



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Modelado de procesos industriales mediante
simulación de eventos discretos: Aplicación a una
célula de inyección

Discrete Event Simulation for Industrial Process
Modeling: Application to an Injection Molding Cell

Autor

Sergio Pérez Marín

Director/es

Enrique Teruel Doñate
Víctor Abizanda Moliner

Grado en Ingeniería Electrónica y Automática

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2025

RESUMEN

Este Trabajo de Fin de Grado presenta el desarrollo y validación de un modelo de simulación de eventos discretos para una célula de producción por inyección de plásticos, utilizando el software libre JaamSim. El objetivo principal ha sido evaluar de forma precisa el comportamiento de una inyectora con sus moldes asociados, operarios, robots, cintas y eventos de fallo, a fin de predecir producción, piezas malas y eficiencia ante distintos escenarios.

El modelo está estructurado en submodelos independientes por molde, integrando tiempos de ciclo, operarios, embalaje, lógica de cambio de molde y modos de fallo representados mediante distribuciones estadísticas. Para cada entidad (pieza) se tratan variables de estado, económicas y de calidad que permiten generar *KPIs* industriales y económicos detallados.

Se han ejecutado 100 réplicas del modelo con semillas de números aleatorios distintas, simulando un mes completo de producción para cada molde. Los resultados se han contrastado con los datos reales del mes de abril en planta, analizando diferencias en disponibilidad, scrap, rendimiento y eficiencia. Los indicadores muestran una alta concordancia entre piezas buenas y tiempos trabajados, con desviaciones explicables por paros no modelados o condiciones excepcionales.

El modelo demuestra su utilidad como herramienta de análisis para la toma de decisiones, evaluación de mejoras y soporte al planificador de producción, abriendo la posibilidad de extenderse a otros procesos, simular escenarios logísticos, realizar simulaciones de cronometrajes industriales o justificar inversiones futuras.

SUMMARY

The Final Degree Project presents the development and validation of discrete event simulation model for a plastic injection production cell, using the open-source software JaamSim. The main objective was to accurately evaluate the behavior of an injection molding machine with its associated molds, operators, robots, conveyors, and failure modes, to predict production, scrap, and efficiency under various scenarios.

The model is structured into independent submodels for each mold incorporating cycle times, operators, packaging, mold change logic, and failure events represented through statistical distributions. Each entity (part) tracks state variables, economic data, and quality metrics, enabling the calculation of detailed industrial and economic *KPIs*.

A total of 100 simulation runs were performed using different random seeds, representing a full month of production for each mold. The results were compared to real plant data from April, analyzing differences in availability, scrap rate, performance and efficiency. The *KPIs* show high consistency in good parts produced and effective working time, with deviations explained by unmodeled downtimes or exceptional conditions.

The model proves to be a valuable analytical tool for decision-making, performance improvement assessment, and support for production planning. It also opens the door to being extended to other processes, simulating logistics scenarios, or supporting future investment justification.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	9
2	MODELADO DE LA INYECTORA INDUSTRIAL EN JAAMSIM	10
2.1	Definición del problema y enfoque	10
2.2	Cambio de paradigma: modelado por molde	12
2.3	Objetivo principal de la simulación	12
2.4	Obtención y procesamiento de datos	13
2.4.1	Tipos de datos necesarios para el modelo	13
2.4.2	Fuentes y criterios de selección	13
2.4.3	Tratamiento y normalización de datos	14
2.4.4	Cálculo de parámetros estadísticos	14
2.4.5	Estimaciones y datos no disponibles	15
2.4.6	Estructura de los archivos de entrada para JaamSim	16
2.5	Explicación del flujo del proceso	17
2.5.1	Transición entre moldes: cambio estándar, cambio desde parada y precalentamiento	17
2.5.2	Gestión de turnos	18
2.5.3	Flujo físico del proceso productivo	18
2.6	Implementación del modelo en JaamSim	19
2.6.1	Cambio de molde, cambio de molde desde parada y precalentamiento	20
2.6.2	Generación de piezas y control de arranque de producción	24
3	Resultados y comparación con datos reales	35
3.1	KPIs completos simulados – Molde 9928	36
3.1.1	Indicadores de disponibilidad	36
3.1.2	Indicadores de producción	37
3.1.3	Indicadores de eficiencia	38
3.1.4	Indicadores económicos	40
3.2	KPIs – Molde 9929	40
3.3	KPIs – Molde 9945	42
3.4	KPIs – Molde 9954	43
4	Conclusiones, limitaciones del modelo y líneas de desarrollo futuras	44

4.1	Conclusiones generales del modelo desarrollado.....	44
4.2	Limitaciones detectadas	44
4.3	Líneas de mejora y desarrollos futuros	45
4.4	Valoración personal.....	46
5	Bibliografía	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Detalle de tipo de paro y duración procedente del resumen mensual de paros .	14
Figura 2: Detalle de una parte de la estructura que sigue el .txt con datos de moldes.	16
Figura 3: Detalle de parte del .txt de la planificación de trabajo por molde	16
Figura 4: Detalle de la parte del modelo que simula los CM , CMP y Precalentamiento.	20
Figura 5: Detalle del panel de visualización de tiempos por proceso	22
Figura 6: Detalle visual de funcionamiento. LED en rojo durante PRREHEAT, programación de moldes y número de turno.	23
Figura 7: Detalle de otro momento temporal de CM e indicadores en funcionamiento.	23
Figura 8: Detalle del flujo general de una pieza. Generación, entrada al submodelo y salida a indicadores de producción.	24
Figura 9: Detalle de la composición del submodelo de fallos	26
Figura 10: Vista general del submodelo completo de la inyectora, robot, operario y embalaje	27
Figura 11: Detalle de asignación de variables y proceso de inyección y robot.....	28
Figura 12: Detalle del proceso descrito en el título del apartado	30
Figura 13: Detalle del proceso de embalaje y transporte	32
Figura 14: Detalle de la estructura de recolección de KPIs	34
Figura 15: Datos tiempo disponible reales de planta. Subrayados en rojo los tipos de paro no simulados.....	36
Figura 16:Detalle KPIs tiempos	36
Figura 17: Detalle de piezas totales, buenas y scrap.	37
Figura 18: Detalle de los KPIs de producción obtenidos por el modelo.	38
Figura 19: Detalle A, P, Q, OEE	39
Figura 20: Detalle indicadores eficiencia del modelo	39
Figura 21: Detalle de indicadores de consumo, costes y beneficios.	40
Figura 22: Detalle resultados mes de abril molde 9929 en planta	41
Figura 23: Resumen de todos los KPIs para el molde 9929 resultantes de la simulación..	41
Figura 24: Detalle resultados molde 9945 mes de abril en planta	42
Figura 25: Resumen de todos los KPIs para el molde 9945 resultantes de la simulación..	42
Figura 26: Detalle resultados molde 9954 mes de abril en planta	43
Figura 27: Resumen de todos los KPIs para el molde 9954 resultantes de la simulación..	43

1 INTRODUCCIÓN

¿Es posible simular con una precisión aceptable el rendimiento real de una inyectora de plástico a partir de datos históricos?

Esta pregunta motiva el presente Trabajo de Fin de Grado, centrado en el desarrollo de un modelo de simulación de eventos discretos (Discrete Event Simulation, DES), una metodología ampliamente utilizada en el ámbito industrial con el fin de modelar sistemas dinámicos donde el estado del sistema cambia en momentos discretos del tiempo. Referencias clave como (Altiok & Melamed, 2007) y (Rossetti, 2021) exponen los fundamentos de esta técnica que permite representar con alto grado de detalle procesos industriales, evaluar rendimientos y analizar comportamientos de un mismo modelo en distintos escenarios y condiciones operativas.

En este trabajo, se ha optado por utilizar JaamSim (JaamSim, 2025), un software libre de simulación de eventos discretos que proporciona una interfaz gráfica intuitiva, estructura modular y posibilidad de definir lógica condicional, control de eventos y recolección de datos y métricas de diversa naturaleza (tiempos, longitudes de cola, totales, etc.). Toda su documentación técnica y los manuales, tanto de usuario como de programación, están accesibles en su web oficial.

A partir de esta simulación se pretende calcular indicadores de producción representativos utilizados en la industria que se detallan a lo largo de la memoria. Mediante esto se pretende poder anticipar decisiones operativas, optimizar la planificación de turnos, evaluar el impacto de cambios de proceso y todo lo que suponga alimentar el modelo con distintos inputs sin tener que realizar pruebas del tipo ensayo y error físicamente en la inyectora o en la planta en general.

Durante las primeras fases del trabajo se consideró modelar cuatro inyectoras, incluyendo todos sus moldes habituales. El objetivo inicial era capturar posibles interacciones entre máquinas, recursos compartidos u operarios. Conforme se avanzaba en crear inicialmente un modelo de inyectora replicable que sirviera como submodelo general para replicar en las demás se ha constatado que, en el caso de estudio, funcionan de forma autónoma. Esta cuestión se desarrolla en detalle en un apartado posterior. Por tanto, se ha delimitado el alcance del trabajo a la inyectora I26 y todos sus moldes, que es lo que aporta el valor real de la simulación. Añadir las otras tres inyectoras hubiera aportado únicamente volumen numérico, pero ningún cambio a nivel técnico ni de simulación.

La modelización propuesta incluye en el conjunto inyectora todos los elementos: la propia inyectora, moldes, robot, cintas, operarios, embalaje, planificación de turnos, fallos modelados mediante distribuciones estadísticas de datos históricos, tiempos de cambio de molde, lógica de arranque, protocolos de arranque, de actuación ante fallo etc.

Además, se incorporan variables económicas para ilustrar el valor añadido que puede aportar JaamSim en simulaciones industriales complejas.

2 MODELADO DE LA INYECTORA INDUSTRIAL EN JAAMSIM

2.1 Definición del problema y enfoque

La producción de piezas de plástico mediante inyección en un entorno industrial está sujeta a múltiples variables que pueden afectar al rendimiento del proceso: planificación de turnos, moldes, tiempos de ciclo, cambios de molde, paros de distinta naturaleza, piezas rechazadas, saturación del operario, cuellos de botella y fases de embalaje, entre otros.

Para la recolección tanto de datos como de flujos del proceso a modelar me he documentado mediante las siguientes vías:

- Responsable de captura de datos: Aporta informes de los paros desglosados por tipo de paro y duraciones totales, tiempos trabajados, piezas buenas, etc.
- Documentación de métodos de trabajo de la empresa. De aquí obtengo datos como las cavidades del molde, cadencia de inyección, número de operarios necesarios, número de molde.
- Visionado en la propia planta del proceso. Notas personales de cuál es el flujo que se sigue observándolo directamente en la planta.

La planificación actual se basa en una combinación de experiencia de la persona que planifica y la producción teórica esperada. Sin embargo, este enfoque presenta limitaciones importantes. La primera de ellas es que es difícil para un ser humano considerar simultáneamente todas las causas que pueden provocar desviaciones respecto a la producción teórica, como pequeñas fluctuaciones en el ciclo promedio de inyección o fallos que no pueden anticiparse.

La segunda limitación es la dependencia total que se genera tanto del criterio del planificador como de su continuidad en la empresa, ya que, si se marcha de la empresa, parte del conocimiento operativo se pierde. Tener procesos de planta simulados ayuda a preservar el *know-how* de la empresa. Además, conforme avanza la tecnología, si un número suficiente de personas se dedica a alimentar y mejorar el modelo, puede alcanzarse un nivel equivalente al de un gemelo digital del proceso.

Conviene subrayar que realizar este modelado no es predecir el futuro de forma exacta, sino simular el comportamiento de los elementos que componen un proceso y que, siempre que los datos de entrada sean de calidad, se comportará, con un margen de error controlado, como lo haría el proceso real.

Para abordar este problema se ha optado por desarrollar un modelo de simulación por eventos discretos que represente el comportamiento real de una inyectora industrial en condiciones de operación reales. El software elegido es JaamSim por ser una herramienta libre que permite un alto nivel de parametrización, control lógico y trazabilidad de eventos de una forma visual e intuitiva, sin requerir conocimientos avanzados de programación.

El modelo de inyectora desarrollado reproduce el flujo completo del proceso que atraviesa una pieza de plástico inyectada desde su inyección en el molde hasta su embalado final. Se incorporan todos los elementos que intervienen en el proceso que en este caso son los siguientes:

- Inyectora
- Robot
- Cinta transportadora
- Operario
- Embalaje
- Modos de fallo
- Turnos
- Cambios de molde

2.2 Cambio de paradigma: modelado por molde

Cada molde, como se detalla en el apartado dedicado a los datos de entrada del modelo, tiene sus datos propios asociados como cadencia, número de cavidades, número de operarios, modos de fallo asociados y variables económicas, entre otros.

El enfoque adoptado es distinto del que se utiliza actualmente. El enfoque actual presenta los rendimientos, piezas totales y demás indicadores productivos agrupados por inyectora, sin hacer distinción por molde. Se dispone del rendimiento y los indicadores de eficiencia por inyectora, pero si se observa una eficiencia por debajo de lo normal no se puede distinguir si es un problema de la inyectora o de algún molde.

Una analogía que ilustra esta diferencia es la siguiente: imaginamos varios vasos con café de distinta procedencia (representando los moldes) y una única botella de leche (representando la inyectora). Si echamos la misma leche en todos los cafés y todos tienen mal sabor, podemos concluir en que la culpa del mal sabor es de la leche (inyectora). Sin embargo, si solo algunos de ellos saben mal podemos identificarlos y podremos atribuirlo al café, es decir, al molde concreto.

Este enfoque de discriminar por molde no es el actual, pero permite un análisis más preciso tanto para identificar y corregir problemas concretos como para evitar no verlos. Imaginemos que vemos el rendimiento global de una inyectora y es del 105%, podemos caer en la equivocación de pensar que esa inyectora funciona por encima de lo esperado, aunque en realidad puede operar con varios moldes simultáneamente y uno de ellos puede ir al 112% y otro al 90%. Por otro lado, permite mucha más profundidad en el modelado del sistema.

La estrategia de modelado a seguir ha sido desarrollar una inyectora genérica con un número de moldes variable, ajustable con mínima intervención. El modelo se alimenta con datos externos, desde un archivo de texto, para así poder replicar este submodelo de inyectora con moldes y solo cambiar los datos de entrada, siguiendo uno de los principios fundamentales de la simulación y del diseño en ingeniería, enfoque modular, replicable y escalable.

2.3 Objetivo principal de la simulación

El objetivo de la simulación es proporcionar una herramienta fiable para anticipar el comportamiento del sistema ante distintos escenarios, calcular indicadores clave y facilitar la toma de decisiones técnicas y económicas sin necesidad de realizar pruebas físicas en planta. Esto se ve potenciado por la posibilidad que da la simulación de eventos discretos (DES) a través de JaamSim en este caso de simular n réplicas de cada escenario que se plantee para así no caer en el azar de simular precisamente un escenario en el que la inversión resulta favorable o se alcanza el rendimiento adecuado.

2.4 Obtención y procesado de datos

2.4.1 Tipos de datos necesarios para el modelo

Para la construcción del modelo de simulación ha sido necesario recopilar y procesar distintos conjuntos de datos relacionados con el funcionamiento real de la inyectora, sus moldes y otros procesos. Los datos se dividen en tres grupos: datos técnicos por molde, planificación de turnos, fallos de producción y variables económicas.

Los datos por molde incluyen: Número de molde, tiempo de ciclo (cadencia), número de cavidades del molde, número de operarios necesarios, peso de la pieza, modos de fallo asociados y sus parámetros para caracterización estadística, así como precios de materia prima, valor de venta del producto y tasas energéticas de consumo. Cada uno de estos valores puede variar significativamente entre moldes, por esta razón es fundamental asociarlos a cada molde y tratarlos de forma independiente, lo cual no sería posible si se modelara la inyectora sin distinción entre moldes.

2.4.2 Fuentes y criterios de selección

La planificación de turnos se ha extraído de la planificación real de la planta para el mes de abril en cuanto a número de entradas por molde y horas trabajadas. En el caso de esta simulación se han simulado siempre turnos de ocho horas.

En cuanto a las fuentes de datos, se han utilizado los documentos técnicos que recogen los métodos de trabajo de cada pieza, y, por tanto, de cada molde para las variables que atañen al molde, las cavidades y el operario. Para los datos históricos de fallos se ha utilizado un resumen mensual de paros por molde del mes de abril donde se pueden obtener los paros registrados en ese molde en funcionamiento clasificados por tipo de paro, número de apariciones, duración total, piezas buenas y demás indicadores de rendimiento del molde. En los casos en los que no existía un dato exacto, se ha optado por una estimación realista o por no incluirlo en el modelo, según el impacto que tuviera.

Uno de los aspectos clave ha sido la selección de la ventana temporal para extraer los datos. Para los turnos hemos simulado el mes de abril mediante la planificación real. Para los fallos de molde y su modelización no se ha elegido un histórico de datos completo (por ejemplo, desde enero de 2025) ya que las condiciones cambian de un mes a otro: hay fallos de molde que se han reparado y ya no tienen el mismo impacto ni la misma tasa de ocurrencia, a veces cambia el tiempo de ciclo, incluso la temperatura hace que haya unos parámetros de inyección de invierno y otros de verano por la dependencia de la temperatura ambiente del plástico a inyectar. Por ello, se han utilizado los paros de mayor ocurrencia y peso en el mes de abril. Si la simulación se implanta habrá que añadir una política de actualización y recolección de datos que se adapte a los cambios adecuadamente.

2.4.3 Tratamiento y normalización de datos

Los datos han sido tratados y normalizados: se han corregido errores tipográficos, unificado las unidades (por ejemplo, tiempo en formato hh:mm:ss pasado a h, peso en kg, etc.) y agrupado por molde en lugar de por inyectora.

2.4.4 Cálculo de parámetros estadísticos

A partir del Excel de paros, se han obtenido los dos parámetros clave para caracterizar las distribuciones estadísticas que representan el comportamiento de los paros seleccionados que son el tiempo medio entre llegadas (MTBF) y la media de duración cada vez que se produce un evento. Estas distribuciones se utilizan dentro de JaamSim para modelar el comportamiento aleatorio de los fallos a lo largo del tiempo.

Finalmente, los datos procesados se han exportado en formato .txt, separados en dos archivos: uno para la planificación por turnos y otro para los datos técnicos por molde. El modelo de JaamSim ha sido programado para leer automáticamente esta información y asignarla a las entidades correspondiente mediante variables indexadas. El formato de este .txt es tipo tabla y como veremos se accede por número de fila y columna del dato, como se haría para referirse a las posiciones de un dato en una matriz donde cada fila es un molde o turno según el documento y cada columna un dato técnico del molde o el molde que trabaja en ese turno.

Para representar la tasa de ocurrencia de eventos que no tienen una periodicidad definida y, por tanto, tratamos como aleatorios, se ha utilizado una distribución exponencial para representar el tiempo entre llegadas o IAT y para la duración de estos eventos se ha utilizado la media como valor constante representativo de la duración, ya que actualmente no se están generando informes detallados de tiempo entre paros y duración por molde para así poder ver los máximos, mínimos o introducirlos en un programa estadístico y obtener la distribución a la que más se ajustan.

Para poner contexto acerca del cálculo primero se va a presentar la forma en la que los datos del resumen mensual de paros por molde dan la información referente a cada tipo de paro.

Herramienta: 9928						
Apagado General	96:13:34	6	16:02:16			
Sol. corte material	2:47:53	1	2:47:53			
Precalentamiento	2:23:37	3	0:47:52			
Pruebas	2:22:12					
Mandar material	1:23:31	1	1:23:31			
Avería en indust.	0:46:57	12	0:03:55			
Cambio molde parada	0:37:46	1	0:37:46	137:23:56	29:27:43	6:56:50
Defecto pieza	0:35:29	3	0:11:50			
Cambio de molde	0:21:34	1	0:21:34			
Microparos	0:10:39	8	0:01:20			
Perdida trazabilidad	0:05:55	3	0:01:58			
Paro productivo	0:04:44	1	0:04:44			
PARO_A_DEFINIR	0:02:22	1	0:02:22			
	107:56:13	41	2:37:57	137:23:56	29:27:43	6:56:50

Figura 1: Detalle de tipo de paro y duración procedente del resumen mensual de paros

Herramienta 9928 se refiere a la numeración del molde. Debajo de este número de molde tenemos todos los paros agrupados por tipo. En la tercera columna tenemos el tiempo total que la inyectora con el molde concreto ha pasado en cada estado. La cuarta columna indica el número de ocurrencias por tipo de paro. La quinta columna representa el tiempo medio de duración de cada tipo de paro (tiempo total dividido entre número de ocurrencias) y las tres últimas columnas representan: el sumatorio de todo el tiempo en cada estado, dato que no nos sirve porque incluye el tiempo en el que la máquina ha estado en *Apagado general*, la segunda representa el tiempo total trabajado (sin incidencias) y la tercera representa el sumatorio de paros que se considera que afectan al rendimiento del molde.

Es necesario justificar qué paros no contabilizan para el tiempo parado (entendido como tiempo donde se pierde producción). Como primera aproximación cualitativa, se han dejado fuera del modelado paros que han ocurrido una sola vez al mes y que, aunque me he centrado en una inyectora y sus cuatro moldes he analizado si eran recurrentes en los demás moldes. En este grupo se encuentran tipos de paro como: programa de robot no ok, perdida trazabilidad, micro paros, defecto pieza, mandar material, pruebas entre otros. Son situaciones no recurrentes entre moldes. Los paros que sí se han modelado son: cambio de molde, cambio de molde a máquina parada, precalentamiento, paro productivo, avería en industrialización, avería de máquina, paro a definir, avería de molde y fallo de AMR. El AMR es una carretilla automática que retira los palés de embalaje y trae los vacíos sin necesidad de que haya un carretillero que la conduzca.

Todas estas distribuciones se han modelado mediante una distribución exponencial cuyo IAT se ha calculado para cada tipo de paro como:

$$IAT = \frac{T_{trabajado} + T_{parado}}{\text{Número de paros}}$$

Por ejemplo, regresando a la figura1 el numerador serían las 29:27 h trabajadas más las 6:56 paradas en total del molde y para cada tipo de paro dividiríamos entre su número de ocurrencias. Además, no cuentan para el tiempo parado: apagado general, precalentamiento, pruebas o mantenimiento. Esto se debe a que se considera que no son paros que hagan perder productividad.

Para el tiempo medio de duración de cada fallo se ha seguido la fórmula lógica:

$$\text{Duración media de paro} = \frac{\text{Tiempo total de tipo de paro}}{\text{Número total de ocurrencias del tipo de paro}}$$

2.4.5 Estimaciones y datos no disponibles

Por otro lado, hay otros tipos de datos que ya sea por motivos de confidencialidad o por no estar disponibles actualmente se han tenido que estimar o generar artificialmente con objeto de demostrar las posibilidades de uso de estos datos dentro del entorno de JaamSim.

Datos que existen, pero no se utilizan acordes a la realidad por confidencialidad:

- Peso pieza
- €/kg de materia prima
- €/kg pieza inyectada (precio de venta)
- Tasas de máquina (ON y STBY)
- Tasa de operario

Algunos otros datos que no son relevantes bien porque no he podido acceder a ellos, no se recogen o se salen del ámbito del Trabajo Final de Grado.

- Piezas en cada embalaje y número total de embalajes disponibles
- Tiempo de recogida del embalaje y reposición de embalaje vacío
- Pedidos semanales exactos por proveedor
- Stocks, cantidad de embalajes disponibles

2.4.6 Estructura de los archivos de entrada para JaamSim

Una vez todos estos datos están procesados se insertan en un documento .txt para que desde la interfaz de JaamSim se pueda acceder a estos datos. El formato es tipo tabla, con una primera fila que contiene los encabezados y las restantes son referentes a cada molde y las columnas a sus distintas variables y en el caso de los turnos en los que cada molde produce cada fila representa un turno de 8h y tiene en la única columna con información relevante el número de molde en cuestión.

MOLDE	Cadencia	Nop	Cav	PesoPieza (kg)
9928	65	1	1	0.2
9929	76	0.5	3	0.3
9945	68	1	2	0.25
9954	85	0.25	1	0.35

Figura 2: Detalle de una parte de la estructura que sigue el .txt con datos de moldes.

A continuación, detalle del .txt donde se añaden los turnos y el molde que corresponde a cada uno.

TURNOS	MOLDE
1	9928
2	9929
3	9945
4	9928
5	9929
6	9945
7	9928
8	0
9	0

Figura 3: Detalle de parte del .txt de la planificación de trabajo por molde

2.5 Explicación del flujo del proceso

En este apartado se va a explicar cómo es el flujo real del proceso y las condiciones que se han de modelar. El siguiente apartado hablará del cómo se han llevado a la simulación todos estos procesos y condiciones a satisfacer para garantizar la fidelidad del modelo con un alto grado de confianza.

2.5.1 Transición entre moldes: cambio estándar, cambio desde parada y precalentamiento

Para este paso previo a la producción se puede partir desde distintas situaciones:

2.5.1.1 Cambio de molde (**CM**)

El cambio de molde se define en los criterios de la planta como el tiempo que transcurre desde la última pieza buena del molde anterior a la primera pieza buena del molde siguiente. Este caso ocurre cuando la máquina ha estado funcionando con otro molde durante el turno anterior, y se realiza una transición directa sin apagar la inyectora.

2.5.1.2 Cambio de molde a máquina parada (**CMP**)

El cambio de molde a máquina parada se produce cuando no hubo actividad programada en el turno anterior y la máquina permaneció apagada antes del arranque. Por ejemplo, si en el turno de la mañana se va a trabajar con un molde distinto al del turno de la tarde del día anterior, el cambio de molde se realizaría durante el turno de la noche para poder arrancar durante la mañana a la hora del inicio del turno.

2.5.1.3 Precalentamiento

El precalentamiento puede entenderse como una consecuencia directa del cambio de molde a máquina parada, ya que, al estar la máquina apagada durante el turno anterior al que está programado el molde requiere un precalentamiento para alcanzar la temperatura de servicio necesaria para operar. Este precalentamiento suele durar en torno a una hora, y se realiza habitualmente una hora antes del comienzo del turno de trabajo para que la inyectora esté lista y no haya tiempos muertos al comenzar la jornada.

El precalentamiento no sucede durante el **CM** ya que la máquina permanece encendida en un estado de mantenimiento de las condiciones, no consume energía como cuando arranca en frío después de un **CMP**.

Estas situaciones suponen tiempos no productivos que deben considerarse para lograr un modelado fiel del comportamiento en la planta, y están reflejadas en las variables intrínsecas de cada molde empleadas en el modelo de JaamSim.

2.5.2 Gestión de turnos

Para esta simulación se han utilizado las horas reales trabajadas por cada molde, dividiéndolas en un número entero de turnos completos de 8 horas. En la planificación real, por diversas circunstancias, a veces se planean turnos de 4h o a veces, si un molde ha sufrido una avería, hay que reubicarlo porque es prioritario y eso hace que haya que interrumpir la producción de un molde menos prioritario o con más horas disponibles de máquina por tener menor demanda de piezas. Para simplificar el modelado se han simulado turnos de 8h completos por cada turno en que un molde tiene planeada producción. Hay pequeñas diferencias entre un turno de 8h y dos turnos de 4h, como por ejemplo que en el caso de dos turnos de 4h se añade un cambio de molde más reduciendo tiempo productivo real.

Por otro lado, en ocasiones, incluso al asignar un número entero de turnos no se llega a la producción final por pequeñas cantidades de piezas y en un momento dado hay que volver a introducir en producción un molde.

En esta simulación se ha considerado prioritario conseguir que, en el número de horas reales trabajadas del molde, la simulación consiga un número similar de piezas buenas, malas y totales.

2.5.3 Flujo físico del proceso productivo

Una vez el molde ha sido planificado, montado en la inyectora y se encuentra en condiciones de operación, se detalla a continuación el flujo que sigue una pieza desde su inyección hasta su embalaje.

2.5.3.1 Inyectora

El plástico fundido se inyecta en las cavidades del molde. Cuando ha terminado la inyección el molde se abre y entra un robot a extraer la pieza. Esta inyectora tiene un tiempo de ciclo o cadencia que se expresa en piezas por segundo o en segundos por pieza. Al inicio de una producción o cada vez que hay una parada se ejecuta una rutina que descarta las tres primeras piezas para asegurar la calidad.

2.5.3.2 Robot

La función del robot es extraer la pieza del molde, depositarla en la cinta y volver a la posición de espera para recoger la siguiente pieza inyectada. Su ciclo de operación es menor que el de la inyectora. Dado que no afecta a la cadencia del proceso, su tiempo se ha estimado sin modelado detallado.

2.5.3.3 Cinta

Cinta que transporta las piezas desde la cota de dejada del robot hasta el puesto del operario. Aunque se incluye en el modelo, su influencia es marginal, por lo que se han estimado sus tiempos. Tiene una capacidad limitada que depende de cada pieza, si esta se supera, la inyección se para.

2.5.3.4 Operario

Una vez la pieza llega al puesto del operario, según el método de trabajo el operario realiza acciones sobre la pieza (poner grapas, clips, eliminar rebabas y embalar entre otros). El tiempo de ciclo de la inyección viene definido por un cronometraje industrial que se realiza al operario para saber su capacidad de procesamiento por hora.

2.5.3.5 Embalaje

Es otro proceso que quedaba fuera del alcance este trabajo, se ha modelado de forma estándar dejando claro que, en disposición de datos concretos para cada pieza, se puede modelar. El tiempo de embalar las piezas viene recogido en el cronometraje que define el tiempo de ciclo de la inyectora. Una vez se ha completado el embalaje, se retiran los embalajes llenos y vuelven vacíos.

2.5.3.6 Fallos

Como elemento transversal se han modelado los fallos como parte inherente a todo proceso. Cada vez que se produce un fallo, se para la producción e inicia el protocolo de tirar las tres primeras piezas cuando se reanuda.

2.5.3.7 Indicadores claves de rendimiento (KPIs)

Desde la oficina de producción se puede visualizar el estado de cada inyectora con el nombre de la pieza y algunos indicadores clave de rendimiento. En la planta real vienen calculados en tiempo real a medida que se da el turno. En esta simulación, dichos valores se estiman.

2.6 Implementación del modelo en JaamSim

Una vez definido el flujo del proceso físico y las condiciones reales de funcionamiento, este apartado detalla cómo se ha trasladado dicha lógica al entorno de simulación JaamSim. Para ello, cada etapa del proceso se ha descompuesto en bloques funcionales, replicando los tiempos de operación, condicionantes lógicos y las interacciones entre distintas partes del proceso mediante los objetos y nivel de programación lógica que proporciona este software.

Cada bloque representa una fase del flujo productivo que atraviesa la pieza, desde la generación de la pieza en la inyectora hasta la salida en el embalaje.

El objetivo de esta implementación es lograr una representación fiel del comportamiento observado en planta, permitiendo evaluar distintos escenarios de producción y obtener métricas clave con precisión para ayudar en la planificación, toma de decisiones y comparar escenarios similares modificando un parámetro que en el entorno físico supondría un mayor coste productivo.

2.6.1 Cambio de molde, cambio de molde desde parada y precalentamiento

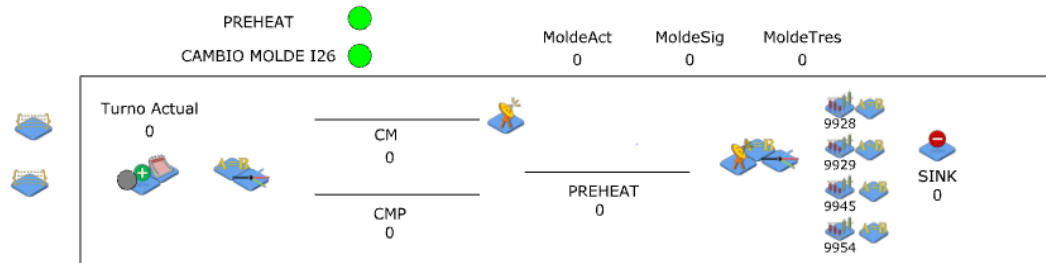


Figura 4: Detalle de la parte del modelo que simula los **CM**, **CMP** y Precalentamiento.

Como pequeño apunte técnico sobre el funcionamiento de JaamSim, conviene saber que en JaamSim las simulaciones se construyen a partir del paso de entidades a través de bloques. Cada entidad puede generarse de forma periódica para representar eventos temporales, o bien representar un objeto físico (como una pieza) que activa los bloques que transita. Algunos bloques se activan en función del tiempo programado o de eventos externos, sin necesidad del paso de una entidad. Es el caso del *EventSchedule* (bloque con forma de calendario color rosa). Otros bloques especiales no requieren entidades, ya que monitorean continuamente el valor de ciertas variables y reaccionan en función de ellas.

A continuación, se describe el funcionamiento de los bloques que gestionan el sistema de transición entre moldes, desde la lectura de datos hasta la preparación para el arranque de la producción.

2.6.1.1 Lectura de datos

En el margen izquierdo, fuera del rectángulo, se encuentran los bloques encargados de leer los archivos .txt que contienen la planificación de moldes y los datos técnicos asociados a cada uno de ellos. Estos archivos se cargan al inicio de la simulación y se accede a ellos mediante funciones tipo *Value(fila)(columna)*, que permiten asignar dinámicamente los parámetros a cada turno o molde activo.

2.6.1.2 Actualización de turno y moldes

A partir de entidades generadas cada 8h por el bloque *EventSchedule* (calendario rosa), estas se dirigen a los dos siguientes bloques encargados de actualizar el turno y aplicar la lógica que determina si corresponde realizar un cambio de molde (**CM**), un cambio de molde a máquina parada (**CMP**), un precalentamiento o si se trata del caso especial del primer turno.

En el primero de los dos bloques se recogen variables como el molde actual, el siguiente molde y el molde posterior, necesarias para establecer la lógica de decisión. Esta lógica evalúa las siguientes condiciones:

- Si el molde actual es distinto al siguiente, se programa un **CM** para el siguiente turno.
- Si el molde actual es igual al siguiente, no se realiza ninguna acción
- Si el molde actual es distinto de cero y el siguiente turno tiene molde igual a cero, se consulta el molde posterior:
 - Si este es distinto del actual, se debe realizar un **CMP** seguido de un precalentamiento durante el turno que no tiene molde programado.
 - Si coincide con el molde actual, solo se ejecutará el precalentamiento al inicio del siguiente turno

El segundo bloque es un decisor (*Branch*) que, en función de las variables **CM**, **CMP**, **PREHEAT** y los valores de los moldes, redirige la entidad generada hacia el bloque correspondiente: cambio de molde, cambio desde parada, precalentamiento o directamente al flujo posterior al precalentamiento.

2.6.1.3 **CM, CMP y PREHEAT**

Una vez las entidades son dirigidas a cualquiera de estos destinos, cada uno tiene configurado un tiempo de trabajo que se lee directamente desde los archivos .txt, donde se definen los tiempos medios para cada evento. Además, se asigna un estado en la entidad que se registra el tiempo que permanece en ese bloque. Así, al finalizar esta fase, la entidad conserva consigo la información de cuánto tiempo ha pasado en cada estado (**CM**, **CMP** o **PREHEAT**).

En la figura se observa que a la derecha del **CM** aparece un bloque con forma de antena parabólica. La entidad atraviesa este bloque al terminar el **CM**, y este envía una señal a la lógica de la inyectora para reiniciar el contador de piezas que deben desecharse al comienzo del turno.

Después de un **CMP**, la entidad siempre pasa por el bloque de **PREHEAT**. Al finalizar atraviesa otro bloque equivalente que también envía la señal para reiniciar el contador, garantizando que se descarten las tres primeras piezas cuando comience la producción.

2.6.1.4 *Actualización de estados y recolección de estadísticas*

Los siguientes dos bloques son funcionalmente equivalentes a los anteriores, repitiendo la estructura de asignación de variables y decisión. El primero de ellos guarda variables de interés como el último molde válido, fundamental para evitar errores cuando el molde actual es igual a 0. En estos casos, el sistema no puede acceder directamente a los datos del molde, ya que el índice válido está definido solo entre 2 y 5. Además, cuando termina un turno, pueden quedar piezas en curso que deben finalizar su recorrido con los parámetros del último molde que se estaba utilizando.

Adicionalmente, este bloque incrementa un contador para registrar cuántas veces ha sido utilizado cada molde.

A continuación, un bloque de tipo decisor (*Branch*) ramifica la lógica en función del número de molde, enviando la entidad hacia la sección correspondiente de recolección de datos y estadísticas.

2.6.1.5 Recolección de datos y estadísticas

En esta parte final de la lógica se recogen los principales datos de interés. Las entidades, ya separadas por número de molde mediante un bloque *Branch*, pasan primero por un bloque de tipo *Statistics* que registra el tiempo acumulado en cada uno de los posibles estados: **CM**, **CMP** y **PREHEAT**. Finalmente, los datos van a parar a una entidad tipo *Sink*, bloque donde las entidades desaparecen del modelo.

2.6.1.6 Visualización de tiempos por proceso

9928			9945		
CM (Medio)	CMP (Medio)	Preheat (Medio)	CM (Medio)	CMP (Medio)	Preheat (Medio)
2 0,14	1 0,13	2 0,31	1 0,05	2 0,09	2 0,43
9929			9954		
CM (Medio)	CMP (Medio)	Preheat (Medio)	CM (Medio)	CMP (Medio)	Preheat (Medio)
2 0,26	1 0,12	1 0,19	0 0,00	1 0,30	1 0,53

Figura 5: Detalle del panel de visualización de tiempos por proceso

Como se puede observar, se muestra un papel que recoge el número de veces que se ha producido cada tipo de transición (**CM**, **CMP** y **PREHEAT**) y su correspondiente tiempo medio. Esta información se obtiene directamente de los bloques estadísticos (*Statistics*) que se acumulan el tiempo que cada entidad ha permanecido en cada uno de estos estados.

Este panel se ha limitado a los procesos previos al inicio de la producción, ya que cada uno de estos bloques tiene una duración constante definida por los datos de entrada. En esta parte del modelo no se han aplicado distribuciones estadísticas para representar variabilidad entre eventos porque no hay datos accesibles.

En el caso de que se introdujeran distribuciones de tiempos en fases posteriores, dicha variabilidad se reflejaría directamente en los datos exportados por la simulación, y su análisis debería realizarse en una hoja de cálculo. Este aspecto se aborda más adelante en el apartado correspondiente al análisis de resultados.

2.6.1.7 Elementos visuales auxiliares

En la imagen del proceso general se pueden observar distintos elementos como textos contadores y variables visibles que cumplen una doble función. Por un lado, ayudan al receptor del modelo a comprender visualmente el estado del sistema durante la simulación. Por otro, son herramientas útiles durante la fase de desarrollo, ya que permiten detectar errores lógicos o incoherencias en el flujo de trabajo.

Estas variables visibles incluyen, por ejemplo:

- El número del turno actual
- Los moldes activo, siguiente y posterior (MoldeAct, MoldeSig, MoldeTres)
- Los indicadores de estado (PREHEAT, CAMBIO MOLDE I26) que cambian de color para marcar eventos activos

A continuación, se muestran dos capturas que ilustran el comportamiento dinámico del modelo según distintos escenarios: uno con cambio de molde estándar, y otro con cambio desde parada y precalentamiento. Estas representaciones visuales permiten validar que el modelo ejecuta correctamente la lógica definida para cada situación.

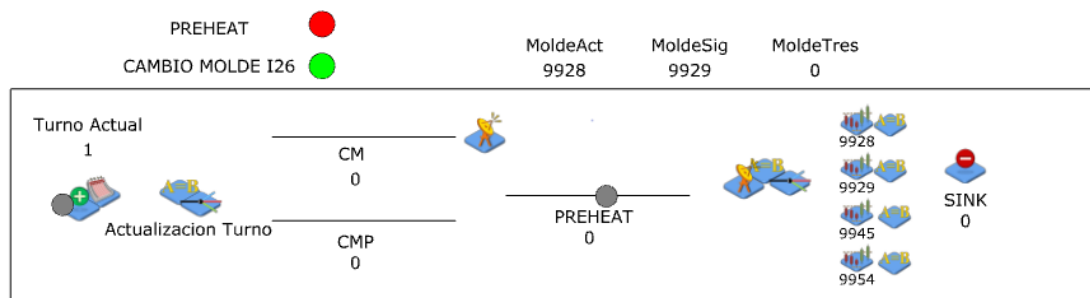


Figura 6: Detalle visual de funcionamiento. LED en rojo durante PRREHEAT, programación de moldes y número de turno.

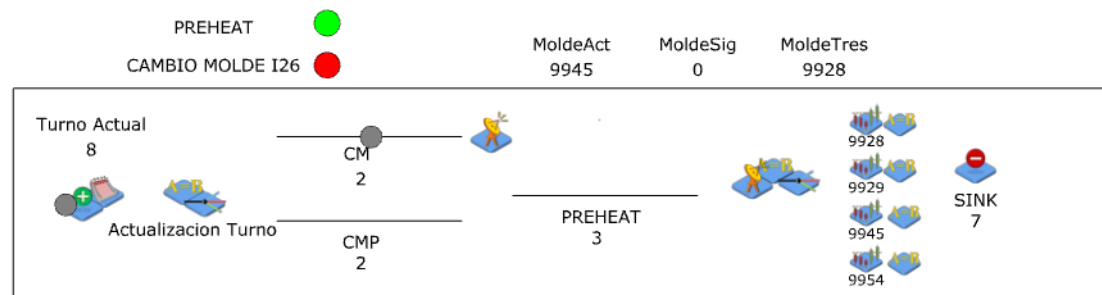


Figura 7: Detalle de otro momento temporal de CM e indicadores en funcionamiento.

2.6.2 Generación de piezas y control de arranque de producción

Una vez la lógica de turnos y cambio de molde ha determinado qué molde se debe utilizar, comienza la fase de generación de piezas. Esta parte del modelo es responsable de crear entidades que representan piezas físicas, pero solo cuando se cumplen ciertas condiciones lógicas que garantizan que la producción puede comenzar de forma correcta.

El inicio de la producción está controlado por una señal (*INYE ON/OFF*) que actúa como umbral lógico: si esta condición no se cumple, no se generan piezas. Esta lógica permite bloquear la producción en casos como un **CM**, **CMP**, o **PREHEAT**. Además, tras ciertas transiciones como el reinicio tras un fallo o un cambio de molde, se activa el protocolo de descarte de las tres primeras piezas, representado por la señal ReiniciarScrap.

La figura siguiente resume este sistema de control y distribución inicial de entidades.

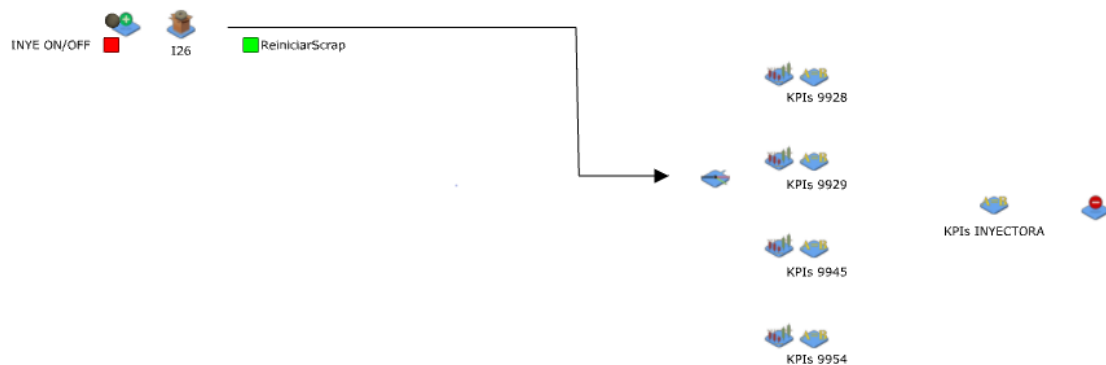


Figura 8: Detalle del flujo general de una pieza. Generación, entrada al submodelo y salida a indicadores de producción.

La generación de piezas en el modelo está controlada por un bloque que crea una nueva entidad (en este caso una nueva pieza) solo cuando se cumplen simultáneamente una serie de condiciones lógicas que garantizan que el sistema está listo para producir una nueva pieza. Estas condiciones se agrupan y supervisan mediante un bloque del tipo *SignalThreshold*, representado en el modelo como *INYE ON/OFF*, que actúa como interruptor lógico principal.

Para que este generador se active, deben cumplirse los siguientes requisitos:

- No debe haber acumulación en el sistema: las colas de entrada a la inyectora, al robot, al operario y al embalaje deben estar vacías o por debajo de sus límites. Concretamente:
 - Las colas de entrada a la inyectora para cada molde deben estar vacías. Solo puede haber una pieza siendo procesada, no puede haber acumulación en espera
 - La cola del robot también debe estar vacía, ya que este solo manipula una pieza a la vez y no admite espera acumulada.
 - La cola del operario debe tener menos de 20 piezas. Esto representa la capacidad de piezas que caben en la cinta.

- La cola del embalaje debe tener menos de 21 piezas. Se ha supuesto una capacidad estándar de embalaje para todos los moldes, ya que este valor no tiene un impacto relevante en el modelo actual.
- No debe haber procesos activos: la producción solo puede comenzar si no hay un cambio de molde en marcha (**CM**), un cambio de molde desde máquina parada (**CMP**) ni un precalentamiento (**PREHEAT**) activo.
- Debe existir un molde válido asignado al turno actual: si el molde es 0, no hay planificación por lo que no se permite producir.
- Debe haberse superado el primer segundo del tiempo de simulación, para evitar generación automática en el arranque antes de que se carguen los datos y el estado del sistema.

Cuando todas estas condiciones se cumplen, se activa la señal *INYE ON/OFF*, lo que permite que el generador cree entidades que representan piezas físicas en producción. El *INYE ON/OFF* no requiere que las entidades pasen por él, ya que es un bloque de monitorización continua del estado del sistema.

La señal *ReiniciarScrap* se activa desde los bloques anteriormente comentados de **CM** o **PREHEAT** y se desactiva desde el interior del submodelo físico de la inyectora (explicado más adelante), una vez se han descartado las tres primeras piezas.

Finalmente, cuando las piezas salen del submodelo I26, cada entidad es dirigida a un bloque tipo *Branch* que evalúa el molde activo en ese momento y redirige la entidad hacia sus bloques de cálculo de *KPIs* y valores representativos del proceso.

Toda esta lógica representa el sistema general de control de producción previo al submodelo físico, que se identifica gráficamente en el modelo como una caja con un icono de engranaje y el texto I26. Este submodelo específico se detalla en un apartado posterior.

Antes de entrar en este submodelo, es necesario describir cómo se han modelado los fallos en el sistema, ya que estos pueden interrumpir en cualquier momento el proceso productivo.

2.6.2.1 Submodelo de fallos: ocurrencia y lógica de paradas

El submodelo de fallos representa la lógica de generación y gestión de paros productivos dentro del modelo. Cada tipo de paro se ha modelado de forma individual para capturar su comportamiento estocástico y permitir su trazabilidad a nivel de molde.

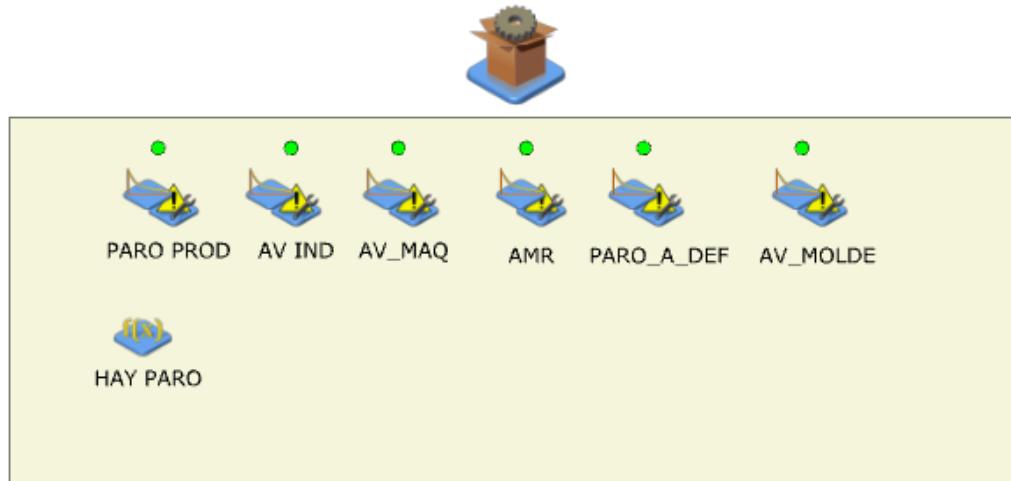


Figura 9: Detalle de la composición del submodelo de fallos

En la figura se observan los distintos tipos de fallo considerados:

- PARO PROD: Parada productiva general
- AV IND: Avería en elementos de la industrialización
- AV MAQ: Avería de MÁQUINA
- AMR: Fallo del robot autónomo que transporta embalajes
- PARO A DEF: Paro indefinido
- AV MOLDE: Avería del propio molde

Cada uno de estos eventos se modela mediante un bloque llamado *DownTimeEntity* (bloque con el signo de exclamación dentro del triángulo amarillo). Estos bloques generan fallos aleatorios según una distribución exponencial, colocada justo antes del bloque *DownTimeEntity*, cuya configuración (tiempo medio entre llegadas e intensidad del fallo) se obtiene directamente del archivo .txt con los datos técnicos por molde. Este enfoque permite que los fallos ocurran con una frecuencia y duración realista específica para cada molde. Es por eso por lo que en el submodelo de la inyectora emplearemos este submodelo cuatro veces, una para cada uno de los moldes.

Cuando un fallo se activa, el bloque entra en un estado *WorkingState* = 0 y el indicador LED se visualiza en rojo, lo que resulta muy útil para monitorizar el modelo durante las animaciones (simulaciones "lentas" con paso de tiempo proporcional al tiempo real).

Abajo a la izquierda del submodelo aparece un bloque solitario llamado HAY PARO, que es un *ExpressionEntity*. Su función es monitorizar todos los fallos activos. Este tipo de bloque tampoco requiere que pasen entidades por él, ya que evalúa el estado lógico de otros bloques del modelo que contienen variables de las que depende su estado. Esta expresión

devuelve un valor lógico 1 si todos los fallos están inactivos, y un valor lógico 0 si al menos uno de ellos está activo, indicando una interrupción del proceso.

Este mecanismo se utiliza dentro del submodelo físico de la inyectora para bloquear la inyección mientras haya algún fallo activo. Además, se usa para calcular el tiempo total que cada molde ha estado afectado por paradas, como parte del cálculo posterior de indicadores clave del rendimiento (*KPIs*).

2.6.2.2 Submodelo físico de la inyectora: estructura y lógica del funcionamiento

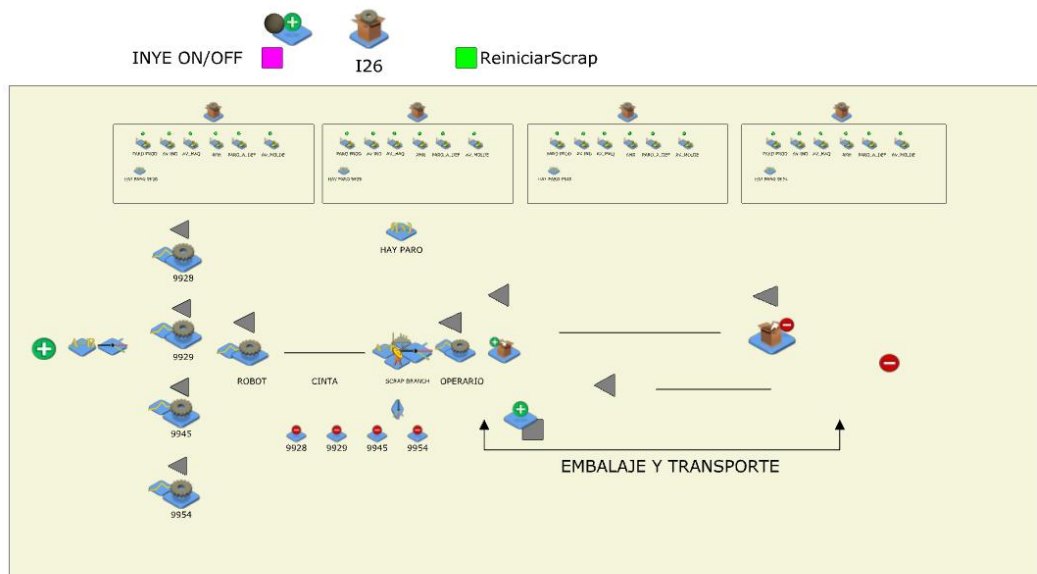


Figura 10: Vista general del submodelo completo de la inyectora, robot, operario y embalaje

La figura muestra una vista general del submodelo I26, encargado de simular el comportamiento físico de una inyectora real junto con sus periféricos. En esta representación se incluyen los sistemas de detección de fallos por molde, la lógica de selección del molde activo, la operación física de inyección, robotizado, operario, embalaje, gestión de piezas defectuosas y flujos hacia el cálculo de *KPIs*.

A partir de esta versión global, se desglosa a continuación cada una de las secciones que conforman este submodelo para comprender su funcionamiento y cómo se han trasladado las condiciones reales de planta al entorno de simulación JaamSim.

2.6.2.2.1 Inyectora: generación, asignación de variables y proceso de inyección

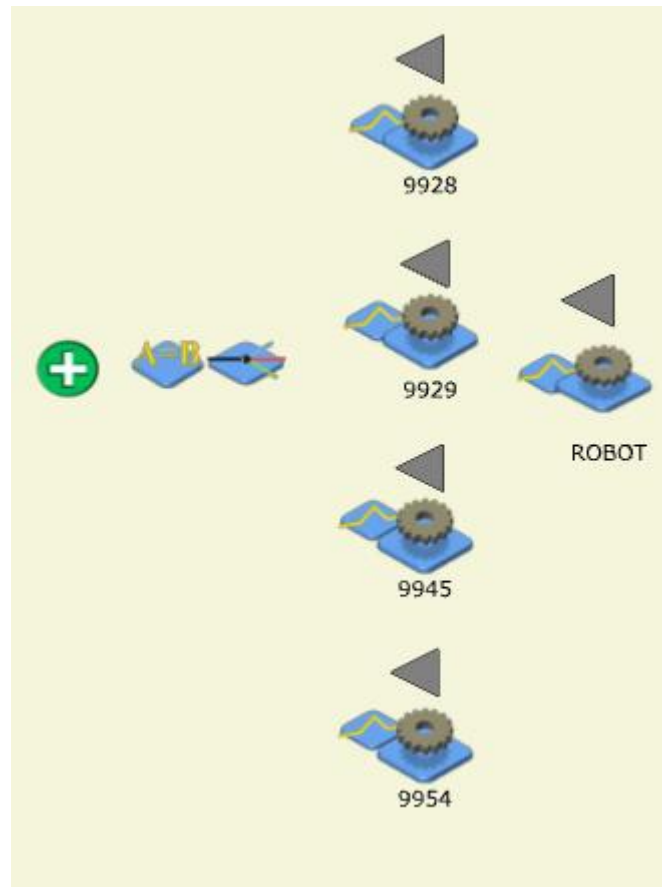


Figura 11: Detalle de asignación de variables y proceso de inyección y robot

Una vez las entidades generadas superan el control de condiciones previas (turno válido, sin paros activos, sin saturación en colas), acceden al submodelo físico de la inyectora identificado como I26. En esta primera etapa del submodelo se prepara la entidad con los datos necesarios y se redirige según el molde activo.

El primer bloque es un Assign, cuya función es incorporar a cada entidad (pieza) una serie de atributos esenciales para el modelado del proceso y el posterior cálculo de indicadores. Las variables que se asignan son:

- Molde activo: si el turno tiene un molde programado distinto de 0, se asigna directamente, en caso contrario se hereda el último molde válido.
- Número de operarios, número de cavidades, peso por pieza, €/kg materia prima, €/kg de venta por pieza: estos datos se extraen del archivo .txt de moldes y se asignan en función del índice del molde activo.

Estas variables acompañan a la pieza durante todo su flujo, y permiten distinguir comportamientos por molde dentro de la misma inyectora.

Tras la asignación, la entidad pasa por un *Branch* que evalúa el número de molde activo. Según el valor, la pieza es enviada a una de las cuatro ramas que representan los moldes:

9928, 9929, 9945 y 9954. Cada uno de estos moldes está modelado por un bloque de tipo Server individual, con sus propios fallos, colas y características.

Este enfoque ha sido elegido frente a una solución de un único bloque Server con datos variables según molde porque:

- Permite contabilizar el tiempo de trabajo real de cada molde
- Permite asociar un submodelo de fallos (explicado anteriormente) a cada molde y que los fallos se disparen por horas trabajadas de ese molde y no horas trabajadas en general de la inyectora.
- Evita errores al intentar reiniciar o cambiar dinámicamente los valores internos de un Server compartido, lo cual aumenta la robustez.

Cada inyectora tiene asociada una cola de entrada obligatoria por requerimientos de JaamSim. Aunque normalmente no hay acumulación en esta zona, su presencia garantiza que el modelo sea funcional y estable.

A continuación, la pieza entra en el bloque Server, que representa el proceso de inyección real. El tiempo de servicio se ha modelado mediante una distribución triangular, con:

- Moda = tiempo de ciclo real del molde
- Rango = $\pm 1\%$ sobre la moda

Este tipo de distribución ofrece una forma sencilla de introducir pequeñas variaciones en la duración del ciclo sin requerir un ajuste estadístico completo ni añadir ruido innecesario.

Una vez finalizado el proceso de inyección, se asigna a la pieza un atributo adicional que indica el estado operativo de la inyectora en ese instante. Esta lógica distingue entre:

- “Working” si el molde estaba en funcionamiento normal
- “Breakdown” si el molde se encontraba en estado de fallo (por cualquier tipo)
- “Idle” queda como estado de reserva, aunque no se alcanza en la práctica porque no se permite la entrada de piezas si la inyectora está inactiva.

Este atributo será utilizado más adelante para el cálculo de indicadores de calidad y disponibilidad (KPIs)

Cada inyectora está conectada a su propio submodelo de fallos, explicado en detalle en el apartado anterior. Gracias a esta estructura:

- Los fallos asociados a cada molde se activan solo cuando dicho molde está trabajando.
- Se respeta el tiempo de trabajo acumulado de cada molde, base fundamental para la activación aleatoria de eventos mediante distribuciones exponenciales.
- Se evita mezclar datos o estadísticas de moldes distintos, lo que permitiría errores de interpretación

Esta arquitectura modular refuerza la precisión del modelo, facilita la trazabilidad de eventos por molde y permite un análisis detallado por unidad de producción.

Una vez finalizado el tiempo de servicio en la inyección, la entidad es redirigida al bloque común de robot, independientemente del molde activo. Este bloque también es de tipo Server, y representa la operación de recogida y traslado de la pieza desde la inyectora hasta la cinta transportadora. El tiempo de servicio del robot se ha modelado mediante una distribución triangular con moda 20 segundos y un rango de $\pm 1\%$, ya que en la práctica el robot siempre ejecuta sus acciones en un tiempo menor que la inyectora y la espera en su cota de recogida a que se abra el molde. No se han modelado fallos en el robot ya que no había datos suficientes y que cualquier incidencia en este componente repercute directamente en la parada de inyección y por tanto está contemplada en algunos fallos de la inyectora bajo otro tipo de paro. Una vez finalizada esta operación, la pieza pasa a la fase de cinta transportadora.

2.6.2.2.2 Transporte, control de calidad inicial y proceso de operario

En esta sección se describe la fase posterior a la inyección: el transporte de la pieza por la cinta, el control de piezas no ok asociado a arranques o reinicios, y el trabajo manual del operario antes del embalaje.

A continuación, se muestra el esquema de bloques que representan esta lógica en el modelo:

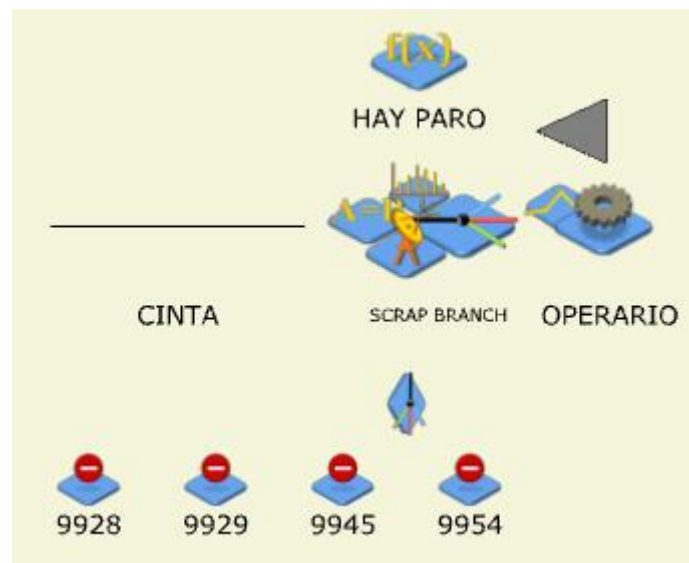


Figura 12: Detalle del proceso descrito en el título del apartado

Una vez la pieza ha sido procesada por la inyectora y trasladada por el robot, accede al tramo correspondiente a la cinta transportadora. Este segmento representa el desplazamiento desde la zona de inyección hasta el puesto del operario. Aunque no tiene fallos asociados, sí representa un tiempo de servicio que simula el transporte físico. Desde ahí comienza una secuencia de control de calidad y asignación de scrap (piezas no ok).

Después de la cinta, la entidad atraviesa un bloque Assign que gestiona el reinicio del contador de piezas desechables cuando se produce un cambio de molde, inicio de turno o

reanudación tras fallo. Este bloque evalúa las condiciones de las entidades HAY_PARO (que integran el estado 1 o 0 de fallos de cada molde) y ReiniciarScrap, una señal que fue activada previamente desde los bloques **CM**, **CMP** o **PREHEAT**.

En concreto, este Assign reinicia un contador interno si se detecta un fallo activo satisfaciendo la condición $HAY_PARO = 0$ o si *ReiniciarScrap* está activa. A partir de ahí, se cuenta cuántas piezas han pasado por la cinta desde que se reanudó la producción. Si este número es inferior a tres, se marca la pieza como chatarra ($Scrap = 1$). Esto simula la lógica de la planta donde se desechan automáticamente las tres primeras piezas para asegurar la calidad tras cada arranque.

Justo después, la entidad pasa por un bloque que desactiva ReiniciarScrap, de forma que el contador de piezas deje de reiniciarse en los siguientes ciclos si no ha habido nuevas interrupciones.

Una vez la pieza ha pasado el control inicial de scrap, se enfrenta a un bloque tipo *Branch*. Aquí se evalúa el valor del atributo Scrap:

- Si $Scrap = 1$, la pieza se dirige a un bloque adicional que, mediante una segunda ramificación, la envía a uno de los cuatro *Sink* (papeleras de entidades) correspondiente al molde de origen. Este paso permite contabilizar las piezas descartadas por scrap de cada molde.
- Si $Scrap = 0$, se utiliza una distribución discreta para simular el scrap habitual en producción. Con un 98% de probabilidad de pieza buena y un 2% de ser considerada defectuosa cuando el operario la revisa. Si resulta defectuosa va a los mismos *Sinks* que cuando $Scrap = 1$.

Las piezas que superan el control de calidad alcanzan el bloque Server que representa al operario. El tiempo de servicio de este operario se define mediante una distribución triangular cuya moda es un 7% superior a la del ciclo de inyección. El margen de variabilidad está entre un -2% y un +20%, lo que refleja que el operario es más propenso a variaciones, acumulaciones o interrupciones frente a la repetibilidad de la inyectora.

Una vez procesada la pieza, se le asigna un nuevo estado lógico: operario, que puede usarse posteriormente para el cálculo de indicadores de disponibilidad o saturación del recurso humano. El bloque también tiene definida una variable de tasa horaria de coste del operario, análoga a la tasa de máquina para cálculos de *KPIs* finales.

Por último, la cola de entrada al operario simula la capacidad de la cinta para acumular piezas antes de que sean procesadas. Este es un punto crítico, ya que si la cola supera las 20 piezas (valor estimado como límite de saturación), el modelo detiene la generación de nuevas entidades. Esta monitorización se realiza desde fuera del submodelo mediante una expresión lógica que participa en el control de la señal *INYE ON/OFF*

2.6.2.2.3 Embalaje y transporte final

Tras el proceso llevado a cabo por el operario, las piezas que han sido correctamente procesadas se agrupan en lotes para su embalaje y posterior retirada. Esta fase final del modelo representa el empaquetado de las piezas terminadas y su salida del sistema productivo, cerrando así, el ciclo completo desde la inyección hasta el transporte. La lógica de este segmento también contempla la finalización de la producción planificada, especialmente en fases de transición como cambios de molde o turnos sin planificación.

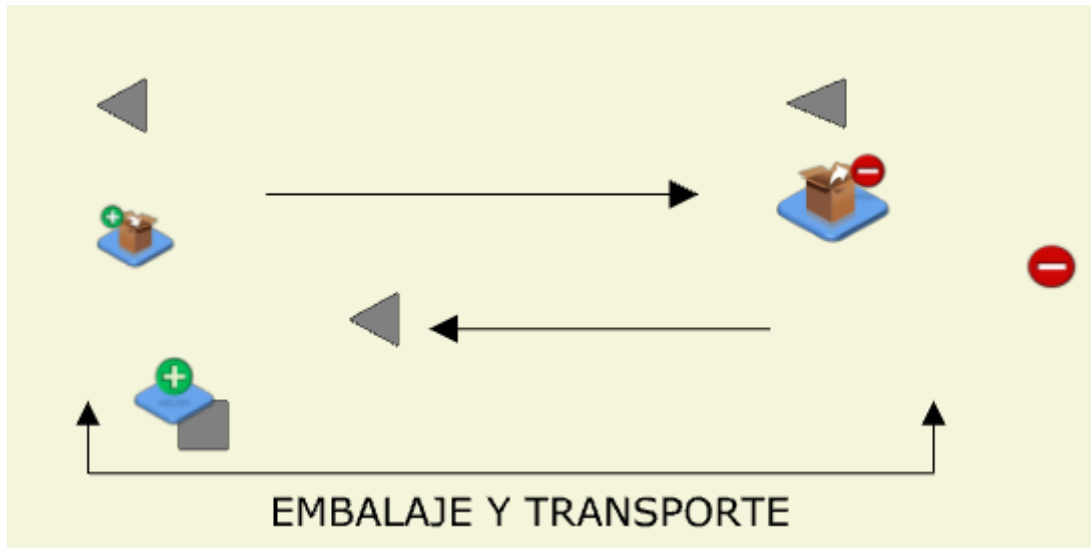


Figura 13: Detalle del proceso de embalaje y transporte

La fase final del flujo productivo consiste en el proceso de embalaje y transporte de las piezas ya procesadas por el operario. En esta etapa, las entidades (piezas) se agrupan en lotes y son gestionadas mediante un sistema de contenedores que simula el movimiento físico del material dentro de la planta.

En la parte inferior del submodelo se encuentra un generador de contenedores, que en este caso produce dos unidades al inicio del turno. Estos contenedores son los recursos que se utilizarán para embalar y transportar las piezas durante toda la jornada.

Cada contenedor se posiciona sobre un bloque de tipo *AddTo*, representado por un icono de caja verde con un símbolo de suma. Este bloque está conectado a una cola donde se almacenan las piezas que salen del operario. La lógica del *AddTo* se activa cuando la cola alcanza las 20 piezas, momento en el cual todas las entidades son automáticamente cargadas en el contenedor en tiempo cero, ya que el proceso de embalaje se considera incluido dentro del tiempo del operario.

Una vez cargado, el contenedor sigue la flecha horizontal hacia la derecha y viaja hasta el bloque *RemoveFrom* (bloque de desembalaje), donde todas las piezas son descargadas tras un tiempo de transporte de 50 segundos, que representa el trayecto de retirada del embalaje lleno. Una vez descargado, el contenedor regresa a la posición inicial para poder ser reutilizado. No se ha considerado los tiempos de retirada y reposición de embalaje por no tener acceso a ellos y porque el problema de falta de embalaje es un tipo de paro que

apenas es habitual en este caso. Por otro lado, si se tomasen tiempos, se podría modelar mediante distribuciones estadísticas las duraciones de estos procesos, así como introducir desde el .txt los embalajes disponibles para solo crear esos.

Ahora bien, durante los cabios de molde, el fin del turno o en turnos sin planificación activa, es posible que no se lleguen a acumular 20 piezas en la cola de embalaje. Para estos casos, se ha implementado una lógica de **RenegTime** (tiempo de renuncia) en la cola, que permite sacar las piezas si han esperado demasiado y el sistema detecta que no se van a completar. Estas condiciones son:

- Que haya un **CM** activo
- Que haya **CMP** activo
- Que haya **PREHEAT** activo
- Que el molde actual sea 0

Si alguna de estas condiciones se cumple tras el tiempo de espera del **RenegTime** (20 minutos en este caso) las piezas renuncian a seguir esperando en la cola y son directamente enviadas al sistema de recolección de *KPIs*. Saltándose el transporte estándar y el embalado. Esto puede entenderse como picos de la producción que se guardan en embalajes a medio completar hasta que el molde vuelva a entrar, por ejemplo.

Estas piezas mantienen todos sus atributos y tiempos representativos, por lo que pueden ser correctamente clasificadas por molde en el bloque *Branch* final y contabilizadas dentro de los indicadores clave del modelo.

2.6.2.2.4 Recolección de KPIs

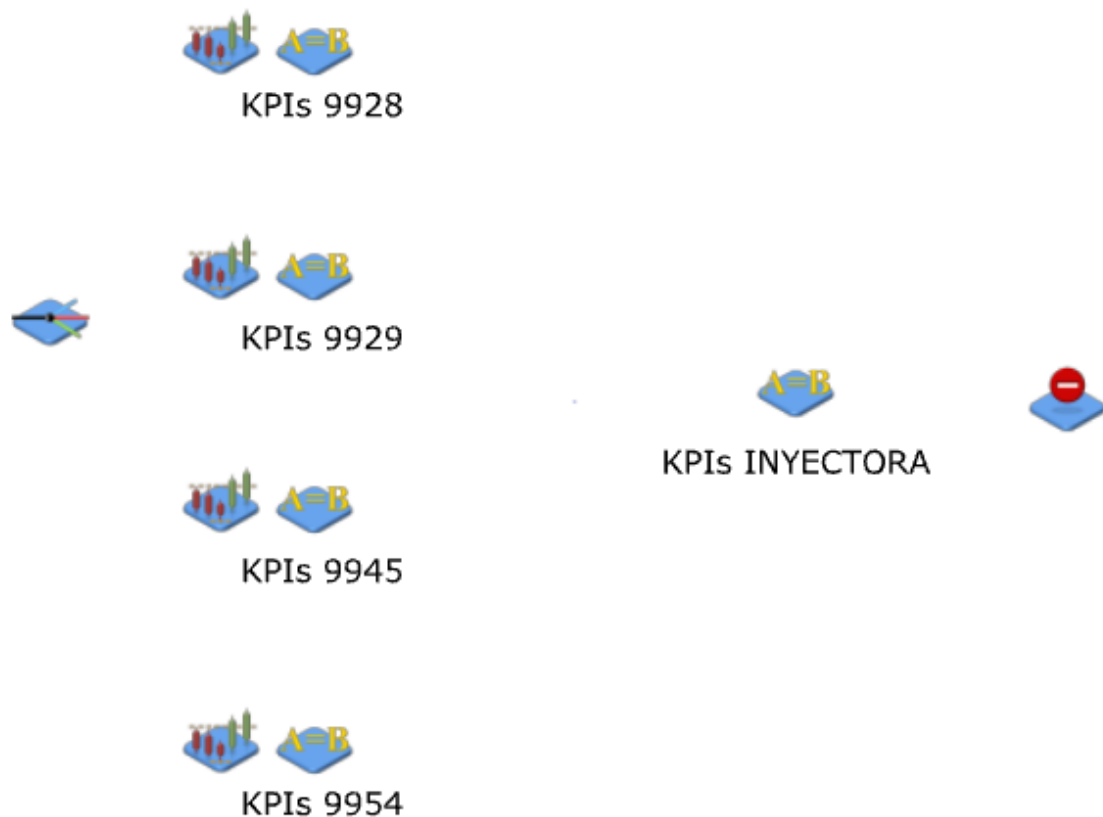


Figura 14: Detalle de la estructura de recolección de KPIs

Al finalizar el recorrido completo de cada entidad (pieza) a través del submodelo de producción, esta se dirige a los bloques encargados de la recolección de indicadores clave de rendimiento (*KPIs*). La estructura empleada para cada molde sigue un patrón común: un bloque tipo *Statistics* que registra los tiempos que la pieza ha pasado en cada estado (inyección, operativo, paros, etc.) y un bloque tipo *Assign* que calcula los totales e indicadores finales que luego se exportan. Adicionalmente, se ha incorporado un bloque de *KPIs* generales por inyectora que representa el acumulado de todos los moldes. Aunque este dato no resulta tan útil para el análisis detallado ni la identificación de causas raíz puede ofrecer una visión rápida y agregada del rendimiento general de la máquina.

Los valores obtenidos no se analizan en este apartado, ya que serán presentados y comentados en detalle en la sección de resultados. Allí se compararán con los datos reales del mes de abril en planta, considerando los turnos simulados, las horas efectivas trabajadas y las diferencias inevitables derivadas de no haber repicado con exactitud todos los paros reales.

3 Resultados y comparación con datos reales

Este apartado recoge los principales resultados obtenidos tras la simulación completa del modelo. El objetivo es analizar el rendimiento del sistema bajo condiciones controladas y contrastarlo con los datos reales de producción del mes de abril en planta. Para ello, se han utilizado como referencia los *KPIs* clásicos de rendimiento industrial (OEE, tiempos de proceso, scrap, piezas buenas, etc.), así como otros indicadores más específicos relacionados con aspectos económicos o tiempos por estado.

Todas las distribuciones estadísticas del modelo (fallos, duración de procesos, tasas de scrap, etc.) están asociadas a generadores de números aleatorios cuyos valores concretos dependen de la semilla empleada para generar números aleatorios en cada ejecución. Para obtener resultados representativos y reducir el efecto del azar, se han ejecutado 100 réplicas del modelo, simulando un mes completo de turnos. En cada réplica la semilla de números aleatorios cambia. A partir de estas réplicas, se ha calculado la media de cada indicador, mostrando también el intervalo de variación correspondiente a una confianza del 95%. Esto permite no solo evaluar los valores esperados, sino también analizar la dispersión de los resultados y su fiabilidad.

Para facilitar la interpretación de los resultados, los *KPIs* se han clasificado en cuatro grandes bloques temáticos:

- Indicadores de disponibilidad y fallos: tiempos en estado de trabajo, fallo, **CM**, **CMP**, **PREHEAT**, etc.
- Indicadores de producción: piezas buenas, totales, teóricas, scrap.
- Indicadores de eficiencia: Performance, Calidad, Disponibilidad y eficiencia general del molde.
- Indicadores económicos: consumo de materia prima, costes estimados, beneficio por pieza, etc.

En primer lugar, se presentará una captura global con todos los *KPIs* disponibles para el molde 9928, incluyendo tanto los comprables con la planta real como otros indicadores ficticios que el modelo puede calcular si se dispone de datos suficientes. El objetivo es mostrar el potencial completo del sistema simulado.

A continuación, se mostrarán únicamente los *KPIs* comparables directamente con la realidad para cada molde. En este caso se omiten indicadores económicos o extrapolados al no disponer de datos suficientes o fiables de comparación.

3.1 KPIs completos simulados – Molde 9928

3.1.1 Indicadores de disponibilidad

Los indicadores de disponibilidad permiten conocer cuánto tiempo efectivo ha estado operativa la inyectora durante el tiempo simulado y cómo se han distribuido las distintas causas de parada.

Se presenta a continuación la tabla real del mes de abril en planta donde se recogen las horas trabajadas por molde y los distintos tipos de paro registrados.

Herramienta: 9928							
<u>Apagado General</u>		96:13:34	6	16:02:16			
<u>Sol. corte material</u>		2:47:53	1	2:47:53			
<u>Pre calentamiento</u>		2:23:37	3	0:47:52			
<u>Pruebas</u>		2:22:12					
<u>Mandar material</u>		1:23:31	1	1:23:31			
<u>Averia en indust.</u>		0:46:57	12	0:03:55			
<u>Cambio molde parada</u>		0:37:46	1	0:37:46	137:23:56	29:27:43	6:56:50
<u>Defecto pieza</u>		0:35:29	3	0:11:50			
<u>Cambio de molde</u>		0:21:34	1	0:21:34			
<u>Microparos</u>		0:10:39	8	0:01:20			
<u>Perdida trazabilidad</u>		0:05:55	3	0:01:58			
<u>Paro productivo</u>		0:04:44	1	0:04:44			
<u>PARO_A_DEFINIR</u>		0:02:22	1	0:02:22			
		107:56:13	41	2:37:57	137:23:56	29:27:43	6:56:50

Figura 15: Datos tiempo disponible reales de planta. Subrayados en rojo los tipos de paro no simulados

En la figura pueden observarse los tiempos totales acumulados por tipo de paro, el número de ocurrencias y la duración media. Las tres columnas de la derecha muestran:

- Tiempo total registrado (incluye apagado general, por lo que no es útil)
- Tiempo de trabajo sin incidencias (29,5 horas)
- Tiempo total de parada (6,5 horas)

A continuación, se muestran los resultados obtenidos tras las 100 réplicas de simulación

TIEMPOS											
TimeWorking		TimeBreakdown		TimeDispo		TimeWorkingReal		TimeCM		TimeCMP	
30.03	0.02	0.17	0.02	30.61	0.03	30.44	0.02	0.29	0.00	0.13	0.00
										0.62	0.00

Figura 16:Detalle KPIs tiempos

En esa tabla, cada celda presenta dos valores:

- El primero es la media del *KPI* simulada teniendo en cuenta los valores obtenidos para la variable en cada una de las 100 réplicas.

- El segundo es el intervalo de el nivel de confianza, que determina la anchura del intervalo estimado para esa métrica.

Comparando ambos conjuntos de datos:

- El tiempo trabajado simulado (30 h) es ligeramente superior al real (29,5 h). Esta diferencia se explica porque en el modelo todos los turnos simulados son bloques completos de 8h
- El tiempo de paradas es considerablemente menor en la simulación. Esto se debe a que solo se han modelado los fallos más frecuentes, dejando fuera eventos puntuales como micro paros, pruebas o ajustes que sí se contabilizan en la planta y otros tipos de paros que no presentan una recurrencia modelable por sí mismos.

Los demás tiempos (**CM**, **CMP**, **PREHEAT**) se muestran como referencia. Si no se modelasen por su valor medio constante y se introdujeran variaciones serían más representativos.

3.1.2 Indicadores de producción

Este bloque recoge los *KPIs* directamente relacionados con la producción efectiva del molde 9928 durante el mes simulado. Los indicadores se centran en la cantidad total de piezas producidas, las piezas buenas, las descartadas como scrap y la producción teórica a partir del tiempo de trabajo.

Siguiendo la estructura de los *KPIs* anteriores, a continuación, se muestran los datos reales de la planta en el mes de abril:

Herramienta: 9928									
Apagado General		96:13:34	6	16:02:16					
Sol. corte material		2:47:53	1	2:47:53					
Precalentamiento		2:23:37	3	0:47:52					
Pruebas		2:22:12							
Mandar material		1:23:31	1	1:23:31					
Averia en indust.		0:46:57	12	0:03:55					
Cambio molde parada		0:37:46	1	0:37:46	137:23:56	29:27:43	6:56:50	1.952	1.883
Defecto pieza		0:35:29	3	0:11:50					
Cambio de molde		0:21:34	1	0:21:34					
Microparos		0:10:39	8	0:01:20					
Perdida trazabilidad		0:05:55	3	0:01:58					
Paro productivo		0:04:44	1	0:04:44					
PARO_A_DEFINIR		0:02:22	1	0:02:22					
		107:56:13	41	2:37:57	137:23:56	29:27:43	6:56:50	1.952	1.883
								69	

Figura 17: Detalle de piezas totales, buenas y scrap.

En color verde se pueden apreciar de izquierda a derecha: piezas totales, buenas y scrap. A continuación, se muestran los resultados de la simulación.

PRODUCCIÓN							
PTotales		PBuenas		PScrap		PTotalTeo	
1952.21	1.40	1896.96	1.23	55.25	1.49	1978.88	1.39

Figura 18: Detalle de los KPIs de producción obtenidos por el modelo.

Algunas conclusiones:

- Las piezas totales coinciden, lo cual quiere decir que, sabiendo que hay media hora de diferencia de tiempo trabajado entre la realidad y el modelo, es un buen ajuste.
- Las piezas buenas difieren en 13 unidades, resultado más que aceptable.
- PScrap difieren en 14 unidades, resultado más que aceptable de nuevo.

Estos resultados muestran que, a igualdad de tiempo trabajado, el modelo reproduce un comportamiento muy similar al de la planta. Es importante destacar que los turnos simulados han sido bloques completos, mientras que en la planta puede haber ajustes puntuales, turnos parciales o paros no programados. Además, ciertos fallos puntuales no han sido modelados.

3.1.3 Indicadores de eficiencia

Este apartado recoge los *KPIs* compuestos que permiten evaluar el rendimiento general del sistema en términos de eficiencia. Se calculan a partir de variables básicas previamente presentadas: tiempos y producción.

Los indicadores considerados son:

- P (Performance o Rendimiento): $P(\%) = \frac{\text{Piezas totales reales}}{\text{Piezas totales teóricas}}$
- A (Availability o Disponibilidad): $A(\%) = 1 - \frac{\text{Tiempo parado}}{\text{Tiempo parado} + \text{Tiempo trabajado}}$
- Q (Quality o Calidad): $Q(\%) = \frac{\text{Piezas buenas reales}}{\text{Piezas totales reales}}$
- OEE (Overall Equipment Effectiveness o Eficiencia efectiva general):

$$OEE(\%) = P * Q * A$$

80,92	101,93	96,47	79,57
80,92	101,93	96,47	79,57

Figura 19: Detalle A, P, Q, OEE

En la planta se obtiene:

- A = 80,92%
- P = 101,93 %
- Q = 96,47 %
- OEE = 79,57%

El modelo refleja:

EFICIENCIA							
P		A		Q		OEE	
98.65	0.00	99.44	0.07	97.17	0.08	95.32	0.12

Figura 20: Detalle indicadores eficiencia del modelo

Vemos una diferencia grande en la disponibilidad de casi 19 puntos. Esto es debido a que muchos de los paros no se han modelado y han tenido un gran peso en las horas de paro de la máquina. En el apartado de conclusiones se tratará en profundidad cómo se podría modelar esto.

Respecto al rendimiento vemos que se obtiene un valor similar con diferencia de dos puntos porcentuales.

El indicador de calidad también está dentro de lo aceptado.

El indicador de OEE por tanto se ve muy distorsionado debido a que es la multiplicación de todos ellos.

Es necesario comentar que, en este mes de abril, concretamente el día 28 hubo un apagón nacional que seguramente afectó a estos rendimientos.

3.1.4 Indicadores económicos

Este tipo de indicadores no se recogen como tal en la planta, son un añadido por parte de la simulación con la finalidad de demostrar las posibilidades que da este tipo de simulaciones de procesos industriales si se tienen los datos adecuados y el modelo es lo suficientemente fiel a la realidad para poder confiar en él.

CONSUMOS Y COSTES									
KG_MP_Consumidos	EUR_MP_Consumida	CosteOperario	CosteStandby	CosteMqON	CosteTotal	EUR_Por_Pieza			
390.44 0.28	351.40 0.25	640.00 0.00	3.40 0.43	1501.52 1.07	2496.31 1.29	1.32 0.00			

INGRESOS Y RENTABILIDAD					
Ingreso	Beneficio	BeneficioPorPieza			
2655.74 1.72	159.43 2.02	0.08 0.00			

Figura 21: Detalle de indicadores de consumo, costes y beneficios.

Con esto se han creado los siguientes indicadores:

- Kilos de materia prima consumidos, calculado como las piezas totales por el peso de la pieza.
- Euros de materia prima consumida, calculado como los kilos totales por el precio de compra.
- Coste operario, calculado como el número de turnos por la tasa del operario
- Coste de la máquina en stand-by, calculado como el tiempo de la máquina en fallo por la tasa de la máquina en stand-by.
- Coste de la máquina en ON, calculado como el tiempo de cada molde activo por la tasa de la máquina encendida.
- Coste total.
- Ingresos, beneficio y beneficio por pieza como *KPIs* que permiten generar informes resumen en reuniones o toma de decisiones.

3.2 KPIs – Molde 9929

Para los tres moldes restantes se van a presentar los resultados generales del mes de abril en planta y todos los indicadores juntos que se han obtenido en el modelo. Solo se comentará lo más significativo ya que todo sigue la misma estructura que en el molde 9928.

Key Items		Detalles de paro				Disponibilidad			Producción			OEE						
Descripción paro	Stop Color	Tº Paro	Nº	Media	Disponible	Trabajado	Parado	Total	Buenas	Scrap	% cambios	% averías	% producción	% logística	A	P	Q	OEE
Herramienta: 9929																		
Apagado General		96:04:29	5	19:12:54														
Falta de programa		14:23:44	6	2:23:57														
Precalentamiento		2:57:51	4	0:44:28														
Mantenimiento		0:44:47	6	0:07:28														
Avería en indust.		0:40:40	5	0:08:08														
Avería de molde		0:31:31	3	0:10:30														
Cambio de molde		0:31:18	1	0:31:18	136:34:01	20:09:06	2:14:04	1.555	1.494	61	4,53	5,37	0,08		90,02	101,53	96,08	87,81
Cambio molde parada		0:28:30	1	0:28:30														
Microparos		0:01:01	1	0:01:01														
Cambio de color		0:00:58	1	0:00:58														
Mandar material		0:00:06																
Sol. corte material			1															
		116:24:55	34	3:25:26	136:34:01	20:09:06	2:14:04	1.555	1.494	61	4,53	5,37	0,08		90,02	101,53	96,08	87,81

Figura 22: Detalle resultados mes de abril molde 9929 en planta

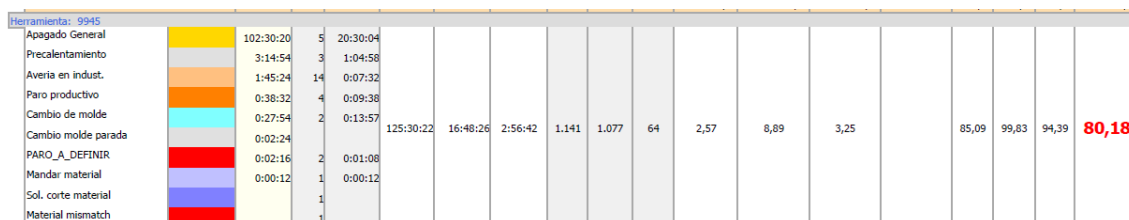
TIEMPOS											
TimeWorking	22.45	0.02	TimeBreakdown	0.00	0.00	TimeDispo	23.09	0.02	TimeWorkingReal	23.09	0.02
									TimeCM	0.52	0.00
									TimeCMP	0.12	0.00
									TimePreheat	0.19	0.00
PRODUCCIÓN											
PTotales	1706.23	1.30	PBuenas	1663.25	0.41	PScrap	42.98	1.26	PTotalTeo	1754.98	1.29
EFICIENCIA											
P	97.22	0.00	A	100.00	0.00	Q	97.48	0.07	OEE	94.77	0.07
CONSUMOS Y COSTES											
KG_MP_Consumidos	511.87	0.39	EUR_MP_Consumida	460.68	0.35	CosteOperario	240.00	0.00	CosteStandby	0.00	0.00
									CosteMqON	1122.59	0.85
									CosteTotal	1823.27	1.20
									EUR_Por_Pieza	1.10	0.00
INGRESOS Y RENTABILIDAD											
Ingreso	3492.82	0.87	Beneficio	1669.55	1.30	BeneficioPorPieza	1.00	0.00			

Figura 23: Resumen de todos los KPIs para el molde 9929 resultantes de la simulación

Las principales diferencias son:

- En esta simulación no se han registrado fallos para el molde 9929, lo que genera una disponibilidad del 100% y un coste en stand-by nulo. Esta diferencia se explica por la no modelización de ciertos paros menores registrados en planta.
- El modelo ha trabajado aproximadamente 2 horas más que en los datos reales, lo que justifica la ligera diferencia en piezas totales obtenidas, ajustada a la cadencia definida para el proceso.

En general es una buena aproximación con márgenes aceptables.



TIEMPOS													
TimeWorking		TimeBreakdown		TimeDispo		TimeWorkingReal		TimeCM		TimeCMP		TimePreheat	
22.435923	0.0740537	1.3598	0.0795267	24.025723	0.0214266	22.665923	0.0740537	0.046	0	0.184	0	0.864	0

PRODUCCIÓN							
PTotales		PBuenas		PScrap		PTotalTeo	
1525.54	5.033834	1461.98	5.9930734	63.56	1.7429661	1541.2827	5.0356488

EFICIENCIA							
P		A		Q		OEE	
98.97833	0.0037964	94.288315	0.3324741	95.828365	0.1210927	89.438006	0.3951505

CONSUSMOS Y COSTES													
KG_MP_Consumidos		EUR_MP_Consumida		CosteOperario		CosteStandby	CosteMaqON	CosteTotal	EUR_Por_Pieza				
381.385	1.2584585	343.2465	1.1326127	480	0								
						27.196	1.590533	1121.7961	3.7026829	1972.2386	3.3300213	1.3493694	0.0034809

INGRESOS Y RENTABILIDAD					
Ingreso		Beneficio		BeneficioPorPieza	
2558.465	10.487878	586.22637	7.4245302	0.4006306	0.0034809

- El tiempo trabajado son casi 5,5h lo que refleja la gran diferencia en las piezas fabricadas. Esto se debe nuevamente a que a veces un turno de 8h acaba siendo dos de 4h o uno de 4h y dos de 2h introduciendo en esos tiempos cambios de molde, paradas y arranques que hacen que las horas acaben variando en la realidad y a lo comentado antes acerca de los tipos de paro no modelados, donde hay una diferencia de 1,5h.

[illegible]

TIEMPOS													
TimeWorking		TimeBreakdown		TimeDispo		TimeWorkingReal		TimeCM		TimeCMP		TimePreheat	
7.7796682	0.0084063	0	0	8.0746682	0.0084063	8.0746682	0.0084063	0	0	0.295	0	0.53	0

PRODUCCIÓN							
PTotales		PBuenas		PScrap		PTotalTeo	
661.26	0.7187349	645	0.2308216	16.26	0.7075845	686.3468	0.7145385

EFICIENCIA							
P		A		Q		OEE	
96.344766	0.0052665	100	0	97.543756	0.1044376	93.978202	0.0969399

CONSUMO Y COSTES													
KG_MP_Consumidos		EUR_MP_Consumida		CosteOperario		CosteStandby		CosteMqON		CosteTotal		EUR_Por_Pieza	
231.441	0.2515572	208.2969	0.2264015	40	0	0	0	388.98341	0.4203168	637.28031	0.6466605	0.9880329	0.0009936

INGRESOS Y RENTABILIDAD					
Ingreso		Beneficio		BeneficioPorPieza	
1580.25	0.5655129	942.96969	0.7686033	1.4619671	0.0009936

4 Conclusiones, limitaciones del modelo y líneas de desarrollo futuras

4.1 Conclusiones generales del modelo desarrollado

- El modelo desarrollado reproduce fielmente el comportamiento del proceso productivo bajo condiciones normales de trabajo, permitiendo predecir la producción alcanzada con gran precisión a igualdad de tiempo trabajado.
- Permite evaluar distintos escenarios de planificación y comportamiento del sistema, lo que lo convierte en una herramienta de análisis, mejora y toma de decisiones de alto valor.
- Su estructura modular, replicable y parametrizada lo hace fácilmente escalable a más moldes, inyectoras o procesos de planta.

4.2 Limitaciones detectadas

- La principal limitación radica en la calidad de los datos de entrada. Al no contar con una recolección sistemática de tiempos exactos entre fallos (por tipo y duración), se ha optado por utilizar distribuciones exponenciales simplificadas.
- Muchos eventos esporádicos no se han modelado (como micro paros, pruebas, defectos en pieza, entre otros). Estos eventos, aunque minoritarios, suman tiempos que influyen en la producción final, por lo que podría ser interesante caracterizarlos.
- El uso de tiempos promedio para **CM**, **CMP** o **PREHEAT** elimina su variabilidad real, que nuevamente requeriría de un estudio sistemático de los tiempos de operación para poder modelarse.
- La planificación del modelo es fija en turnos de 8h. Esto difiere de la realidad, donde los turnos pueden dividirse (4h, 2h ...) o interrumpirse por prioridades logísticas.
- No se ha modelado el stock, la llegada de materia prima ni los pedidos de cliente, lo cual limitaría la simulación respecto a la logística o al cliente final.

Estos dos puntos anteriores podrían ser modelados de forma más acorde a la realidad, planificando por horas o por cantidad de embalaje fabricado, pero supondría exceder los límites de este trabajo. Para ello, debería pasar periodos prolongados con los responsables de cada área y consultar con ellos en qué

condiciones se deciden aplicar estos turnos parciales (que son la minoría), o en qué punto del proceso se empieza a priorizar la cantidad de piezas fabricadas en lugar de las horas trabajadas o los turnos completos.

Para una aplicación real, merecería la pena invertir el tiempo necesario para asegurar que los datos que alimentan al modelo (su materia prima) sean de calidad y así poder modelar las situaciones de la forma más cercana a la realidad de la planta posible. Por otro lado, en este tipo de decisiones intervienen también eventos externos no controlables, por ejemplo, que un cliente no devuelva el embalaje vacío a tiempo para poder fabricar un turno entero según lo planeado.

4.3 Líneas de mejora y desarrollos futuros

- Integrar el modelo con la persona encargada de planificar los turnos, para que este pueda probar escenarios y sugerir variables a introducir o controlar en el modelo.
- Mejorar la base de datos: capturar y clasificar los tiempos entre fallos de forma estructurada, incorporar la duración real de algunos eventos y, los que no son recurrentes, pero suponen horas reales de paro, representarlos todos mediante una distribución de “eventos raros” de tipo exponencial y duración variable también según los datos recogidos. En esta categoría podrían incluirse todos los tipos de fallos que se han excluido del modelado por no ser suficientemente recurrentes.
- Modelar stocks de materia prima y embalaje.
- Introducir la planificación por pedidos o lotes en lugar de simplemente por turnos de 8h, simulando producción hasta alcanzar cierta cantidad o llenar embalajes disponibles.
- Incorporar lógica de recursos compartidos. Esto puede darse cuando la simulación pasa a ser de toda la planta o de más procesos y pueden modelarse recursos que comparten como carretilleros, comodines de turno, operarios, inyectoras prioritarias para no parar, etc.
- Valorar la aplicación del modelo como soporte para:
 - Evaluar mejoras técnicas: por ejemplo, comparar la mejora de una cadencia en un molde concreto para una inyectora en condiciones de trabajo reales con suficientes escenarios para eliminar el ruido estadístico.
 - Optimizar procesos de montaje o ensamblaje si se dispone de información sobre sus fallos y duraciones.
 - Sustituir el cronometraje in situ por simulaciones con tiempos por operación estandarizados y homologados.
 - Generar escenarios sintéticos ante falta de datos reales.
- Aplicación práctica en planta como:
 - Asistente de toma de decisiones: si simulamos entre varios escenarios y hay uno claramente favorable para la planta, seguirlo. En el caso de que en la implantación de este escenario surgiera un imprevisto se puede, desde el punto en el que el problema surja, recopilar variables y volver a simular en unos minutos para volver a encontrar el escenario más favorable, o, al menos evitar uno que no lo sea.

- Herramienta de apoyo en inversiones o presentación de proyectos ante dirección, clientes o inversores.

En resumen, este trabajo demuestra que, con herramientas adecuadas, estructura modular y datos suficientes, es posible modelar procesos industriales reales con alta precisión, sentando las bases para una planta más flexible analítica y orientada a la mejora continua.

4.4 Valoración personal

La realización de este Trabajo de Fin de Grado ha sido una experiencia exigente pero muy enriquecedora. Me ha permitido aplicar los conocimientos adquiridos durante el grado a un entorno real, donde los datos no siempre son completos ni perfectos, y donde la toma de decisiones requiere análisis, criterio y flexibilidad. Lejos de trabajar con información ideal, este proyecto me ha obligado a lidiar con incertidumbres, buscar soluciones creativas (pero representativas de la realidad de la planta), validar hipótesis con ensayo y error y, sobre todo, comprender que en ingeniería muchas veces hay que tomar decisiones razonadas con los datos disponibles. En ese sentido, he aprendido que gran parte de la ingeniería es también el arte de la estimación, de modelar lo complejo con recursos limitados, identificar y eliminar el ruido y hacer que funcione.

Además, este trabajo me ha confirmado que la simulación de procesos es una disciplina que me motiva y en la que me gustaría seguir profundizando. Poder analizar escenarios, entender los sistemas desde dentro para construir modelos que ayuden a la toma de decisiones reales me parece una herramienta muy poderosa y alineada con el perfil profesional que me gustaría desarrollar.

5 Bibliografía

Altiok, T., & Melamed, B. (2007). *Simulation Modeling and Analysis with Arena*. Elseiver.

JaamSim. (2025). Obtenido de JaamSim: <https://www.jaamsim.com/>

Rossetti, M. D. (2021). *Simulation Modeling and Arena*.