de emergencia para actuar de manera rápida y segura.

### **CAPÍTULO 3: CONCLUSIONES**

---

En el presente proyecto se ha desarrollado una simulación de las tareas de los pilotos en la cabina de un A320 durante un vuelo en formación. Para el alcance de dicho objetivo, se ha usado el software Simio, que permite modelar sistemas precisos ofreciendo herramientas intuitivas.

La reproducción precisa del modelo nos ha permitido estudiar cómo se desarrollan las actividades en distintos escenarios creados. Además de observar los factores que afectan a la eficiencia y carga de trabajo del piloto, como la complejidad de las actividades, la cantidad de información que procesan o bien la comunicación con los otros elementos del sistema.

Otro factor que se ha detectado con el estudio es el impacto de las llamadas por parte del ATC que requieren de una atención prioritaria de los pilotos. Estas llamadas pueden informar de incidentes junto con órdenes de resolución, por lo que la carga de trabajo y el estrés del piloto aumentan a causa de ser situaciones no usuales para ellos y no tener la misma capacidad de solución.

Para aportar nuevas soluciones que ayuden a la reducción de la carga de trabajo, así como a la optimización de recursos e implantación de nuevas tecnologías, la simulación es un concepto que ofrece la capacidad de reproducción de sistemas, junto con escenarios que permiten valorar y analizar los efectos sujetos a los cambios implantados en la ejecución de las actividades de los pilotos durante el vuelo.

Implementar nuevas tecnologías que permitan la automatización de ciertas tareas puede reducir la carga de trabajo, así como repartir las tareas para aumentar la efectividad del desarrollo.

De cara a futuros estudios relacionados con la reducción del estrés y carga de trabajo de los pilotos, resulta atrayente la investigación asociada con la integración de nuevas tecnologías como la inteligencia artificial. De modo que el presente proyecto sirva de base para el desarrollo completo de la herramienta de simulación.



## BIBLIOGRAFÍA

- 
- [1] Airbus A320. (2024, 22 febrero). Wikipedia. Recuperado 1 de marzo de 2024, de [https://es.wikipedia.org/wiki/Airbus\\_A320](https://es.wikipedia.org/wiki/Airbus_A320)
- [2] A320ceo Setting single-aisle standards. (2024). Airbus. Recuperado 12 de febrero de 2024, de <https://aircraft.airbus.com/en/aircraft/a320-the-most-successful-aircraft-family-ever/a320ceo>
- [3] Vuelo en formación. (2016). Federación de Deportes Aéreos. Recuperado 22 de marzo de 2024, de <http://www.fdacv.com/publicaciones/vueloenformacion.pdf>
- [4] Distribuciones de probabilidad. (2014, octubre). Sergas. Recuperado 6 de marzo de 2024, de [https://www.sergas.es/Saude-publica/Documents/1899/Ayuda\\_Epidat\\_4\\_Distribuciones\\_de\\_probabilidad\\_Octubre2014.pdf](https://www.sergas.es/Saude-publica/Documents/1899/Ayuda_Epidat_4_Distribuciones_de_probabilidad_Octubre2014.pdf)
- [5] Distribuciones de probabilidad. (2019). Simulemos. Recuperado 6 de marzo de 2024, de <https://simulemos.cl/books/simio/page/distribuciones-de-probabilidad>
- [6] Flight Control Unit. (2024). FlyByWire Simulations Documentation. Recuperado 13 de marzo de 2024, de <https://docs.flybywiresim.com/pilots-corner/a32nx-briefing/flight-deck/glareshield/fcu/#appr>
- Construcción de la cabina del piloto. La unidad de control de vuelo. (2017, 16 febrero). Key.Aero. Recuperado 13 de marzo de 2024, de <https://www.key.aero/es/article/construccion-de-la-cabina#:~:text=La%20FCU%20o%20Unidad%20de,corazón%20de%20cualquier%20avión%20moderno.>
- [7] CPDLC & DLC. (2024). IVAO AERO. Recuperado 13 de marzo de 2024, de <https://es.ivaio.aero/?module=atc/ivac2&page=cpdlc>
- [8] MCDU Airbus A320 sobre mesa. (s. f.). A320 FCU. Recuperado 29 de abril de 2024, de <https://a320fcu.com/producto/mcdu-airbus-a320-sobre-mesa/>



[9] Sistema de comunicaciones Airbus A320 Fam ATA 23 VHF, HF, Como Comunicarse con la TORRE de CONTROL. (2022). [Vídeo]. Youtube. Recuperado 10 de mayo de 2024, de <https://www.youtube.com/watch?v=uF0XrwsVGC8>

[10] Uso del transponder. (2018). [Vídeo]. Youtube. Recuperado 10 de mayo de 2024, de <https://www.youtube.com/watch?v=KTDspFoiQ2g>

[11] Introducción a la simulación. (s. f.). Biblus. Recuperado 14 de marzo de 2024, de <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/11005/fichero/2+introducción+a+la+simulación.pdf>

[12] Simulación de eventos discretos. (s. f.). Biblus. Recuperado 14 de marzo de 2024, de <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/11311/fichero/Generación+de+un+modelo+de+simulación+virtual+aplicado+a+una+línea+de+fabricación+aeronáutica+%252F3+Simulación+de+eventos+discretos.pdf>

[13] Simio and Simulation - Modeling, Analysis, Applications - 6th Edition. (2021, 1 agosto). Simio. Recuperado 5 de marzo de 2024, de <https://textbook.simio.com/SASMAA/index.html>

[14] Tipo de simulaciones. (s. f.). LABSAG. Recuperado 6 de junio de 2024, de <https://labsag.co.uk/blog/index.php/2021/08/16/tipos-de-simulaciones/>

[15] THE STORY OF SIMIO. (s. f.). Simio. Recuperado 26 de febrero de 2024, de <https://www.simio.com/about-simio/>

Simulación - Qué es, utilidad, definición y concepto. (2022, 7 marzo). Definición.de. Recuperado 27 de febrero de 2024, de <https://definicion.de/simulacion/>

[16] Simio Simulación Software para simulación y planificación de operaciones. (s. f.). Simio. Recuperado 27 de febrero de 2024, de <https://www.simio-simulacion.es>

[17] Standard Library. (2019). Simulemos. Recuperado 23 de marzo de 2024, de <https://simulemos.cl/books/simio/chapter/standard-library>

[18] Ventajas y desventajas. (s. f.). Simulación 2. Recuperado 10 de junio de 2024, de <https://simulacion2.wordpress.com/ventajas-y-desventajas/>

Simulación de procesos. (2011). Blogspot. Recuperado 10 de junio de 2024, de <http://simulacion2011.blogspot.com/2011/02/ventajas-y-desventajas-de-la-simulacion.html>

