

PROYECTO AUTOMATIZACIÓN DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN: FABRICACIÓN DEL TESLA MODEL S



Francisco Javier Román Cortés
Rohan Keith Laycock
Juan de Dios Herrera Hurtado

ÍNDICE

1.- INTRODUCCIÓN

2.- FABRICACIÓN DE LA BATERÍA

3.- FABRICACIÓN CUERPO DEL COCHE

4.- FABRICACIÓN DEL MOTOR ELÉCTRICO

5.- ENSAMBLAJE DE LA BATERÍA, LA ESTRUCTURA DEL COCHE, EL MOTOR ELÉCTRICO Y FINALIZACIÓN DEL VEHÍCULO

6.- PRODUCTO FINAL

7.- SIMULACIÓN EN ARENA

7.1.- SCHEDULE: TASA LLEGADA DE MATERIALES

7.2.- TIEMPOS DE PROCESO

7.3.- FABRICACIÓN DE LA BATERÍA

7.4.- FABRICACIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL COCHE

7.5.- FABRICACIÓN DEL MOTOR

7.6.- UNIÓN BATERÍA, ESTRUCTURA DEL COCHE Y MOTOR, JUNTO CON OPERACIONES FINALES

7.7.- VENTA O ALMACENAJE DEL PRODUCTO DEFINITIVO

7.8.- CIERTOS RESULTADOS CARACTERÍSTICOS DEL PROCESO DE FABRICACIÓN

8.- ANÁLISIS ESTADÍSTICO

8.1.- ANÁLISIS NOMINAL (REDUCCIÓN DE HALF WIDTH PARA EL PARÁMETRO 'TOTAL WIP')

8.2.- ANÁLISIS COMPARATIVO DE MEDIAS

8.2.1.- NOMINAL FRENTE A INCREMENTO DE 1 HORA EN EL HORARIO DE TRABAJO DIARIO

8.2.2.- NOMINAL FRENTE A INCREMENTO DE LA CAPACIDAD DE LOS RECURSOS EN UN 200% RESPECTO A LA CAPACIDAD NOMINAL Y, ADEMÁS, SE INCREMENTA LA TASA DE LLEGADA DE MATERIAS PRIMAS UN 110% RESPECTO A LA TASA DE LLEGADA NOMINAL

8.2.3.- NOMINAL FRENTE A CAMBIOS EN EL TURNO DE TRABAJO PARA INCLUIR UNA PAUSA DE 1 HORA A LO LARGO DEL TURNO HABITUAL

8.2.4.- COMPARACIÓN ENTRE LA MEDIDA CONSISTENTE EN ALARGAR EL TURNO 1 HORA MÁS Y LA MEDIDA CONSISTENTE EN AUMENTAR LA CAPACIDAD AL DOBLE Y LA TASA DE LLEGADA DE MATERIAS PRIMAS UN 20%

9.- COMENTARIOS SOBRE EL ENTORNO ARENA

10.- CONCLUSIONES

11.- BIBLIOGRAFÍA

1.- Introducción

En este trabajo, hemos simulado el proceso de fabricación de coches eléctricos en el programa Arena, un software de simulación de automatización. Nos hemos basado en Tesla, la empresa innovadora cuyo objetivo es acelerar la transición a energías renovables. En particular, se ha simulado la producción del Model S, un coche eléctrico lujoso con altas prestaciones.

Debido a la enorme complejidad en la fabricación de todos los elementos para un vehículo eléctrico como el Model S y, además, debido a la limitación de recursos por utilizar la versión estudiante del software, se ha modelado el proceso de forma reducida, incluyendo las partes más importantes del proceso.

2.- Fabricación de la batería

La fabricación de celdas de litio para las baterías consiste en varias etapas, que se pueden resumir en dos principales: la fabricación del electrodo y el ensamblaje de las celdas. En el caso de la batería de Tesla, se agrupan miles de celdas en un paquete que posteriormente se coloca en la base del vehículo.



Figura 1: Paquete de baterías

El esquema que se ha seguido para la producción de las baterías es el siguiente:

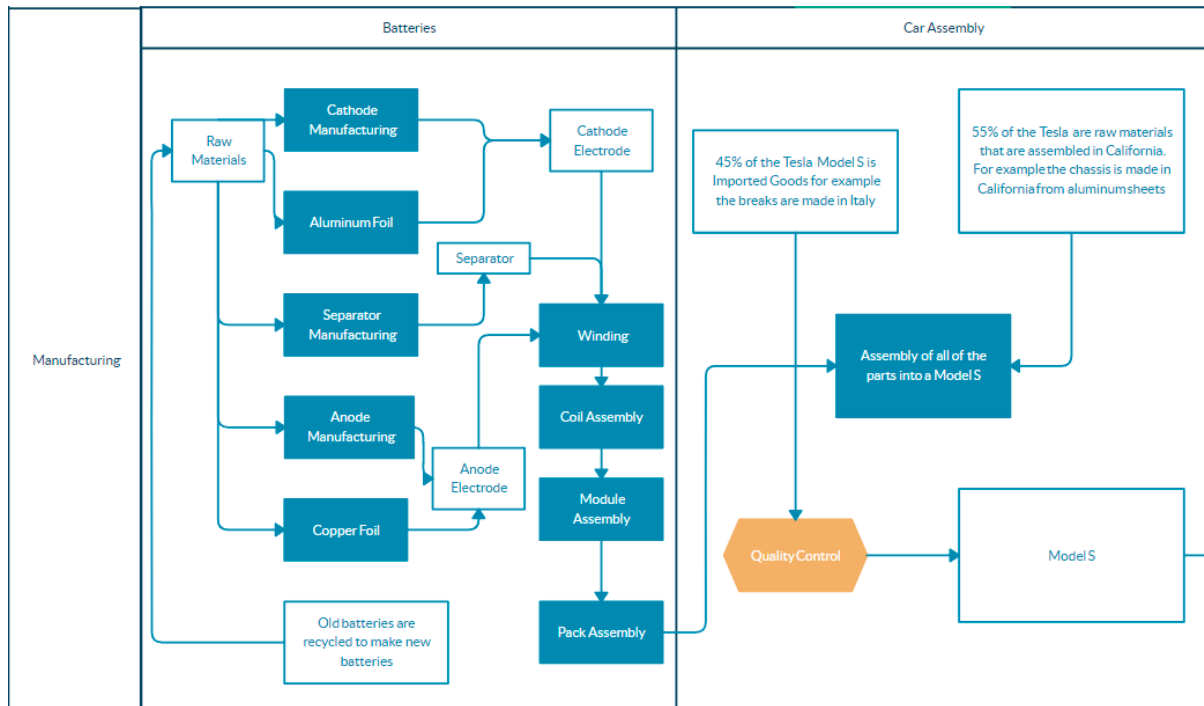


Figura 2: Esquema del proceso productivo de la batería

Por simplicidad, se han omitido los procesos de tratamiento de las materias primas que son: mezclar una disolución de varias materias primas, revestimiento y secado.

Por tanto, partimos de rollos metálicos laminados, de cobre y aluminio, y el polímero, un material aislante que se sitúan entre el ánodo y el cátodo.

Materias primas de partida:

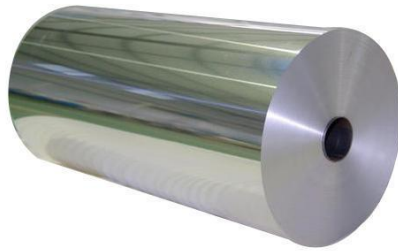


Figura 3: Lámina aluminio



Figura 4: Lámina de cobre



Figura 5: PVC battery separator

- En la simulación, antes del proceso de fabricación se ha modelado el transporte del material, siendo el origen de este material de un almacén o material reciclado, simulado en Arena con el bloque *create*. Para el transporte fue necesario agrupar los materiales, transportarlos y separarlos. En Arena, estos materiales se han transportado en *carts*.

- Después de la llegada de las láminas, entra en los procesos *fabricación celdas batería*, esta engloba varios procesos que se corresponde con el proceso de fabricación del electrodo. Primero el calandrado, que consiste en presionar los metales entre rodillos. A continuación, hay procesos de corte longitudinal y secado al vacío. Finalmente, se hace el ensamblaje de las células.
- El último paso en el proceso de fabricación de la batería es agrupar miles de celdas en un paquete. Esto se corresponde con el bloque *creación del panel de baterías*.

Una vez tenemos las baterías, se transportan mediante un *cart* a la zona donde se unirán con la estructura del coche y con el motor eléctrico.



Figura 6: Fabricación de una celda

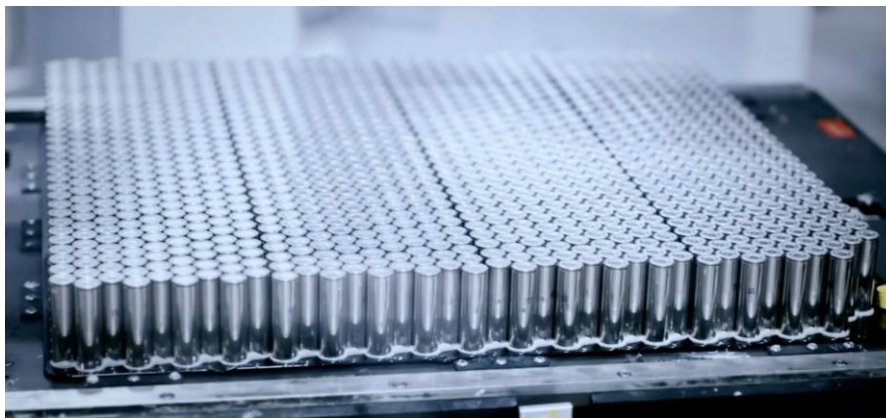


Figura 7: Paquete de baterías, un conjunto de celdas

3.- Fabricación cuerpo del coche

La estructura del coche se fabrica mayoritariamente de aluminio, un metal con propiedades adecuadas para la automoción al ser ligero, resistente, de larga duración, muy resistente a la corrosión, impermeable, reciclable y dúctil. Esta última propiedad, permite al aluminio deformarse de manera plástica sin romperse, algo esencial para la fabricación de la estructura del coche.

Además del aluminio, en proporciones mucho menores, se usan otros materiales que lo complementan:

- Acero al boro: Por sus propiedades en cuanto a resistencia, se usa para reforzar el aluminio en puntos de seguridad críticos. Este acero al boro a su vez está compuesto por boro, hierro, carbón metalúrgico y otros aditivos.
- Titanio: Para la parte baja del coche se usa también titanio que, gracias a su gran resistencia, permite proteger el panel de baterías de impactos o rozamientos de elementos de la carretera.

Esta información se ha obtenido de la siguiente fuente:

Bauxite: The Tesla Model S body and chassis are built almost entirely from aluminum, which comes from bauxite ore. Aluminum is lightweight, which helps to maximize the range of the battery beyond that of other EVs. The total amount of aluminum used in the car is 410 lbs (190 kg). [1]

A continuación, explicaremos las transformaciones que se realizan sobre el aluminio.

El aluminio llega en enormes rollos de unos 9000 kilogramos de peso. Estos rollos se cortan con láser en láminas y luego se les da forma mediante prensado. De aquí viene la importancia de la ductilidad del aluminio, de no ser así, no sería un material adecuado para el proceso de fabricación de la estructura del coche.

Posteriormente, se unen las distintas láminas prensadas para conseguir la carrocería final del coche y, finalmente, se pinta la carrocería y se le da cierto tratamiento para otorgar al coche una imagen atractiva y para protegerlo de los agentes externos.

Todos estos pasos, se han emulado mediante módulos *process* y se ha usado un módulo *create* para la llegada de la entidad del aluminio que se utiliza para la estructura del coche.

El transporte del aluminio a lo largo de todos estos procesos se ha realizado mediante una cinta (*conveyor*) que también lleva la estructura final a la siguiente parte del proceso, parte en la que se unen batería, estructura del coche y motor.

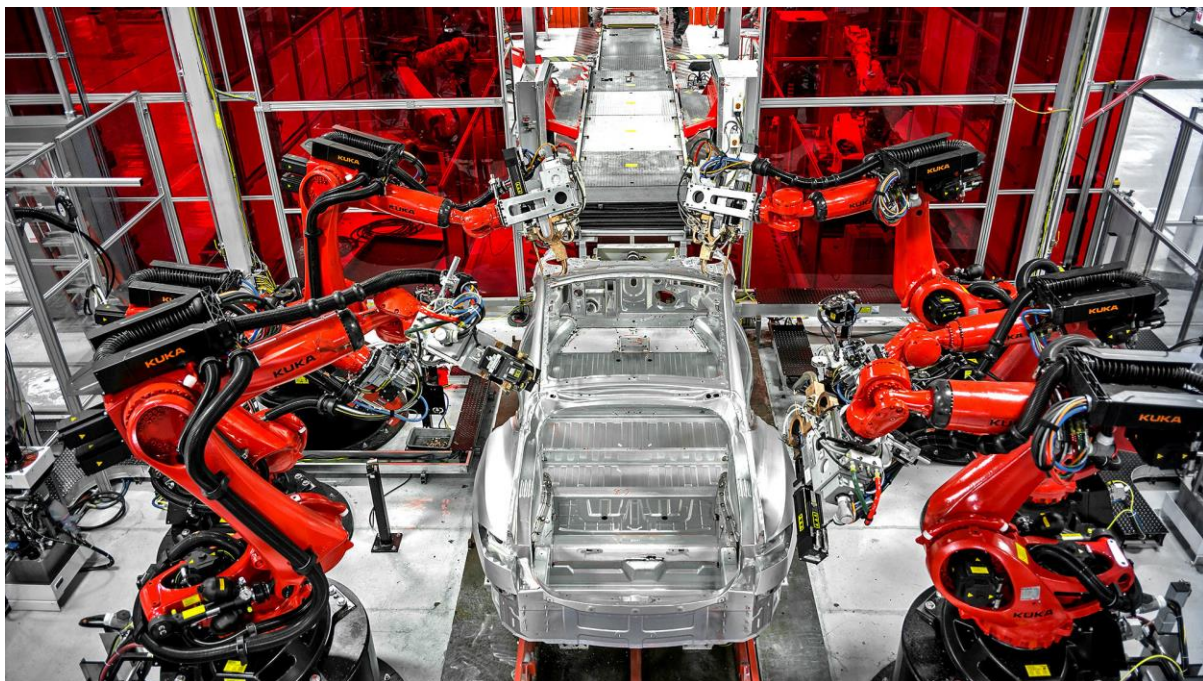


Figura 8: Fabricación del cuerpo del Model S

4.- Fabricación del motor eléctrico

El motor que se va a fabricar es un motor eléctrico trifásico de inducción AC. Para ello, nos basamos en el esquema que a continuación se muestra (simplificando el proceso):

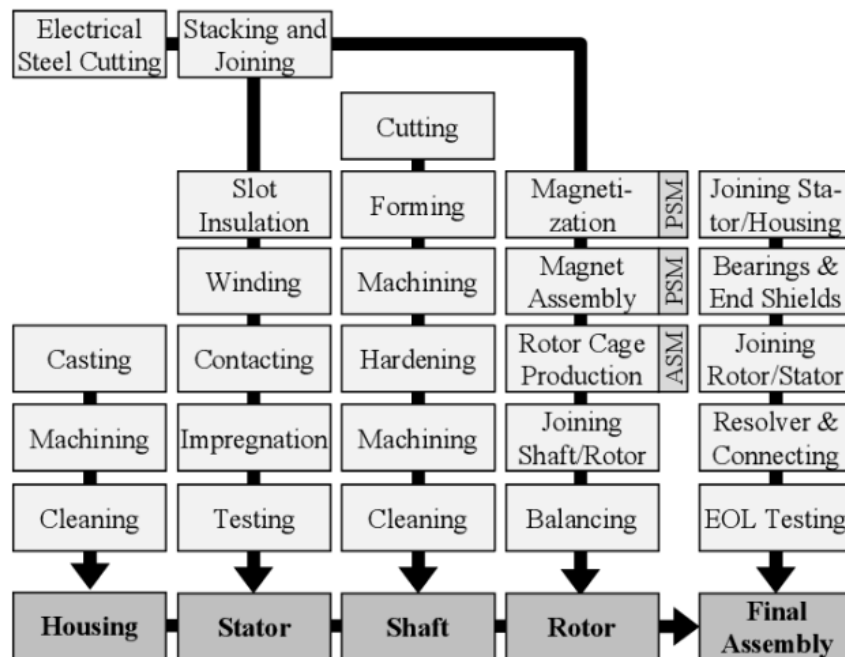


Fig. 4. Simplified production process of electric motors

Figura 9: Esquema sobre el proceso productivo del motor

Básicamente, el motor se compone de:

- La carcasa, que protege al motor de agentes externos como agua, viento, polvo, etc.
- El estátor, que se encarga de generar un campo magnético giratorio cuando una corriente trifásica atraviesa sus devanados.
- El eje, que gira solidariamente con el rotor.
- El rotor, debido a la variación del campo magnético, genera unas corrientes inducidas gracias a la fuerza electromotriz. Estas corrientes inducidas junto con la presencia del campo magnético giratorio, provocan una fuerza magnética que tiene como resultado el giro del rotor junto con el eje.

A la hora de implementar esto en Arena, se ha usado un módulo *create*, que simula la llegada de las piezas necesarias para la elaboración del motor. Con las piezas ya disponibles, se han encadenado una serie de *process* que emulan la fabricación de las distintas partes del motor ya comentadas:

- Montaje de la carcasa → consiste en la fundición del metal, producción de la carcasa y limpieza del metal que compone la carcasa.

- Montaje del estátor → consiste en el aislamiento de las ranuras, el bobinado de cobre en las ranuras y su posterior verificación.

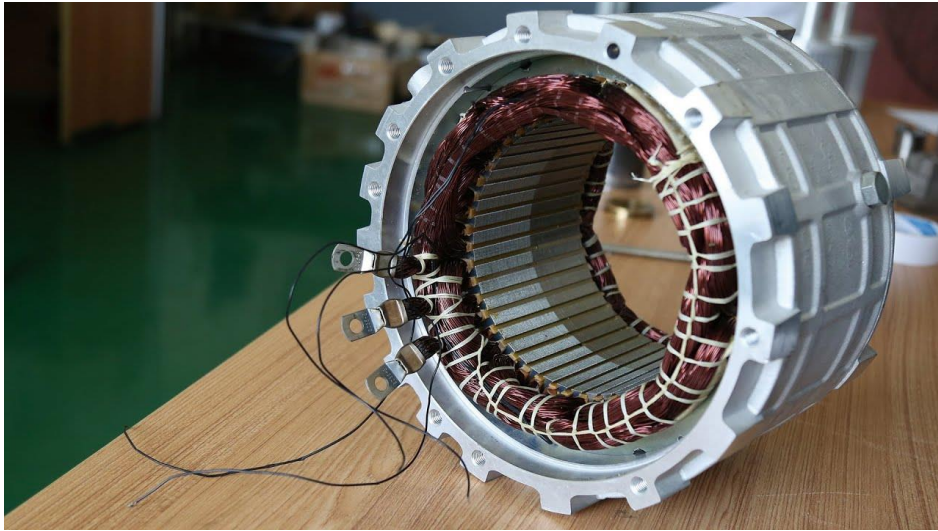


Figura 10: Imagen del estátor de un motor eléctrico

- Montaje del eje → consiste en el corte de la pieza metálica, su endurecimiento y la limpieza.
- Montaje del rotor → comúnmente del tipo jaula de ardilla que se une al eje del motor.

Finalmente se ensamblan estas partes para obtener el motor.

Y ya tendríamos nuestro motor eléctrico que es una de las tres partes esenciales junto con la batería y el cuerpo del coche.

Los motores llegan a la parte de unión mediante un *cart*.

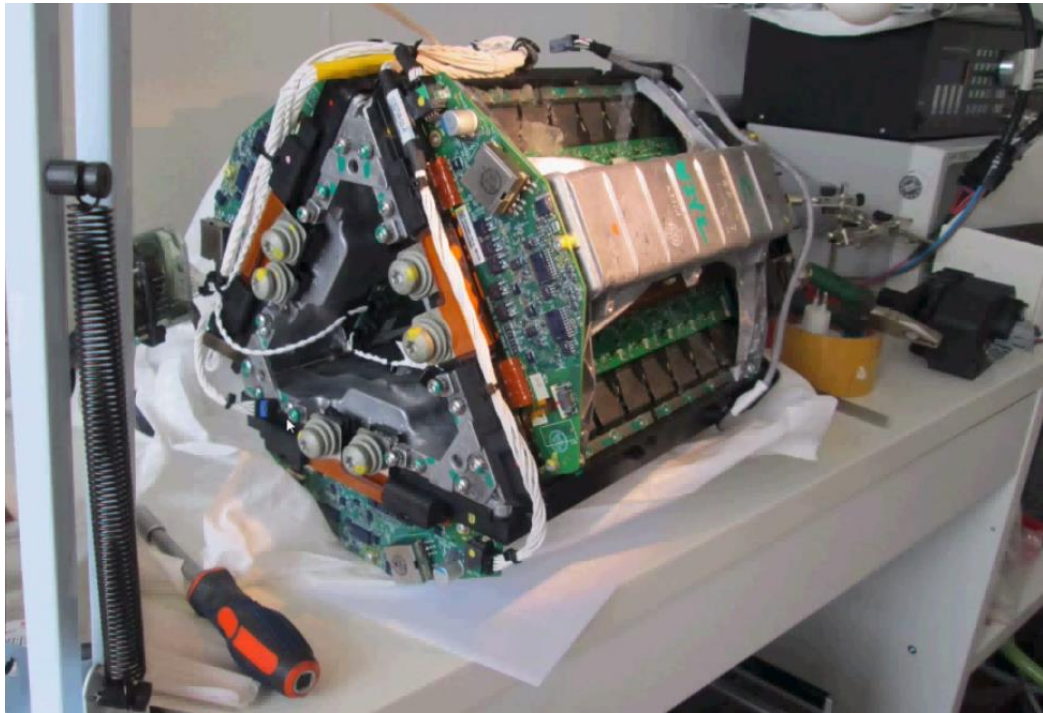


Figura 11: Imagen de un motor eléctrico de Tesla sin la carcasa



Figura 12: Motor eléctrico finalizado

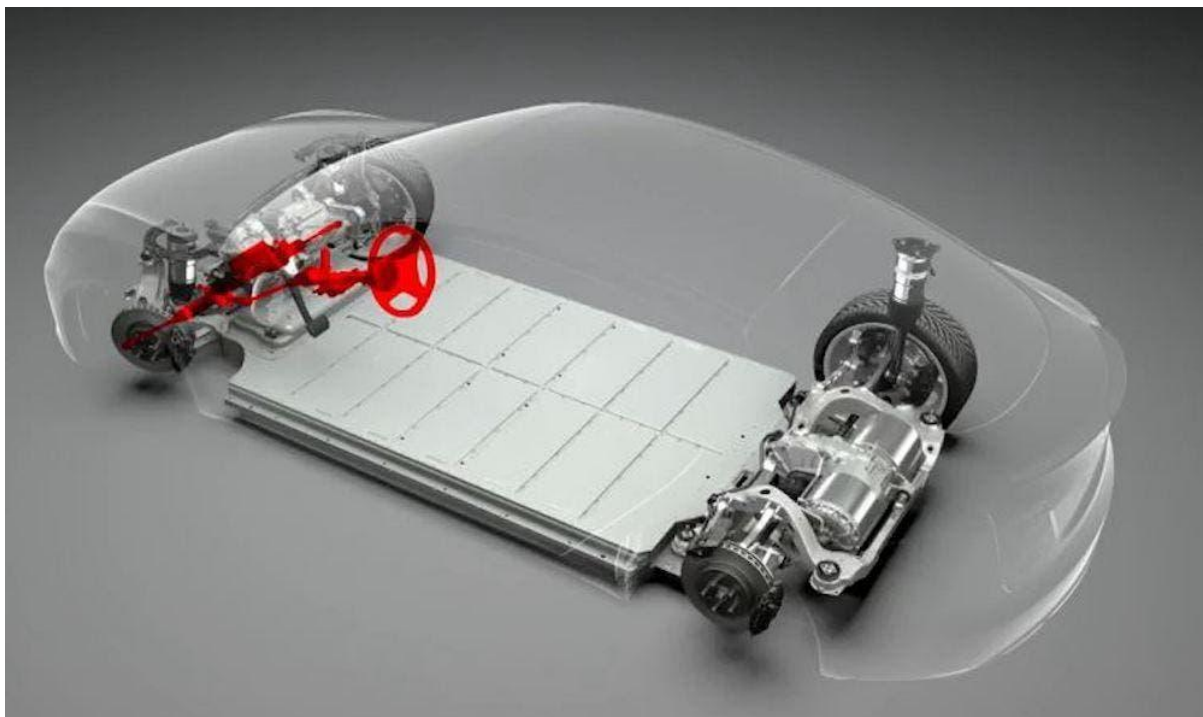


Figura 13: Motor eléctrico finalizado montado sobre el vehículo

5.- Ensamblaje de la batería, la estructura del coche, el motor eléctrico y finalización del vehículo

El ensamblaje final lo realizan un equipo de robots y mecánicos conjuntamente, para así conseguir mayor eficiencia.

Una vez tenemos la batería, la estructura del coche y el motor eléctrico, se unen mediante un bloque *match*. Este bloque tan solo saca una nueva entidad si tiene al menos una entidad de cada tipo (batería, estructura del coche y motor eléctrico), en caso contrario se encolan las entidades.

Una vez unidas estas partes, se añaden los retrovisores y se instalan los faros. Posteriormente, se introducen los dos ejes transversales de las ruedas, las llantas, sillas y el volante. Luego se instala el computador, la pantalla y los sensores del coche. Finalmente, se instalan puertas y lunas laterales, trasera y frontal.

6.- Producto final

Una vez finalizado el Model S, imitando la producción real de Tesla debido a que la demanda es mayor que la oferta, existe un bloque *decide* que, según una probabilidad, se decide si enviar el coche a un almacén o directamente a la casa del cliente.



Figura 14: Tesla Model S



Figura 15: Vista cenital del Model S

7.- Simulación en Arena

A continuación se explican los detalles de la fabricación relacionados con la simulación.

7.1.- Schedule: Tasa llegada de materiales

Se ha asignado la misma tasa de llegada para todas las entidades de la simulación.

Las entidades son:

- En la fabricación de la batería:
 - aluminio
 - cobre
 - aislante
- En la fabricación del cuerpo del coche:
 - aluminio
- En la fabricación del motor:
 - las piezas de motor

Mediante *Schedule (de tipo Arrival)* se han asignado unos horarios de trabajo de la planta, de manera que imponemos que, para cada día, los módulos *create* funcionarán de 9:00 a 21:00, con una tasa de 2 entidades por hora, limitado a un máximo de 20 entidades en cada *create*, ya que de lo contrario, si no se limitaba esto, por la cierta complejidad del modelo, se producía el error de más de 150 entidades en la simulación. Por tanto, era necesario limitar el número máximo de entidades que puede generar cada módulo *create*, esto implica que como máximo en un día de trabajo, la fábrica puede producir hasta 20 vehículos Tesla Model S.

Cabe destacar que también se tiene un *Schedule (de tipo Capacity)* a partir del cual se define la capacidad de todas las máquinas de la planta (no se podía hacer varios schedules para diferentes máquinas por el límite de elementos máximos en la versión de estudiante).

7.2.- Tiempos de proceso

Planteando una tasa de fabricación de aproximadamente 2 vehículos por hora, se han planteado unos tiempos de proceso aproximados tales que en conjunto tienen la siguiente configuración de tiempos por “rama” de procesos:

- Para la fabricación de la batería:
 - Unos 30 minutos acumulando el conjunto de los 4 procesos.
- Para la fabricación de la estructura del coche:
 - Unos 20 minutos acumulando el conjunto de los 4 procesos.
- Para la fabricación del motor
 - Unos 30 minutos acumulando el conjunto de los 4 procesos.
- Para el ensamblado final
 - Unos 10 minutos acumulando el conjunto de los 4 procesos.

7.3.- Fabricación de la batería

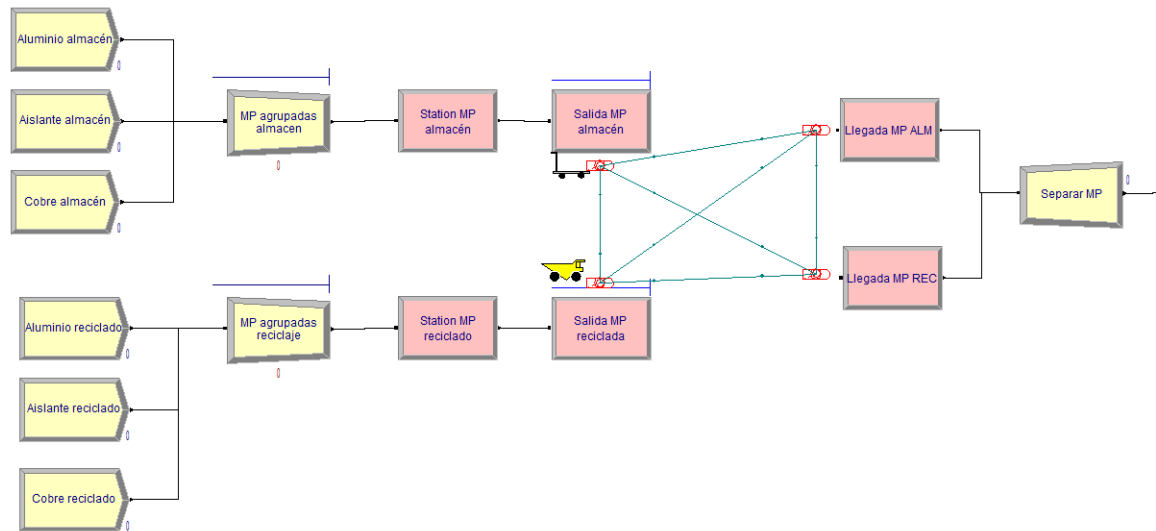


Figura 16: Captura de la parte de la fabricación de la batería (I)

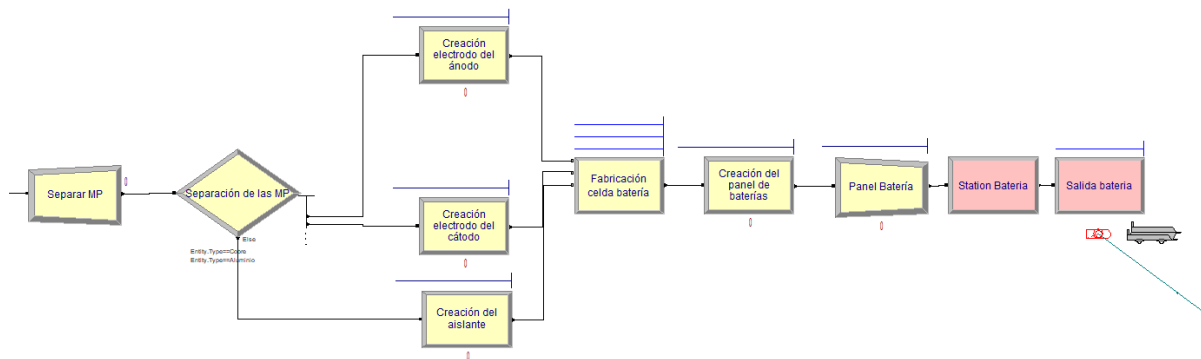


Figura 17: Captura de la parte de la fabricación de la batería (II)

- Desde los bloques *create* salen las entidades de las materias primas (aluminio, cobre y aislante) del almacén y reciclado.
- En el bloque *batch* juntamos las materias primas para el transporte
- Desde la estación salen las materias primas agrupadas que transportamos sobre un *cart*.
- Las materias primas agrupadas llegan a otra estación y después lo separamos a través de un bloque *separate*.
- Una vez separados los materiales, con el bloque *decide*, enviamos cada material a su *process* correspondiente; para los procesos de fabricación del ánodo, cátodo y aislante.
- La salida de los tres procesos se junta en un *process* que es la fabricación del electrodo, y engloba a muchos más. Modelamos como la fabricación de una celda.
- Después la celda entra en el *process* de fabricación del panel.
- El *batch* modela la creación del paquete de la batería final, donde se agrupan miles de celdas para crear un paquete. Debido a la limitación de recursos, en

la simulación se crea un paquete con una celda, pero realmente serían miles de celdas para un paquete.

- Finalmente, por un *station* y mediante un *cart* envíamos la batería finalizada hasta la zona de ensamblaje final.

7.4.- Fabricación de la estructura del coche

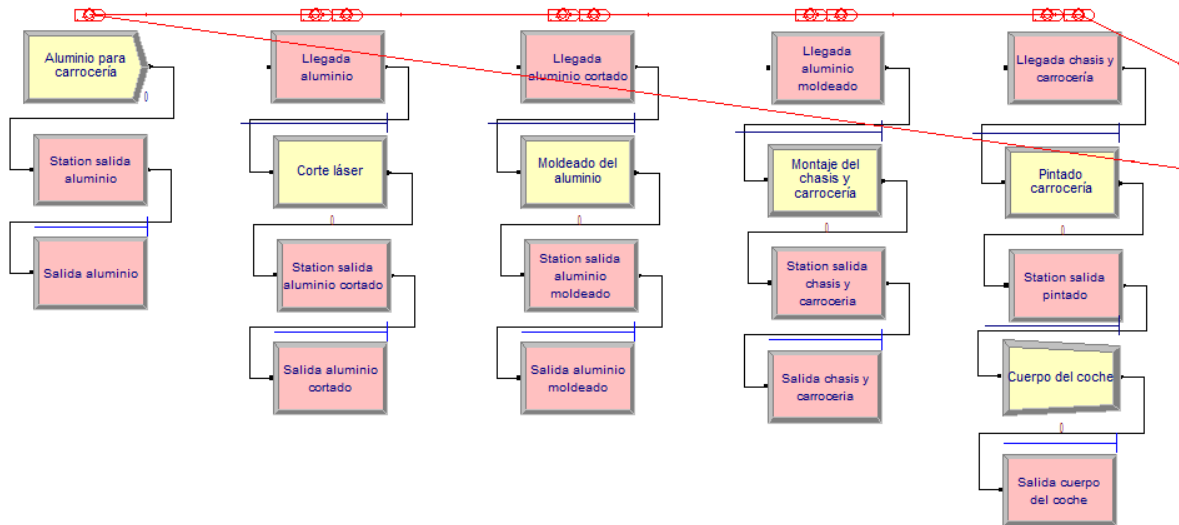


Figura 18: Captura de la parte de la estructura del coche

- Se utiliza un bloque *create* para simular la llegada del aluminio a la zona de trabajo.
- Se usan diferentes *process* para cada operación realizada.
- Para el transporte de la entidad de una zona a otra, se ha usado una cinta (*convey*) que llega hasta la zona donde se unen las tres partes (batería, estructura y motor). Para ello, se han creado y encadenado varias estaciones de llegada y salida de entidades.
- Finalmente, se usa un bloque *batch* que genera la entidad final del cuerpo del coche.

7.5.- Fabricación del motor

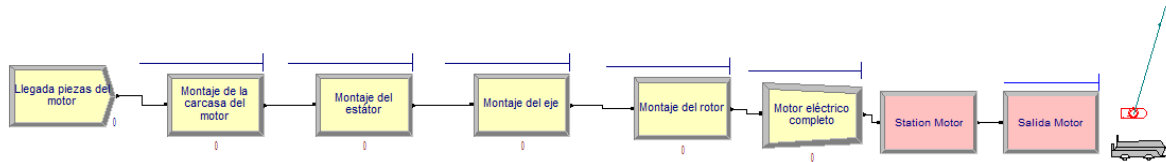


Figura 19: Captura de la parte de la fabricación del motor del coche

- Para la parte del motor, volvemos a usar un *create* que emula la llegada de los materiales.
- Tras esto, se usan varios *process* para realizar la fabricación de las diferentes partes que componen el motor eléctrico.
- Mediante un *cart* llevamos nuestro motor eléctrico a la zona de unión.

7.6.- Unión, batería, estructura del coche y motor, junto con operaciones finales

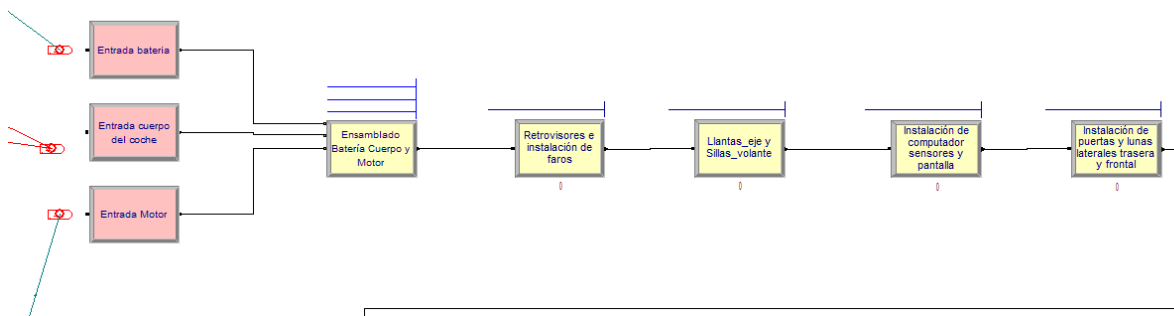


Figura 20: Captura de la parte de la unión de la batería, estructura y motor del coche, junto con las últimas operaciones para terminar el coche

- Tenemos tres estaciones a las que llegan las tres entidades esenciales que componen nuestro coche eléctrico: batería, estructura del coche y motor eléctrico.
- Mediante un *match*, imponemos al programa a que nos dé la entidad *Coche semiterminado* solo cuando al menos tenga una entidad de cada entidad anteriormente mencionada, en caso contrario, las respectivas entidades sobrantes se encolan.
- Se crean varios *process* para realizar diferentes procesos hasta concluir la fabricación del coche por completo.

7.7.- Venta o almacenaje del producto definitivo

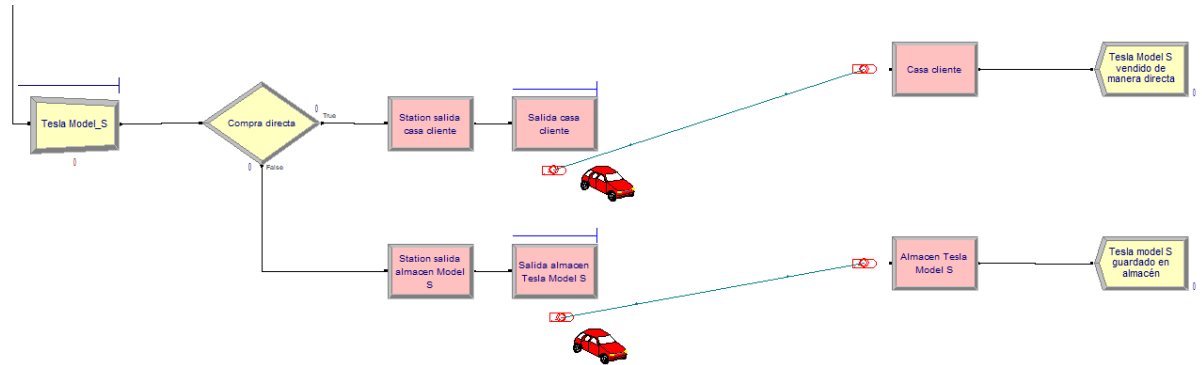


Figura 21: Captura de la parte de la venta o almacenaje del vehículo

- Llegamos a la parte final del proceso productivo del Tesla Model S. Lo primero que se realiza es usar un *batch* que genere la entidad final *Tesla Model S*.
- Mediante un bloque *decide*, ofrecemos dos opciones sobre qué hacer con el producto final, con un 75% de probabilidad (puesto que es un coche muy demandado por la sociedad), se lleva el coche directamente a la casa del cliente, y con un 25% de probabilidad, el coche se lleva al almacén. El transporte del producto final tanto a casa del cliente como al almacén se ha simulado con *carts* en el entorno Arena.

7.8.- Ciertos resultados característicos del proceso de fabricación

Los resultados que se muestran a continuación corresponden a 10 replicaciones, siendo cada una de una duración de 1 día.

Usage

Total Number Seized	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average
Equipo de robots	73.0000	4,90	56.0000	80.0000
Maquina aislante	19.6000	0,84	17.0000	21.0000
Maquina anodo	20.0000	1,07	17.0000	22.0000
Maquina bobinado	18.5000	1,08	16.0000	20.0000
Maquina catodo	19.4000	1,18	17.0000	22.0000
Maquina laser	19.5000	1,13	15.0000	20.0000
Maquina prensadora	19.4000	1,13	15.0000	20.0000
Maquinaria carcasa	20.0000	0,00	20.0000	20.0000
Maquinaria eje	20.0000	0,00	20.0000	20.0000
Maquinaria estator	20.0000	0,00	20.0000	20.0000
Maquinaria rotor	20.0000	0,00	20.0000	20.0000
Mecanicos	52.3000	4,00	42.0000	60.0000

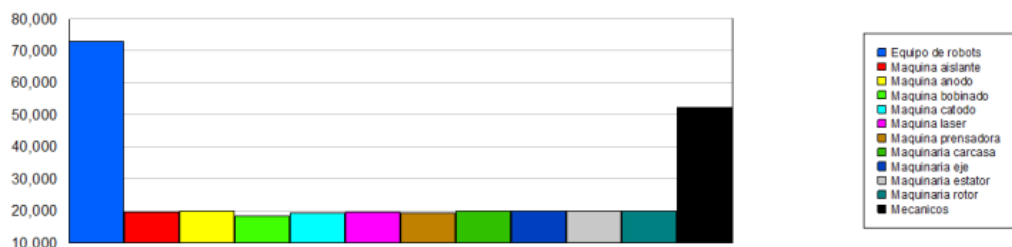


Figura 22: Utilización de los recursos de la planta

Como podemos observar en la figura 22, los recursos más usados son equipos robóticos y personal (mecánicos e ingenieros), este es un resultado que se corresponde de manera fiel con la realidad, lo cual es un buen indicativo del modelo de Arena en ese sentido.

Other

Number In	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average
Aislante	20.0000	0,58	18.0000	21.0000
Aluminio	39.5000	1,55	35.0000	42.0000
Capsula bateria	18.6000	0,97	17.0000	20.0000
Cobre	20.7000	0,90	19.0000	22.0000
Coche semiterminado	17.8000	1,38	14.0000	20.0000
Cuerpo Coche	19.2000	1,38	14.0000	20.0000
Motor electrico	20.0000	0,00	20.0000	20.0000
MP agrupadas	19.7000	0,68	18.0000	21.0000
Panel Bateria	18.5000	1,08	16.0000	20.0000
Piezas motor	20.0000	0,00	20.0000	20.0000
Tesla Model S	17.1000	1,41	14.0000	20.0000

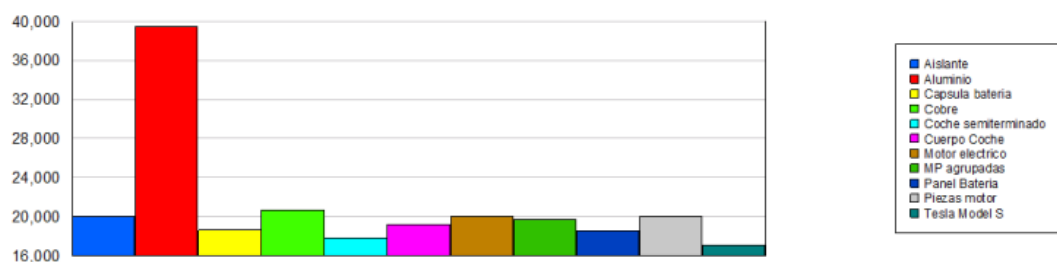


Figura 23: Entidades generadas en el proceso productivo

En esta imagen destaca la gran cantidad de aluminio que ha necesitado el proceso productivo, esto se debe a que el aluminio es utilizado tanto para la fabricación de las baterías, como en la fabricación de la estructura del coche. Para el resto de entidades, el número obtenido es más homogéneo.

A la vista de los resultados obtenidos al simular 10 replicaciones de un día, la media obtenida de vehículos Tesla Model S producidos en un día es de 17.1 unidades \approx 17 unidades.

8.- Análisis estadístico

8.1.- Análisis nominal (reducción de half width)

Por la distribución de horarios de trabajo de la planta, se hacen replicaciones de 24h para evaluar el comportamiento de la planta en un ciclo de trabajo habitual de un día completo. Más adelante se explicarán estos horarios en detalle.

Se comienza analizando para $n_0 = 10$ replicaciones. Se va a buscar reducir el half width del 'Total WIP', ya que $h = 9.89$ es muy elevado (intervalo de valores muy amplio). El half width de 'Tesla Model S producido' ya es pequeño (< 2), por lo que nos centraremos en el Total WIP, para tener valores más fiables de este parámetro, siendo que a su vez también disminuirá el half width de 'Tesla Model S producido'.

- **$n_0 = 10$ replicaciones**

Output

Output	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average
Tesla Model S producido	17.1000	1,41	14.0000	20.0000
Total WIP	23.3000	9,89	2.0000	43.0000



Figura 24: Resultados estadísticos de los parámetros que pretenden estudiar tanto el WIP total, como el número de vehículos producidos ($n = 10$ replicaciones)

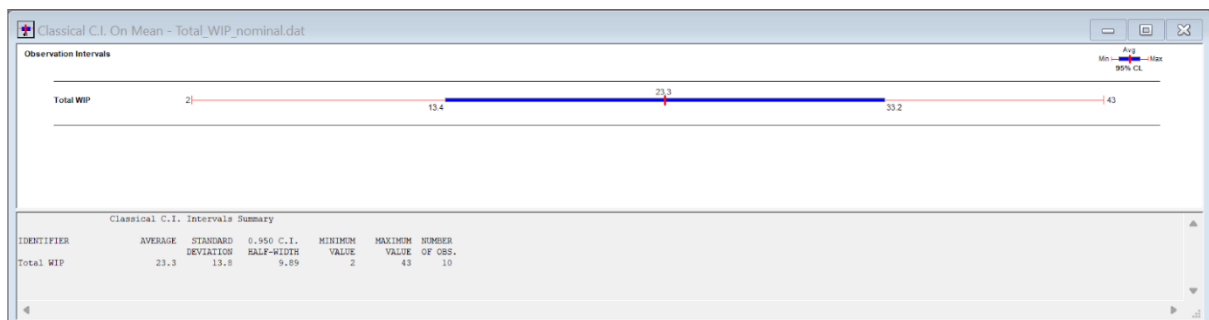


Figura 25: Resultados obtenidos mediante Output Analyzer para el intervalo de confianza de la media para el parámetro Total WIP ($n = 10$ replicaciones)

- **Búsqueda de half width de 'Total WIP' $\rightarrow h = 5$**

Se usa la aproximación:

$$n = n_0 * \frac{h_0^2}{h^2} = 10 * \frac{9.89^2}{5^2} = 39.12 \approx 39 \text{ replicaciones}$$

Realizaremos una nueva simulación con 39 replicaciones para buscar obtener dicho half width:

Output

Output	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average
Tesla Model S producido	16.9487	0,96	8.0000	20.0000
Total WIP	24.4359	6,80	0.00	93.0000

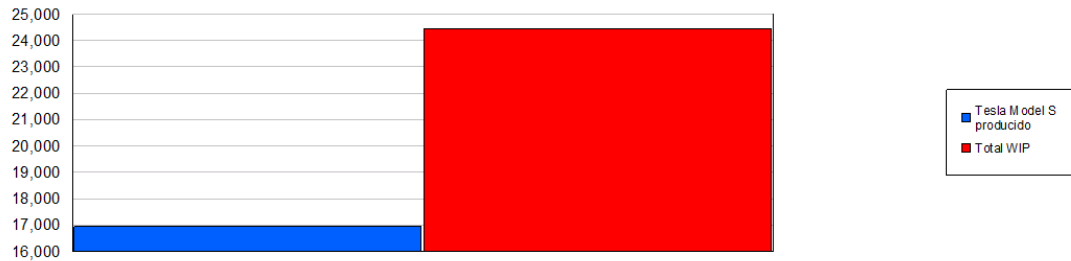


Figura 26: Resultados estadísticos de los parámetros que pretenden estudiar tanto el WIP total, como el número de vehículos producidos ($n = 39$ replicaciones)

Aunque se esperaba un half width de en torno a 5 según la fórmula, el resultado ha sido $h = 6.80$, que se aleja un poco de 5, por encima, con lo cual interesa iterar hasta lograr el h deseado.

Se usa la aproximación:

$$n = n_0 * \frac{h_0^2}{h^2} = 39 * \frac{6.80^2}{5^2} = 72.13 \approx 72 \text{ replicaciones}$$

Output	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average
Tesla Model S producido	16.7778	0,62	8.0000	20.0000
Total WIP	24.4861	4,22	0.00	93.0000

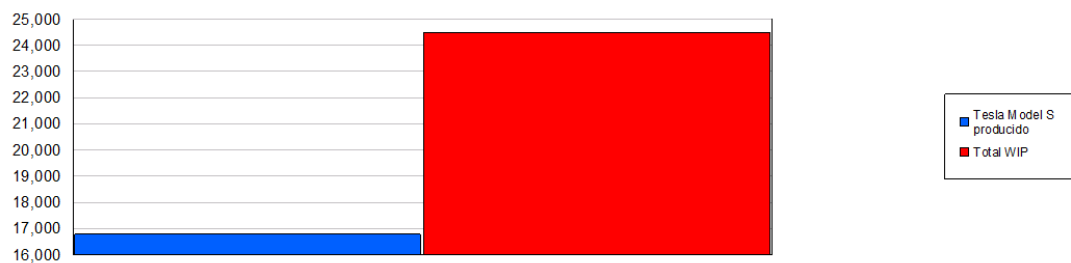


Figura 27: Resultados estadísticos de los parámetros que pretenden estudiar tanto el WIP total, como el número de vehículos producidos ($n = 72$ replicaciones)

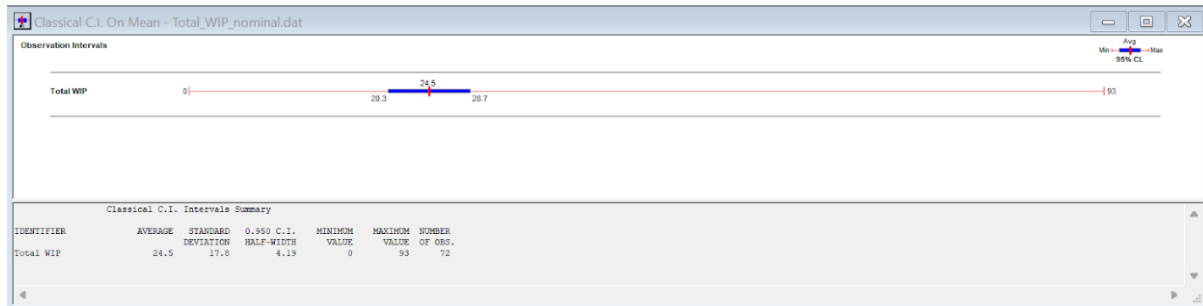


Figura 28: Resultados obtenidos mediante Output Analyzer para el intervalo de confianza de la media para el parámetro Total WIP ($n = 72$ replicaciones)

Como vemos, ahora el half width ha vuelto a disminuir y ya es inferior a la h deseada de 5, con lo cual no es necesario volver a iterar en este caso.

Por último, para este primer análisis se propone disminuir aún más el half width, hasta por ejemplo el valor que definimos como pequeño anteriormente ($h < 2$).

- **Búsqueda de half width de 'Total WIP' $\rightarrow h = 2$**

Partiremos de $h_0 = 4.22$, $n_0 = 72$ y $h = 2$. Se usa la aproximación:

$$n = n_0 * \frac{h_0^2}{h^2} = 72 * \frac{4.22^2}{2^2} = 320.55 \approx 321 \text{ replicaciones}$$

Realizaremos una nueva simulación con 321 replicaciones para buscar obtener dicho half width:

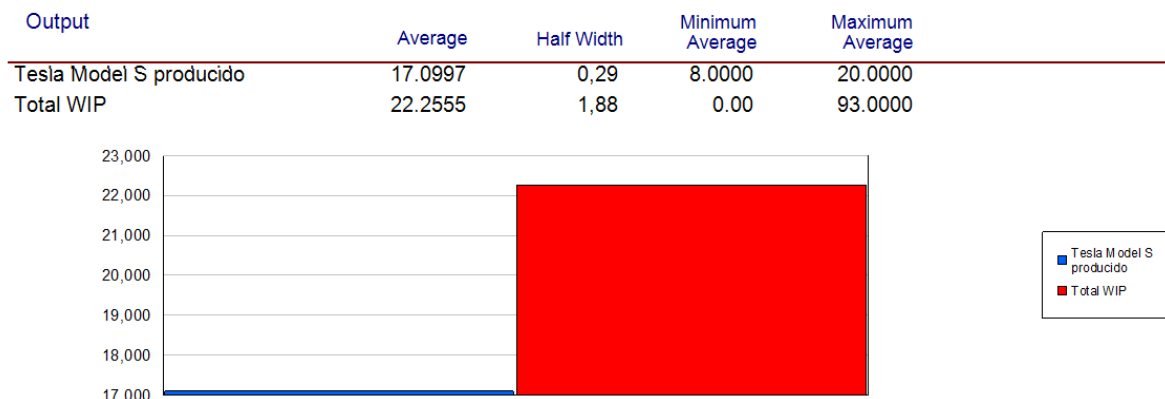


Figura 29: Resultados estadísticos de los parámetros que pretenden estudiar tanto el WIP total, como el número de vehículos producidos ($n = 321$ replicaciones)

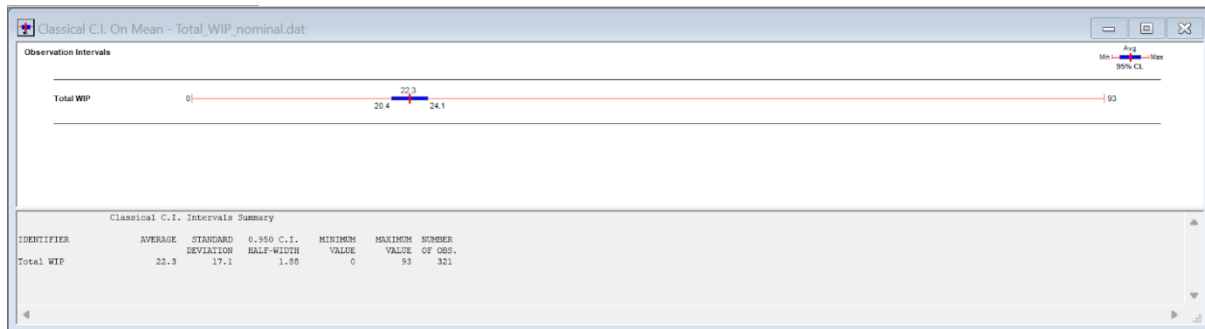


Figura 30: Resultados obtenidos mediante Output Analyzer para el intervalo de confianza de la media para el parámetro Total WIP ($n = 321$ replicaciones)

Como vemos, con 321 replicaciones, obtenemos un half width de 1.88, que es algo inferior al deseado ($h = 2$), con lo cual tendremos un intervalo de confianza más estrecho que en los casos anteriores. Esto permite que, habiendo impuesto un intervalo de confianza del 95% en torno a la media, tendremos la media esperada (real) dentro de este intervalo con un 95% de probabilidad. De ahí que interese reducir el half width para tener una media encerrada en un intervalo mucho más estrecho (para el Total WIP en este caso), consiguiendo un valor más fiable de este valor medio del parámetro.

8.2.- Análisis comparativo de medias (variando tasas de llegada de materias primas y capacidades de los recursos)

Definimos las condiciones nominales de simulación (funcionamiento habitual), para comprender con qué cambios se va a comparar:

- Schedule de los módulos *create* (excepto los de materias primas recicladas):
 - De 0:00 a 9:00 → Inactivo
 - De 9:00 a 21:00 → Tasa de 2 entidades por hora
 - De 21:00 a 00:00 → Inactivo
- Schedule de capacidades para los recursos:
 - De 0:00 a 9:00 → Inactivo
 - De 9:00 a 21:00 → Capacidad de las máquinas/recursos de 1
 - De 21:00 a 00:00 → Inactivo
- Schedule de los módulos *create* de materias primas recicladas:
 - De 0:00 a 9:00 → Inactivo
 - De 9:00 a 10:00 → Tasa de 1 entidad por hora
 - De 10:00 a 00:00 → Inactivo

8.2.1.- Nominal frente a incremento de 1 hora en el horario de trabajo diario

Se busca comprobar la mejora en el número de unidades producidas si se alarga el turno de trabajo hasta las 22:00, tal que:

- Schedule de los módulos *create* (excepto los de materias primas recicladas):
 - De 0:00 a 9:00 → Inactivo
 - De 9:00 a 22:00 → Tasa de 2 entidades por hora
 - De 22:00 a 00:00 → Inactivo
- Schedule de capacidades para los recursos:
 - De 0:00 a 9:00 → Inactivo
 - De 9:00 a 22:00 → Capacidad de las máquinas de 1
 - De 22:00 a 00:00 → Inactivo
- Schedule de los módulos *create* de materias primas recicladas: Inalterado

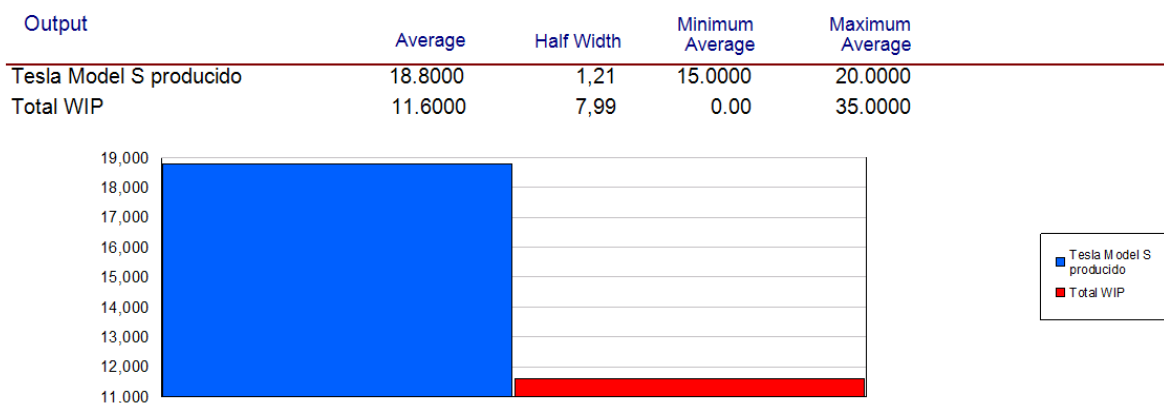


Figura 31: Resultados estadísticos de los parámetros que pretenden estudiar tanto el WIP total, como el número de vehículos producidos (Incremento de 1 hora en los turnos de trabajo)

Si comparamos con la figura 24, vemos a simple vista como el número medio de Tesla Model S producido al día aumenta con este cambio, concretamente aumenta su valor 1.7 respecto de dicho caso, ambas simulaciones para 10 replicaciones y las mismas tasas de materias primas y capacidades en los recursos.

Sin embargo, hay que garantizar la validez de estos resultados. Para ello recurrimos de nuevo a *Output Analyzer* con su opción *Compare Means*, obteniendo el siguiente resultado:

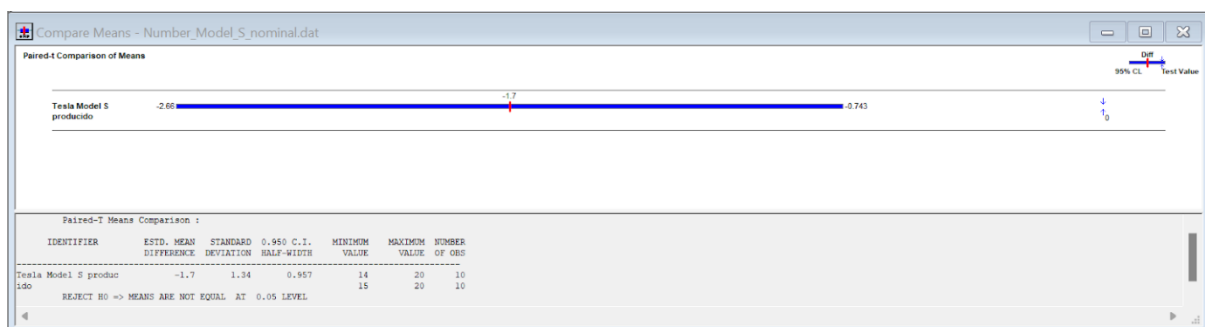


Figura 32: Comparación de medias para el caso nominal frente al incremento de 1 hora en los turnos de trabajo de la fábrica

Se aprecia como la media del caso nominal efectivamente tiene un valor inferior en 1.7 Model S producidos al día respecto del caso planteado en el que se incrementa 1 hora el turno de trabajo. Además, podemos garantizar que ambas medias son distintas, ya que como vemos, el 0 está fuera del intervalo. Por tanto, podemos garantizar que con esta medida se aumentaría la producción frente al caso nominal.

8.2.2- Nominal frente a incremento de la capacidad de los recursos en un 200% respecto a la capacidad nominal y, además, se incrementa la tasa de llegada de materias primas un 110% respecto a la tasa de llegada nominal

Se plantea ahora el caso de que, manteniendo los horarios del caso nominal (turnos habituales de 12h de trabajo), se realizase una cierta inversión en mejora de los recursos y maquinaria de manera que la capacidad de todos ellos aumentase al doble de la actual. También se pide a los proveedores un aumento en las cantidades de materias primas suministradas.

Veamos cómo afecta esto al número de unidades producidas (recordar que el máximo es 20 Tesla Model S producidos al día por limitaciones del software):

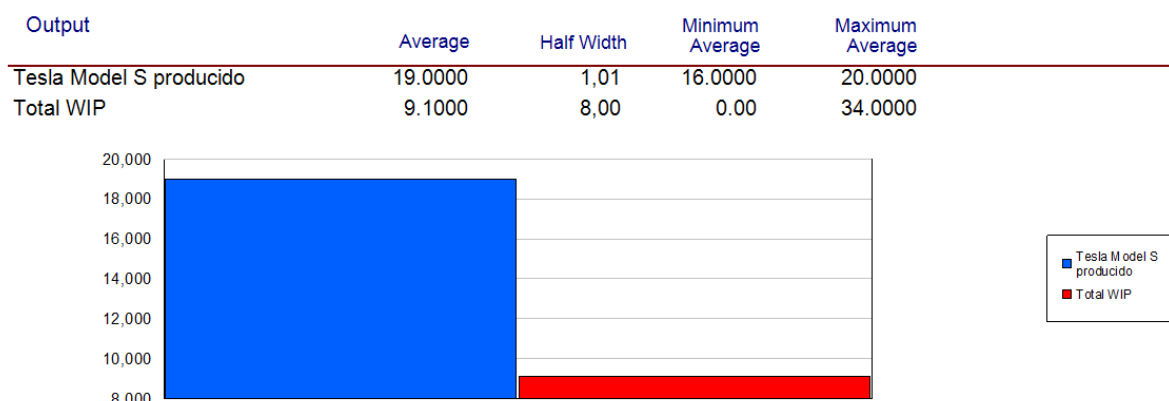


Figura 33: Resultados estadísticos de los parámetros que pretenden estudiar tanto el WIP total, como el número de vehículos producidos (Incremento de la capacidad de los recursos en un 200% e incremento de la tasa de llegada de materias primas en un 110%)

Si comparamos con la figura 24, vemos de nuevo a simple vista como el número medio de Tesla Model S producido al día aumenta con este cambio, concretamente aumenta su valor 1.9 respecto de dicho caso, ambas simulaciones para 10 replicaciones y con los cambios mencionados en este apartado en cuanto a capacidad y tasa de llegada de materias primas. Sin embargo, hay que garantizar la validez de estos resultados.

Para ello recurrimos de nuevo a *Output Analyzer* con su opción *Compare Means*, obteniendo el siguiente resultado:

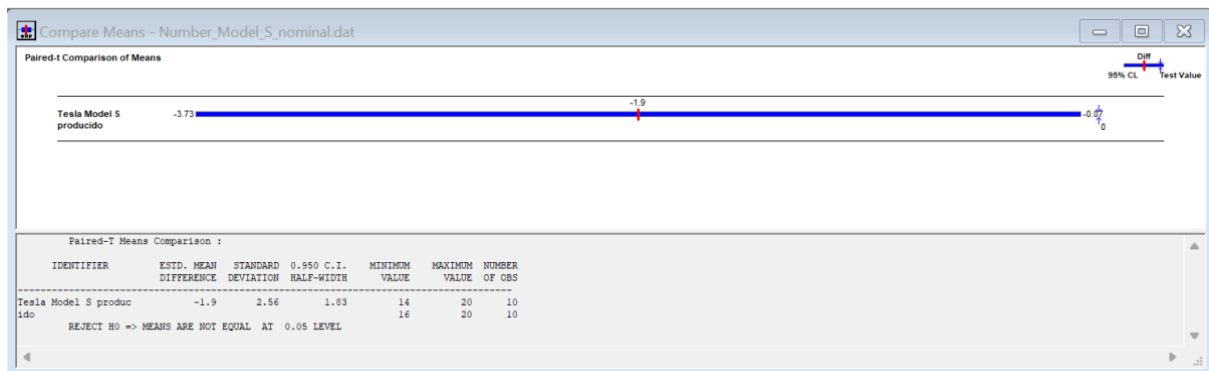


Figura 34: Comparación de medias para el caso nominal frente al incremento de la capacidad de los recursos en un 200% y el incremento de la tasa de llegada de materias primas en un 110%

Se aprecia como la media del caso nominal efectivamente tiene un valor inferior en 1.9 Model S producidos al día respecto del caso planteado en el que se incrementa las capacidades de todos los recursos en un 200% y la llegada de materias primas en un 110%, ambos respecto a los valores nominales. Además, podemos garantizar que ambas medias son distintas, ya que como vemos, el 0 está fuera del intervalo. Por tanto, podemos garantizar que con esta medida se aumentaría la producción frente al caso nominal.

8.2.3.- Nominal frente a cambios en el turno de trabajo para incluir una pausa de 1 hora a lo largo del turno habitual

Se busca comprobar la mejora en el número de unidades producidas si se incluye una pausa de 1 hora en el turno de 12h existente anteriormente, tal que:

- Schedule de los módulos *create* (excepto los de materias primas recicladas):
 - De 0:00 a 9:00 → Inactivo
 - De 9:00 a 14:00 → Tasa de 2 entidades por hora
 - De 14:00 a 15:00 → Inactivo
 - De 15:00 a 21:00 → Tasa de 2 entidades por hora
 - De 21:00 a 00:00 → Inactivo
- Schedule de capacidades para los recursos:
 - De 0:00 a 9:00 → Inactivo
 - De 9:00 a 14:00 → Capacidad de las máquinas de 1
 - De 14:00 a 15:00 → Inactivo
 - De 15:00 a 21:00 → Capacidad de las máquinas de 1
 - De 21:00 a 00:00 → Inactivo
- Schedule de los módulos *create* de materias primas recicladas: Inalterado

Veamos cómo afecta esto al número de unidades producidas:

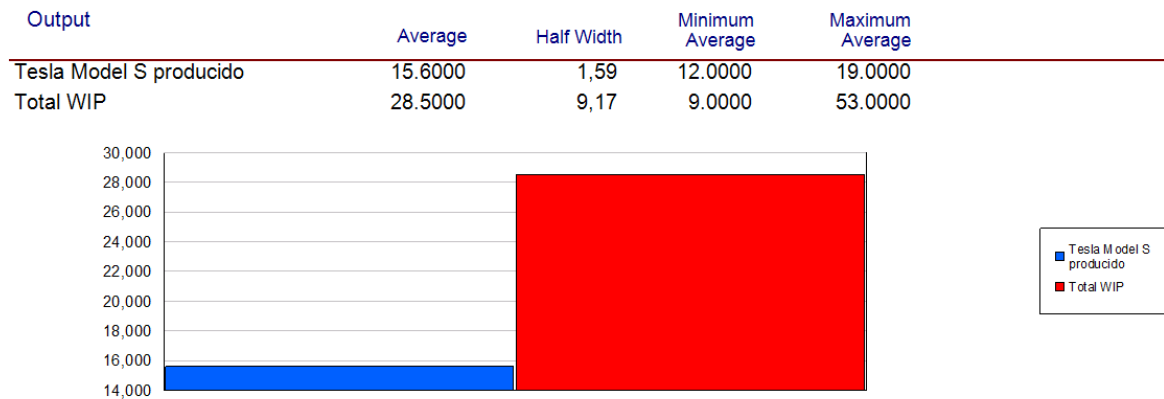


Figura 35: Resultados estadísticos de los parámetros que pretenden estudiar tanto el WIP total, como el número de vehículos producidos (Inclusión de una pausa de una hora en el turno de trabajo habitual)

Vemos ahora como esta pausa, que pretendería emular un descanso en el turno de trabajo, tiene un efecto claro de decremento en la media de unidades producidas (en 1.5 unidades menos en la media respecto del caso nominal), ya que no se ha modela el factor de cansancio por ejemplo de los mecánicos o ingenieros, que quizás sería un factor importante que esta pausa mejoraría.

Para validar estos resultados, volvemos a acudir a *Output Analyzer* con su opción *Compare Means*, obteniendo el siguiente resultado:

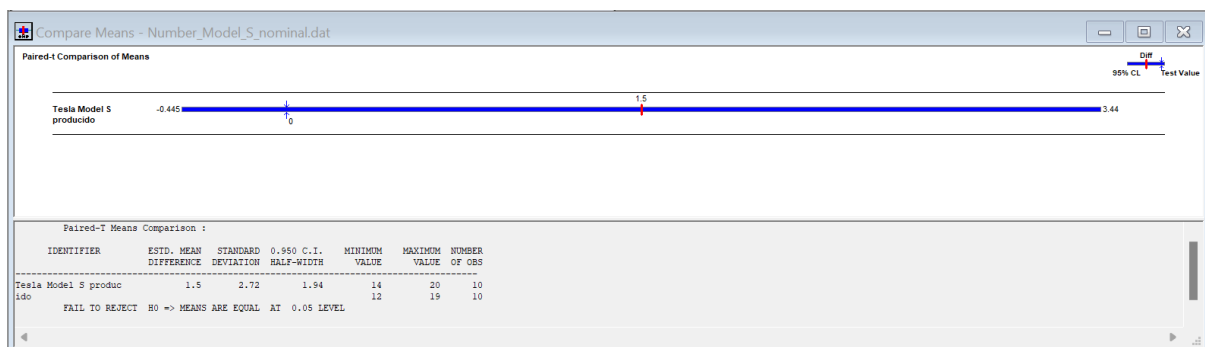


Figura 36: Comparación de medias para el caso nominal frente a la inclusión de una pausa de 1 hora a lo largo del turno de 12 horas habitual

Se aprecia como la media del caso nominal ahora tiene un valor superior en 1.5 Model S producidos al día respecto del caso planteado en el que se incluye esta pausa de 1 hora. Sin embargo, no podemos garantizar que ambas medias son distintas, ya que como vemos, el 0 está dentro del intervalo. Por tanto, no se puede garantizar que con esta medida se reduciría la producción frente al caso nominal. Aunque de nuevo recalcar que no se están teniendo en cuenta factores como el cansancio o la fatiga de los trabajadores humanos.

8.2.4.- Comparación entre la medida consistente en alargar el turno 1 hora más y la medida consistente en aumentar la capacidad al doble y la tasa de llegada de materias primas un 20%

Se busca ahora analizar cuál de las dos medidas que mejora el número de unidades producidas es mejor. Para ello, tenemos que realizar una comparación entre ambas y ver si tenemos una mejora clara de una frente a la otra para ser capaces de elegir una medida como superior a la otra.

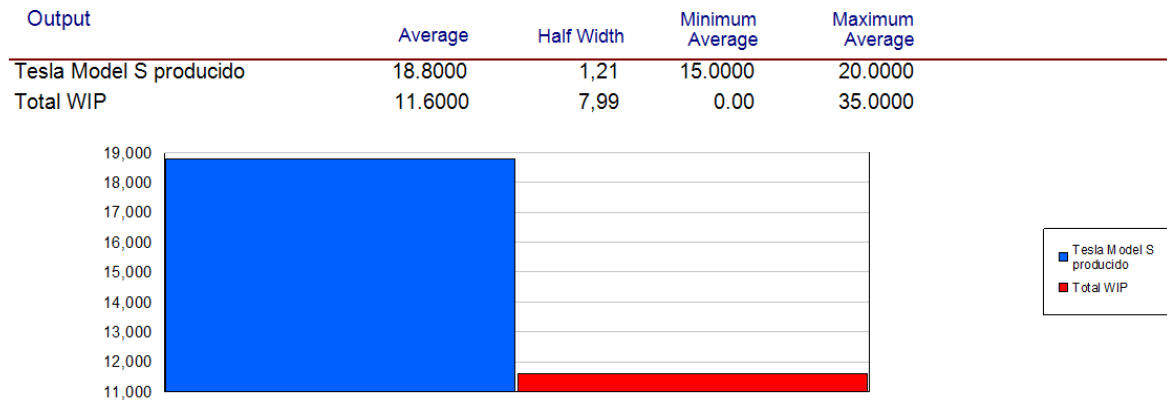


Figura 37: Resultados estadísticos de los parámetros que pretenden estudiar tanto el WIP total, como el número de vehículos producidos (Incremento de 1 hora en los turnos de trabajo)

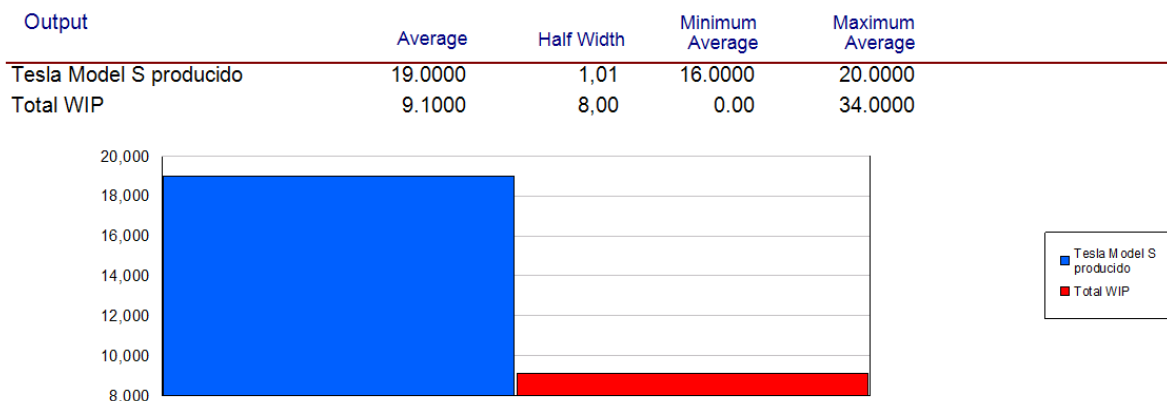


Figura 38: Resultados estadísticos de los parámetros que pretenden estudiar tanto el WIP total, como el número de vehículos producidos (Incremento de la capacidad de los recursos en un 200% e incremento de la tasa de llegada de materias primas en un 110%)

Como vemos, el número medio de unidades producidas con ambas medidas es prácticamente el mismo, por lo tanto, será difícil determinar si una medida es mejor que la otra.

Recurrimos a *Output Analyzer* para confirmar o desmentir esto:

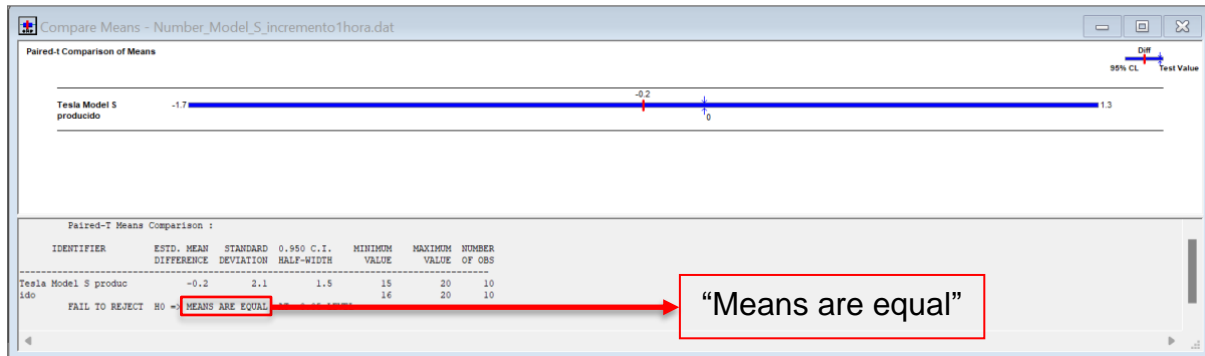


Figura 39: Comparación de la media de unidades producidas con la medida consistente en incrementar 1 hora el turno de trabajo frente a la medida consistente en aumentar la capacidad de los recursos al doble de la nominal y la tasa de llegada de materias primas en un 10%

Comprobamos como ambas medias se consideran iguales, al estar incluido el 0 en el intervalo. Esto era esperable ya que sus valores eran muy cercanos y los intervalos de confianza de cada una de las medias se superponen el uno con el otro y, por tanto, tal como determina Arena, no se puede distinguir una media de la otra. Esto, a efectos de la comparación entre ambas medidas, implica que no podemos discernir cuál de ellas es mejor o peor que la otra, en términos de unidades producidas.

NO SE HA PODIDO HACER USO DEL PROCESS ANALYZER DEBIDO A QUE ERA NECESARIO CREAR TANTO VARIABLES COMO HACER USO DEL MÓDULO ASSIGN. ESTO NO ERA VIABLE POR LAS LIMITACIONES MENCIONADAS DE NÚMERO DE ENTIDADES Y MÓDULOS UTILIZADOS.

9.- Comentarios sobre el entorno Arena

Tras el desarrollo de este proyecto, se ha llegado a la conclusión de que el entorno Arena es un buen programa para simular procesos productivos incluyendo una versión bastante fiel de lo que sería el proceso en la realidad, ya que permite introducir errores, probabilidades, etc.

Sin embargo, la versión estudiante puede generar ciertas limitaciones si se intenta simular un proceso productivo complejo, por ejemplo, el hecho de que tiene como límite 150 entidades, el límite de módulos que se pueden insertar entre otros. Mostramos algunos errores que se han obtenido durante el desarrollo del programa:

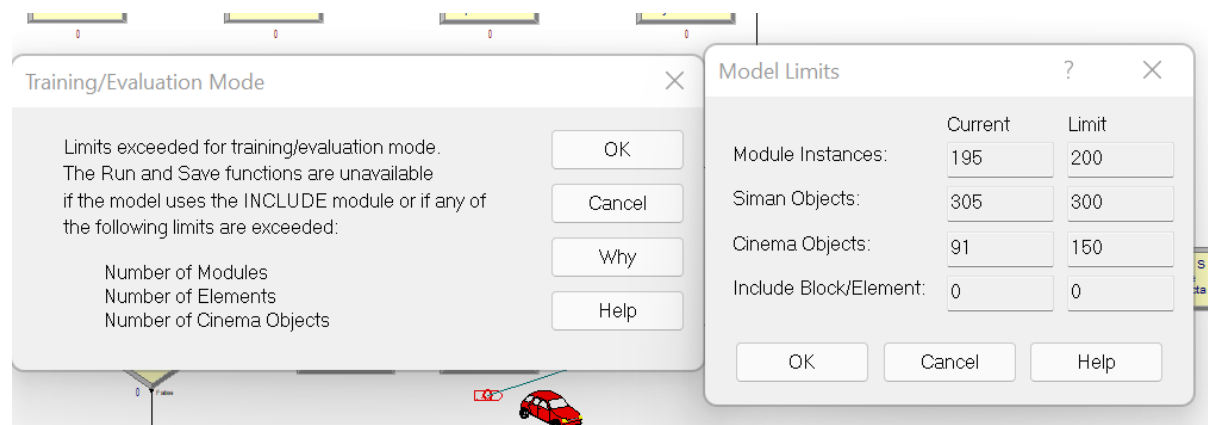


Figura 40: Errores obtenidos durante el desarrollo del programa (I)

```
ERROR:

17114:GGTAEC
A runtime error was detected at time 1248.6063 at the following block:

* 228 1250$          GROUP,,Permanent:1,Last,Tesla Model S:NEXT(1251$);

Maximum of 150 entities exceeded.
Possible causes:
- A logic problem in your model is creating too many entities or not
  disposing them. The run controller may be helpful in finding the problem.
- You are in demo mode and have exceeded the entity limit. The commercial
  version is required to run large models.
- You have set an entity limit on the DISCRETE element that is too small.
  Remove the limit or set it to a larger number.
- You have exceeded the standard array s
pace for models. Use the Array Sizes
page in the Run/Setup dialog to increase the RSET space allocated and
recheck your model.
```

Figura 41: Errores obtenidos durante el desarrollo del programa (II)

10.- Conclusiones

En este primer contacto, se ha realizado una simulación de la automatización de un sistema de producción. El sistema elegido, la fabricación de coches eléctricos Tesla, es tecnológicamente muy avanzado. Tesla es una empresa innovadora adelantada a su tiempo, que existe gracias a un gran equipo de ingeniería y logística.

Hemos atacado el desafío con gran entusiasmo, ya que, simplificar y modelar el problema técnico de confeccionar un Tesla, nos ha forzado a entender, aunque fuese de manera superficial, los elementos y procesos más importantes en este gran problema técnico. En nuestra investigación, hemos aprendido mucha ciencia e ingeniería que existe por detrás de un coche eléctrico, teniendo que revisar los principios físicos que hay detrás de la batería y el motor eléctrico.

Aunque se haya creado un modelo simple, hemos podido verificar por nuestra propia experiencia el enorme problema de logística que tiene que abordar una empresa como Tesla. Requiere un gran elemento de coordinación y sincronización, junto con la proeza de ingeniería planteada para el desarrollo de todos los elementos individuales que componen el producto final.

Debido a la gran limitación del programa *Arena estudiante*, con una capacidad de recursos limitada, nos ha condicionado en la creación de nuestro modelo, a pesar de ello, lo hemos desarrollado lo más complejo posible, más fiel a la realidad, donde hemos incluido procesos distribuidos y elementos de transporte, todo en sincronismo. Lo que hace que Tesla destaque, y a la vez no quiebre, es por su desarrollo de baterías, fundamental para el coche eléctrico y para acelerar la transición tecnológica hacia las energías renovables; un aspecto del proyecto que hubiésemos desarrollado en más profundidad si no fuera por la limitación de recursos.

En conclusión, al finalizar este proyecto nos vemos más capacitados para diseñar y analizar sistemas complejos de automatización, con gran generalidad e interdisciplinariedad, ideal para un futuro ingeniero mecatrónico.

11.- Bibliografía

Proceso de fabricación (construcción y ensamblaje) de un Tesla:

https://www.researchgate.net/publication/313839281_Tesla_Motors_Revolutionizing_the_Global_Automotive_Industry

Esquema del proceso productivo de la batería:

<https://creately.com/diagram/example/ifrd73vq1/tesla>

How is a Tesla Battery made?

<https://www.youtube.com/watch?v=M-0W66QHh78&t=295s>

Proceso de fabricación baterías de litio:

https://www.researchgate.net/publication/330902286_Lithium-ion_Battery_Cell_Production_Process

Foto batería Tesla Model S:

https://www.tesla.com/en_eu/models

Proceso de fabricación de un motor eléctrico:

<https://www.youtube.com/watch?v=deH37diYP5U>

Referencia [1]:

<https://www.visualcapitalist.com/extraordinary-raw-materials-in-a-tesla-model-s/>

Proceso de fabricación Tesla Model S:

<https://www.youtube.com/watch?v=Z2Lan5nhUQk>