

**Escuela de Negocios**

**Tipo de documento:** Tesis de maestría



*Master in Management + Analytics*

# Asignación de recursos humanos a líneas de producción en autopartistas y la industria automotriz

**Autoría:** Ramella Gómez, Martina Sara

**Año:** 2025

## ¿Cómo citar este trabajo?

Ramella Gómez, M. (2025) "Asignación de recursos humanos a líneas de producción en autopartistas y la industria automotriz". [Tesis de maestría. Universidad Torcuato Di Tella]. Repositorio Digital Universidad Torcuato Di Tella. <https://repositorio.utdt.edu/handle/20.500.13098/13752>

El presente documento se encuentra alojado en el **Repositorio Digital de la Universidad Torcuato Di Tella** bajo una licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional  
**Dirección:** <https://repositorio.utdt.edu>



**UNIVERSIDAD  
TORCUATO DI TELLA**

MASTER IN MANAGEMENT + ANALYTICS

ASIGNACIÓN DE RECURSOS HUMANOS A  
LÍNEAS DE PRODUCCIÓN EN AUTOPARTISTAS Y  
LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

**TESIS**

Martina Sara Ramella Gomez

Mayo 2025

Tutor: Juan José Miranda Bront

## Resumen

En el contexto actual, la industria automotriz y la correspondiente industria de autopartes, que provee las diversas piezas a las plantas ensambladoras, enfrentan una complejidad productiva significativa debido a la multiplicidad de variables que se ofrecen a los clientes finales. Cuando un cliente visita una concesionaria para adquirir un automóvil, tiene la posibilidad de seleccionar entre una amplia gama de modelos, versiones, colores, accesorios internos y externos, entre otros aspectos. Estas opciones pueden configurar más de 400 combinaciones posibles, conocidas como Katashikis. Al concretarse una venta, el Katashiki especificado se incorpora a la línea de producción. Dicha línea, pese a ser continua, dispone de la versatilidad requerida para adaptarse en cada estación de trabajo y producir exactamente las características demandadas por el cliente.

Este proyecto aborda la descripción de la industria, sus retos actuales, y la problemática específica relacionada con la asignación de personal a los distintos puestos de trabajo, con el fin de manejar todas las variantes y restricciones de la manera más eficaz. Para la realización de este estudio, se seleccionó uno de los principales proveedores de la industria automotriz en términos de facturación, volumen de producción y diversidad de componentes fabricados, dado que enfrenta desafíos considerables en su proceso de asignación de recursos humanos.

Además, con el objetivo de demostrar la versatilidad y aplicabilidad del modelo y programa desarrollado, se implementó un ejercicio adicional en una de las líneas de producción más complejas de la industria automotriz, específicamente en el área de Pintura. El análisis comparativo entre la situación previa (benchmarking) y la solución propuesta evidencia mejoras notables. Mediante la implementación del programa, se logró una reducción de dos personas (un 5%) en la asignación a la línea de producción de Pintura, mientras que se incrementó la suma total de habilidades de los empleados un 12%, demostrando así un avance significativo en la eficiencia y calidad en la asignación de recursos en términos de las competencias necesarias para el desarrollo de las tareas asignadas.

## **Abstract**

Nowadays, the automotive industry and the corresponding auto parts industry, which provides various parts to assembly plants, face significant production complexity due to the multiplicity of variables offered to end customers. When a customer visits a dealership to purchase a car, he has the possibility of selecting from a wide range of models, versions, colors, internal and external accessories, among other aspects. These options configure more than 400 possible combinations, known as Katashikis. Upon completion of a sale, the specified Katashiki is added to the production line. This line, despite being continuous, has the versatility required to adapt to each workstation and produce exactly the characteristics demanded by the client.

This project addresses the description of the industry, its current challenges, and the specific problems related to the assignment of personnel to different jobs, in order to manage all variants and restrictions in the most effective way. To carry out this study, one of the main suppliers to the automotive industry in terms of billing, production volume and diversity of manufactured components is considered, given that it faces considerable challenges in its human resource allocation process.

Aiming to demonstrate the versatility and applicability of the approach, an additional analysis is conducted over one of the the most complex production lines in the automotive industry, specifically in the Painting area. The comparative analysis between the previous situation (benchmarking) and the proposed solution shows notable improvements. Through the implementation of the program, a reduction of two people (5%) in the assignment to the Painting production line was achieved, while the total sum of employee skills was increased 12 %, thus demonstrating significant progress in efficiency and quality in the allocation of resources in terms of the competencies necessary for the development of the assigned tasks.

# Índice

1.	Introducción .....	7
1.1.	Contexto .....	7
1.2	Situación actual del proveedor .....	23
1.3	Objetivo .....	25
2.	Revisión de Literatura.....	26
3.	Datos.....	28
4.	Metodología actual.....	33
5.	El problema.....	33
5.1.	Definición .....	33
5.2.	Ejemplo.....	34
6.	Detalles de resolución .....	40
6.1.	Modelo matemático.....	46
6.2.	Aspectos de implementación.....	48
7.	Resultados .....	50
8.	Conclusiones.....	67
9.	Referencias .....	69
	Apéndice A. Aplicación para desarrollar .....	70
	Apéndice B. Código del Programa en Python del ejemplo .....	75
	Apéndice C. Código del Programa en Python del proveedor.....	80

## Índice de Tablas

<i>Tabla 1. Operaciones y puestos por línea.....</i>	29
<i>Tabla 2. Tabla de tareas.....</i>	36
<i>Tabla 3. Tabla de grupos.....</i>	36
<i>Tabla 4. Tabla de restricciones.....</i>	36
<i>Tabla 5. Tabla de restricciones modificada.....</i>	37
Tabla 6: Resultados de los modelos implementados en la instancia 1.....	51
Tabla 7: Resultados de los modelos implementados en la instancia 2.....	52
Tabla 8: Resultados de los modelos implementados en la instancia 3.....	52
Tabla 9: Resultados de los experimentos.....	54

## Índice de Figuras

Figura 1: Gráfico de evolución de ventas globales de vehículos por tipo.....	8
Figura 2: Gráfico de producción y exportación de automóviles y comerciales livianos en Argentina.....	9
Figura 3: Producción de vehículos e importaciones de autopartes.....	10
Figura 4: Mapa de locación de automotrices en Argentina.....	11
Figura 5: Ejemplo Toyota Hilux. Versiones.....	12
Figura 6: Ejemplo Toyota Hilux. Selección de colores.....	12
Figura 7: Ejemplo Toyota Hilux. Elección de accesorios.....	12
Figura 8: Visualización simplificada de una línea ensambladora de vehículos (línea de producción de industria automotriz).....	13
Figura 9: Autoparte: Mazo de cable.....	15
Figura 10: Visualización de los arneses en un vehículo.....	16
Figura 11: Visualización de los arneses en un vehículo.....	16
Figura 12: Detalle de puestos necesarios para cada línea.....	18
Figura 13: Distribución espacial de los puestos línea 1.....	19
Figura 14: Distribución espacial de los puestos línea 2.....	19
Figura 15: Distribución geográfica de los puestos línea 3.....	20
Figura 16: Distribución espacial de los puestos línea 4.....	20
Figura 17: Visualización de una de las operaciones que deben realizarse para obtener la autoparte.....	21
Figura 18: Extracto de la matriz de polivalencia.....	22
Figura 19: Esquema de rotación en bloques.....	22
Figura 20: Cartelera de rotación por grupo.....	24
Figura 21: Cartelera de rotación por grupo con mayor detalle.....	25
Figura 22. Esquema de producción en serie.....	28
Figura 23: Cartelera de rotación por grupo con mayor detalle.....	30
Figura 24: Porcentaje de personas por puesto.....	31
Figura 25: Extracto de la línea 1 con sus correspondientes grupos y % de personas con capacidad de realizar cada tarea.....	32
Figura 26. Operaciones y puestos por la línea del ejemplo.....	35
Figura 27: Asignación óptima.....	37
Figura 28: Asignación óptima con la modificación realizada.....	38
Figura 29: Tareas asignadas a cada persona en cada bloque.....	38
Figura 30: Matriz de polivalencias de la Línea 1, Turno B.....	41

Figura 31: Composición de grupos.....	42
Figura 32: Digitalización de la asignación de tareas del proveedor de la Línea 1 en el Turno B en un día en particular. ....	57
Figura 33: Resultado de la asignación de tareas de la Línea 1 Turno B del proveedor con el programa (extracto). ....	58
Figura 34: Representación de lugares del vehículo donde se coloca el Sealer.....	59
Figura 35: Aplicación de Sealer. ....	60
Figura 36: Resultado de la asignación de tareas real de la automotriz. ....	61
Figura 37: Resultado de la asignación de tareas de la empresa automotriz con el programa. ..	62
Figura 38: Representación de situación real del 4/06. ....	63
Figura 39: Representación de situación real del 5/06. ....	64
Figura 40: Representación de situación real del 6/06. ....	65
Figura 41: Resultado de la asignación de tareas de la empresa automotriz con el programa. ..	65

# 1. Introducción

## 1.1. Contexto

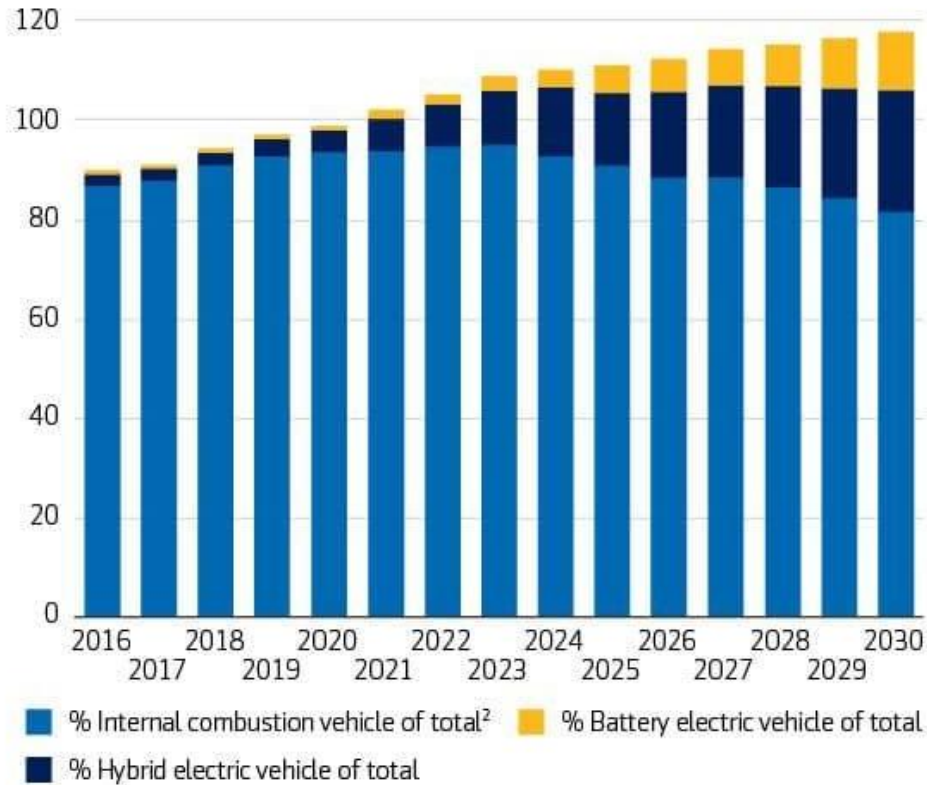
La industria automotriz es uno de los pilares de la economía global, simbolizando innovación tecnológica y progreso. Este sector no sólo impulsa el desarrollo económico, sino que también es un barómetro de la salud económica y tecnológica de las naciones. Con la introducción de tecnologías avanzadas como la electrificación de vehículos y los sistemas autónomos, la industria está en la cúspide de una revolución que redefine su estructura y estrategia a nivel mundial.

### Contexto Global de la Industria Automotriz

La industria automotriz enfrenta múltiples desafíos que incluyen adaptaciones a nuevas tecnologías, fluctuaciones en los mercados financieros y exigencias de sostenibilidad ambiental. Los fabricantes globales están invirtiendo considerablemente en investigación y desarrollo para integrar soluciones ecológicas y eficientes, tales como vehículos eléctricos y tecnologías de conducción autónoma.

Desafíos económicos y regulatorios también moldean la industria. Las políticas comerciales y las regulaciones ambientales en diversas regiones demandan una rápida adaptación de las estrategias de producción y comercialización. Por ejemplo, la Unión Europea ha implementado rigurosos estándares de emisiones que impulsan la adopción de vehículos eléctricos.

En cuanto al cambio en la demanda del consumidor, la preferencia por vehículos sostenibles y personalizados está creciendo. Esto exige que las líneas de producción sean más flexibles, capaces de adaptarse a una amplia gama de configuraciones vehiculares, desde el color hasta la tecnología incorporada.



**Figura 1:** Gráfico de evolución de ventas globales de vehículos por tipo.

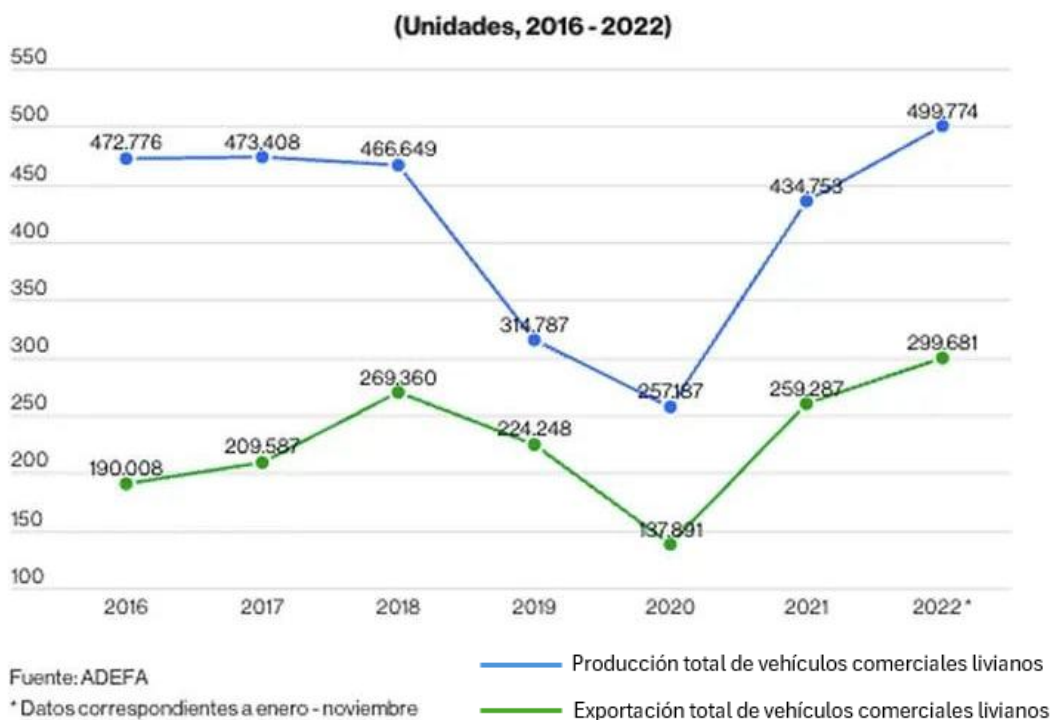
Fuente: <https://ovacen.com/evolucion-coche-electrico/>

La Figura 1 ilustra una disminución en la adopción de tecnologías convencionales de vehículos de combustión interna, mientras que se proyecta un aumento significativo en las tecnologías eléctricas e híbridas para el año 2030. Este cambio resalta una gran oportunidad para identificar y aplicar reducciones de costos y automatizaciones que apoyen la sostenibilidad y eficiencia en el tiempo, adaptándose a las nuevas demandas del mercado automotriz.

#### La Industria Automotriz en Argentina

industriales y de exportación. Sin embargo, enfrenta desafíos únicos como la inestabilidad económica y política, que afectan tanto la producción como la demanda local y regional.

Los desafíos locales incluyen alta inflación y políticas de importación fluctuantes que complican la planificación a largo plazo y la inversión extranjera. La dependencia del mercado brasileño añade una capa adicional de incertidumbre debido a sus propias fluctuaciones económicas.



**Figura 2:** Gráfico de producción y exportación de automóviles y comerciales livianos en Argentina.

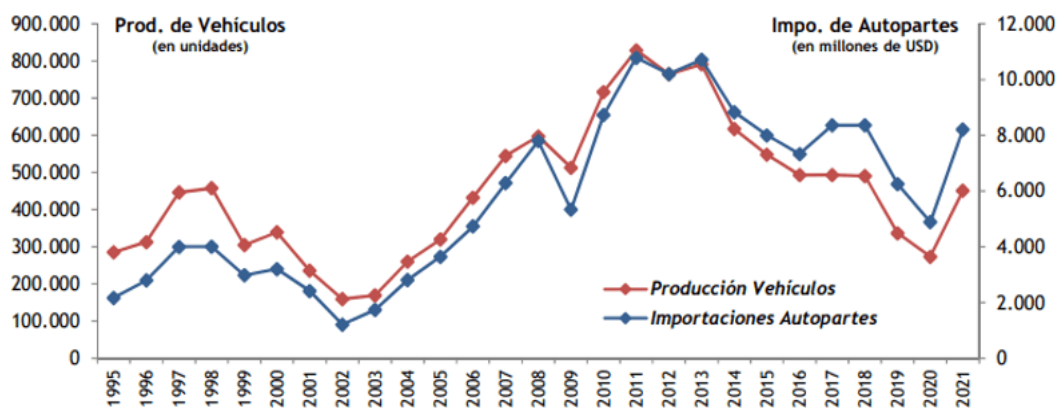
Fuente: ADEFA. Asociación de Fabricantes de Automotores.

La Figura 2 muestra la producción y exportación de automóviles y vehículos comerciales livianos en Argentina desde 2016 hasta 2022.

Tanto la producción de vehículos como las exportaciones de los mismos muestran una tendencia generalmente decreciente hasta 2020, donde alcanza su nivel más bajo en el rango de 200.000 unidades donde la principal causa de este valle fue la pandemia por COVID-19. Después de este punto, hay un aumento notable en la producción, alcanzando casi 500.000 y unas 300.000 unidades de exportación en 2022.

La Figura 2 resulta útil para analizar el impacto de ciertos eventos, como la crisis económica o la pandemia, en la industria automotriz de Argentina, así como para discutir la capacidad de la industria para recuperarse y crecer después de estos eventos indicando que es un rubro sostenible.

### PRODUCCIÓN DE VEHÍCULOS E IMPORTACIONES DE AUTOPARTES



Fuente: AFAC

**Figura 3:** Producción de vehículos e importaciones de autopartes.

Fuente: AFAC. Asociación de Fábricas Argentinas de Componentes.

Los datos presentados en la Figura 3 destacan cómo las importaciones de autopartes acompañan la fluctuación en la producción de vehículos, reflejando una interdependencia que afecta directamente la capacidad de recuperación y crecimiento del sector.

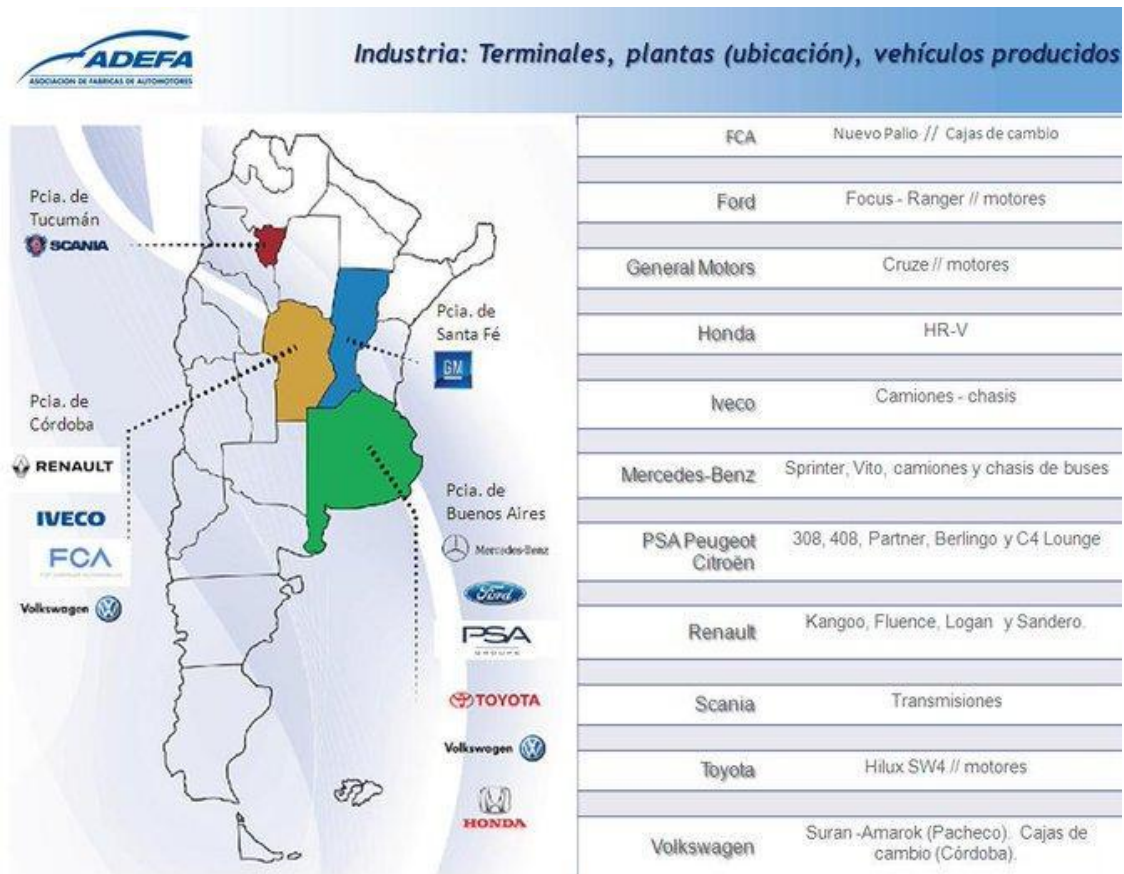
La imagen muestra un gráfico combinado con dos ejes que traza dos series de datos a lo largo del tiempo, desde 1995 hasta 2021. En el eje vertical izquierdo y representado con una línea roja, tenemos la "Producción de Vehículos" en Argentina, medida en unidades. En el eje vertical derecho y representado con una línea azul, tenemos las "Importaciones de Autopartes" en Argentina, medidas en millones de USD.

La Figura 3 muestra tendencias de ambas series de datos con fluctuaciones a lo largo del tiempo. Parece haber picos y caídas, con una tendencia notable en la producción de vehículos que sube y baja, mostrando picos alrededor de los años 1997, 2008, 2011 y 2013-2014, con una tendencia general a la baja después de 2013-2014 y un notable descenso en 2020. Por otro lado, las importaciones de autopartes muestran aumentos y disminuciones correlacionadas con la producción de vehículos, pero con un declive menos pronunciado después de 2013-2014 y una caída muy significativa en 2020.

A partir de 2013, el hecho de que las importaciones de autopartes (línea azul) comiencen a superar a la producción de vehículos (línea roja) puede explicarse por un aumento en el contenido importado por unidad producida. Esto refleja una mayor dependencia de componentes importados en el proceso de fabricación local, posiblemente vinculada a cambios en los modelos producidos, acuerdos de integración regional, pérdida de proveedores locales o restricciones de escala que limitan la producción de ciertos componentes en el país. Adicionalmente, puede estar asociado a procesos de especialización dentro de las cadenas globales de valor, donde Argentina participa principalmente en el ensamblaje final, incorporando un mayor volumen de piezas importadas.

En línea con el panorama de producción e importación mostrado anteriormente, la siguiente imagen ilustra un mapa de Argentina dónde están marcadas las provincias donde se encuentran

las terminales. Para cada una de las terminales se especifican los vehículos o componentes que producen. Por ejemplo, FCA produce el "Nuevo Palio" y cajas de cambio; Ford produce el "Focus" y "Ranger" además de motores; y General Motors produce el "Cruze" y también motores. Otras marcas y productos listados incluyen Honda con el "HR-V", Iveco con "Camiones - chasis", Mercedes-Benz con "Sprinter, Vito, camiones y chasis de buses", entre otros. Se puede apreciar que en cada planta hay variedad de productos y, a su vez, cada uno de estos productos tiene una gran variedad de combinaciones como se mencionó anteriormente.



**Figura 4:** Mapa de locación de automotrices en Argentina.

Fuente: ADEFA. Asociación de Fabricantes de Automotores.

Para citar un ejemplo, la camioneta Toyota Hilux posee 13 versiones disponibles, ver Figura 5. Dentro de estas versiones, además, hay que elegir entre la transmisión manual o automática, color (6 opciones, ver Figura 6), y accesorios (11 opciones, ver Figura 7). Esto conlleva a que, si bien se producen en la misma línea, al pasar el vehículo por cada estación de trabajo va a verse afectado por los detalles que lo componen.

Cabina & Chasis DX		Cabina Simple DX		Cabina Doble DX		Cabina Doble DX		Cabina Doble SR			
4x2	4x4	4x2	4x4	4x2	4x4	4x2	4x4	4x2		4x4	
6 M/T				6 A/T				6 M/T	6 A/T	6 M/T	6 A/T

SRV	SRX		SRV	SRV+	SRX
4x2				4x4	
6 A/T				6 A/T	

**Figura 5:** Ejemplo Toyota Hilux. Versiones.

Fuente: Página web de Toyota Argentina.

**COLORES DISPONIBLES**

- Súper blanco\*
- Blanco perlado
- Negro mica
- Plata metalizado
- Gris oscuro metalizado
- Rojo metalizado

**Figura 6:** Ejemplo Toyota Hilux. Selección de colores.

Fuente: Página web de Toyota Argentina.

**HACELA A TU MEDIDA**

- Lena cubrecaja
- Gancho de arrastre y cableado
- Zócalo de aluminio
- Protector frontal
- Protector frontal de radiador
- Tuercas de seguridad
- Candado para rueda de auxilio
- Overfenders
- Caja multipropósito frontal
- Compresor 12 v
- Cierre centralizado de portón trasero

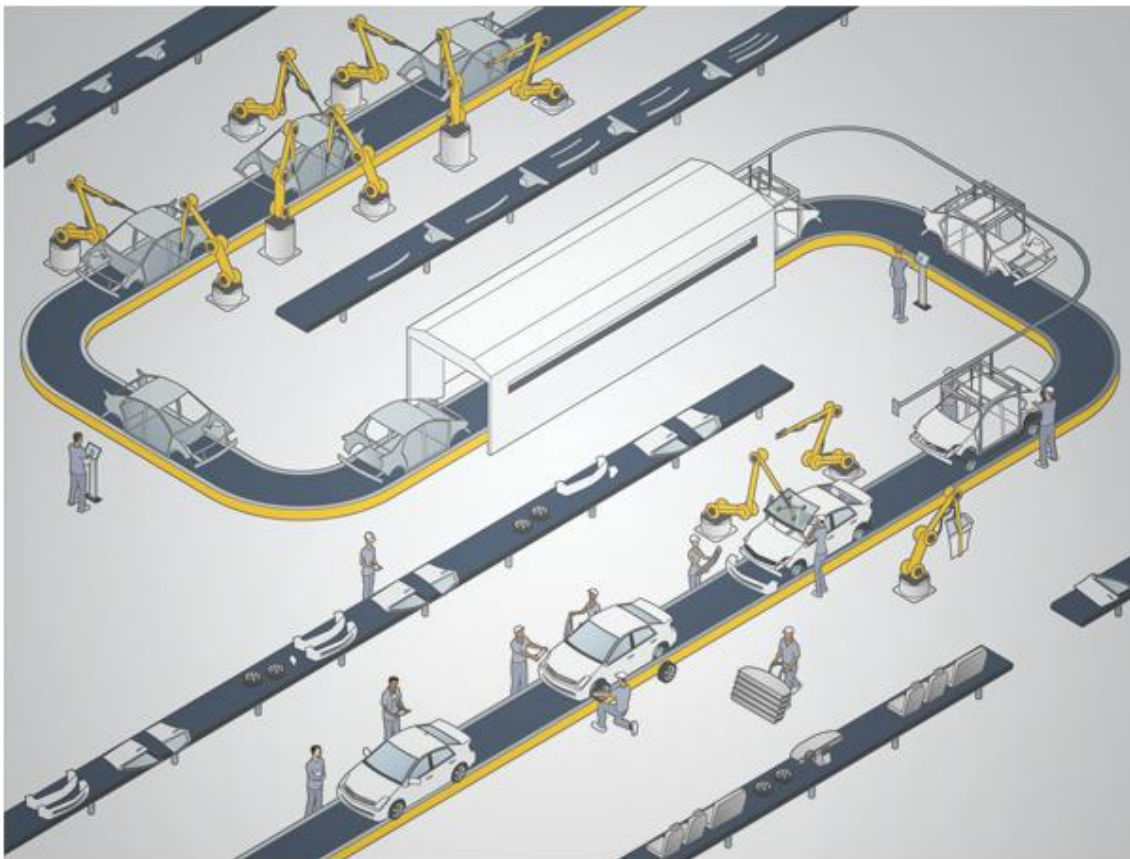
**Figura 7:** Ejemplo Toyota Hilux. Elección de accesorios.

Fuente: Página web de Toyota Argentina.

## Producción de vehículos y autopartes

En la industria automotriz, una de las grandes complejidades que se presenta es la asignación de personal, debido a la necesidad de adaptarse a configuraciones de productos altamente variables, tal como se mencionó anteriormente. La flexibilidad en la producción es esencial no solo en maquinaria y tecnología, sino también en la gestión de recursos humanos. Una asignación inadecuada puede resultar en ineficiencias operativas, incremento en los costos laborales, disminución de la calidad del producto y, aún más importante, tener problemas de seguridad.

La siguiente figura muestra una línea de producción automotriz moderna que integra tanto trabajo manual como automatización a través de robots industriales. La configuración de la línea se organiza de manera que maximiza la eficiencia y la productividad en el ensamblaje de vehículos, manteniendo un equilibrio entre la intervención humana y la automatización.



**Figura 8:** Visualización simplificada de una línea ensambladora de vehículos (línea de producción de industria automotriz).

Fuente: yahoo imágenes

### Elementos Automatizados:

1. Robots de Ensamblaje: En la parte superior de la imagen se pueden observar varios robots industriales que realizan tareas automatizadas. Estos robots son responsables de ensamblar componentes específicos del vehículo, como puertas, capós y otros

elementos estructurales. Su precisión y velocidad permiten una producción más rápida y consistente.

2. Robots de Soldadura: A lo largo de la línea, se pueden identificar robots dedicados a la soldadura de piezas del chasis y otros componentes metálicos. La utilización de estos robots asegura soldaduras uniformes y fuertes, mejorando la seguridad y la durabilidad del vehículo.
3. Robots de Pintura: También se observa la presencia de robots en una cabina de pintura, donde se encargan de aplicar capas de pintura de manera uniforme y eficiente, reduciendo el desperdicio de materiales y asegurando una cobertura completa.

#### Intervención Humana:

1. Operarios de Ensamblaje: A lo largo de la línea, se pueden ver operarios realizando diversas tareas manuales. Estos trabajadores se encargan de la instalación de piezas que requieren mayor precisión o ajustes finales que aún no pueden ser completamente automatizados. Su papel es crucial para asegurar la calidad del producto final.
2. Inspección de Calidad: Parte del personal está dedicado a la inspección visual y manual de los vehículos en diferentes etapas de la producción. Esta inspección es esencial para detectar y corregir posibles defectos antes de que el vehículo avance a la siguiente etapa del ensamblaje.
3. Manipulación de Componentes: Algunos trabajadores son responsables de mover y posicionar componentes en la línea de producción, asegurando que los robots puedan acceder a ellos de manera eficiente. Además, pueden realizar ajustes y alineaciones que requieran un alto grado de destreza y experiencia.

#### Interacción entre Humanos y Robots:

La línea de producción de la Figura 8 ilustra un entorno de manufactura avanzado donde la colaboración entre humanos y robots es fundamental. Los robots realizan tareas repetitivas, peligrosas o que requieren alta precisión, mientras que los operarios se enfocan en tareas que demandan habilidades manuales, toma de decisiones y flexibilidad. Esta combinación optimiza la eficiencia del proceso productivo y garantiza un alto estándar de calidad en los vehículos ensamblados.

En resumen, la imagen representa una fábrica automotriz moderna que utiliza una estrategia de producción híbrida, aprovechando las fortalezas tanto de la automatización como de la intervención humana. Este enfoque no solo mejora la eficiencia y la productividad, sino que también asegura la calidad y la personalización en el proceso de fabricación de vehículos.

#### Presentación del proveedor estudiado:

Este trabajo considera uno de los proveedores de autopartes más importantes con relación al costo de sus productos y en la proporción que representa la mano de obra respecto al proceso total de fabricación, con el objetivo de ilustrar la situación actual al considerar el problema de

gestión de personal para la fabricación, sus dificultades y consecuencias de estas. El proveedor se especializa en ensamble de arneses de cables (Figura 9), ubicado en Loma Verde, Argentina.



**Figura 9:** Autoparte: Mazo de cable.

Fuente: proveedor autopartista.

Este proveedor suministra componentes destinados a la fabricación de vehículos para una de las empresas automotrices más importantes del país. Se ubica entre los principales actores de la industria en términos de facturación y volumen de producción. Dado que su actividad se caracteriza por su intensiva mano de obra, donde los costos laborales representan el 50% del costo total del componente automotriz, resulta esencial para el desarrollo del negocio gestionar y optimizar la asignación de personal.

La planta de ensamble de arneses de cable alberga cuatro líneas de producción: Línea 1 y 2, dedicadas a la manufactura del producto "Cable de motor principal", y Líneas 3 y 4, encargadas de la producción de "Cable de motor secundario".

Cada una de estas líneas comprende un conjunto de operaciones específicas ordenadas que se detallarán más adelante, que deben ser llevadas a cabo de manera repetitiva por parte de los trabajadores para alcanzar el producto final. Los operarios poseen habilidades y características particulares (usualmente denominada polivalencia) que exigen su distribución en las distintas operaciones, basándose en sus capacidades y limitaciones individuales.

Una vez que el proveedor realiza los arneses, los envía a la terminal automotriz para su ensamble en el vehículo final, donde, como se comentó anteriormente, varía dependiendo el Katashiki a producir.

Para visualizar esto, en las figuras 10 y 11 se pueden ver todos los tipos de arneses que luego van a ser ensamblados manualmente en una línea de producción continua de automóviles como se puede ver de manera simplificada en la Figura 8.



**Figura 10:** Visualización de los arneses en un vehículo.

Fuente: <http://www.ptolomeo.unam.mx>



**Figura 11:** Visualización de los arneses en un vehículo.

Fuente: yahoo imágenes

### Detalles de funcionamiento del proveedor

La planta opera en un régimen de 2 turnos diarios (Turno Mañana y Turno Tarde), compuestos por 4 bloques de trabajo cada uno (B1, B2, B3 y B4). Con base en requerimientos sindicales y consideraciones de riesgos ergonómicos, los operarios deben rotar entre diversos puestos de trabajo (Operaciones) en cada bloque. Sin embargo, la asignación de estas rotaciones se encuentra actualmente limitada a un esquema preestablecido, que podría no ser el más eficaz en términos de las habilidades individuales de cada operario para realizar tareas específicas. Para comprender el problema se comienza con la explicación de la operación que realiza el proveedor.

Como mencionamos, el proveedor realiza varios productos en su planta y los elabora en 4 líneas de producción similares como se puede ver en la Figura 12.

**PUESTOS DE LAS DIFERENTES LINEAS**

**FAMILIA: ENGINE ROOM MAIN**



**FAMILIA: ENGINE**



Línea 1 - ERM		
#	Nombre YAS	Nombre Generico
1	Bonder	BONDER
2	Bonder	BONDER
3	Sub 1	SUBENSAMBLE
4	Sub 2	SUBENSAMBLE
5	Sub 3	SUBENSAMBLE
6	Sub 4	SUBENSAMBLE
7	Sub 5	SUBENSAMBLE
8	Sub 6	SUBENSAMBLE
9	Sub 7	SUBENSAMBLE
10	Sub 8	SUBENSAMBLE
11	Sub 9	SUBENSAMBLE
12	Sub 10	SUBENSAMBLE
13	Sub 11	SUBENSAMBLE
14	Sub 12	SUBENSAMBLE
15	Sub 13	SUBENSAMBLE
16	Sub 14	SUBENSAMBLE
17	Sub 15	SUBENSAMBLE
18	Sub 16	SUBENSAMBLE
19	Sub 17	SUBENSAMBLE
20	P. derecha	CABLEADO
21	Centro	CABLEADO
22	Fuñilera	CABLEADO
23	Pizquierta	CABLEADO
24	Inserc. Centro	CABLEADO
25	Inserc. Derech	CABLEADO
26	Refuerzo	CABLEADO
27	Inserc. Izquier	CABLEADO
28	W'szu-1	WASUREMBO
29	W'szu-2	WASUREMBO
30	Enc 1	ENSAMBLE
31	Enc 2	ENSAMBLE
32	Enc 3	ENSAMBLE
33	Enc 4	ENSAMBLE
34	Enc 5	ENSAMBLE
35	Enc 6	ENSAMBLE
36	Enc 7	ENSAMBLE
37	Enc 8	ENSAMBLE
38	Enc 9	ENSAMBLE
39	Enc 10	ENSAMBLE
40	Enc 11	ENSAMBLE
41	Enc 12	ENSAMBLE
42	Enc 13	ENSAMBLE
43	Enc 14	ENSAMBLE
44	Enc 15	ENSAMBLE
45	Enc 16	ENSAMBLE
46	Enc 17	ENSAMBLE
47	Enc 18	ENSAMBLE
48	Enc 19	ENSAMBLE
49	Enc 20	ENSAMBLE
50	Enc 21	ENSAMBLE
51	Enc 22	ENSAMBLE
52	Enc 23	ENSAMBLE
53	Enc 24	ENSAMBLE
54	Enc 25 (pre)	ENSAMBLE
55	Enc 26 (pre)	ENSAMBLE
56	Enc Pre 3A	ENSAMBLE
57	GROMMET	GROMMET
58	WPROOF	WATER
59	IA2-1	IA2-TEST EMDEP
60	IA2-2	IA2-TEST EMDEP
61	IA2-3	IA2-TEST EMDEP
62	IA2-4	IA2-TEST EMDEP
63	IA2 Dup	IA2-TEST EMDEP
64	IA2 Dup	IA2-TEST EMDEP
65	IA2 Dup	IA2-TEST EMDEP
66	IA2 Dup	IA2-TEST EMDEP
67	ACC-1	IA2-TEST ACC
68	ACC-2	IA2-TEST ACC
69	ACC-3	IA2-TEST ACC
70	Fus-1	FUSIBLE
71	Caja	ENSAMBLE
72	Tv	TEST VISION
73	Tapa-prot 1	ENSAMBLE
74	Tapa-prot 2	ENSAMBLE
75	Amarres 1	IA3
76	Amarres 2	IA3
77	Amarres 3	IA3
78	Ins. Final 1	IA3
79	Ins. Final 2	IA3
80	Tachos	WASUREMBO
81	Sub A/B	SUBENSAMBLE

Línea 2 - ERM		
#	Nombre YAS	Nombre Generico
1	Bonder	BONDER
2	Sub pre	SUBENSAMBLE
3	Sub 1	SUBENSAMBLE
4	Sub 2	SUBENSAMBLE
5	Sub 3	SUBENSAMBLE
6	Sub 4	SUBENSAMBLE
7	Sub 5	SUBENSAMBLE
8	Sub 6	SUBENSAMBLE
9	Sub 6A	SUBENSAMBLE
10	Sub 7	SUBENSAMBLE
11	Sub 7A	SUBENSAMBLE
12	Sub 8	SUBENSAMBLE
13	Sub 9	SUBENSAMBLE
14	Sub 10	SUBENSAMBLE
15	Sub 11	SUBENSAMBLE
16	SUB 1A	SUBENSAMBLE
17	SUB 8A	SUBENSAMBLE
18	SUB 11A	SUBENSAMBLE
19	cab P.derecha	CABLEADO
20	cab Fuñilera	CABLEADO
21	cab Centro	CABLEADO
22	cab P. Izq	CABLEADO
23	Cab role	CABLEADO
24	Inserc. 1	CABLEADO
25	Inserciones 2	CABLEADO
26	W'szu-1	WASUREMBO
27	W'szu-2	WASUREMBO
28	Enc 1	ENSAMBLE
29	Enc 1A	ENSAMBLE
30	Enc 1B (800)	ENSAMBLE
31	Enc 2	ENSAMBLE
32	Enc 3	ENSAMBLE
33	Enc 4	ENSAMBLE
34	Enc 5	ENSAMBLE
35	Enc 6	ENSAMBLE
36	Enc 6A	ENSAMBLE
37	Enc 7	ENSAMBLE
38	Enc 8	ENSAMBLE
39	Enc 9	ENSAMBLE
40	Enc 10	ENSAMBLE
41	Enc 11	ENSAMBLE
42	Enc 11A	ENSAMBLE
43	Enc 12	ENSAMBLE
44	Enc 13	ENSAMBLE
45	Enc 13 A (800)	ENSAMBLE
46	Enc 14	ENSAMBLE
47	Enc 14A (800)	ENSAMBLE
48	Enc 15	ENSAMBLE
49	Enc 16	ENSAMBLE
50	Enc 17	ENSAMBLE
51	PRE 1	ENSAMBLE
52	PRE 2	ENSAMBLE
53	GROMMET	GROMMET
54	IA2-1	IA2-TEST EMDEP
55	IA2-2	IA2-TEST EMDEP
56	IA2-3	IA2-TEST EMDEP
57	IA2-4	IA2-TEST EMDEP
58	ACC-1	IA2-TEST ACC
59	ACC-2	IA2-TEST ACC
60	ACC-3	IA2-TEST ACC
61	Fus	FUSIBLE
62	WPROOF	WATER
63	Caja	ENSAMBLE
64	Tapa-prot 1	ENSAMBLE
65	Tapa-prot 2	ENSAMBLE
66	TV-1	TEST VISION
67	Amarre 1	IA3
68	Amarre 2	IA3
69	Amarre 3	IA3
70	IA3-1	IA3
71	IA3-2	IA3
72	Sub A/B	SUBENSAMBLE

Línea 3 - Engine GD		
#	Nombre YAS	Nombre Generico
1	Sub pre	SUBENSAMBLE
2	PRE-1	SUBENSAMBLE
3	PRE-2	SUBENSAMBLE
4	Sub 1	SUBENSAMBLE
5	Sub 2	SUBENSAMBLE
6	Sub 3	SUBENSAMBLE
7	Sub 4	SUBENSAMBLE
8	Sub 5	SUBENSAMBLE
9	Sub 6	SUBENSAMBLE
10	Sub 7	SUBENSAMBLE
11	Sub 8	SUBENSAMBLE
12	Sub 9	SUBENSAMBLE
13	Sub 10	SUBENSAMBLE
14	Sub 11	SUBENSAMBLE
15	Sub 12	SUBENSAMBLE
16	Sub 13	SUBENSAMBLE
17	Sub bonder-1	BONDER
18	Sub bonder-2	BONDER
19	Sub bonder-3	BONDER
20	Cab-1	CABLEADO
21	Cab-2	CABLEADO
22	Cab-3	CABLEADO
23	Cab-4	CABLEADO
24	Inserc bonder-1	CABLEADO
25	Inserc bonder-2	CABLEADO
26	Inserc bonder-3	CABLEADO
27	W'szu A	WASUREMBO
28	W'szu B	WASUREMBO
29	E-1	ENSAMBLE
30	E-2	ENSAMBLE
31	E-3	ENSAMBLE
32	E-4	ENSAMBLE
33	E-5	ENSAMBLE
34	E-6	ENSAMBLE
35	E-7	ENSAMBLE
36	E-8	ENSAMBLE
37	E-9	ENSAMBLE
38	E-10	ENSAMBLE
39	E-11	ENSAMBLE
40	E-12	ENSAMBLE
41	E-13	ENSAMBLE
42	E-14	ENSAMBLE
43	E-15	ENSAMBLE
44	E-16	ENSAMBLE
45	E-17	ENSAMBLE
46	E-18	ENSAMBLE
47	E-19	ENSAMBLE
48	E-20	ENSAMBLE
49	E-21	ENSAMBLE
50	E-22	ENSAMBLE
51	E-23 Izq	ENSAMBLE
52	E-23 Der	ENSAMBLE
53	E-24	ENSAMBLE
54	E-25	ENSAMBLE
55	E-26	ENSAMBLE
56	E-27	ENSAMBLE
57	E-28	ENSAMBLE
58	E-29	ENSAMBLE
59	E-30	ENSAMBLE
60	E-31	ENSAMBLE
61	Grommet	GROMMET
62	Wproof	WATER
63	IA2-1	IA2-TEST EMDEP
64	IA2-2	IA2-TEST EMDEP
65	IA2-3	IA2-TEST EMDEP
66	Acc-1	IA2-TEST ACC
67	Acc-2	IA2-TEST ACC
68	Protector - 3D	ENSAMBLE
69	Amarres-1	ENSAMBLE
70	Amarres-2	ENSAMBLE
71	I.Final -1	IA3
72	I.Final -2	IA3
73	Flujo de Tachos	WASUREMBO

Línea 4 - Engine GD - nafta		
#	Nombre YAS	Nombre Generico
1	Sub de bonder 1	BONDER
2	Tubbing	BONDER
3	Bonder	BONDER
4	Sub A	SUBENSAMBLE
5	Pre-ensamble	SUBENSAMBLE
6	Pre-ensamble	SUBENSAMBLE
7	Sub 1	SUBENSAMBLE
8	Sub 2	SUBENSAMBLE
9	Sub 3	SUBENSAMBLE
10	Sub 4	SUBENSAMBLE
11	Sub 5	SUBENSAMBLE
12	Sub 6	SUBENSAMBLE
13	Sub 7	SUBENSAMBLE
14	Sub 8	SUBENSAMBLE
15	Sub 9	SUBENSAMBLE
16	Sub 9A	SUBENSAMBLE
17	Sub 10	SUBENSAMBLE
18	Sub 11	SUBENSAMBLE
19	Sub 12	SUBENSAMBLE
20	Cab-1	CABLEADO
21	Cab-2	CABLEADO
22	Cab-3	CABLEADO
23	Cab-4	CABLEADO
24	Inser-1	CABLEADO
25	Inser-2	CABLEADO
26	Inser-3	CABLEADO
27	W'szu A	WASUREMBO
28	W'szu B	WASUREMBO
29	E-1	ENSAMBLE
30	E-2	ENSAMBLE
31	E-3	ENSAMBLE
32	E-4	ENSAMBLE
33	E-4A	ENSAMBLE
34	E-6A	ENSAMBLE
35	E-5	ENSAMBLE
36	E-6	ENSAMBLE
37	E-3A	ENSAMBLE
38	E-7	ENSAMBLE
39	E-8	ENSAMBLE
40	E-8A	ENSAMBLE
41	E-9	ENSAMBLE
42	E-9A	ENSAMBLE
43	E-10	ENSAMBLE
44	E-11	ENSAMBLE
45	E-11A	ENSAMBLE
46	E-12	ENSAMBLE
47	E-13	ENSAMBLE
48	E-13A	ENSAMBLE
49	E-14	ENSAMBLE
50	E-15	ENSAMBLE
51	E15A	ENSAMBLE
52	E-16	ENSAMBLE
53	E16A	ENSAMBLE
54	Grommet	GROMMET
55	Tesa	ENSAMBLE
56	Wproof	WATER
57	IA2-1	IA2-TEST EMDEP
58	IA2-2	IA2-TEST EMDEP
59	IA2-3	IA2-TEST EMDEP
60	Acc-1	IA2-TEST ACC
61	Acc-2	IA2-TEST ACC
62	3D	ENSAMBLE
63	Amarres-1	ENSAMBLE
64	Amarres-2	ENSAMBLE
65	I.Final	IA3
66	I.Final	IA3

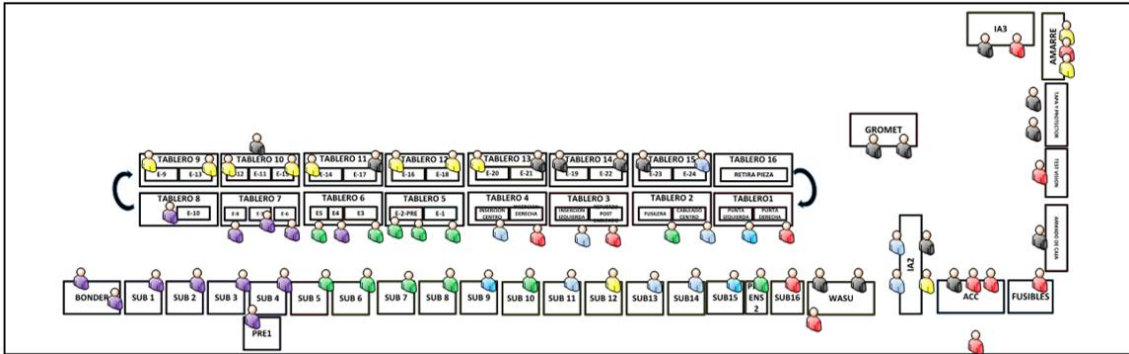
**Figura 12:** Detalle de puestos necesarios para cada línea.

Fuente: proveedor autopartista.

Se puede ver para cada una de las líneas de producción el detalle de operaciones necesarias, el orden de ejecución de las mismas, y se aprecia que, si bien hay operaciones similares, cada línea tiene sus particularidades, es decir, cada línea es distinta y las actividades se realizan en orden.

Líneas de producción:

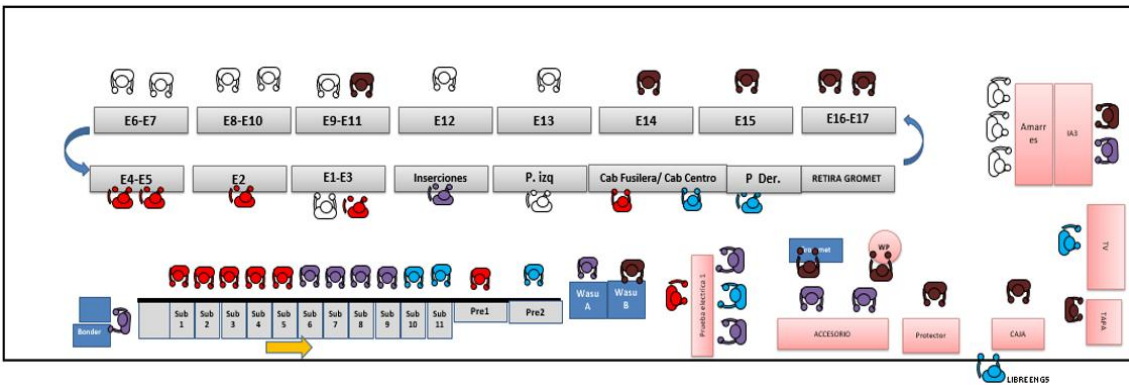
En la Figura 13 se puede ver la distribución geográfica de los puestos de la línea 1 actuales, y la necesidad de contar con una persona que realice cada operación. Se puede ver que los operarios están con diferentes colores, éstos identifican a qué grupo pertenece cada uno (grupo de 1 a 6). Dicha división en grupos, que permanece fija, se realiza para identificar los operarios que responden a cada líder. Una vez que un operario está bajo la supervisión de determinado líder no se modifica ya que esto facilita la gestión del personal en cuanto a comunicación, crecimiento y soporte.



**Figura 13:** Distribución espacial de los puestos línea 1.

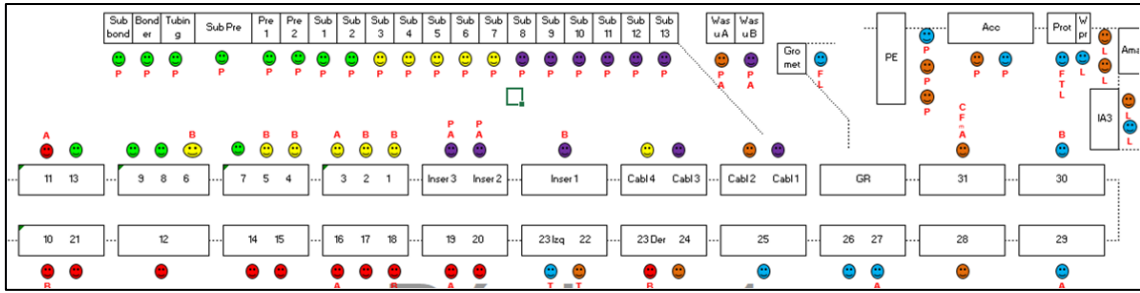
Fuente: proveedor autopartista.

Las siguientes tres figuras pertenecen a las líneas 2, 3 y 4, las mismas poseen el mismo criterio de una persona para cada operación, distribuidas en grupos para poseer un líder fijo.



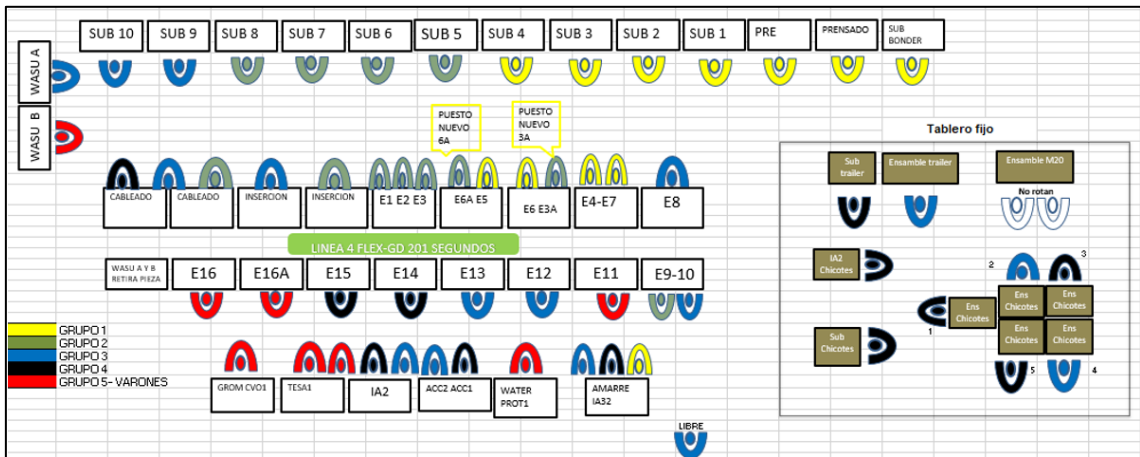
**Figura 14:** Distribución espacial de los puestos línea 2.

Fuente: proveedor autopartista.



**Figura 15:** Distribución geográfica de los puestos línea 3.

Fuente: proveedor autopartista.



**Figura 16:** Distribución espacial de los puestos línea 4.

Fuente: proveedor autopartista.

Se puede observar en las imágenes previas de manera muy clara la disparidad de la estructura de cada línea, las diferentes tareas a realizar y la distribución de las mismas.

Situación actual del proveedor:

Para fabricar cada producto, el mismo tiene que cumplir con todas las operaciones definidas (por ejemplo, pasar desde la operación 1 a la operación 81 en el caso de la línea 1), donde cada una es acumulativa y necesaria para lograr el producto final. En la Figura 17 se puede ver una de las operaciones donde se está realizando un ensamble, pero, para que el producto esté en esta instancia de producción, antes tuvo que pasar por instancias de Bonder, Subensamblado, Cableado y Wasurembo.



**Figura 17:** Visualización de una de las operaciones que deben realizarse para obtener la autoparte.

Fuente: proveedor autopartista.

Los operarios se deben distribuir en cada uno de los puestos de manera tal que en cada momento haya uno y solo uno en cada operación, todas las operaciones deben tener alguien asignado ya que la línea es continua, debe cumplir restricciones ergonómicas y de capacidad física (altura/fuerza), y debe ser alguien que sepa hacer la operación.

Los operarios poseen determinadas habilidades para cada una de las posibles tareas a realizarse, existe una escala que indica el expertise. Es decir, que tenga 1 o 3 de puntaje en la matriz de polivalencia (Figura 18). Si el operario tiene 0 en la matriz de polivalencia significa que no sabe hacer la tarea, por lo tanto, no podría ser asignado a la misma. Cada empleado sabe hacer un subconjunto de estas operaciones.



mismo, Juan rota a la operación 3, una vez transcurridas las siguientes 2 horas rota nuevamente a la operación 1 y, finalmente, el último bloque lo hace en la operación 4.

Todas estas operaciones son del grupo 1 pero es necesario que el operario rote en cada bloque si las restricciones ergonómicas así lo requieren.

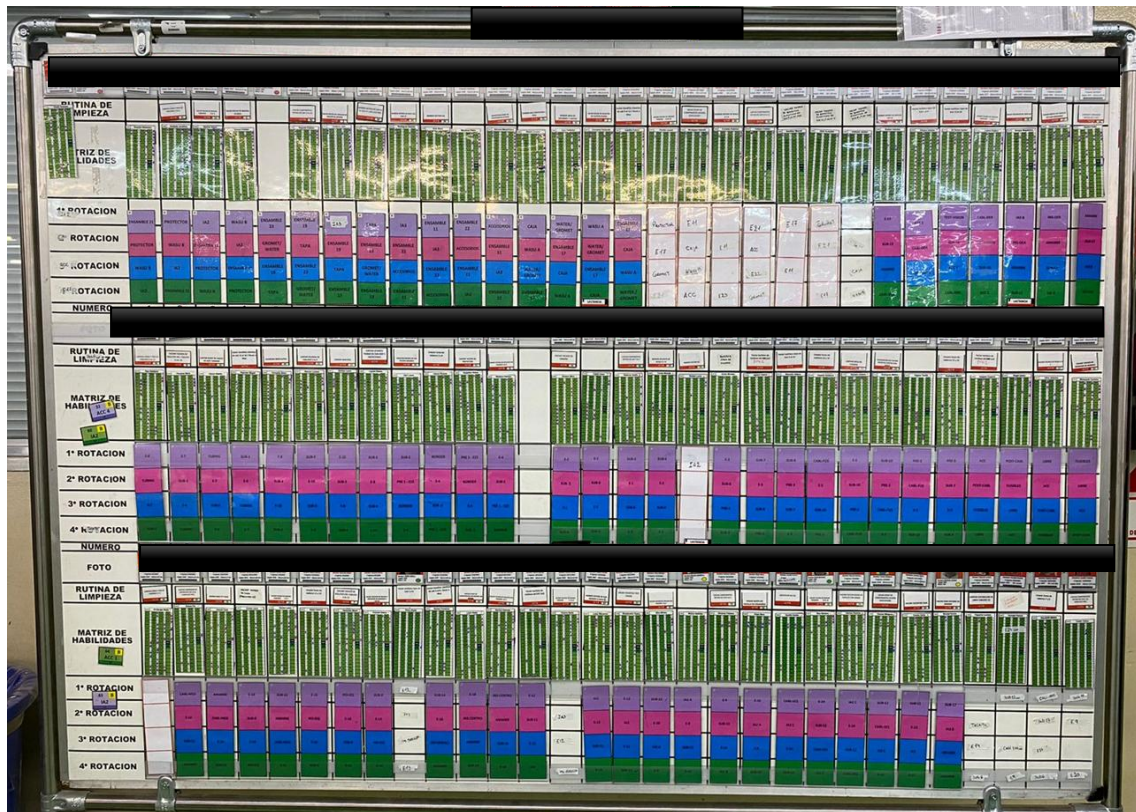
Es importante mencionar que puede haber rotaciones alternativas a la presentada en la Figura 19, es decir, en este caso Juan pasó de la Operación 1 en el Bloque 1 a la Operación 3 en el Bloque 2, pero, podría haber ido a la operación 1 a N siempre que las restricciones lo permitan.

## **1.2 Situación actual del proveedor**

La realidad que enfrenta el proveedor, y por consiguiente la empresa automotriz que respalda sus operaciones, radica en el hecho de que han estructurado su esquema de trabajo en la asignación de personal a los puestos de trabajo priorizando la simplicidad en la gestión de la supervisión, en lugar de buscar una optimización que permita una asignación más eficiente y adecuada de los recursos humanos. En este contexto, la eficiencia se entiende como la capacidad de asignar a cada operario la tarea donde puede aplicar su mayor nivel de habilidad, minimizando la necesidad de asistencia adicional, reduciendo los desvíos de calidad y aumentando la estabilidad del proceso productivo.

En la situación actual, el proveedor carece de una digitalización integral tanto de la operación como de la asignación de recursos humanos. Esto genera importantes dificultades en cuanto a la trazabilidad y en la búsqueda de asignaciones óptimas, tanto en términos de reducir el plantel de operarios disponibles en cada línea como de seleccionar adecuadamente las personas según sus habilidades para cada operación, dificultando la identificación de oportunidades de mejora en los procesos.

Para la operación, actualmente por cada línea y turno se cuenta con una pizarra similar a la mostrada en la Figura 20. Cada una de las personas (filas) tiene un imán con el listado de cada operación y están marcadas las operaciones que sabe realizar.



**Figura 20:** Cartelera de rotación por grupo.

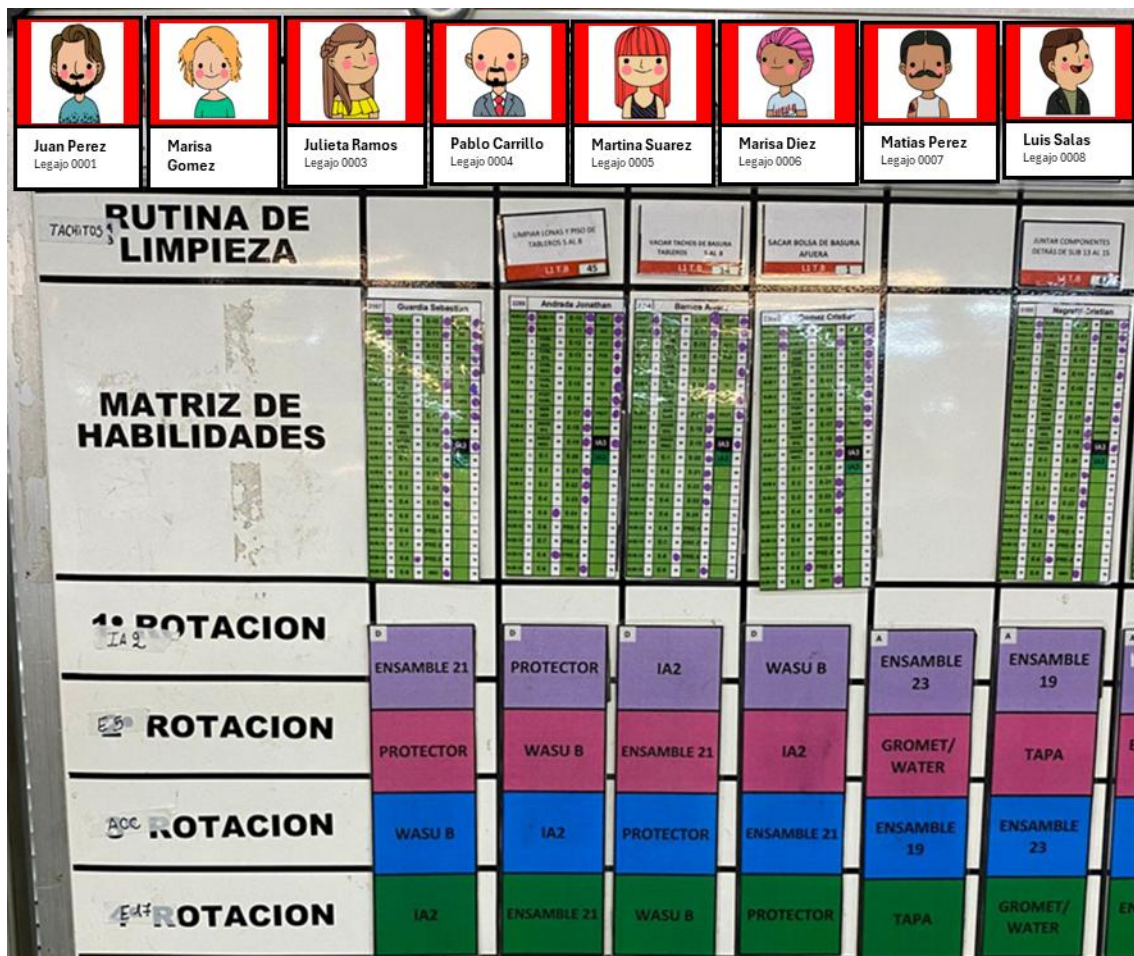
Fuente: proveedor autopartista.

Los encabezados de cada fila consisten en una foto e información de cada persona, las cuales fueron ocultadas por cuestiones de privacidad.

En base a esta información, los líderes los distribuyen manualmente a los operarios en los diferentes puestos para cada uno de los 4 bloques, y este proceso de asignación se repite cada día ya que, si bien pueden tener pre armado un esquema, depende también del presentismo de los operarios.

En esta pizarra, si bien se podría ver que personas están ya con operaciones asignadas, no permite visualizar con claridad que para cada Bloque de trabajo estén las 81 operaciones cubiertas y mucho menos si están cubiertas con personas que sepan hacer la tarea. Este es el claro ejemplo de las dificultades que posee cada líder a la hora de asignar.

En la Figura 21 se puede ver con más detalle la información que posee cada líder y el estado de la misma.



**Figura 21:** Cartelera de rotación por grupo con mayor detalle.

Fuente: proveedor autopartista.

En la imagen se puede ver claramente que la herramienta que poseen los líderes para poder hacer asignaciones de personal es ineficiente en términos de visualización, de actualización de datos, de búsqueda de mejoras, y no permite ver si todos los puestos están cubiertos ni tener rápida acción ante algún desvío, ya sea por ausentismo o cualquier eventualidad que pueda surgir en un día de trabajo.

### 1.3 Objetivo

El propósito fundamental de esta tesis radica en explorar alternativas para alcanzar una asignación eficiente del personal a los grupos de trabajo de cada línea de producción. En este contexto, una asignación eficiente se define como aquella que maximiza la suma de la polivalencia total de las tareas asignadas a cada persona perteneciente a la línea, contribuyendo de manera consiguiente a la robustez en la formación de grupos en la línea de producción, con miras a mejorar la versatilidad. La asignación obtenida será comparada con la suma de

polivalencia que actualmente posee cada línea de producción, lo que facilitará la comparación y cuantificación de la potencial mejora.

Además, abordaremos un segundo desafío empresarial de gran relevancia: la planificación de la producción en días sábados y feriados. Este aspecto representa uno de los problemas más complejos de resolver para el proveedor. En esta faceta, se busca asignar al personal eficientemente, conservando en la medida de lo posible los grupos originales obtenidos. Esto significa minimizar los cambios necesarios y, al mismo tiempo, maximizar la suma de polivalencias.

En síntesis, la metodología planteada en esta tesis persigue una serie de beneficios sustanciales, que incluyen:

- Reducción del tiempo dedicado a la asignación por parte de los jefes de línea.
- Optimización de los procesos de rotación.
- Mejora en la calidad del trabajo y la percepción de los empleados al evitar la repetitividad en sus tareas.
- Mantenimiento y mejora de las habilidades del personal.
- Establecimiento de un sistema de trazabilidad en los puestos de trabajo.
- Identificación de áreas que requieran capacitación adicional.
- Mejora en la eficiencia de la línea de producción y, por consiguiente, en los costos de ensamblaje de las autopartes.

## **2. Revisión de Literatura**

La optimización en la asignación de recursos humanos en la industria automotriz ha sido ampliamente estudiada en la literatura, abarcando desde enfoques matemáticos hasta estrategias de gestión operacional. Este trabajo se apoya en diversos estudios y metodologías que han permitido desarrollar un modelo de programación lineal entera para la asignación óptima de personal en líneas de producción.

Uno de los pilares teóricos fundamentales de esta tesis proviene de la investigación operativa, especialmente en el uso de modelos de programación lineal y entera para la optimización de procesos industriales. Khan et al. (2019) presentan un enfoque sistemático sobre estas técnicas, resaltando su aplicabilidad en contextos reales con restricciones complejas. Complementariamente, Chen et al. (2011) profundizan en la programación entera aplicada, abordando tanto su formulación como las estrategias de resolución exactas y heurísticas, lo cual resulta especialmente relevante para su implementación en entornos productivos.

La planificación de turnos y la optimización de la rotación de personal también han sido objeto de análisis en la literatura. Estudios recientes han explorado el impacto de la flexibilidad en la asignación de tareas y cómo la rotación eficiente de operarios puede mejorar la productividad y reducir la fatiga laboral (Hanif y Hakim, 2020). Esta investigación desarrolla un modelo matemático de rotación de trabajos mediante programación no lineal entera mixta (MINLP) para equilibrar la carga de trabajo en líneas de ensamblaje, considerando factores ergonómicos. El

modelo logró reducir significativamente la variación en la carga diaria entre operadores, promoviendo una distribución más equitativa y eficiente.

La aplicación de estos principios en la industria automotriz ha sido ejemplificada en estudios de caso que demuestran la efectividad de la optimización matemática en la gestión de la fuerza laboral. En particular, Ford Motor Company desarrolló un sistema de soporte para la toma de decisiones y la programación en entornos de manufactura complejos, logrando reducir costos de flete, horas extras e inventario, además de mejorar la eficiencia operativa (Barlatt et al., 2012). Este caso fue documentado en la revista *Interfaces* (2012), donde se detalla el diseño e implementación de un sistema integrado de planificación y programación aplicado a plantas de estampado automotriz, con resultados medibles en términos de reducción de costos operativos.

Además de los enfoques matemáticos, la gestión de la cadena de suministro juega un papel crucial en la optimización de los procesos de producción y la asignación de personal. Simchi-Levi et al. (2008) enfatizan la importancia de integrar la planificación de recursos humanos con la gestión de la producción para garantizar una operación eficiente y alineada con las demandas del mercado. El libro aborda el problema de la complejidad y falta de coordinación en las cadenas de suministro modernas, lo que genera ineficiencias, altos costos y problemas de servicio. Propone soluciones basadas en modelos cuantitativos y estrategias colaborativas para mejorar la toma de decisiones y el desempeño logístico.

La evolución de la planificación de operaciones y su transición hacia sistemas de gestión integrados han sido documentadas en trabajos como el de Olhager (2013), destacando la importancia de adaptarse a las nuevas tendencias tecnológicas y de mercado. Analiza la evolución de la planificación y el control de operaciones desde un enfoque centrado en la producción hacia una perspectiva integrada de cadena de suministro. Destaca cómo los avances tecnológicos y la globalización han impulsado esta transformación, exigiendo una mayor coordinación y visibilidad a lo largo de toda la red logística.

Finalmente, la gestión y asignación de recursos ha sido ampliamente utilizada en la literatura, tanto desde la perspectiva teórica, el desarrollo de modelos y algoritmos, así como también a través de aplicaciones y su impacto práctico. En su versión más simple, la asignación de trabajadores a tareas puede ser abordado mediante el clásico Problema de Asignación (AP, por su nombre en inglés), ver e.g. (Martello & Toth 1990). Sin embargo, restricciones específicas motivadas por aplicaciones prácticas concretas, con múltiples particularidades a ser incorporadas, requieren de variantes más sofisticadas para el problema. En esta tesis se considera una variante el AP con conflictos (APC), donde ciertas combinaciones de asignaciones son incompatibles de realizar simultáneamente. Recientemente, (Oncan et al. 2019) estudian el APC, mostrando que el mismo es NP-Hard y proponiendo un algoritmo exacto basado en relajaciones combinatorias. Desde el punto de vista práctico, los conflictos entre las asignaciones capturan las restricciones ergonómicas que debe cumplir la asignación para satisfacer los requerimientos establecidos en los convenios colectivos de trabajo.

La literatura revisada respalda la metodología utilizada en esta tesis, proporcionando un fundamento teórico y empírico sólido para el desarrollo del modelo de optimización propuesto. La combinación de programación lineal entera, gestión de la cadena de suministro y digitalización de datos permite abordar de manera integral el problema de la asignación de recursos humanos en líneas de producción automotriz, asegurando una solución eficiente y adaptable a las necesidades del sector.

### 3. Datos

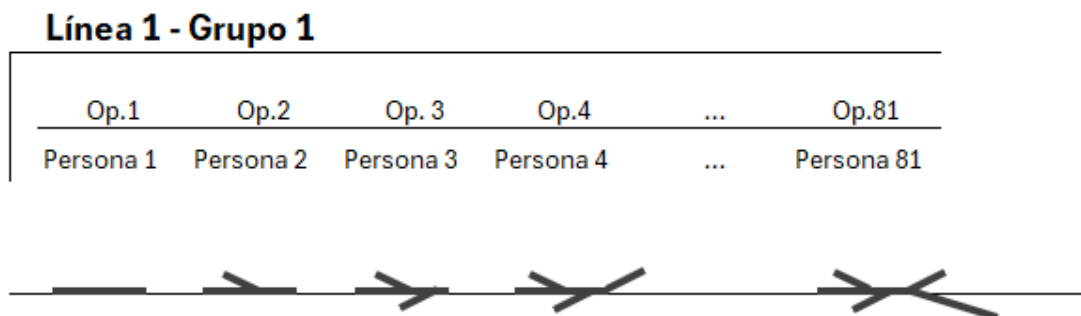
La información necesaria para abordar esta investigación fue proporcionada por el proveedor. Aunque contamos con la colaboración y el compromiso del proveedor para facilitar cualquier dato necesario, lamentablemente nos encontramos con un primer desafío importante, tal como se mencionó anteriormente: la información no se encuentra completamente digitalizada, está fragmentada y se presenta en múltiples formatos.

En términos generales, los datos con los que se dispone incluyen información sobre las operaciones realizadas en cada línea de producción, la asignación de personas a grupos específicos, las matrices de habilidades de los operarios y su respectiva polivalencia, así como las restricciones ergonómicas asociadas a cada puesto y las restricciones ergonómicas relacionadas con las rotaciones dentro de un turno de trabajo. Además, se dispone de registros diarios de fichadas (asistencia) de cada operario. Más adelante se explicará en detalle cada uno de estos datos necesarios para resolver el problema.

Los datos disponibles se dividen en las siguientes categorías:

#### Operaciones / Puestos asociados a cada línea:

Se detalla la cantidad y tipo de operaciones necesarias en cada una de las 4 líneas de producción principales. Todas las operaciones se realizan en forma simultánea por diferentes operarios ya que la línea de producción es continua y en serie. Cada operario está trabajando en una autoparte distinta simultáneamente.



**Figura 22.** Esquema de producción en serie.

En el esquema presentado en la Figura 22 se puede apreciar que la autoparte se va formando en la línea, pero en cada momento las operaciones son realizadas en simultáneo.

Operaciones	Cantidad de puestos	Cantidad de puestos	Cantidad de puestos	Cantidad de puestos
	L1	L2	L3	L4
BONDER	2	1	3	3
SUBENSAMBLE	16	18	16	16
CABLEADO	6	7	7	7
WASUREMBO	2	2	3	2
ENSAMBLE	29	28	35	29
GROMMET	1	1	1	1
WATER	1	1	1	1
IA2-TEST EMDEP	8	4	3	3
IA2- TEST ACC	3	3	2	2
IA3	5	5	2	2
FUSIBLE	1	1	0	0
TEST VISION	1	1	0	0
<b>TOTAL</b>	<b>75</b>	<b>72</b>	<b>73</b>	<b>66</b>

**Tabla 1.** Operaciones y puestos por línea

Fuente: elaboración propia

En la tabla se puede ver que, si bien las operaciones de manera agrupadas son similares, las cantidades por línea difieren ya que elaboran distintos productos, con ciertas particularidades dependiendo del producto final.

Grupos asociados a cada línea:

En cada línea de producción, se implementa una subdivisión en grupos compuestos por operaciones y puestos de trabajo predefinidos. Esta subdivisión se lleva a cabo con el propósito de establecer líderes en cada grupo, lo que contribuye a brindar un soporte eficiente a los trabajadores.

Una vez que una persona ha sido asignada a un grupo específico, es necesario proceder a la asignación eficiente de operarios a cada puesto durante las distintas rotaciones que se efectúan en un turno de trabajo (con un total de 4 rotaciones por turno), es decir, una operación por bloque como se graficó en la Figura 19.

En detalle, la Línea 1 consta de 6 grupos (Figura 13), la Línea 2 se compone de 5 grupos (Figura 14), la Línea 3 está integrada por 6 grupos (Figura 15), y la Línea 4 presenta 5 grupos (Figura 16) en su estructura.

Restricciones de cada puesto:

Para lograr una asignación eficiente de recursos, es crucial considerar ciertas restricciones operativas al momento de efectuar las rotaciones durante el turno de trabajo.

A título de ejemplo, se debe tener en cuenta que si un operario lleva a cabo una operación categorizada como "pinza fina" en el primer bloque de trabajo (Figura 23), no podrá realizar una operación con la categoría "pinza" en el segundo bloque, es decir, no podría realizar la operación "Sub Ensamble 6", "Sub Ensamble 7", "Sub Ensamble 8", "Sub Ensamble 10", ni repetir la operación en sí misma.

GRUPO 2-LINEA 1			
Sub Ensamble 5	Medio	Pinza fina (**)	No debe rotar con otro puesto de pinza
Ensamble 1	Bajo	circunducción/ encintado	Colocar Personas de menos de 1,60 mts. VER REEDUCACIÓN PARA HACERLO MEDIO y será Sin Restricción.
Sub Ensamble 6	Medio	Pinza	Sin restricción
Ensamble 2	Alto	circunducción/ encintado	Ubicar Personas por encima 1,65 mts
Sub Ensamble 7	Medio	Pinza	Sin restricción
Ensamble 3	Alto	circunducción/ encintado	Ubicar Personas por encima 1,65 mts
Sub Ensamble 8	Medio	Pinza	Sin restricción
Ensamble 3 (pre)	Alto	circunducción/ encintado	Ubicar Personas por encima 1,65 mts
Cableado Fusiblera	Alto	Circunducción/ Abducción hombro	Ubicar Personas por encima 1,65 mts
Ensamble 5	Alto	circunducción/ encintado	Ubicar Personas por encima 1,65 mts
Sub Ensamble 10	Medio	Pinza	Sin restricción
Ensamble 26 (pre 2)	Medio	Circunducción/ Encintado	Sin Restricción

**Figura 23:** Cartelera de rotación por grupo con mayor detalle.

Fuente: proveedor autopartista.

En su mayoría, estas restricciones ergonómicas se relacionan con la altura del personal, el tipo de operación y la necesidad de alternar el uso de diversas partes del cuerpo con el fin de evitar la repetitividad en las tareas.

### Matriz de Polivalencia de los operarios:

Para cada operario se detalla su línea de producción ya que difieren entre líneas, turno (A o B) ya que identifica si son operarios que tienen contrato para venir a la mañana o a la tarde, grupo de trabajo actual que se identifica como solución del autopartista, y las operaciones que puede realizar, identificadas con el número 1 a 3 dependiendo si es capaz de realizar el puesto (1), tiene una habilidad intermedia o si posee excelente habilidad en el puesto (3). La ausencia de valor indica que el operario no está capacitado para realizar la tarea.

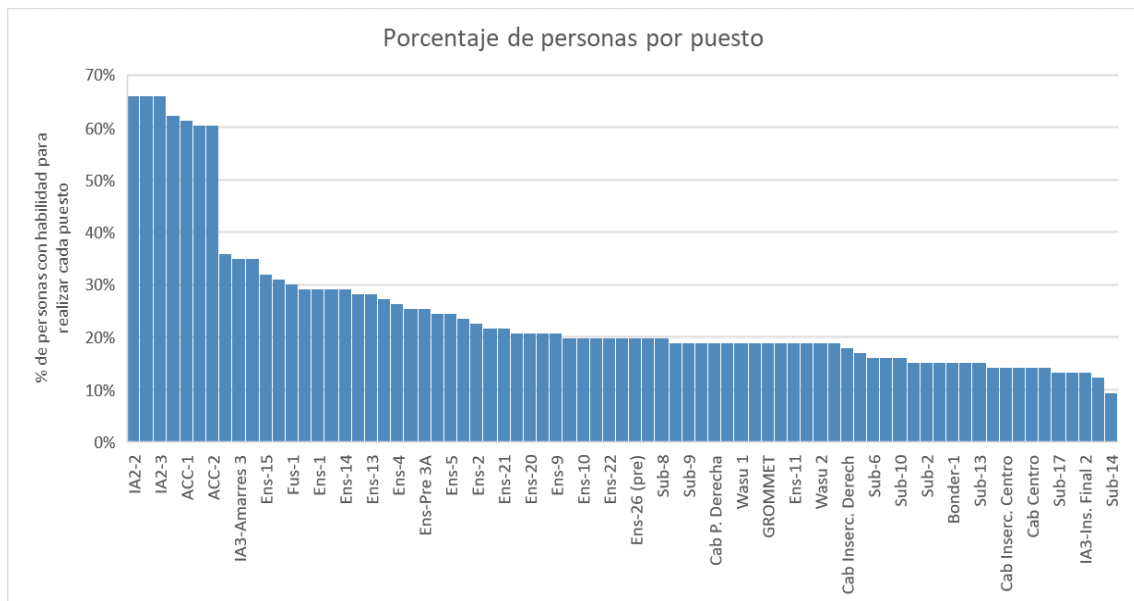
Si bien existen algunas personas categorizadas como "Instructores" con habilidades excelentes, en general, el proveedor se basa en la información de si la persona sabe (1) o no sabe (0), o puede o no puede, dependiendo de restricciones operativas o personales, llevar a cabo cada tarea. Es decir, se está obviando en la asignación considerar a las personas que poseen 3 en su matriz de polivalencia, dato fundamental para poder aprovechar siempre el conocimiento y eficiencia de estas personas a realizar determinadas tareas.

A partir de la matriz de la Figura 18, se pueden identificar las operaciones que cada operario puede realizar y su nivel de habilidad. Del mismo modo, se puede determinar qué personas pueden desempeñar cada puesto de trabajo. Este aspecto es crucial, ya que muestra que la distribución de personas capacitadas para realizar cada puesto es muy diversa en la configuración actual.

En la Figura 24 se aprecia cómo algunas tareas pueden ser realizadas por aproximadamente el 70% de las personas, mientras que otras solo pueden ser ejecutadas por menos del 10%.

Esto ocurre porque hay actividades más "fáciles" de aprender y ejecutar que otras, hay tareas que requieren más entrenamiento, habilidades y/o experiencia que otras, es por eso que hay más personas que saben hacerlas.

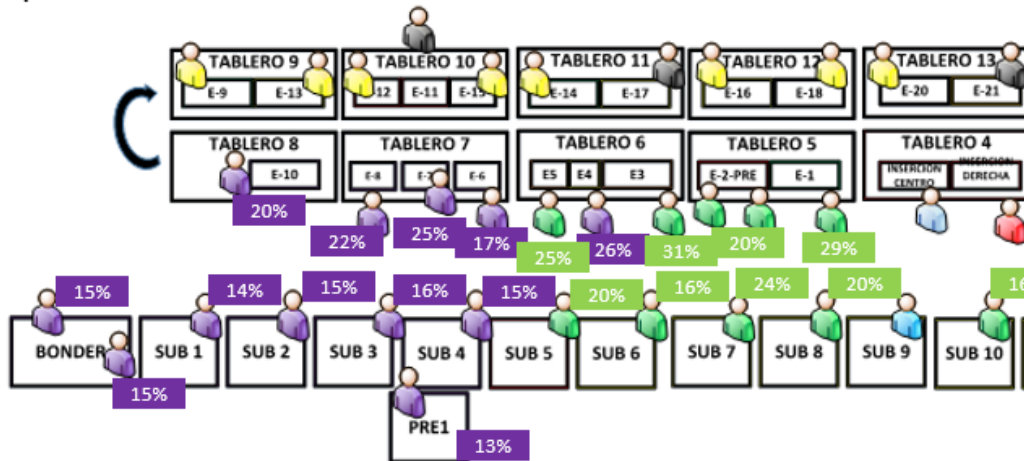
Esta información es fundamental, ya que permite identificar los puestos con menores posibilidades de ajustes eficientes y resalta la importancia de la capacitación en dichos puestos.



**Figura 24:** Porcentaje de personas por puesto.

Fuente: Elaboración propia.

- Grupo 1
- Grupo 2
- Grupo 3
- Grupo 4
- Grupo 5
- Grupo 6



**Figura 25:** Extracto de la línea 1 con sus correspondientes grupos y % de personas con capacidad de realizar cada tarea.

Fuente: Elaboración propia.

Además, se cuenta con la asignación actual de las personas a sus respectivos grupos armada manualmente por el proveedor y la rotación que se realiza en cada uno, lo que posibilita calcular la suma de la polivalencia por grupo y utilizarla como punto de referencia al comparar las soluciones generadas por el modelo, es decir, el benchmark. El análisis de los puestos y grupos actuales ha permitido identificar desequilibrios en la distribución de personas que tienen las habilidades necesarias para realizar las tareas asignadas a cada grupo

Registro de fichadas diaria de los operarios:

Finalmente, al comienzo de cada jornada laboral, disponemos de un registro diario que nos proporciona información sobre qué operarios han asistido al trabajo. Esta información resulta fundamental ya que filtra los operarios disponibles para llevar a cabo la asignación de puestos, teniendo en cuenta el nivel de asistencia de los trabajadores.

Esta información se utilizará como input de personas disponibles para asignar cada día.

## 4. Metodología actual

Para clarificar la situación actual y luego presentar la problemática a resolver se presenta la forma en que actualmente el proveedor realiza la asignación de las personas a las tareas.

Actualmente, la asignación de operarios a las tareas se realiza de forma manual y sin herramientas digitales. Al inicio del día, los operarios se dirigen a la pizarra del grupo al que pertenecen (Figura 20). Allí, cambian su tarjeta de rojo (ausente) a verde (presente).

Una vez identificados los presentes, el líder organiza la grilla de rotaciones (Figura 19) usando imanes preestablecidos. Sin embargo, este método es lento y carece de herramientas de control. No permite verificar si cada operario sabe realizar la tarea asignada ni optimiza el uso de personal con mayores habilidades.

Actualmente, la planificación es rígida. No permite flexibilidad ante ausencias, no garantiza que las tareas sean cubiertas por personal capacitado ni aprovecha a quienes tienen un nivel de habilidad 3.

Por ello, se necesitan herramientas digitales que optimicen la asignación. El objetivo es distribuir a los operarios en los grupos y tareas de cada bloque de trabajo, asegurando que las restricciones se respeten y que las personas con mayores habilidades sean asignadas correctamente.

## 5. El problema

### 5.1. Definición

En esta sección formalizamos el problema planteado anteriormente como un problema de optimización combinatoria, que denominamos Problema de Asignación a Líneas de Producción (PALP). En particular, este problema puede formularse como una variante del Problema de Asignación con Conflictos (APC, por su sigla en inglés), estudiado en Oncan et al. (2019).

Sea  $O = \{1, \dots, n\}$  el conjunto que representa el personal (i.e., los operarios) y  $T = \{1, \dots, m\}$  las tareas a ser realizadas. El horizonte de planeamiento se encuentra dividido en  $K$  bloques horarios idénticos, donde la totalidad de las tareas deben ser realizadas por exactamente un operario en cada bloque. A su vez, en cada bloque horario cada operario puede realizar alguna tarea. En principio, no es requerido que todos los operarios sean asignados a algún bloque horario. Los operarios cuentan con distintas habilidades, representados a partir de la denominada matriz de polivalencia  $P \in \mathbb{R}^{(n \times m)}$ , donde  $p_{ij}$  indica la habilidad (skill) de un operario  $i \in O$  para realizar una tarea  $j \in T$ . Asumimos que a mayor valor de  $p_{ij}$ , mayor es la habilidad. Notar que la habilidad para realizar una tarea no depende del bloque en el que es asignada.

Consideramos una partición del grupo de tareas  $T = T_1 \cup T_2 \cup \dots \cup T_L$ , donde  $T_i$ ,  $1 \leq i \leq L$  representa un subgrupo de tareas que denominaremos como “grupo” que, idealmente, debe ser realizado por el mismo subconjunto de operarios. Esta característica modela cierta estructura jerárquica entre los operarios, donde operarios asignados a un subgrupo de tareas reportan a un mismo referente.

Existen limitaciones respecto a la asignación de tareas en bloques consecutivos a un mismo operario, que capturan las restricciones ergonómicas establecidas para la seguridad de los operarios. Para ello, sea  $C = (T, A)$  un digrafo donde los vértices representan las tareas, y una arista  $(j, j') \in A$  entre dos tareas indica que la tarea  $j'$  no puede ser realizada en el bloque inmediatamente posterior a la tarea  $j$  por un mismo operario. El PALP consiste en encontrar una asignación de operarios a tareas para cada bloque, respetando la conformación de grupos y los conflictos de secuencialidad de tareas, que maximice la suma total de habilidades de la asignación.

El PALP puede formularse como una variante del APC. Resumidamente, y asumiendo por simplicidad un único grupo disponible, sea  $D = (V, E)$  un grafo bipartito, con  $v \in V = V_1 \cup V_2$  el conjunto de vértices donde  $V_1$  contiene los vértices  $v = (i, k)$ ,  $i \in O$  y  $k \in K$  indicando la disponibilidad del operario  $i$  durante el bloque  $k$ , y  $V_2$  los vértices  $w = (j, k)$  indicando la necesidad de realizar la tarea  $j \in T$  en el bloque  $k \in K$ . Siguiendo esta notación, dados  $v$  y  $w$  definimos  $p_{vw} = p_{ij}$  para capturar el beneficio de asignar al operario  $i$  a la tarea  $j$  en un determinado bloque. El conjunto  $A$  sólo contiene aristas entre vértices de  $V_1$  y  $V_2$  correspondientes al mismo bloque  $k$ . De la misma forma que en Oncan et al. (2019), las restricciones en la asignación de tareas consecutivas se modelan como incompatibilidades entre aristas del conjunto  $E$ . Sea  $(i, j) \in A$  una incompatibilidad definida en  $C$ , consideramos como incompatibles los ejes de la forma  $(i, k), (j, k+1) \in E$ ,  $k, k+1 \in K$ , como asignaciones incompatibles.

## 5.2. Ejemplo

Con el propósito de facilitar la comprensión e interpretación tanto del problema como de los resultados obtenidos, se opta por presentar un ejemplo simplificado que mantiene la esencia del problema a resolver en el contexto del proveedor. Aunque los datos se reducen significativamente, se conservan las mismas temáticas, variables, restricciones y complejidades presentes en el problema completo.

Reducción de Datos:

- Se reduce el número de personas/operarios en una línea de producción de alrededor de 80 a 10.
- Se disminuye la cantidad de tareas en la línea productiva de 75 a 8.
- Se reduce la cantidad de grupos de 6 a 2.
- Se reduce la cantidad de bloques de trabajo de 4 a 2.
- Se incorporan 5 restricciones de secuencialidad.

Los datos de entrada utilizados para el problema de optimización posibilitan la obtención de la asignación más eficiente de recursos, con el propósito de garantizar que el personal con las habilidades más adecuadas sea asignado a cada tarea, bloque y grupo, al mismo tiempo que se cumplen de manera rigurosa todas las restricciones previamente definidas.

### Datos de Entrada:

Los datos utilizados para el problema de optimización se presentan en las siguientes tablas:

### Tabla de personas:

Esta tabla corresponde a la matriz de polivalencia.

Para este ejemplo se tiene un listado de las 10 personas con sus habilidades (skills/polivalencias) correspondientes para cada una de las 8 tareas definidas.

tareas personas	GRUPO 1				GRUPO 2			
	tarea_1	tarea_2	tarea_3	tarea_4	tarea_5	tarea_6	tarea_7	tarea_8
persona_1	3	0	3	0	3	0	0	0
persona_2	1	1	0	1	1	1	1	0
persona_3	0	3	3	0	0	3	3	0
persona_4	1	0	1	0	0	1	1	0
persona_5	1	1	0	0	1	1	0	1
persona_6	0	1	1	0	0	0	0	1
persona_7	0	1	1	1	1	1	1	0
persona_8	0	0	0	3	3	0	0	3
persona_9	0	0	0	1	0	0	1	1
persona_10	0	0	1	1	1	1	0	0

**Figura 26.** Operaciones y puestos por la línea del ejemplo.

Fuente: Elaboración propia.

En esta Figura 26 se puede ver que las tareas 1 a 4 corresponden al grupo 1 (es decir, comparten un mismo líder) y las tareas 5 a 8 corresponden al grupo 2 (comparten otro líder).

Se puede apreciar que la persona 8 tiene skill de 3 en las tareas 4, 5 y 8. Es decir, puede hacer solo esas 3 tareas, y lo hace de manera excelente. En cambio, la persona 10, puede hacer las tareas 3, 4, 5 y 6 pero lo hace con un skill 1, es decir que es capaz de realizarlo, pero puede cometer defectos o necesitar algún soporte.

### Tabla de tareas:

Muestra las 8 tareas a realizar y a qué grupo pertenecen (Grupo 1 o Grupo 2).



BLOQUE 1		BLOQUE 2	
<b>GRUPO 1</b>			
TAREA 1	PERSONA 1	TAREA 1	PERSONA 4
TAREA 2	PERSONA 3	TAREA 2	PERSONA 3
TAREA 3	PERSONA 4	TAREA 3	PERSONA 1
TAREA 4	PERSONA 9	TAREA 4	PERSONA 9
<b>GRUPO 2</b>			
TAREA 5	PERSONA 5	TAREA 5	PERSONA 5
TAREA 6	PERSONA 10	TAREA 6	PERSONA 10
TAREA 7	PERSONA 7	TAREA 7	PERSONA 7
TAREA 8	PERSONA 8	TAREA 8	PERSONA 8

**Figura 27:** Asignación óptima.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 27 representa una solución factible, en particular la óptima, para el problema de asignación. En esta solución, se asignan personas a los grupos de trabajo, asegurando que estos grupos se mantengan fijos entre los diferentes bloques de trabajo. Luego, dentro de cada grupo, se define qué tarea debe realizar cada persona en cada bloque. Esta estructura garantiza una distribución eficiente de los recursos humanos, respetando las restricciones establecidas y maximizando el aprovechamiento de las habilidades de cada operario.

Los resultados indican que las personas se distribuyen en las tareas en cada bloque de manera que se maximiza la suma total de habilidades (skills) y se cumplen todas las restricciones mencionadas. Se puede ver que todas las tareas tienen a una persona asignada en cada bloque, se destaca en verde que esas personas tienen skill 3 en la tarea y en amarillo que tengan skill 1.

Se puede ver que en el grupo 2 las personas realizan la misma tarea tanto en el bloque 1 como en el 2. Esto sí puede ocurrir ya que no hay ninguna restricción (ver tabla de restricciones de secuencialidades) ergonómica u operativa que lo impida. A modo de ejemplo, agregamos una restricción adicional indicando que la tarea 5 no puede repetirse, es decir, en la tabla de restricciones se agrega la siguiente última fila:

1	1
1	2
2	1
6	7
7	6
5	5

**Tabla 5.** Tabla de restricciones modificada.

Con esta restricción adicional, los resultados fueron:

BLOQUE 1		BLOQUE 2	
<b>GRUPO 1</b>			
TAREA 1	PERSONA 4	TAREA 1	PERSONA 1
TAREA 2	PERSONA 3	TAREA 2	PERSONA 3
TAREA 3	PERSONA 1	TAREA 3	PERSONA 4
TAREA 4	PERSONA 9	TAREA 4	PERSONA 9
<b>GRUPO 2</b>			
TAREA 5	PERSONA 10	TAREA 5	PERSONA 2
TAREA 6	PERSONA 10	TAREA 6	PERSONA 10
TAREA 7	PERSONA 7	TAREA 7	PERSONA 7
TAREA 8	PERSONA 8	TAREA 8	PERSONA 8

**Figura 28:** Asignación óptima con la modificación realizada.

Esto indica que, la restricción que se agregó, en donde la tarea 5 no podía realizarse de manera consecutiva por la misma persona, se cumple, sumado a que se mantiene el resto de los conceptos.

En la siguiente tabla se puede ver cómo fueron los resultados (iniciales) y se puede apreciar el cumplimiento de las restricciones.

personas	1				2				grupos tareas
	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	3	0	3	0	3	0	0	0	
2	1	1	0	1	1	1	1	0	
3	0	3	3	0	0	3	3	0	
4	1	0	1	0	0	1	1	0	
5	1	1	0	0	1	1	0	1	
6	0	1	1	0	0	0	0	1	
7	0	1	1	1	1	1	1	0	
8	0	0	0	3	3	0	0	3	
9	0	0	0	1	0	0	1	1	
10	0	0	1	1	1	1	0	0	

**Figura 29:** Tareas asignadas a cada persona en cada bloque.

Fuente: Elaboración propia.

**Referencias:**

Los campos pintados en celeste corresponden a tareas que se asignaron en el bloque 1.

Los campos pintados en color naranja corresponden a tareas que se asignaron en el bloque 2.

Los campos pintados en color **gris** corresponden a tareas que se asignaron en ambos bloques, que como vimos anteriormente esto es factible siempre que las restricciones ergonómicas u operativas lo permitan.

Los resultados muestran que:

La persona 1 realiza la tarea 1, que tiene un skill de 3, en el bloque 1, y la tarea 3, con un skill de 3, en el bloque 2.

Las personas 2 y 6 no tienen asignaciones. Esto es importante ya que pueden reasignarse a otro tipo de tareas u otra línea de producción. Vemos que el programa busca maximizar la suma de polivalencias de la línea tratando también de reducir la cantidad de personas permitiendo optimizar los usos y costos.

La persona 3 realiza la tarea 2, con un skill de 3, tanto en el bloque 1 como en el bloque 2.

El mismo patrón se repite para otras personas y tareas, cumpliendo todas las restricciones, como:

- Cada tarea tiene una persona asignada en cada bloque.
- Cada persona tiene asignada una sola tarea por bloque.
- No se asigna a personas de diferentes grupos entre sí, es decir, si una persona realiza una tarea correspondiente al grupo 1 en el bloque 1, debe realizar una tarea correspondiente al grupo 1 en el bloque 2.
- Se respetan las restricciones de secuencialidad, lo que significa que, si una persona realiza en el bloque 1 la tarea 1, no puede repetir esa tarea en el bloque 2. Esto se puede ver claramente en la persona 1 y su cambio de tarea entre bloque y bloque, siendo ambas del mismo grupo.

Este ejemplo simplificado permite una comprensión clara del problema y la búsqueda del armado de grupos y asignación de tareas, maximizando las habilidades y cumpliendo con todas las restricciones.

Con esto podemos ver que se puede mejorar la visualización de la distribución detectando qué personas necesitan más entrenamiento en determinadas tareas con el objetivo de mejorar cada vez más la suma de habilidades, también se distribuye de manera tal que quedan 2 personas de las 10 liberadas para poder enviarlas a otra línea o a realizar otras tareas. Es importante también mencionar que de esta manera nos aseguramos de forma rápida que todas las restricciones se cumplan y que ante cualquier eventualidad que ocurra en el turno se puede realizar una nueva asignación y encontrar soluciones factibles.

## 6. Detalles de resolución

Para resolver este problema de asignación de recursos, se ha optado por enmarcarla como un problema de optimización.

La metodología seleccionada para abordar el objetivo de esta tesis es la programación lineal entera. Este enfoque metodológico se caracteriza por su capacidad para lograr una asignación óptima del personal a los puestos de trabajo, con el objetivo de maximizar la suma de la polivalencia en cada grupo y, en consecuencia, de cada línea de trabajo.

Además, la programación lineal entera proporciona la flexibilidad necesaria para identificar soluciones alternativas que impliquen los cambios mínimos posibles con respecto a la propuesta original. Esto resulta de gran utilidad en situaciones donde la planificación puede verse afectada por variables como el ausentismo, o cuando se requiere planificar la operación en días de fin de semana o feriados.

Para abordar este desafío, se ha optado por descomponer el problema en una serie de instancias correspondientes a cada línea de producción y turno, ya que cada línea/turno son independientes. De esta manera, se han identificado 8 instancias distintas, a saber: cuatro líneas (1 a 4), con dos turnos por línea (A y B) en el Autopartista más la línea de Sealer en el sector de Pintura para los turnos Naranja y turno Blanco de la empresa automotriz.

Esta separación se realiza ya que para cada línea y turno hay distintas personas asociadas y esto significa que poseen distinto nivel de habilidades y, a su vez, no hay interacción entre los operarios, lo cual nos permite evaluar la robustez del programa.

Para ilustrar el enfoque empleado, buscando brindarle al lector mayor entendimiento, se describe el modelo de programación lineal utilizado a partir del ejemplo de la Línea 1\_Turno B. En esta instancia, se dispone de  $O$  personas:

persona no	tareas																																																																											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76																												
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0																						
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0																				
3	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0																				
4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0																				
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0																			
6	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0																			
7	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0																			
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	3	0	0	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	3	3	0	3	3	0	3	3	0	3	3	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3																	
9	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0																		
10	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0																			
11	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0																		
71																																																																												
72																																																																												
73	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0																			
74	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0																		
75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1																	
76	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1																	
77	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1																	
78	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0																
79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0																
80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0																
81	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0																

Figura 30: Matriz de polivalencias de la Línea 1, Turno B.

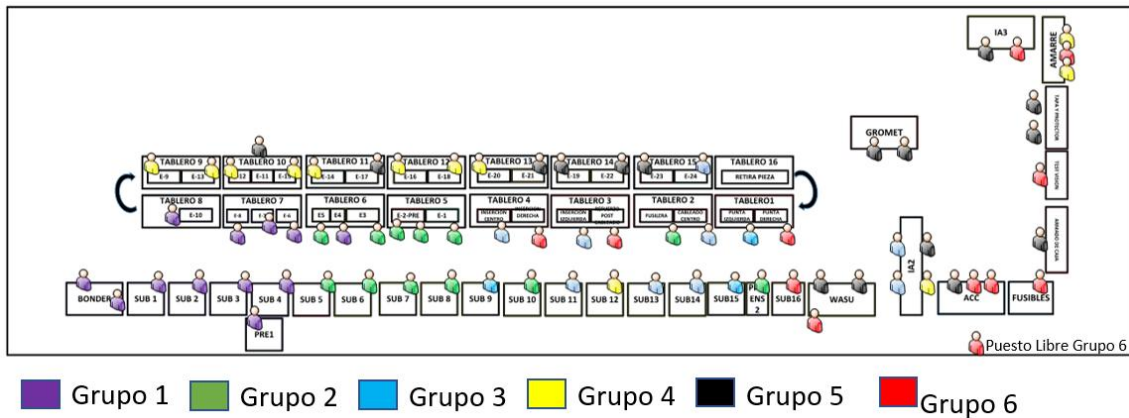
Fuente: Elaboración propia.

Cada persona (numeradas del 1 al n en el caso de la Línea 1 turno B) presenta un nivel de habilidad asociado a cada una de las tareas. Este nivel de habilidad se clasifica de la siguiente manera:

- 0: No puede realizar el puesto.
- 1: Capaz de realizar el puesto.
- 3: Excelente habilidad en el puesto.

En la instancia, se deben cubrir T tareas. Estas tareas en T se particionan en L grupos distintos, que como mencionamos, debemos respetar ya que cada uno tiene un líder referente.

Los grupos están compuestos de las siguientes tareas.



**Figura 31:** Composición de grupos.

Fuente: Proveedor autopartista.

En la imagen se puede ver la distribución geográfica de las actividades que componen la línea 1 y la identificación de los grupos de cada tarea.

**Grupo 1, compuesto por 12 tareas:**

1. Bonder 1
2. Bonder 2
3. Subensamblado 1
4. Subensamblado 2
5. Subensamblado 3
6. Subensamblado 4
7. Ensamblado 4
8. Ensamblado 6
9. Ensamblado 7
10. Ensamblado 8
11. Ensamblado 19
12. Ensamblado 25 (Pre)



**Grupo 2, compuesto por 12 tareas:**

1. Subensamblado 5
2. Subensamblado 6
3. Subensamblado 7
4. Subensamblado 8
5. Subensamblado 10
6. Cableado Fusilera
7. Ensamblado 1
8. Ensamblado 2
9. Ensamblado 3
10. Ensamblado 5



11. Ensamble 26 (Pre)
12. Ensamble 3A (Pre)

**Grupo 3, compuesto por 12 tareas:**

1. Subensamble 9
2. Subensamble 11
3. Subensamble 13
4. Subensamble 14
5. Subensamble 15
6. Centro Cableado
7. Cableado Izquierda
8. Cableado Inserción Centro
9. Cableado inserción Izquierda
10. Ensamble 24
11. IA2 1
12. IA2 2



**Grupo 4, compuesto por 12 tareas:**

1. Subensamble 12
2. Ensamble 9
3. Ensamble 12
4. Ensamble 13
5. Ensamble 14
6. Ensamble 15
7. Ensamble 16
8. Ensamble 18
9. Ensamble 20
10. IA2 3
11. IA3 Amarres 1
12. IA3 Amarres 3

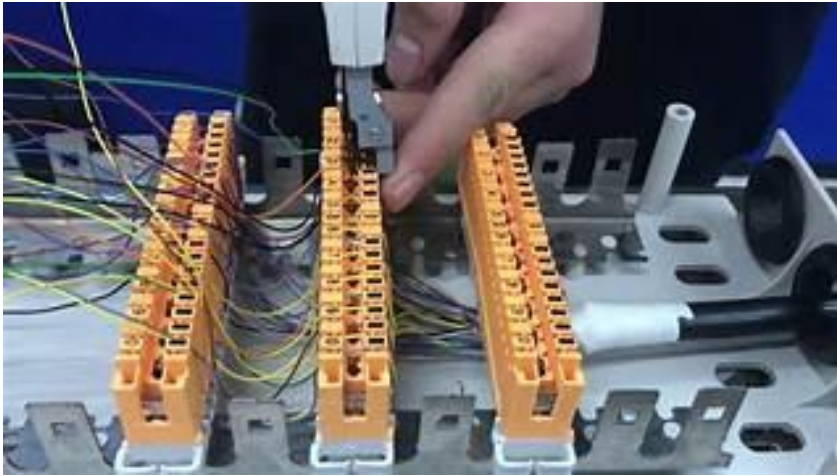


**Grupo 5, compuesto por 16 tareas:**

1. Wasurembo 1
2. Wasurembo 2
3. Ensamble 11
4. Ensamble 17
5. Ensamble 19
6. Ensamble 21
7. Ensamble 22
8. Ensamble 23
9. Grommet
10. Water Proof
11. IA2 4
12. ACC 1
13. Ensamble Caja
14. Ensamble Tapa Protector 1



15. Ensamble Tapa Protector 2
16. IA3 Inspección Final 1



**Grupo 6, compuesto por 12 tareas:**

1. Subensamble 16
2. Subensamble 17
3. Cableado Derecho
4. Cableado Inserción Derecha
5. Cableado Refuerzo
6. ACC 2
7. ACC 3
8. Fusilera 1
9. Test Vision
10. IA3 Amarres
11. IA3 Inspección Final 2
12. Libre: no requiere persona



La jornada laboral de 8 horas se divide en 4 bloques de 2 horas cada uno. Por lo tanto, la asignación de personal debe tener en cuenta una distribución específica para cada uno de los 4 bloques.

A modo de recordatorio, también se encuentran incluidas en el modelo las restricciones ergonómicas previamente mencionadas, que impiden asignar en bloques consecutivos tareas que impliquen esfuerzos físicos similares. Por ejemplo, si un operario realiza una tarea de alta exigencia ergonómica en el bloque 1, no podrá ser asignado a una tarea similar en el bloque 2.

Para incorporar estos datos en el modelo, se utilizan las siguientes estructuras de archivos, pensando en la escalabilidad del problema y la adaptación a distintas líneas, distintas empresas e incluso distintos rubros.

Para estructurar la información necesaria en la formulación del modelo, los datos se organizan en función de los elementos clave del problema: las tareas a realizar (T), los operadores disponibles (O), la cantidad de bloques, las restricciones de secuencialidad y la matriz de polivalencia que relaciona personas con habilidades. Cada tarea se identifica junto con su grupo

correspondiente, cada grupo con la cantidad de tareas asociadas, y las restricciones definen el orden en que deben ejecutarse determinadas tareas. A su vez, cada operador se vincula a un conjunto de habilidades, representando su capacidad para ejecutar distintas tareas. Toda esta información ingresa al programa en archivos de texto, esta organización permite escalar el modelo a distintas líneas de producción, empresas o incluso sectores industriales, facilitando su adaptabilidad.

Si bien la instancia actual del modelo se basa en un conjunto específico de tareas, grupos, restricciones y personas con sus respectivas habilidades, estos insumos están sujetos a modificaciones frecuentes. Las líneas de producción pueden adaptarse por cambios en los modelos de vehículos o por mejoras operativas. Asimismo, estudios ergonómicos pueden introducir nuevas restricciones, y las personas pueden desarrollar nuevas habilidades, ser capacitadas en otras operaciones, rotar a diferentes líneas, o quedar temporalmente inactivas por licencias o ausencias. Esta forma de estructurar los datos permite capturar la flexibilidad operativa necesaria. Todos estos aspectos serán formalizados más adelante en la descripción matemática del modelo.

El objetivo del problema resuelto con la técnica de programación lineal entera es maximizar la suma de habilidades (skills) en cada grupo, y, por ende, en toda la línea de producción. Esto se logra asignando a las personas a los puestos cumpliendo con una serie de restricciones:

- Todos los puestos deben estar cubiertos por una persona en cada bloque de trabajo.
- Cada persona puede estar asociada sólo a un grupo.
- Ciertas tareas identificadas en el negocio como físicamente exigentes no pueden ser asignadas en bloques consecutivos a un mismo operario, debido a criterios de ergonomía y salud laboral. Esta incompatibilidad se modela mediante una restricción que impide la asignación secuencial de dichas tareas en bloques subsiguientes, y será formalizada en las restricciones del modelo utilizando una tabla de incompatibilidades entre tareas.

Aunque el modelo no impone una restricción explícita que impida asignar personas con nivel de habilidad cero a determinadas tareas, su función objetivo prioriza la asignación de operadores con mayores niveles de habilidad. De esta manera, las soluciones óptimas tienden naturalmente a excluir asignaciones ineficientes, como aquellas que involucrarían personas sin la capacitación adecuada.

#### **Adicionales (valor agregado a este problema):**

Adicionalmente a la resolución del problema central, se han desarrollado funcionalidades que aportan valor agregado a la optimización del proceso.

Estas adiciones incluyen:

#### **Asignaciones de Personal para Fines de Semana y Feriados:**

Se propone la mejor asignación de personal para trabajar en días no laborables.

Valor agregado: Se permite identificar a las personas más adecuadas para maximizar la eficiencia en días especiales. Cuando se detecta la indisponibilidad de ciertos empleados, se pueden

eliminar del grupo de datos y ejecutar el programa con esta información, adaptando la asignación de manera óptima.

#### Asignaciones de Personal en Tiempo Real a partir de las Fichadas:

Se propone la mejor asignación en tiempo real utilizando la información de fichadas del turno.

Valor agregado: La información de fichadas, exportada a Excel, se utiliza para ajustar la asignación en tiempo real. En caso de que el modelo original sea infactible con esta información, se plantea la flexibilización de restricciones, como la mezcla de grupos o la relajación de restricciones de secuencialidad.

### **6.1. Modelo matemático**

Para resolver el PALP, se propone un modelo de programación lineal entera que optimiza la asignación de operarios a tareas en bloques horarios, considerando habilidades, restricciones ergonómicas y agrupamientos funcionales.

#### **Conjuntos y parámetros:**

$O = \{1, \dots, n\}$ : conjunto de operarios

$T = \{1, \dots, m\}$ : conjunto de tareas

$K = \{1, \dots, b\}$ : conjunto de bloques horarios

$P = [p_{ij}] \in \mathbb{R}^{n \times m}$ : matriz de habilidades, donde  $p_{ij}$  representa la habilidad del operario  $i \in O$  para la tarea  $j \in T$

$G(j)$ : Identificador del grupo al que pertenece la tarea  $j \in \{1, \dots, L\}$

$C = (T, A)$ : digrafo de conflictos entre tareas;  $(j, j') \in A$  indica que  $j$  y  $j'$  no pueden ser realizadas por un mismo operario en bloques consecutivos

#### **Variable de decisión:**

$x_{ijk} \in \{0, 1\}$ :

Donde  $x_{ijk} = 1$  si el operario  $i$  realiza la tarea  $j$  en el bloque  $k$ ; 0 en caso contrario.

#### **Función objetivo:**

Maximizar la suma total de habilidades asignadas:

$$\mathbf{Max} \sum_i \sum_j \sum_k p_{ij} \cdot x_{ijk}$$

Se busca asignar tareas a operarios con mayor nivel de habilidad, maximizando la eficiencia operativa total.

**Restricciones:**

(1) Cada tarea debe ser realizada por exactamente un operario en cada bloque:

$$\sum_i x_{ijk} = 1$$

$$\forall j \in T, \forall k \in K$$

(2) Cada operario puede realizar a lo sumo una tarea por bloque:

$$\sum_j x_{ijk} \leq 1$$

$$\forall i \in O, \forall k \in K$$

(3) Un operario sólo puede trabajar en tareas de un único grupo en todo el día de trabajo:

$$\sum G(j) \cdot x_{ijk_1} = \sum G(j) \cdot x_{ijk_2}$$

$$\forall i \in O,$$

$$\forall k_1, k_2 \in K$$

Esto fuerza a que cada operario realice tareas del mismo grupo en todos los bloques, ya que las sumas ponderadas por grupo deben coincidir.

(4) Restricción ergonómica: tareas incompatibles no pueden ser asignadas en bloques consecutivos:

$$x_{ijk} + x_{ij'k+1} \leq 1$$

$$\forall i \in O, \forall (j, j') \in A, \forall k < K$$

**Flexibilidad del modelo:** no se impide explícitamente la asignación a tareas con  $p_{ij}=0$ , pero como la función objetivo prioriza mayores habilidades, las soluciones óptimas tienden a evitar tales asignaciones en las instancias consideradas.

**Escalabilidad:** el modelo puede adaptarse fácilmente a diferentes líneas de producción, turnos o empresas, cambiando la definición de  $T$ ,  $O$ ,  $G$ , o el grafo de conflictos  $C$ .

En resumen, la función objetivo busca maximizar la suma de las habilidades de las personas multiplicadas por las variables binarias de asignación de tareas en cada grupo. Las restricciones aseguran que todas las tareas tengan exactamente una persona asignada en cada bloque, que cada persona sea asignada a un máximo de una tarea en cada bloque y que cada persona sea asignada a tareas dentro del mismo grupo en cada bloque.

La solución óptima de este modelo de programación lineal entera proporciona la asignación más eficiente de personas a tareas y grupos, maximizando la suma de habilidades en cada grupo y, por ende, en la línea de producción en su totalidad.

## 6.2. Aspectos de implementación

El programa se ha desarrollado en Python y se utiliza el módulo PuLP para resolver el problema de optimización. A continuación, se explica cómo se estructura el código y cómo se relaciona con el lenguaje de programación lineal entera.

### Lectura de Datos:

El programa comienza leyendo datos esenciales desde archivos externos independientes organizados de la siguiente manera:

- 1: Contiene la lista de tareas, identificando su grupo correspondiente.
- 2: Incluye la lista de grupos y la cantidad de tareas en cada grupo.
- 3: Contiene las restricciones de secuencialidad entre tareas.
- 4: Contiene la información sobre las personas, incluyendo sus habilidades para cada tarea.

### Creación del Modelo:

Se crea un modelo de optimización de asignación utilizando el módulo PuLP, definiéndolo como un problema de maximización.

### Definición de Variables de Decisión:

Se generan variables de decisión llamadas "personas\_tareas\_bloques" para representar si una persona realiza una tarea en un bloque determinado. Son la implementación de las variables  $x_{ijk}$ . Estas variables son binarias (0 o 1).

### Función Objetivo:

La función objetivo del modelo se define como la maximización de la suma de las habilidades de las personas asignadas a tareas en cada grupo. El objetivo es maximizar la calidad de las asignaciones.

### Restricciones del Modelo:

Se agregan restricciones al modelo para garantizar que todas las tareas tengan exactamente una persona asignada en cada bloque, limitar a una tarea por persona y bloque, respetar restricciones de secuencialidad y asignar a cada persona tareas dentro del mismo grupo. Las restricciones incluyen:

- Cada tarea debe tener exactamente una persona asignada en cada bloque.
- Cada persona puede ser asignada a un máximo de una tarea en cada bloque.
- Cada persona debe ser asignada a tareas dentro del mismo grupo en cada bloque.

- Se evita que una tarea de elevada carga ergonómica sea realizada consecutivamente a otra de carga similar.

#### Resolución del Modelo:

El modelo se resuelve utilizando el método "solve" de PuLP para encontrar la asignación óptima de tareas a personas.

#### Impresión de Resultados:

Los resultados se imprimen para mostrar qué personas realizan qué tareas en cada bloque.

#### Visualización:

La biblioteca Matplotlib se utiliza para crear gráficos de heatmap que representan la asignación de tareas. Se generan cuatro gráficos, uno para cada bloque, que muestran a las personas en los ejes horizontal y las tareas en los ejes vertical. Los valores en el heatmap indican si una persona realiza una tarea en un bloque específico.

#### Exportación de Resultados:

Se crea un DataFrame de Pandas con los datos de asignación de tareas y se exporta a un archivo Excel llamado 'asignaciones.xlsx'.

Esta estructura del programa permite abordar eficazmente la asignación de personal, resolver problemas en tiempo real y explorar múltiples escenarios, aportando flexibilidad y eficiencia al proceso de gestión de recursos humanos.

## 7. Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para las líneas de producción del proveedor. Posteriormente, para demostrar la aplicabilidad de este programa en un contexto más complejo, se expondrán los resultados obtenidos en una línea de producción de una de las automotrices más importantes del país.

Inicialmente, con el fin de evaluar la eficacia del programa, se solicitó al proveedor que proporcione los datos de asignación real correspondientes a un día en particular. Es relevante destacar que los datos suministrados consistieron en fotografías de las pizarras mencionadas en la introducción de este documento. Estas pizarras, distribuidas en diversas locaciones de la planta y administradas por diferentes personas, presentan una complejidad considerable en su lectura y, además, resulta arduo aprovechar estos datos para extraer información, buscar mejoras o establecer la trazabilidad de las tareas ejecutadas por cada individuo en cada bloque y día de trabajo.

Una vez que se completó la digitalización de todos los datos proporcionados, se procedió a implementar un modelo de optimización que busca maximizar la suma de las habilidades de las personas asignadas a tareas definiendo los grupos sujeto a que se cumplan las restricciones ya comentadas. Luego se analizan los resultados de la aplicación del modelo para 2 combinaciones de modelos:

1. **Modelo 1:** Grupos fijos con restricciones ergonómicas
2. **Modelo 2:** Grupos fijos sin restricciones ergonómicas

El principal objetivo de evaluar estas variantes es analizar el impacto de la flexibilidad en la asignación de personal en la eficiencia del modelo. En particular, la variante abordada mediante el Modelo 1 implica que los operarios no pueden hacer tareas subsiguientes entre bloques si están restringidas por temas de incompatibilidad.

Las instancias consideradas para las dos empresas (proveedor autopartista y terminal de ensamblado de vehículos finales) y distintas líneas, turnos y días son las siguientes:

1. **Proveedor autopartista Línea 1 – Turno Blanco:** esta línea cuenta con 76 tareas (o puestos de trabajo), 81 operarios disponibles y un conjunto de tareas agrupadas en 6 grupos funcionales. La matriz de polivalencia presenta valores entre 0 y 3, indicando distintos niveles de habilidades entre operarios y tareas.
2. **Terminal línea de Pintura Sealer – Turno Naranja:** se consideran 36 tareas, 55 operarios disponibles, y una estructura de tareas organizada en 7 grupos. Las habilidades se distribuyen en un rango de 0 a 4.
3. **Terminal de la línea de Pintura Sealer – Turno Blanco:** se replica la configuración anterior, con las mismas 36 tareas, 55 operarios y 7 grupos de tareas, manteniéndose también el rango de habilidades entre 0 y 4.

Para esta etapa final, se realiza una comparación utilizando datos reales correspondientes a los días 4, 5 y 6 de junio. En todos los casos, los datos de entrada se

mantienen constantes (es decir, los mismos operarios estuvieron presentes), aunque la empresa realizó asignaciones distintas en cada jornada.

En todos los casos se consideran 4 bloques horarios (índice k en las variables).

Las métricas que se utilizaron para evaluar las soluciones son:

1. **Suma de skill:** Representa el nivel de habilidad acumulado de los operarios asignados a cada tarea. Una mayor suma de skill indica que el modelo está asignando trabajadores con mayor capacidad a las tareas, optimizando el rendimiento global.
2. **Cantidad de infactibilidades:** Indica el número de restricciones que no se pueden cumplir en la solución obtenida.
3. **Cantidad de personas necesarias:** Mide la cantidad total de operarios requeridos para completar todas las tareas dentro del horizonte de planificación. Si bien no es parte de la función objetivo, es relevante para evaluar la eficiencia en el uso de recursos humanos.

Se espera usar tantas personas como tareas tenga la instancia.

Si la línea de producción tiene 36 tareas, se usarán 36 personas, siempre y cuando se puedan cumplir todas las restricciones, si no, sería infactible y tal vez se debería ser más flexible con las incompatibilidades o con forzar a no cambiar de grupo

Debido a que el Modelo 1 impone todas las restricciones de forma estricta, cualquier solución obtenida es, por definición, factible. Sin embargo, se incorpora una métrica de infactibilidad para facilitar la comparación con el Modelo 2, que sí permite violaciones de ciertas restricciones, y con la solución implementada por la empresa, que puede no cumplir con todos los requisitos ergonómicos del modelo. De esta manera, se puede cuantificar el impacto que tiene la presencia de infactibilidades sobre la eficiencia general y la cantidad de operarios necesarios, permitiendo un análisis más preciso del rol que cumplen las restricciones en la optimización de la asignación.

Presentación de resultados agregados/generales:

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en cada instancia evaluada.

	<b>Instancia 1: Proveedor autopartista Línea 1 Turno Blanco</b>		
	<b>Benchmark</b> (Sit. Real)	<b>Modelo 1:</b> <b>Con restricciones</b>	<b>Modelo 2:</b> <b>Sin restricciones</b>
<b>Cant. Personas</b>	77	76	76
<b>Suma Skill</b>	328	340	340
<b>Infactibilidades</b>	4	0	0

**Tabla 6:** Resultados de los modelos implementados en la instancia 1.

<b>Instancia 2:</b> Terminal línea de Pintura Sealer Turno Naranja			
	<b>Benchmark</b> (Sit. Real)	<b>Modelo 1:</b> <b>Con</b> restricciones	<b>Modelo 2:</b> <b>Sin</b> restricciones
<b>Cant. Personas</b>	38	36	36
<b>Suma Skill</b>	410	460	460
<b>Infactibilidades</b>	7	0	0

**Tabla 7:** Resultados de los modelos implementados en la instancia 2.

<b>Instancia 3/4/5:</b> Terminal línea de Pintura Sealer Turno Blanco					
	<b>Benchmark</b> (Sit. Real 4/06)	<b>Benchmark</b> (Sit. Real 5/06)	<b>Benchmark</b> (Sit. Real 6/06)	<b>Modelo 1:</b> <b>Con</b> restricciones	<b>Modelo 2:</b> <b>Sin</b> restricciones
<b>Cant. Personas</b>	38	38	39	36	36
<b>Suma Skill</b>	408	404	402	456	456
<b>Infactibilidades</b>	6	8	9	0	0

**Tabla 8:** Resultados de los modelos implementados en la instancia 3.

El análisis comparativo de los resultados presentados en las Tablas 6, 7 y 8 permite extraer conclusiones relevantes en torno a tres dimensiones clave: nivel total de skill asignado, cantidad de personas necesarias y cumplimiento de restricciones operativas.

Es importante mencionar también que al proveedor y a la planta automotriz les demanda 30 minutos por día por líder realizar esta asignación de manera manual, mientras que el programa realiza la asignación en segundos, y, por el momento, al no contar con una aplicación, se necesitan 5 minutos para convertir los resultados a una visualización más clara.

En primer lugar, se observa que ambos modelos desarrollados (Modelo 1, con restricciones completas, y Modelo 2, sin restricciones ergonómicas) logran sistemáticamente mejorar la suma total de habilidades asignadas respecto a las soluciones reales observadas en planta. En las tres instancias analizadas, los modelos incrementan el valor global de skill sin necesidad de aumentar la cantidad de personal asignado. Por ejemplo, en la instancia 2, la solución real registra una suma de 410 puntos, mientras que ambos modelos alcanzan el máximo teórico de 460. En la instancia 3, donde se cuenta con tres planificaciones reales distintas, se observa un promedio de 405 puntos frente a los 456 alcanzados por ambos modelos. Esta diferencia se debe a que la solución real varía de un día a otro por decisiones operativas, mientras que el modelo produce una única solución óptima, consistente en su asignación y completamente trazable.

Cabe destacar que los valores obtenidos por los modelos coinciden con el máximo teórico alcanzable en cada instancia, lo que indica que se logra la mejor combinación posible de habilidades dadas las condiciones de disponibilidad. Por ejemplo, en el Turno Naranja (instancia 2), con 36 tareas a cubrir por bloque, el valor máximo se alcanza asignando 7 personas con nivel

4 ( $7 \times 4 = 28$ ) y 29 personas con nivel 3 ( $29 \times 3 = 87$ ), lo cual da un total de 115 por bloque. Multiplicado por los 4 bloques considerados, se obtiene un máximo de 460 puntos. Del mismo modo, en el Turno Blanco (instancia 3), con 6 personas de nivel 4 ( $6 \times 4 = 24$ ) y 30 de nivel 3 ( $30 \times 3 = 90$ ), el total por bloque es de 114, lo que multiplicado por 4 bloques da un total de 456. Esta estimación de cota superior permite validar que los modelos asignan operadores de manera óptima bajo las condiciones del problema.

En segundo lugar, se observa que los modelos requieren una cantidad igual o incluso menor de operarios en comparación con la planificación real. Aunque la función objetivo no busca minimizar explícitamente la cantidad de personas, la estructura del modelo, en particular, la asignación obligatoria de una tarea por bloque y persona, junto con la maximización del nivel de habilidad, genera un comportamiento emergente que tiende a reducir la dotación necesaria. Al priorizar operarios con mayor nivel de skill, el modelo favorece asignaciones más eficientes, dejando sin asignar a quienes poseen menor habilidad. En todos los casos analizados, se logra cubrir completamente los puestos de trabajo sin exceder la cantidad de personal disponible, mejorando así la utilización de los recursos humanos existentes.

Por último, y de forma especialmente destacada, los modelos propuestos eliminan completamente las infactibilidades presentes en las asignaciones reales. Mientras que las soluciones empíricas presentan entre 4 y 9 restricciones incumplidas, los modelos garantizan una solución operativamente viable, incluso cuando se respetan las estructuras grupales y restricciones ergonómicas.

En síntesis, los modelos desarrollados mejoran de manera significativa la calidad de las asignaciones respecto a la solución real, alcanzando combinaciones óptimas de habilidades, con igual o menor cantidad de operarios y garantizando factibilidad operativa. Sin embargo, es importante aclarar que el cumplimiento de restricciones en el Modelo 2 es incidental, ya que estas no están presentes en su formulación. La comparación entre ambos modelos motiva el análisis posterior, en el que se explora específicamente el impacto de mantener o eliminar restricciones ergonómicas en la planificación.

El patrón general observado se mantiene consistente en todas las instancias analizadas, lo que valida la aplicabilidad de estos modelos en distintos contextos dentro de la cadena de producción automotriz. Esto incluye tanto un proveedor de autopartes como líneas de pintura en terminales automotrices.

**Análisis de impacto de restricciones ergonómicas:**

<b>Experimento</b>	<b>Descripción</b>	<b>Resultado Modelo 1</b>	<b>Resultado Modelo 2</b>	<b>Conclusión</b>
<b>1. Inclusión de restricciones ergonómicas adicionales</b>	Se agregaron manualmente restricciones de secuencialidad entre tareas críticas/incompatibles	Inviabile (no se puede cumplir con las nuevas restricciones)	Factible, pero viola varias de las nuevas restricciones al analizar luego el detalle	Las restricciones ergonómicas afectan la viabilidad. Ignorarlas genera riesgos operativos, problemas sindicales, problemas de salud ocupacional.
<b>2. Reducción de operarios al mínimo</b>	Se redujo el número de operarios al mínimo teórico necesario para cubrir tareas  (Ej: TN = 36 personas)	Factible	Factible	Con dotación mínima y sin secuencias críticas, las restricciones ergonómicas no afectan el resultado

**Tabla 9:** Resultados de los experimentos.

Con el objetivo de evaluar específicamente el efecto de las restricciones ergonómicas en la planificación de tareas, se diseñaron dos experimentos adicionales sobre la instancia correspondiente al Turno Naranja (TN). El propósito fue observar si y cómo se modifican los resultados al incorporar restricciones más exigentes o reducir al mínimo la disponibilidad de recursos humanos.

## **1. Inclusión de restricciones de incompatibilidad adicionales**

En primer lugar, se introdujeron manualmente nuevas restricciones de secuencialidad entre tareas que no formaban parte del conjunto original, forzando incompatibilidades ergonómicas entre tareas de alto skill. El objetivo es generar un escenario en el que el Modelo 1 (con restricciones) y el Modelo 2 (sin restricciones) ofrezcan resultados divergentes.

Como era de esperarse, el Modelo 2 siguió proporcionando soluciones factibles, ya que estas nuevas restricciones no forman parte de su formulación. En contraste, el Modelo 1 resultó inviable únicamente luego de incorporar un total de 12 restricciones adicionales, agregadas de a dos por vez. Hasta ese punto, la solución obtenida por el Modelo 1 permaneció sin cambios en la suma total del skill (340 puntos), lo cual sugiere que el modelo puede absorber cierto grado de complejidad sin degradar la calidad de la asignación. Este hallazgo refuerza su sensibilidad ante la incorporación de requisitos ergonómicos más estrictos.

Para profundizar el análisis, se evaluó ex post la solución propuesta por el Modelo 2, considerando las restricciones de secuencialidad agregadas. Se observa que esta solución incurre en varias violaciones de las restricciones ergonómicas introducidas, lo que confirma que la ausencia de tales restricciones en el modelo puede llevar a asignaciones operativamente riesgosas desde el punto de vista de ergonomía. Este resultado refuerza la importancia de mantener estas restricciones dentro del modelo cuando se busca garantizar condiciones de trabajo seguras y sostenibles.

## **2. Reducción del personal al mínimo teórico necesario**

En un segundo experimento, se redujo artificialmente la cantidad de operarios disponibles hasta alcanzar el mínimo teórico requerido para cubrir las tareas (36 operarios para 36 tareas por bloque), manteniendo el resto de los datos constantes. El objetivo es evaluar si esta menor disponibilidad generaba diferencias en las soluciones entre los modelos o afectaba la factibilidad.

El resultado fue que ambos modelos continuaron arrojando soluciones factibles idénticas, sin variaciones en la asignación ni en el valor de la función objetivo. Este resultado sugiere que, en condiciones de saturación mínima de recursos (con dotación justa), las restricciones ergonómicas no necesariamente entran en conflicto con la asignación óptima si no se introducen secuencias críticas. Es decir, no toda reducción de personal implica automáticamente tensiones entre eficiencia y ergonomía.

## **Conclusión de los experimentos**

Estos ensayos complementarios permiten concluir que las restricciones ergonómicas, si bien pueden no afectar todas las instancias, sí juegan un rol determinante en contextos donde existen secuencias potencialmente críticas o tareas de alta exigencia que no deben ser consecutivas. En esos casos, ignorarlas, como hace el Modelo 2, puede conducir a soluciones que, aunque factibles desde el punto de vista matemático, son inaplicables o incluso riesgosas en la práctica.

Por lo tanto, el Modelo 1 permite una representación más precisa de las condiciones reales de trabajo y es esencial para escenarios donde la seguridad operativa y la ergonomía son criterios no negociables. La comparación entre ambos modelos no sólo cuantifica el impacto de estas restricciones sobre la eficiencia, sino que también destaca la importancia de incorporarlas en herramientas de planificación avanzadas.

**Presentación de resultados en detalle:**

Línea 1 – Turno B del proveedor:

Se analizó la asignación real de tareas en un día específico para la Línea 1 en el Turno B de un proveedor autopartista. Esta digitalización permitió cuantificar el total de habilidades (skill) asignadas, que resultó en 328 puntos. Se detectaron:

- Restricciones de secuencialidad no cumplidas, marcadas en naranja.
- Operarios con nivel de skill 3 sin asignación, marcados en verde.
- Personas no utilizadas durante el algún bloque, marcadas en rojo

Persona	Bloque	Tarea	Grupo	Skill	Persona	Bloque	Tarea	Grupo	Skill	Persona	Bloque	Tarea	Grupo	Skill	Persona	Bloque	Tarea	Grupo	Skill
1	1	67	Grupo 6	1	11	1	48	Grupo 4	1	21	1	32	Grupo 3	1	31	1	4	Grupo 1	1
1	2	68	Grupo 6	1	11	2	44	Grupo 4	1	21	2	34	Grupo 3	1	31	2	7	Grupo 1	1
1	3	69	Grupo 6	1	11	3	46	Grupo 4	1	21	3	35	Grupo 3	1	31	3	12	Grupo 1	1
1	4	70	Grupo 6	1	11	4	37	Grupo 4	1	21	4	36	Grupo 3	1	31	4	9	Grupo 1	1
2	1	49	Grupo 5	1	12	1	34	Grupo 3	1	22	1	71	Grupo 6	1	32	1	36	Grupo 3	1
2	2	50	Grupo 5	1	12	2	35	Grupo 3	1	22	2	72	Grupo 6	1	32	2	29	Grupo 3	1
2	3	51	Grupo 5	1	12	3	36	Grupo 3	1	22	3	73	Grupo 6	1	32	3	34	Grupo 3	1
2	4	52	Grupo 5	1	12	4	29	Grupo 3	1	22	4	74	Grupo 6	1	32	4	35	Grupo 3	1
3	1	1	Grupo 1	1	13	1	2	Grupo 1	1	23	1	61	Grupo 5	1	33	1	72	Grupo 6	1
3	2	2	Grupo 1	1	13	2	3	Grupo 1	1	23	2	62	Grupo 5	1	33	2	74	Grupo 6	1
3	3	3	Grupo 1	1	13	3	1	Grupo 1	1	23	3	63	Grupo 5	1	33	3	75	Grupo 6	1
3	4	4	Grupo 1	1	13	4	3	Grupo 1	1	23	4	64	Grupo 5	1	33	4	76	Grupo 6	1
4	1	50	Grupo 5	1	14	1	31	Grupo 3	1	24	1	74	Grupo 6	1	34	1	25	Grupo 3	1
4	2	51	Grupo 5	1	14	2	26	Grupo 3	1	24	2	75	Grupo 6	1	34	2	27	Grupo 3	1
4	3	52	Grupo 5	1	14	3	31	Grupo 3	1	24	3	66	Grupo 6	1	34	3	33	Grupo 3	1
4	4	49	Grupo 5	1	14	4	26	Grupo 3	1	24	4	68	Grupo 6	1	34	4	30	Grupo 3	1
5	1	51	Grupo 5	1	15	1	17	Grupo 2	1	25	1	62	Grupo 5	1	35	1	52	Grupo 5	1
5	2	52	Grupo 5	1	15	2	15	Grupo 2	1	25	2	63	Grupo 5	1	35	2	53	Grupo 5	1
5	3	49	Grupo 5	1	15	3	16	Grupo 2	1	25	3	64	Grupo 5	1	35	3	54	Grupo 5	1
5	4	50	Grupo 5	1	15	4	19	Grupo 2	1	25	4	61	Grupo 5	1	35	4	55	Grupo 5	1
6	1	66	Grupo 6	1	16	1	26	Grupo 3	3	26	1	27	Grupo 3	1	36	1		Grupo 1	1
6	2	67	Grupo 6	1	16	2	31	Grupo 3	3	26	2	28	Grupo 3	1	36	2		Grupo 1	1
6	3	68	Grupo 6	1	16	3	26	Grupo 3	3	26	3	30	Grupo 3	1	36	3		Grupo 1	1
6	4	69	Grupo 6	1	16	4	31	Grupo 3	3	26	4	32	Grupo 3	1	36	4		Grupo 1	1
7	1	5	Grupo 1	1	17	1	69	Grupo 6	1	27	1	73	Grupo 6	3	37	1	45	Grupo 4	1
7	2	6	Grupo 1	1	17	2	70	Grupo 6	1	27	2	76	Grupo 6	3	37	2	46	Grupo 4	1
7	3	7	Grupo 1	1	17	3	71	Grupo 6	1	27	3	76	Grupo 6	3	37	3	45	Grupo 4	1
7	4	8	Grupo 1	1	17	4	72	Grupo 6	1	27	4	75	Grupo 6	3	37	4	38	Grupo 4	1
8	1	47	Grupo 4	3	18	1	38	Grupo 4	1	28	1	12	Grupo 1	3	38	1	3	Grupo 1	1
8	2	48	Grupo 4	3	18	2	40	Grupo 4	1	28	2	1	Grupo 1	3	38	2	9	Grupo 1	1
8	3	41	Grupo 4	3	18	3	40	Grupo 4	1	28	3	4	Grupo 1	3	38	3	8	Grupo 1	1
8	4	42	Grupo 4	3	18	4	45	Grupo 4	1	28	4	5	Grupo 1	3	38	4	7	Grupo 1	1
9	1	68	Grupo 6	1	19	1	19	Grupo 2	1	29	1	13	Grupo 2	1	39	1	53	Grupo 5	1
9	2	69	Grupo 6	1	19	2	20	Grupo 2	1	29	2	14	Grupo 2	1	39	2	54	Grupo 5	1
9	3	70	Grupo 6	1	19	3	21	Grupo 2	1	29	3	15	Grupo 2	1	39	3	55	Grupo 5	1
9	4	67	Grupo 6	1	19	4	24	Grupo 2	1	29	4	16	Grupo 2	1	39	4	56	Grupo 5	1
10	1	8	Grupo 1	1	20	1	40	Grupo 4	1	30	1	7	Grupo 1	1	40	1	28	Grupo 3	1
10	2	5	Grupo 1	1	20	2	45	Grupo 4	1	30	2	8	Grupo 1	1	40	2	25	Grupo 3	1
10	3	6	Grupo 1	1	20	3	38	Grupo 4	1	30	3	9	Grupo 1	1	40	3	27	Grupo 3	1
10	4	6	Grupo 1	1	20	4	39	Grupo 4	1	30	4	12	Grupo 1	1	40	4	33	Grupo 3	1

Persona	Bloque	Tarea	Grupo	Skill	Persona	Bloque	Tarea	Grupo	Skill	Persona	Bloque	Tarea	Grupo	Skill	Persona	Bloque	Tarea	Grupo	Skill
41	1	6	Grupo 1	1	51	1	33	Grupo 3	1	61	1	78	Grupo 6	1	71	1	60	Grupo 5	1
41	2	4	Grupo 1	1	51	2	32	Grupo 3	1	61	2	65	Grupo 6	1	71	2	61	Grupo 5	1
41	3	5	Grupo 1	1	51	3	25	Grupo 3	1	61	3	74	Grupo 6	1	71	3	53	Grupo 5	1
41	4	2	Grupo 1	1	51	4	28	Grupo 3	1	61	4	66	Grupo 6	1	71	4	54	Grupo 5	1
42	1	54	Grupo 5	1	52	1	24	Grupo 2	1	62	1		Grupo 1	1	72	1	63	Grupo 5	1
42	2	55	Grupo 5	1	52	2	21	Grupo 2	1	62	2		Grupo 1	1	72	2	60	Grupo 5	1
42	3	56	Grupo 5	1	52	3	22	Grupo 2	1	62	3	14	Grupo 2	1	72	3	59	Grupo 5	1
42	4	57	Grupo 5	1	52	4	23	Grupo 2	1	62	4	14	Grupo 2	1	72	4	53	Grupo 5	1
43	1	9	Grupo 1	1	53	1	56	Grupo 5	1	63	1	22	Grupo 2	1	73	1	70	Grupo 6	1
43	2	12	Grupo 1	1	53	2	57	Grupo 5	1	63	2	23	Grupo 2	1	73	2	71	Grupo 6	1
43	3	2	Grupo 1	1	53	3	58	Grupo 5	1	63	3	24	Grupo 2	1	73	3	72	Grupo 6	1
43	4	1	Grupo 1	1	53	4	59	Grupo 5	1	63	4	22	Grupo 2	1	73	4	73	Grupo 6	1
44	1	39	Grupo 4	1	54	1	30	Grupo 3	1	64	1	58	Grupo 5	1	74	1	64	Grupo 5	1
44	2	37	Grupo 4	1	54	2	33	Grupo 3	1	64	2	59	Grupo 5	1	74	2	64	Grupo 5	1
44	3	37	Grupo 4	1	54	3	32	Grupo 3	1	64	3	60	Grupo 5	1	74	3	62	Grupo 5	1
44	4	44	Grupo 4	1	54	4	25	Grupo 3	1	64	4	51	Grupo 5	1	74	4	60	Grupo 5	1
45	1	41	Grupo 4	1	55	1	29	Grupo 3	1	65	1	44	Grupo 4	1	75	1		Grupo 1	1
45	2	42	Grupo 4	1	55	2	30	Grupo 3	1	65	2	43	Grupo 4	1	75	2		Grupo 1	1
45	3	42	Grupo 4	1	55	3	28	Grupo 3	1	65	3	47	Grupo 4	1	75	3		Grupo 1	1
45	4	46	Grupo 4	1	55	4	27	Grupo 3	1	65	4	43	Grupo 4	1	75	4		Grupo 1	1
46	1	43	Grupo 4	1	56	1	23	Grupo 2	1	66	1	14	Grupo 2	1	76	1		Grupo 1	1
46	2	39	Grupo 4	1	56	2	24	Grupo 2	1	66	2	13	Grupo 2	1	76	2		Grupo 1	1
46	3	44	Grupo 4	1	56	3		Grupo 1	1	66	3	19	Grupo 2	1	76	3		Grupo 1	1
46	4	41	Grupo 4	1	56	4		Grupo 1	1	66	4	17	Grupo 2	1	76	4		Grupo 1	1
47	1	35	Grupo 3	1	57	1		Grupo 1	1	67	1	16	Grupo 2	1	77	1	10	Grupo 1	1
47	2	36	Grupo 3	1	57	2		Grupo 1	1	67	2	19	Grupo 2	1	77	2	10	Grupo 1	1
47	3	29	Grupo 3	1	57	3		Grupo 1	1	67	3	13	Grupo 2	1	77	3	11	Grupo 1	1
47	4	34	Grupo 3	1	57	4		Grupo 1	1	67	4	13	Grupo 2	1	77	4	11	Grupo 1	1
48	1	55	Grupo 5	1	58	1	37	Grupo 4	1	68	1	59	Grupo 5	1	78	1	75	Grupo 6	1
48	2	56	Grupo 5	1	58	2	38	Grupo 4	1	68	2	49	Grupo 5	1	78	2	73	Grupo 6	1
48	3	57	Grupo 5	1	58	3	39	Grupo 4	1	68	3	50	Grupo 5	1	78	3	65	Grupo 6	1
48	4	58	Grupo 5	1	58	4	40	Grupo 4	1	68	4	63	Grupo 5	1	78	4	65	Grupo 6	1
49	1	15	Grupo 2	1	59	1	57	Grupo 5	1	69	1	42	Grupo 4	1	79	1	11	Grupo 1	1
49	2	16	Grupo 2	1	59	2	58	Grupo 5	1	69	2	41	Grupo 4	1	79	2	11	Grupo 1	1
49	3	17	Grupo 2	1	59	3	61	Grupo 5	1	69	3	43	Grupo 4	1	79	3	10	Grupo 1	1
49	4	18	Grupo 2	1	59	4	62	Grupo 5	1	69	4	48	Grupo 4	1	79	4	10	Grupo 1	1
50	1	18	Grupo 2	1	60	1	46	Grupo 4	1	70	1	21	Grupo 2	1	80	1	20	Grupo 2	1
50	2	17	Grupo 2	1	60	2	47	Grupo 4	1	70	2	22	Grupo 2	1	80	2	18	Grupo 2	1
50	3	18	Grupo 2	1	60	3	48	Grupo 4	1	70	3	23	Grupo 2	1	80	3	20	Grupo 2	1
50	4	21	Grupo 2	1	60	4	47	Grupo 4	1	70	4	20	Grupo 2	1	80	4	15	Grupo 2	1
															81	1	65	Grupo 6	1
															81	2	66	Grupo 6	1
															81	3	67	Grupo 6	1
															81	4	71	Grupo 6	1

**Figura 32:** Digitalización de la asignación de tareas del proveedor de la Línea 1 en el Turno B en un día en particular.

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, se aplica el modelo de optimización con los mismos datos de entrada. La solución generada alcanzó un valor total de skill de 340, cumpliendo todas las restricciones operativas. Esto representa una mejora del 3.65% respecto a la planificación real.

OUTPUT PROGRAMA						INPUT A PROVEEDOR					
						TOTAL		340			
Persona	Tarea	Bloque	Persona	Tarea	Bloque	Grupo	Skill	Tarea	Bloque	Grupo	
persona_1	tarea_67	1	1	67	1	6	1	GCLinea 1 - Cableado Derecho	1	6	
persona_1	tarea_67	3	1	67	3	6	1	GCLinea 1 - Cableado Derecho	3	6	
persona_1	tarea_67	4	1	67	4	6	1	GCLinea 1 - Cableado Derecho	4	6	
persona_1	tarea_69	2	1	69	2	6	1	GCLinea 1 - Cableado Refuerzo	2	6	
persona_2	tarea_49	1	2	49	1	5	1	GCLinea 1 - Wasurembo 1	1	5	
persona_2	tarea_58	2	2	58	2	5	1	GCLinea 1 - Water Proof	2	5	
persona_2	tarea_61	4	2	61	4	5	1	GCLinea 1 - Ensamble Caja	4	5	
persona_2	tarea_63	3	2	63	3	5	1	GCLinea 1 - Ensamble Tapa Protector 2	3	5	
persona_3	tarea_1	3	3	1	3	1	1	RELinea 1 - Bonder 1	3	1	
persona_3	tarea_2	2	3	2	2	1	1	RELinea 1 - Bonder 2	2	1	
persona_3	tarea_2	4	3	2	4	1	1	RELinea 1 - Bonder 2	4	1	
persona_3	tarea_12	1	3	12	1	1	1	RELinea 1 - Ensamble 25 (Pre)	1	1	
persona_4	tarea_42	4	4	42	4	4	1	MELinea 1 - Ensamble 15	4	4	
persona_4	tarea_44	1	4	44	1	4	1	MELinea 1 - Ensamble 18	1	4	

**Figura 33:** Resultado de la asignación de tareas de la Línea 1 Turno B del proveedor con el programa (extracto).

Fuente: Elaboración propia.

Los datos de las personas se han ocultado para preservar la identidad de los mismos y la confidencialidad de los datos.

Esta visualización se presenta para mostrar cómo el proveedor recibe los datos y puede introducirlos en su sistema, y tener el histórico y trazabilidad que le permita realizar estudios y mejoras.

Es importante destacar que, además de cumplir con todas las restricciones necesarias, es fundamental resaltar los beneficios inherentes a este desarrollo:

- Trazabilidad de los datos.
- Cumplimiento integral de las restricciones.
- Rapidez en la obtención de la asignación óptima.
- Facilidad y rapidez para realizar modificaciones en los datos de entrada y volver a ejecutar el programa.
- Optimización del tiempo de los líderes.
- Posibilidad de detectar áreas de mejora.
- Disponibilidad de datos digitalizados que permiten identificar puestos con cobertura insuficiente o individuos con deficiencias significativas, lo que a su vez posibilita la creación de planes de capacitación.

Para los casos de las demás líneas y turnos (instancias) se puede observar un comportamiento similar, es decir, el proveedor realiza asignaciones en donde no todas las restricciones se cumplen y sobre todo la suma del skill no es la óptima.

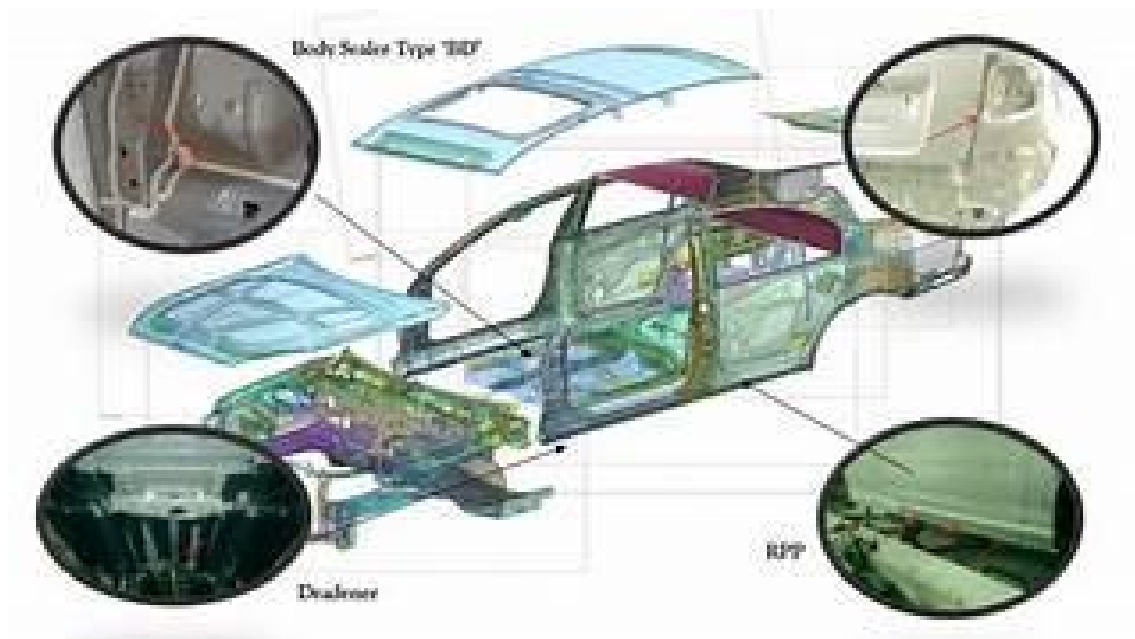
La solución obtenida garantiza la utilización de las personas con mayor skill, la disminución de las personas asociadas a las tareas de producción, el cumplimiento de todas las restricciones y la visibilidad de los resultados.

Por ejemplo, si la cantidad de tareas a cubrir es de 76 (75 más un puesto libre), y hay 5 personas con el skill más alto posible, es decir skill igual a 3, el máximo valor posible para esa instancia será de 340, esto se calcula como  $5 \times 3 = 15$ , y las demás  $70 \times 1$  me da un total de 85 por bloque, es decir, 340 en la producción total de esa línea ese día.

#### Extensión del problema, aplicación en otro rubro:

Como se anticipó en secciones anteriores, el modelo fue aplicado también a una línea de producción automotriz que presenta un mayor grado de complejidad operativa. En particular, se trabajó sobre una de las operaciones más exigentes del área de Pintura de la principal terminal automotriz del país, caracterizada por contar con múltiples restricciones ergonómicas y técnicas. El análisis se realizó sobre un turno específico de trabajo, lo que permitió evaluar la robustez del modelo frente a condiciones operativas más desafiantes.

El programa se ejecutó con los datos suministrados, resultando en una solución específica que se analizó en detalle y se expondrá más adelante.



**Figura 34:** Representación de lugares del vehículo donde se coloca el Sealer.

Fuente: yahoo imágenes

## Análisis Descriptivo de la Instancia y la Solución

### Contexto de la Línea de Pintura

La línea de Pintura es una de las más complejas dentro del proceso de producción automotriz debido a las diversas restricciones ergonómicas y técnicas que deben cumplirse. Estas restricciones aseguran que los empleados no repitan tareas que requieran un esfuerzo físico similar en bloques de tiempo consecutivos, garantizando así la seguridad y bienestar de los trabajadores.



**Figura 35:** Aplicación de Sealer.

Fuente: yahoo imágenes.

Además, cada tarea requiere habilidades específicas que no todos los empleados poseen, lo que complica aún más la asignación de personal.

Este punto es fundamental ya que en este caso la polivalencia tiene las siguientes variaciones:

- 0: No sabe realizar la tarea
- 1: Actualmente en entrenamiento bajo supervisión y asistencia
- 2: Realiza la tarea completa, pero aun con asistencia parcial y chequeo del TL
- 3: Realiza la tarea sin asistencia con seguridad, calidad y dentro del tiempo de ciclo
- 4: EXPERTO, lleva 3 meses consecutivos sin desvíos de calidad y seguridad

En este caso, si el operario tiene skill 3 o 4 puede realizarla sólo, en el caso de tener 1 o 2 requiere de asistencia.

### Situación real de la Línea de Pintura

Para realizar este análisis se evaluaron 4 instancias, una en el Turno Naranja y tres en Turno Blanco.

## Instancia 2: Turno Naranja

En la situación real, se asignaron 38 personas para cumplir con la producción del turno. Sin embargo, se observó que no todas las restricciones se cumplían, y había individuos asignados a tareas para las cuales no poseían la habilidad requerida (Ver Figura 30 los cuadros pintados en rosa). Esto implicaba la necesidad de asistencia por parte de compañeros o líderes, lo que no solo afectaba la eficiencia, sino también la calidad del trabajo. El total de habilidades (skill) obtenido en esta situación real fue de 410.

Adicionalmente a esto, no se cumplía el mantenimiento de operarios dentro de los grupos, siendo más compleja la administración de recursos y el seguimiento por parte de los líderes de célula.

Sumado a esto, es importante destacar que en el caso de la automotriz sucedía lo mismo que en el proveedor en cuanto a la planificación y armado de la información. Se realiza de forma manual, y de manera separada, lo cual imposibilita la detección de oportunidades y de contar con la trazabilidad de las operaciones realizadas y el cumplimiento de todas las restricciones.

Es por esto que en la figura siguiente podemos apreciar que hay personas con skill 0 asignadas, que se mezclan los operarios entre grupos y que no se optimiza la suma de skills.

			BLOQUE 1	BLOQUE 2	BLOQUE 3	BLOQUE 4
TL 1 - 4 TM	UBC 1	UBC - ETIQUETADO 1	3	3	3	3
	UBC 2	UBC - ETIQUETADO 2	3	3	3	3
	UBC 3	UBC - CHEQUEO 1	3	3	3	3
	UBC 4	UBC - CHEQUEO 2	3	3	3	3
TL 2 - 6 TM	SEALER 1	Sec. 1	3	3	3	3
	SEALER 2	Sec. 2	3	3	3	3
	SEALER 3	Sec. 3	3	3	3	3
	SEALER 4	Sec. 4	3	3	3	3
	SEALER 5	Sec. 5	3	3	3	3
	SEALER 6	Sec. 6	3	3	3	3
TL 3 - 5 TM + 2 Relevos	SEALER 7	Sec. 7	3	3	3	3
	SEALER 9	Sec. 9	3	3	3	3
	SEALER 11	Sec. 11	3	3	3	3
	SEALER 13	Sec. 13	3	3	3	3
	SEALER 15	Sec. 15	3	3	3	0
TL 4 - 5 TM + 2 Relevos	SEALER 8	Sec. 8	3	3	3	3
	SEALER 10	Sec. 10	3	3	3	3
	SEALER 12	Sec. 12	3	3	3	3
	SEALER 14	Sec. 14	3	3	3	3
	SEALER 16	Sec. 16	3	3	2	3
TL 5 - 5 TM + 2 Relevos	SEALER 17	Sec. 17	0	0	3	0
	SEALER 19	Sec. 19	3	0	3	3
	SEALER 21	Sec. 21	3	3	3	3
	SEALER 23	Sec. 23	3	3	3	3
	SEALER 25	Sec. 25	3	3	3	3
TL 6 - 5 TM + 2 Relevos	SEALER 18	Sec. 18	3	3	3	3
	SEALER 20	Sec. 20	3	3	3	3
	SEALER 22	Sec. 22	3	3	3	3
	SEALER 24	Sec. 24	3	3	3	3
	SEALER 26	Sec. 26	3	3	3	3
TL 7 - 6 TM	QG 1	QG 1	3	3	3	3
	QG 2	QG 2	3	3	3	3
	QG 3	QG 3	0	3	3	3
	QG 4	QG 4	3	3	3	3
	ANTICHIPING 1	Antichiping 1	3	3	3	3
	ANTICHIPING 2	Antichiping 2	0	3	3	3

**Figura 36:** Resultado de la asignación de tareas real de la automotriz.

Se utilizó la habilidad de cada persona en cada operación para no presentar el nombre y apellido de los operarios.

Fuente: Elaboración propia.

### Solución Generada por el Modelo

La solución generada por el programa se destacó por cumplir todas las restricciones definidas y optimizar la asignación de personal. Utilizando los mismos datos suministrados, el programa redistribuye las tareas entre 36 personas, logrando un total de habilidades de 460, lo que representa un aumento del 12% en comparación con la situación real. Este incremento en el nivel de habilidades asignadas a cada tarea se traduce en una mejora significativa en la eficiencia y calidad del trabajo.

OUTPUT PROGRAMA									INPUT A CLIENTE		
									460		
Persona	Tarea	Bloque	Persona	Tarea	Bloque	Grupo	Skill	Tarea	Bloque	Grupo	
persona_1	tarea_10	2	1	10	2	4	4	Fria: SEALER 10	2	4	
persona_1	tarea_10	4	1	10	4	4	4	Fria: SEALER 10	4	4	
persona_1	tarea_16	1	1	16	1	4	4	Fria: SEALER 16	1	4	
persona_1	tarea_16	3	1	16	3	4	4	Fria: SEALER 16	3	4	
persona_2	tarea_17	2	2	17	2	5	3	Barr SEALER 17	2	5	
persona_2	tarea_19	4	2	19	4	5	3	Barr SEALER 19	4	5	
persona_2	tarea_21	1	2	21	1	5	3	Barr SEALER 21	1	5	
persona_2	tarea_25	3	2	25	3	5	3	Barr SEALER 25	3	5	
persona_3	tarea_33	2	3	33	2	7	3	Curt QG 3	2	7	
persona_3	tarea_33	4	3	33	4	7	3	Curt QG 3	4	7	
persona_3	tarea_35	3	3	35	3	7	3	Curt ANTICHIPING 1	3	7	
persona_3	tarea_36	1	3	36	1	7	3	Curt ANTICHIPING 2	1	7	
persona_4	tarea_7	4	4	7	4	3	3	Lopt SEALER 7	4	3	
persona_4	tarea_9	1	4	9	1	3	3	Lopt SEALER 9	1	3	
persona_4	tarea_9	3	4	9	3	3	3	Lopt SEALER 9	3	3	
persona_4	tarea_15	2	4	15	2	3	3	Lopt SEALER 15	2	3	

**Figura 37:** Resultado de la asignación de tareas de la empresa automotriz con el programa.

Fuente: Elaboración propia.

La solución obtenida se contrasta con la situación real presentada por el jefe de turno para un día representativo de trabajo, revelando discrepancias significativas.

### Instancia 3: Turno Blanco (día 4/06)

En la situación real se asignaron 38 personas con una suma de skill total de 408.

Se puede ver, de manera similar a la Instancia 2 que no se cumple la restricción de habilidades y de mezcla de grupos.

			BLOQUE 1	BLOQUE 2	BLOQUE 3	BLOQUE 4
TL 1 - 4 TM	UBC 1	UBC - ETIQUETADO 1	3	3	3	3
	UBC 2	UBC - ETIQUETADO 2	3	3	3	3
	UBC 3	UBC - CHEQUEO 1	3	3	3	3
	UBC 4	UBC - CHEQUEO 2	3	3	3	3
TL 2 - 6 TM	SEALER 1	Sec. 1	3	3	3	3
	SEALER 2	Sec. 2	3	2	3	3
	SEALER 3	Sec. 3	3	2	3	3
	SEALER 4	Sec. 4	3	3	1	3
	SEALER 5	Sec. 5	3	3	3	3
	SEALER 6	Sec. 6	0	3	3	3
TL 3 - 5 TM + 2 Relevos	SEALER 7	Sec. 7	3	3	3	3
	SEALER 9	Sec. 9	3	3	3	3
	SEALER 11	Sec. 11	3	3	3	3
	SEALER 13	Sec. 13	3	3	3	3
	SEALER 15	Sec. 15	3	3	3	3
TL 4 - 5 TM + 2 Relevos	SEALER 8	Sec. 8	3	3	3	3
	SEALER 10	Sec. 10	3	0	3	0
	SEALER 12	Sec. 12	3	3	3	3
	SEALER 14	Sec. 14	3	3	3	3
	SEALER 16	Sec. 16	3	2	3	3
TL 5 - 5 TM + 2 Relevos	SEALER 17	Sec. 17	3	3	3	3
	SEALER 19	Sec. 19	3	3	3	3
	SEALER 21	Sec. 21	3	3	3	0
	SEALER 23	Sec. 23	3	3	3	3
	SEALER 25	Sec. 25	3	3	3	3
TL 6 - 5 TM + 2 Relevos	SEALER 18	Sec. 18	3	3	3	3
	SEALER 20	Sec. 20	3	3	3	3
	SEALER 22	Sec. 22	3	3	3	3
	SEALER 24	Sec. 24	3	3	2	3
	SEALER 26	Sec. 26	3	3	3	3
TL 7 - 6 TM	QG 1	QG 1	0	3	3	3
	QG 2	QG 2	3	3	3	3
	QG 3	QG 3	3	3	3	3
	QG 4	QG 4	3	3	3	3
	ANTICHIPING 1	Antichiping 1	3	3	3	3
	ANTICHIPING 2	Antichiping 2	0	3	3	3

**Figura 38:** Representación de situación real del 4/06.

#### Instancia 4: Turno Blanco (día 5/06)

En la situación real se asignaron 38 personas con una suma de skill total de 404.

Se puede ver, de manera similar a la Instancia 2 y 3 que no se cumple la restricción de habilidades y de mezcla de grupos.

			BLOQUE 1	BLOQUE 2	BLOQUE 3	BLOQUE 4
TL 1 - 4 TM	UBC 1	UBC - ETIQUETADO 1	0	3	3	3
	UBC 2	UBC - ETIQUETADO 2	3	3	3	3
	UBC 3	UBC - CHEQUEO 1	3	3	3	3
	UBC 4	UBC - CHEQUEO 2	3	3	3	3
TL 2 - 6 TM	SEALER 1	Sec. 1	3	3	3	3
	SEALER 2	Sec. 2	3	3	3	0
	SEALER 3	Sec. 3	3	3	3	3
	SEALER 4	Sec. 4	0	3	3	1
	SEALER 5	Sec. 5	3	3	3	3
	SEALER 6	Sec. 6	3	0	3	3
TL 3 - 5 TM + 2 Relevos	SEALER 7	Sec. 7	3	3	3	3
	SEALER 9	Sec. 9	3	3	3	3
	SEALER 11	Sec. 11	3	3	3	3
	SEALER 13	Sec. 13	3	3	3	3
	SEALER 15	Sec. 15	3	3	3	3
TL 4 - 5 TM + 2 Relevos	SEALER 8	Sec. 8	3	3	3	3
	SEALER 10	Sec. 10	3	0	0	3
	SEALER 12	Sec. 12	3	3	3	3
	SEALER 14	Sec. 14	3	2	3	3
	SEALER 16	Sec. 16	2	3	3	3
TL 5 - 5 TM + 2 Relevos	SEALER 17	Sec. 17	3	3	3	3
	SEALER 19	Sec. 19	3	3	3	3
	SEALER 21	Sec. 21	3	3	3	3
	SEALER 23	Sec. 23	3	3	3	3
	SEALER 25	Sec. 25	3	3	3	3
TL 6 - 5 TM + 2 Relevos	SEALER 18	Sec. 18	3	3	3	3
	SEALER 20	Sec. 20	3	3	3	3
	SEALER 22	Sec. 22	3	3	3	3
	SEALER 24	Sec. 24	3	3	3	3
	SEALER 26	Sec. 26	3	3	3	3
TL 7 - 6 TM	QG 1	QG 1	3	3	3	0
	QG 2	QG 2	3	3	3	3
	QG 3	QG 3	3	3	3	3
	QG 4	QG 4	3	3	3	3
	ANTICHIPING 1	Antichiping 1	3	3	3	3
	ANTICHIPING 2	Antichiping 2	3	3	0	3

**Figura 39:** Representación de situación real del 5/06.

### Instancia 5: Turno Blanco (día 6/06)

En la situación real se asignaron 39 personas con una suma de skill total de 402.

Se puede ver, de manera similar a la Instancia 2 que no se cumple la restricción de habilidades y de mezcla de grupos.

			BLOQUE 1	BLOQUE 2	BLOQUE 3	BLOQUE 4
TL 1 - 4 TM	UBC 1	UBC - ETIQUETADO 1	3	3	3	3
	UBC 2	UBC - ETIQUETADO 2	0	3	3	3
	UBC 3	UBC - CHEQUEO 1	3	3	3	3
	UBC 4	UBC - CHEQUEO 2	3	3	4	3
TL 2 - 6 TM	SEALER 1	Sec. 1	3	3	3	3
	SEALER 2	Sec. 2	2	3	3	3
	SEALER 3	Sec. 3	3	2	3	3
	SEALER 4	Sec. 4	3	3	1	3
	SEALER 5	Sec. 5	3	3	3	3
	SEALER 6	Sec. 6	0	3	3	4
TL 3 - 5 TM + 2 Relevos	SEALER 7	Sec. 7	3	3	3	3
	SEALER 9	Sec. 9	3	3	3	3
	SEALER 11	Sec. 11	3	3	3	3
	SEALER 13	Sec. 13	3	3	3	3
	SEALER 15	Sec. 15	3	3	3	3
TL 4 - 5 TM + 2 Relevos	SEALER 8	Sec. 8	3	3	3	2
	SEALER 10	Sec. 10	4	3	3	0
	SEALER 12	Sec. 12	3	3	3	3
	SEALER 14	Sec. 14	3	4	3	3
	SEALER 16	Sec. 16	3	0	3	3
TL 5 - 5 TM + 2 Relevos	SEALER 17	Sec. 17	3	3	3	3
	SEALER 19	Sec. 19	3	3	3	3
	SEALER 21	Sec. 21	3	3	3	3
	SEALER 23	Sec. 23	3	3	3	3
	SEALER 25	Sec. 25	3	3	3	0
TL 6 - 5 TM + 2 Relevos	SEALER 18	Sec. 18	3	3	3	3
	SEALER 20	Sec. 20	3	3	3	3
	SEALER 22	Sec. 22	3	3	3	3
	SEALER 24	Sec. 24	3	3	3	3
	SEALER 26	Sec. 26	3	3	3	3
TL 7 - 6 TM	QG 1	QG 1	0	3	3	3
	QG 2	QG 2	3	3	3	3
	QG 3	QG 3	3	3	3	3
	QG 4	QG 4	0	0	0	3
	ANTICHIPING 1	Antichiping 1	3	3	3	3
	ANTICHIPING 2	Antichiping 2	1	3	3	3

Figura 40: Representación de situación real del 6/06.

Situación generada por el Modelo:

Además de cumplir con todas las restricciones se puede apreciar una asignación de 36 personas y una suma de skill de 456.

OUTPUT PROGRAMA						INPUT A CLIENTE						
Persona	Tarea	Bloque	Persona	Tarea	Bloque	Grupo	Skill	Gr	Tarea	Bloque	Grupo	
persona_1	tarea_31	3	1	31	3	7	3	Fria:	31	3	7	
persona_1	tarea_33	4	1	33	4	7	3	Fria:	33	4	7	
persona_1	tarea_35	2	1	35	2	7	3	Fria:	35	2	7	
persona_1	tarea_36	1	1	36	1	7	3	Fria:	36	1	7	
persona_4	tarea_20	4	4	20	4	6	3	Lope	20	4	6	
persona_4	tarea_22	3	4	22	3	6	3	Lope	22	3	6	
persona_4	tarea_24	1	4	24	1	6	3	Lope	24	1	6	
persona_4	tarea_26	2	4	26	2	6	3	Lope	26	2	6	
persona_6	tarea_9	3	6	9	3	3	3	Ciur	9	3	3	
persona_6	tarea_11	1	6	11	1	3	3	Ciur	11	1	3	
persona_6	tarea_15	2	6	15	2	3	3	Ciur	15	2	3	
persona_6	tarea_15	4	6	15	4	3	3	Ciur	15	4	3	
persona_7	tarea_31	2	7	31	2	7	3	Tem	31	2	7	
persona_7	tarea_31	4	7	31	4	7	3	Tem	31	4	7	
persona_7	tarea_35	1	7	35	1	7	3	Tem	35	1	7	
persona_7	tarea_36	3	7	36	3	7	3	Tem	36	3	7	

Figura 41: Resultado de la asignación de tareas de la empresa automotriz con el programa.

Fuente: Elaboración propia.

## Comparación y Resultados

Al comparar la situación real con la solución proporcionada por el programa, se revelan discrepancias significativas:

- **Cumplimiento de Restricciones:** La solución generada por el programa asegura que todas las restricciones ergonómicas y de habilidades se cumplan, a diferencia de la situación real.
- **Mejora en Habilidades:** El aumento del 12% en el total de habilidades refleja una asignación más efectiva de los empleados, donde cada tarea es realizada por personas con las capacidades adecuadas.
- **Optimización de Recursos:** Se logró reducir el número de personas necesarias de 38 a 36, lo que implica una reducción del 5% en el personal requerido.

## Implicaciones Económicas y Operativas

La reducción de dos empleados en la línea de producción tiene implicaciones económicas significativas, permitiendo a la empresa ahorrar en costos laborales y reubicar a estos empleados en otras áreas donde se necesiten. Además, el incremento en el total de habilidades asignadas mejora la eficiencia operativa, reduciendo la necesidad de asistencia adicional y potenciando la calidad del trabajo final.

En conclusión, el modelo propuesto no solo garantiza el cumplimiento de todas las restricciones necesarias, sino que también mejora la asignación de recursos humanos de manera significativa. Este enfoque se traduce en ahorros económicos y en una mejora sustancial en la eficiencia y calidad del proceso de producción, demostrando así la robustez y aplicabilidad del modelo en entornos complejos como la industria automotriz.

Si se asume un costo empresa mensual por operario promedio de \$ 3.900.000 (a Julio 2024), como poseen un acuerdo donde además del sueldo mensual y aguinaldo poseen un bono denominado sueldo 14, el costo empresa anual por operario promedio es de \$ 54.600.000. Luego, reubicando 2 personas, el costo de esta operación se verá reducido en \$ 109.200.000 al año.

## 8. Conclusiones

La implementación de un modelo de optimización para la asignación de recursos en líneas de producción ha demostrado ser una herramienta valiosa para mejorar la eficiencia y la gestión de personal en entornos industriales. A lo largo de este trabajo, se ha desarrollado y aplicado un programa que utiliza técnicas de programación lineal entera para abordar los desafíos específicos asociados a la asignación de tareas en el contexto del proveedor y de una reconocida automotriz nacional. A continuación, se presentan las conclusiones clave derivadas de esta investigación.

### **Evaluación de la Efectividad en el Proveedor**

En la primera fase de la investigación, se evaluó la efectividad del programa en el proveedor. Digitalizando y analizando los datos proporcionados por el proveedor, se pudo establecer un benchmark basado en la asignación real de personal en la línea de producción. Los resultados obtenidos con el modelo de optimización indican una mejora del 3.65% en la suma total de habilidades (skill), junto con la observancia rigurosa de todas las restricciones definidas. Este aumento, aunque aparentemente modesto, tiene implicaciones significativas en términos de eficiencia operativa y costos asociados.

La capacidad del programa para proporcionar trazabilidad de datos, respetar restricciones complejas y ofrecer una asignación óptima en un corto período de tiempo presenta ventajas sustanciales. Además, la flexibilidad del modelo permite realizar ajustes en los datos de entrada y ejecutar el programa nuevamente, facilitando la adaptación a cambios en la planificación o en la disponibilidad de personal.

### **Validación en una Línea de Producción Más Compleja**

Para poner a prueba la robustez del modelo, se aplicó a una línea de producción más compleja en una reconocida automotriz nacional. Los resultados revelaron diferencias significativas entre la asignación real de personal y la asignación óptima proporcionada por el programa. La observación de asignaciones incorrectas y la utilización de menos personal con un aumento en el total de habilidades subrayan la capacidad del modelo para identificar oportunidades de mejora y optimización en situaciones más desafiantes.

En un análisis detallado, la implementación del programa en una de las líneas de producción más complejas del área de Pintura demostró que el modelo de optimización es capaz de generar asignaciones que no solo cumplen con todas las restricciones ergonómicas y técnicas, sino que también optimizan el uso del personal disponible. Esto es especialmente notable en comparación con la situación real observada, donde algunas asignaciones no cumplían con las restricciones y los operarios eran asignados a tareas para las cuales no poseían las habilidades requeridas. La optimización permitió reducir el personal necesario en dos operarios, lo que implica una significativa reducción de costos operativos. Además, la mejora en el total de habilidades de 410 a 460 refleja un incremento del 12% en la eficiencia operativa, evidenciando una asignación más adecuada y eficiente del personal disponible.

## Consideraciones para Mejoras Continuas y Aplicaciones Futuras

La implementación exitosa de este modelo de optimización para la asignación de recursos destaca su potencial para mejorar la eficiencia y la productividad en entornos industriales complejos. Sin embargo, se reconoce la necesidad de considerar algunas áreas para mejoras continuas:

- **Refinamiento del Modelo:** La inclusión de variables adicionales, como la fatiga del personal o la complejidad específica de ciertas tareas, podría mejorar la precisión del modelo. Actualmente, el modelo no toma en cuenta estos factores, los cuales podrían influir significativamente en la eficiencia y el bienestar del personal.
- **Integración con Sistemas de Gestión:** La integración del modelo con sistemas de gestión existentes en la empresa podría optimizar la implementación y facilitar la adopción a gran escala. Esto permitiría una gestión más centralizada y una mayor capacidad para realizar ajustes en tiempo real.
- **Desarrollo de Capacidades Analíticas:** La capacitación del personal en análisis de datos y gestión de operaciones puede maximizar los beneficios derivados de la implementación del modelo. Un personal capacitado es crucial para interpretar los resultados del modelo y aplicar mejoras continuas.
- **Exploración de Otras Industrias:** La aplicabilidad del modelo puede extenderse a otras industrias que enfrenten desafíos similares en la asignación de recursos y la planificación de la producción. Industrias como la manufacturera, logística y servicios pueden beneficiarse de la implementación de un modelo de optimización similar.

## Conclusión Final

La presente investigación ha proporcionado una visión integral de la aplicación de un modelo de optimización en la asignación de recursos en entornos industriales específicos. Los resultados obtenidos en el proveedor y en la automotriz nacional evidencian la capacidad del modelo para mejorar la eficiencia y la calidad de las asignaciones de personal. Esta herramienta no solo ofrece beneficios tangibles en términos de costos y productividad, sino que también destaca la importancia de la digitalización de datos y el análisis predictivo en la gestión de operaciones. Con mejoras continuas y adaptaciones a contextos específicos, este modelo puede ser una contribución valiosa para la mejora continua en la gestión de recursos en líneas de producción.

Además, la implementación de esta solución ha demostrado que un enfoque basado en datos y optimización matemática puede superar las prácticas tradicionales, proporcionando asignaciones de personal más eficientes y efectivas. Esto no solo mejora la productividad y reduce los costos operativos, sino que también contribuye a un entorno de trabajo más equilibrado y satisfactorio para los empleados. La digitalización y la optimización de la asignación de tareas son pasos cruciales hacia la modernización de los procesos industriales, y esta investigación subraya su importancia y potencial impacto positivo.

## 9. Referencias

- Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2015). *Introduction to Operations Research*. McGraw-Hill.
- Winston, W. L. (2004). *Operations Research: Applications and Algorithms*. Brooks/Cole.
- Khan, Bari, A., & Khan, M. F. (2019). *Linear and Integer Programming*. Cambridge Scholars Publishing.
- Chen, R. L., Batson, R. G., & Dang, Y. (2011). *Applied Integer Programming: Modeling and Solution*. John Wiley & Sons.
- Hanif, M., & Hakim, A. (2020). Job Rotation Optimization using Mixed-Integer Nonlinear Programming (MINLP) Method to Balance Operator Workload in Automotive Industry. *International Journal of Production Research*, 58(4), 1203-1220.
- Barlatt, A. Y., Cohn, A., Gusikhin, O., Fradkin, Y., Davidson, R., & Batey, J. (2012). Ford motor company implements integrated planning and scheduling in a complex automotive manufacturing environment. *Interfaces*, 42(5), 478-491.
- Simchi-Levi, D., Kaminsky, P., & Simchi-Levi, E. (2008). *Designing and Managing the Supply Chain: Concepts, Strategies, and Case Studies*. McGraw-Hill.
- Silver, E. A., Pyke, D. F., & Thomas, D. J. (2017). *Inventory and Production Management in Supply Chains*. CRC Press.
- S. Martello, P. Toth, *Knapsack Problems: Algorithms and Computer Implementations*, J. Wiley, Chichester, 1990.
- Öncan, T., Şuvak, Z., Akyüz, M. H., & Altinel, İ. K. (2019). Assignment problem with conflicts. *Computers & Operations Research*, 111, 214-229.
- Olhager, J. (2013). Evolution of Operations Planning and Control: From Production to Supply Chains. *International Journal of Production Research*, 51(23-24), 6836-6849.

## Apéndice A. Aplicación para desarrollar

No será alcance de la tesis el desarrollo de una aplicación para celulares, pero se decidió crear la idea de lo que se buscaría obtener en una aplicación para mostrar de manera visual y rápida la asignación de puestos de trabajo a las personas en cada bloque y turno. La idea es estructurar la aplicación de la siguiente manera.

### Estructura de la Aplicación:

#### 1. Página de Inicio:

- Bienvenida al usuario.
- Opciones para seleccionar la línea de producción y el turno/día de trabajo.

#### 2. Vista General de la Asignación:

- Un panel que muestra una vista general de la asignación para el turno/día seleccionado.
- Visualización clara de bloques, puestos de trabajo y asignación de personas.
- Identificación de grupos o categorías de puestos.

#### 3. Detalle por Bloque:

- Sección para cada bloque del turno/día seleccionado.
- Mostrar cada puesto de trabajo y la persona asignada.
- Resaltar cambios significativos desde el día anterior.

#### 4. Resumen de Skill:

- Estadísticas sobre la distribución de habilidades en cada bloque y turno.
- Indicadores visuales de eficiencia y equilibrio de habilidades.

#### 5. Herramientas de Edición:

- Funcionalidades para realizar ajustes manuales en la asignación.
- Posibilidad de reasignar personas o cambiar puestos directamente desde la app.

#### 6. Histórico y Comparativas:

- Sección para revisar asignaciones anteriores y comparar cambios.
- Gráficos o tablas para destacar tendencias y mejoras.

## **7. Notificaciones:**

- Sistema de notificaciones para informar sobre cambios críticos o recordatorios.
- Alertas en tiempo real sobre posibles problemas o conflictos.

### Soporte Tecnológico:

#### **1. Desarrollo de la Interfaz de Usuario (UI):**

En cuanto a la parte del desarrollo de la app, en la que no indagaremos en este trabajo, la idea es diseñar una interfaz intuitiva que permita una fácil navegación y comprensión de la información presentada.

#### **2. Conexión a la Base de Datos:**

Es importante contar con una sólida base de datos para almacenar la información de asignación y los datos históricos y realizar una configuración con una conexión segura y eficiente para recuperar y actualizar los datos en tiempo real.

#### **3. Gráficos e Imágenes:**

Incorporar bibliotecas de gráficos y visualización de datos para representar de manera efectiva la asignación. Usar imágenes o iconos para identificar fácilmente los puestos de trabajo y las personas asignadas.

Para eficientes notificaciones la intención es integrar servicios de notificaciones push para enviar alertas o recordatorios a los usuarios.

#### **4. Pruebas y Optimización:**

Es sumamente importante y necesario realizar pruebas exhaustivas para garantizar la estabilidad y la eficiencia de la aplicación, y optimizar el rendimiento para garantizar una experiencia fluida del usuario ya que es información que se debe proporcionar en tiempo real una vez que se efectúan las fichadas por molinete de los operarios presentes.

#### **5. Seguridad:**

Se deben implementar medidas de seguridad robustas para proteger la información confidencial y garantizar que solo los usuarios autorizados tengan acceso a la aplicación. Esto es indispensable ya que se está trabajando con bases de datos con información de personal del proveedor.

## **6. Escalabilidad:**

Por último, es fundamental diseñar la aplicación con la capacidad de escalar para manejar un aumento en la cantidad de usuarios y datos.



**Día:** martes 14 nov 2023  
**Línea:** 1  
**Turno:** Naranja

**Vista general:**

**Bloque: 1**

Melisa Sanchez **SUB ENSAMBLE - 10**

Juan Perez **WASUREMBO**

Pedro Sosa **CABLEADO - 1**

Martin Diaz **ENSAMBLE - 2**

Pilar Gomez **IA - 2**

**Día:** martes 14 nov 2023  
**Línea:** 1  
**Turno:** Naranja

**Estadísticas:**

**Total Skill: 324**

Bloque	Count
BLOQUE 1	81
BLOQUE 2	80
BLOQUE 3	83
BLOQUE 4	84

## Apéndice B. Código del Programa en Python del ejemplo

```
# -*- coding: utf-8 -*-

# Lectura de tareas
tareas = {}
with open('tareas_ej.txt', 'r') as file:
    for line in file:
        tarea, grupo = line.strip().split('\t')
        tareas['tarea_' + tarea] = int(grupo)
#print(tareas)

#for t in tareas:
# print(tareas[t])

# Lectura de grupos
grupos = {}
with open('grupos_ej.txt', 'r') as f:
    for line in f:
        grupo_id, cant_tareas = line.strip().split('\t')
        grupo_id = int(grupo_id)
        grupos[grupo_id] = int(cant_tareas)
#print(grupos)

# Lectura de restricciones

restricciones = []
with open('restricciones_ej.txt', 'r') as f:
    for line in f:
        tarea1_id, tarea2_id = line.strip().split('\t')
        restricciones.append(('tarea_' + tarea1_id, 'tarea_' +
tarea2_id))
#print(restricciones)

# Lectura de personas
personas = {}
with open('personas_ej.txt', 'r') as f:
    for line in f:
        #print(f)
        persona_id, *habilidades = line.strip().split('\t')
        if persona_id != '':
            habilidades_dict = {}
            for i, h in enumerate(habilidades):
                habilidades_dict['tarea_' + str(i+1)] = int(h)
            personas['persona_' + persona_id] = habilidades_dict

#print(personas['persona_8'])

#print("Personas cargadas:")
#for persona_id, habilidades in personas.items():
# print(persona_id, habilidades)

bloques = range(2)

import pulp
#from pulp import *

# Creación del modelo
modelo = pulp.LpProblem("Optimización de tareas", pulp.LpMaximize)
```

```

# Creación de las variables de decisión
personas_tareas_bloques =
pulp.LpVariable.dicts("personas_tareas_bloques",
                    [(p, t, b) for p in
personas
                    for t in
tareas
                    for b in
bloques],
                    #for g in
grupos,
                    #if t in
g],
                    cat=pulp.LpBinary)
"""
# Creación de las variables de decisión para la asignación de grupos a
personas
personas_grupos = pulp.LpVariable.dicts("personas_grupos",
                    [(p, g) for p in personas
                    for g in grupos],
                    cat=pulp.LpBinary)
"""
#print(personas_tareas_bloques[('persona_1', 'tarea_1', 0)])

#print([personas[p] for p in personas])
#print([tareas[t] for t in tareas])
#print([personas[p][t] for p in personas for t in tareas])

# Definición de la función objetivo
modelo += pulp.lpSum([personas_tareas_bloques[(p, t, b)] *
personas[p][t]
                    for p in personas
                    for t in tareas
                    for b in bloques])

#print(modelo)

#print([personas[p][t] for p in personas for t in tareas])

# Restricción para que todas las tareas tengan una persona asignada en
cada bloque
for t in tareas:
    for b in bloques:
        modelo += pulp.lpSum([personas_tareas_bloques[(p,t,b)] for p
in personas]) == 1#, f"tarea_{t}_bloque_{b}"

# Restricción para limitar a una tarea por persona y bloque
for p in personas:
    for b in bloques:
        modelo += pulp.lpSum([personas_tareas_bloques[(p,t,b)] for t
in tareas]) <= 1#, f"persona_{p}_bloque_{b}"

# Restricción para que cada persona sea asignada a tareas dentro de un
mismo grupo
for p in personas:
    modelo += (pulp.lpSum([personas_tareas_bloques[(p, t, 0)] *
tareas[t] for t in tareas])
                == pulp.lpSum([personas_tareas_bloques[(p, t, 1)] *
tareas[t] for t in tareas]))

```

```

# Restricción para respetar restricciones de secuencialidad
for p, t1, b1 in personas_tareas_bloques.keys():
    for t2 in restricciones:
        if t1 == t2[0] and t2[1] in tareas:
            b2 = b1 + 1
            if b2 < 2:
                modelo += personas_tareas_bloques[(p, t1, b1)] +
personas_tareas_bloques[(p, t2[1], b2)] <= 1

# Resolución del modelo

import numpy as np

modelo.solve()
print("Status : ", pulp.LpStatus[modelo.status])

# Solución óptima
print("The Max Value = ", pulp.value(modelo.objective))

# Mostrar los usuarios seleccionados
x_soln = np.array([personas_tareas_bloques[(p, t, b)].varValue for p
in personas
for b
in bloques
for t
in tareas])
#for g
in grupos])
#print("user_vars: ")
#print(x_soln)

# Impresión de resultados

cuenta_1 = 0
for t in tareas:
    #p = 'persona_1'
    for b in bloques:
        for p in personas:
            #for g in grupos:
                if personas_tareas_bloques[(p, t, b)].varValue == 1:
                    #print(f"{p} realiza la {t} en el bloque {b+1}")
                    cuenta_1 += 1
                    print(f"La tarea {t}, del grupo {tareas[t]} en el
bloque {b+1} es realizada por la persona {p}")
print(f'cantidad de unos: {cuenta_1}')

# Impresión de resultados
cuenta_1 = 0
for p in personas:
    #p = 'persona_1'
    for b in bloques:
        for t in tareas:
            #for g in grupos:
                if personas_tareas_bloques[(p, t, b)].varValue == 1:

```

```

        print(f"{p} realiza la {t}, del grupo {tareas[t]} en el
bloque {b+1}")
        #print(f"La tarea {t}, del {g} en el bloque {b+1} es
realizada por la persona {p}")
        cuenta_1 += 1
print(f'cantidad de unos: {cuenta_1}')

#Visualización

import matplotlib.pyplot as plt

# Obtener las personas, tareas y bloques únicos del output de la
optimización
personas = sorted(list(set([p[0] for p in
personas_tareas_bloques.keys()])), key=lambda x: int(x.split('_')[1]))
tareas = sorted(list(set([p[1] for p in
personas_tareas_bloques.keys()])))
bloques = list(set([p[2] for p in personas_tareas_bloques.keys()]))

# Crear matrices de ceros para almacenar los datos de cada bloque
heatmap_data_bloque1 = np.zeros((len(personas), len(tareas)))
heatmap_data_bloque2 = np.zeros((len(personas), len(tareas)))

# Llenar las matrices con los datos correspondientes
for p, t, b in personas_tareas_bloques:
    tarea_idx = tareas.index(t)
    persona_idx = personas.index(p)
    if personas_tareas_bloques[(p, t, b)].varValue == 1:
        if b == 0:
            heatmap_data_bloque1[persona_idx, tarea_idx] = 1
        if b == 1:
            heatmap_data_bloque2[persona_idx, tarea_idx] = 1

# Configurar el plot del heatmap para el bloque 1
fig, ax = plt.subplots()
heatmap = ax.imshow(heatmap_data_bloque1, cmap='hot')

# Configurar las etiquetas de los ejes
ax.set_xticks(np.arange(len(tareas)))
ax.set_yticks(np.arange(len(personas)))
ax.set_xticklabels(tareas)
ax.set_yticklabels(personas)

# Rotar las etiquetas de los ejes
plt.setp(ax.get_xticklabels(), rotation=45, ha="right",
rotation_mode="anchor")

# Configurar el título y el colorbar
ax.set_title("Heatmap de asignación de tareas (Bloque 1)")
cbar = fig.colorbar(heatmap)

# Mostrar el gráfico del bloque 1
plt.show()

# Configurar el plot del heatmap para el bloque 2
fig, ax = plt.subplots()
heatmap = ax.imshow(heatmap_data_bloque2, cmap='hot')

```

```

# Configurar las etiquetas de los ejes
ax.set_xticks(np.arange(len(tareas)))
ax.set_yticks(np.arange(len(personas)))
ax.set_xticklabels(tareas)
ax.set_yticklabels(personas)

# Rotar las etiquetas de los ejes
plt.setp(ax.get_xticklabels(), rotation=45, ha="right",
rotation_mode="anchor")

# Configurar el título y el colorbar
ax.set_title("Heatmap de asignación de tareas (Bloque 2)")
cbar = fig.colorbar(heatmap)

# Mostrar el gráfico del bloque 2
plt.show()

# Crear un DataFrame con los datos de asignación de tareas
import pandas as pd
data = []
for p, t, b in personas_tareas_bloques:
    if personas_tareas_bloques[(p, t, b)].varValue == 1:
        data.append([p, t, b+1])
df = pd.DataFrame(data, columns=['Persona', 'Tarea', 'Bloque'])

# Exportar el DataFrame a un archivo CSV
#df.to_csv('asignaciones_ej_mini.csv', index=False)

# Exportar el DataFrame a un archivo Excel
df.to_excel('asignaciones_ej_mini.xlsx', index=False)

```

## Apéndice C. Código del Programa en Python del proveedor

```
# -*- coding: utf-8 -*-

# Lectura de tareas
tareas = {}
with open('tareas_1.txt', 'r') as file:
    for line in file:
        tarea, grupo = line.strip().split('\t')
        tareas['tarea_' + tarea] = int(grupo)
#print(tareas)

#for t in tareas:
# print(tareas[t])

# Lectura de grupos
grupos = {}
with open('grupos_1.txt', 'r') as f:
    for line in f:
        grupo_id, cant_tareas = line.strip().split('\t')
        grupo_id = int(grupo_id)
        grupos[grupo_id] = int(cant_tareas)
#print(grupos)

# Lectura de restricciones
restricciones = []
with open('restricciones_1.txt', 'r') as f:
    for line in f:
        tarea1_id, tarea2_id = line.strip().split('\t')
        restricciones.append(('tarea_' + tarea1_id, 'tarea_' +
tarea2_id))
#print(restricciones)

# Lectura de personas
personas = {}
with open('personas_1B.txt', 'r') as f:
    for line in f:
        persona_id, *habilidades = line.strip().split('\t')
        habilidades_dict = {}
        for i, h in enumerate(habilidades):
            habilidades_dict['tarea_' + str(i+1)] = int(h)
        personas['persona_' + persona_id] = habilidades_dict

#print(personas['persona_8'])

#print("Personas cargadas:")
#for persona_id, habilidades in personas.items():
# print(persona_id, habilidades)

bloques = range(4)

import pulp
#from pulp import *

# Creación del modelo
modelo = pulp.LpProblem("Optimización de tareas", pulp.LpMaximize)

# Creación de las variables de decisión
personas_tareas_bloques =
pulp.LpVariable.dicts("personas_tareas_bloques",
```

```

personas                                     [(p, t, b) for p in
                                             for t in
tareas                                       for b in
bloques],                                     #for g in
grupos,                                       #if t in
g],                                           cat=pulp.LpBinary)

#print(personas_tareas_bloques(['persona_1', 'tarea_1', 0]))

#print([personas[p] for p in personas])
#print([tareas[t] for t in tareas])
#print([personas[p][t] for p in personas for t in tareas])

# Definición de la función objetivo
modelo += pulp.lpSum([personas_tareas_bloques[(p, t, b)] *
personas[p][t]
                    for p in personas
                    for t in tareas
                    for b in bloques])

#print(modelo)

#print([personas[p][t] for p in personas for t in tareas])

# Restricción para que todas las tareas tengan una persona asignada en
cada bloque
for t in tareas:
    for b in bloques:
        modelo += pulp.lpSum([personas_tareas_bloques[(p,t,b)] for p
in personas]) == 1#, f"tarea_{t}_bloque_{b}"

# Restricción para limitar a una tarea por persona y bloque
for p in personas:
    for b in bloques:
        modelo += pulp.lpSum([personas_tareas_bloques[(p,t,b)] for t
in tareas]) <= 1#, f"persona_{p}_bloque_{b}"

# Restricción para que cada persona sea asignada a tareas dentro de un
mismo grupo
for p in personas:
    modelo += (pulp.lpSum([personas_tareas_bloques[(p, t, 0)] *
tareas[t] for t in tareas])
              == pulp.lpSum([personas_tareas_bloques[(p, t, 1)] *
tareas[t] for t in tareas]))
    modelo += (pulp.lpSum([personas_tareas_bloques[(p, t, 1)] *
tareas[t] for t in tareas])
              == pulp.lpSum([personas_tareas_bloques[(p, t, 2)] *
tareas[t] for t in tareas]))
    modelo += (pulp.lpSum([personas_tareas_bloques[(p, t, 2)] *
tareas[t] for t in tareas])
              == pulp.lpSum([personas_tareas_bloques[(p, t, 3)] *
tareas[t] for t in tareas]))

```

```

# Restricción para respetar restricciones de secuencialidad
for p, t1, b1 in personas_tareas_bloques.keys():
    for t2 in restricciones:
        if t1 == t2[0] and t2[1] in tareas:
            b2 = b1 + 1
            if b2 < 4:
                modelo += personas_tareas_bloques[(p, t1, b1)] +
personas_tareas_bloques[(p, t2[1], b2)] <= 1

# Resolucion del modelo

import numpy as np

modelo.solve()
print("Status : ", pulp.LpStatus[modelo.status])

# Solucion optima
print("The Max Value = ", pulp.value(modelo.objective))

# Mostrar los usuarios seleccionados
x_soln = np.array([personas_tareas_bloques[(p, t, b)].varValue for p
in personas
in bloques
in tareas])
#for g
in grupos])
#print("user_vars: ")
#print(x_soln)

# Impresión de resultados

cuenta_1 = 0
for t in tareas:
    #p = 'persona_1'
    for b in bloques:
        for p in personas:
            #for g in grupos:
                if personas_tareas_bloques[(p, t, b)].varValue == 1:
                    #print(f"{p} realiza la {t} en el bloque {b+1}")
                    cuenta_1 += 1
                    print(f"La tarea {t}, del grupo {tareas[t]} en el
bloque {b+1} es realizada por la persona {p}")
print(f'cantidad de unos: {cuenta_1}')

# Impresión de resultados
cuenta_1 = 0
for p in personas:
    #p = 'persona_1'
    for b in bloques:
        for t in tareas:
            #for g in grupos:
                if personas_tareas_bloques[(p, t, b)].varValue == 1:
                    print(f"{p} realiza la {t}, del grupo {tareas[t]} en el
bloque {b+1}")

```

```

        #print(f"La tarea {t}, del {g} en el bloque {b+1} es
realizada por la persona {p}")
        cuenta_1 += 1
print(f'cantidad de unos: {cuenta_1}')

#Visualización

import matplotlib.pyplot as plt

# Obtener las personas, tareas y bloques únicos del output de la
optimización
personas = sorted(list(set([p[0] for p in
personas_tareas_bloques.keys()])), key=lambda x: int(x.split('_')[1]))
tareas = sorted(list(set([p[1] for p in
personas_tareas_bloques.keys()])))
bloques = list(set([p[2] for p in personas_tareas_bloques.keys()]))

# Crear matrices de ceros para almacenar los datos de cada bloque
heatmap_data_bloque1 = np.zeros((len(personas), len(tareas)))
heatmap_data_bloque2 = np.zeros((len(personas), len(tareas)))
heatmap_data_bloque3 = np.zeros((len(personas), len(tareas)))
heatmap_data_bloque4 = np.zeros((len(personas), len(tareas)))

# Llenar las matrices con los datos correspondientes
for p, t, b in personas_tareas_bloques:
    tarea_idx = tareas.index(t)
    persona_idx = personas.index(p)
    if personas_tareas_bloques[(p, t, b)].varValue == 1:
        if b == 0:
            heatmap_data_bloque1[persona_idx, tarea_idx] = 1
        if b == 1:
            heatmap_data_bloque2[persona_idx, tarea_idx] = 1
        if b == 2:
            heatmap_data_bloque3[persona_idx, tarea_idx] = 1
        if b == 3:
            heatmap_data_bloque4[persona_idx, tarea_idx] = 1

# Configurar el plot del heatmap para el bloque 1
fig, ax = plt.subplots()
heatmap = ax.imshow(heatmap_data_bloque1, cmap='hot')

# Configurar las etiquetas de los ejes
ax.set_xticks(np.arange(len(tareas)))
ax.set_yticks(np.arange(len(personas)))
ax.set_xticklabels(tareas)
ax.set_yticklabels(personas)

# Rotar las etiquetas de los ejes
plt.setp(ax.get_xticklabels(), rotation=45, ha="right",
rotation_mode="anchor")

# Configurar el título y el colorbar
ax.set_title("Heatmap de asignación de tareas (Bloque 1)")
cbar = fig.colorbar(heatmap)

# Mostrar el gráfico del bloque 1
plt.show()

# Configurar el plot del heatmap para el bloque 2
fig, ax = plt.subplots()

```

```

heatmap = ax.imshow(heatmap_data_bloque2, cmap='hot')

# Configurar las etiquetas de los ejes
ax.set_xticks(np.arange(len(tareas)))
ax.set_yticks(np.arange(len(personas)))
ax.set_xticklabels(tareas)
ax.set_yticklabels(personas)

# Rotar las etiquetas de los ejes
plt.setp(ax.get_xticklabels(), rotation=45, ha="right",
rotation_mode="anchor")

# Configurar el título y el colorbar
ax.set_title("Heatmap de asignación de tareas (Bloque 2)")
cbar = fig.colorbar(heatmap)

# Mostrar el gráfico del bloque 2
plt.show()

# Configurar el plot del heatmap para el bloque 3
fig, ax = plt.subplots()
heatmap = ax.imshow(heatmap_data_bloque3, cmap='hot')

# Configurar las etiquetas de los ejes
ax.set_xticks(np.arange(len(tareas)))
ax.set_yticks(np.arange(len(personas)))
ax.set_xticklabels(tareas)
ax.set_yticklabels(personas)

# Rotar las etiquetas de los ejes
plt.setp(ax.get_xticklabels(), rotation=45, ha="right",
rotation_mode="anchor")

# Configurar el título y el colorbar
ax.set_title("Heatmap de asignación de tareas (Bloque 3)")
cbar = fig.colorbar(heatmap)

# Mostrar el gráfico del bloque 3
plt.show()

# Configurar el plot del heatmap para el bloque 4
fig, ax = plt.subplots()
heatmap = ax.imshow(heatmap_data_bloque4, cmap='hot')

# Configurar las etiquetas de los ejes
ax.set_xticks(np.arange(len(tareas)))
ax.set_yticks(np.arange(len(personas)))
ax.set_xticklabels(tareas)
ax.set_yticklabels(personas)

# Rotar las etiquetas de los ejes
plt.setp(ax.get_xticklabels(), rotation=45, ha="right",
rotation_mode="anchor")

# Configurar el título y el colorbar
ax.set_title("Heatmap de asignación de tareas (Bloque 4)")
cbar = fig.colorbar(heatmap)

# Mostrar el gráfico del bloque 4
plt.show()

```

```
# Crear un DataFrame con los datos de asignación de tareas
import pandas as pd
data = []
for p, t, b in personas_tareas_bloques:
    if personas_tareas_bloques[(p, t, b)].varValue == 1:
        data.append([p, t, b+1])
df = pd.DataFrame(data, columns=['Persona', 'Tarea', 'Bloque'])

# Exportar el DataFrame a un archivo CSV
df.to_csv('asignaciones.csv', index=False)

# Exportar el DataFrame a un archivo Excel
df.to_excel('asignaciones_t_TN.xlsx', index=False)
```