



DISEÑO DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE FLUJO PARA UNA  
LÍNEA DE ENSAMBLE EN LA INDUSTRIA AEROESPACIAL

# TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTOR EN MANUFACTURA AVANZADA

PRESENTA

M.C.I.I. YAXAIL MATA ROBLEDO

ASESOR: DR. GUILLERMO ERNESTO FRADES CASTEDO

SANTIAGO DE QUERÉTARO, QUERÉTARO, OCTUBRE 2018





24 de marzo de 2018

Mtro. Geovany González Carlos  
Coordinador Académico  
CIATEQ, A.C.

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial del alumno **M.C.I.I. YAXAIL MATA ROBLEDO**, una vez revisada la Tesis titulada: "**DISEÑO DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE FLUJO PARA UNA LÍNEA DE ENSAMBLE EN LA INDUSTRIA AEROESPACIAL**", autorizamos que el citado trabajo sea presentado por el alumno para la revisión del mismo con el fin de alcanzar el grado de **DOCTOR EN MANUFACTURA AVANZADA** durante el Examen de Titulación correspondiente.

Y para que así conste se firma la presente a los 24 días del marzo del año 2018.



Dr. Guillermo E. Frades Castedo  
Asesor Académico



Ing. Mecánico Philippe Harpin  
Asesor en Planta



Santiago de Querétaro, Qro.  
03 de Julio del 2018

Dra. María Guadalupe Navarro Rojero  
Directora  
Posgrado CIATEQ  
PRESENTE.

Por medio de la presente me estoy dirigiendo a Ud. de la manera más atenta, de que fui designado como revisor del trabajo de tesis del (la) **M.C.I.I. YAXAIL MATA ROBLEDO**, del trabajo titulado:

**“DISEÑO DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE FLUJO PARA UNA LÍNEA DE ENSAMBLE EN LA INDUSTRIA AEROESPACIAL ”**

Después de haber leído, corregido e intercambiado información con el (la) estudiante antes mencionado(a), el trabajo de tesis que me fue entregado y haciendo resaltar que el (la) estudiante realizó todos los cambios que le fueron sugeridos a la tesis, ésta puede ser autorizada para su publicación y que de ésta manera pueda iniciar los trámites correspondientes para iniciar el proceso de titulación.

Sin otro particular por el momento y en espera de que mis sugerencias sean tomadas en cuenta y en beneficio del estudiante y la institución, agradezco la atención que se sirva prestar a la presente,

ATENTAMENTE  
*Raúl P.B.*  
Dr. Raúl Pérez Bustamante,



Santiago de Querétaro, Qro.  
20 de julio del 2018

Dra. María Guadalupe Navarro Rojero

Directora  
Posgrado CIATEQ  
PRESENTE.

Por medio de la presente me estoy dirigiendo a Ud. de la manera más atenta, de que fui designado como revisor del trabajo de tesis del (la) **Ing. Yaxail Mata Robledo**, del trabajo titulado:

**“Diseño de un sistema de gestión de flujo para una línea de ensamble en la industria aeroespacial”**

Después de haber leído, corregido e intercambiado información con el (la) estudiante antes mencionado(a), el trabajo de tesis que me fue entregado y haciendo resaltar que el (la) estudiante realizó todos los cambios que le fueron sugeridos a la tesis, ésta puede ser autorizada para su publicación y que de ésta manera pueda iniciar los trámites correspondientes para iniciar el proceso de titulación.

Sin otro particular por el momento y en espera de que mis sugerencias sean tomadas en cuenta y en beneficio del estudiante y la institución, agradezco la atención que se sirva prestar a la presente,

ATENTAMENTE

  
**Dra. Adriana Del Carmen Gallegos Melgar**

## RESUMEN

El arranque de un proceso de manufactura en la industria aeroespacial enfrenta diversos retos para cumplir los calendarios de producción. El objetivo de este estudio es determinar una solución concepto que, aplicada a la secuencia del ensamble de partes y componentes aeroespaciales permita minimizar el trabajo detenido, cuando se presenten situaciones problemáticas, como por ejemplo; la ausencia de alguna parte a ensamblar, o una herramienta, o la presencia de una anomalía de calidad en el proceso. Llámese a este enfoque de minimización, gestión del flujo de trabajo.

Actualmente puede ser más importante cambiar de un modo de resolución de problemas, que es más o menos aleatorio, a un modo de gestión del flujo del trabajo, junto con el problema, de manera sistémica. La aplicación de la Teoría de Solución de Problemas de Invención, TRIZ, específicamente el algoritmo ARIZ-85C, provee un marco de trabajo ideal para generar una solución concepto. La gestión del flujo del trabajo a través de la configuración de la secuencia de ensamble en unidades mínimas de trabajo racional y basada en las competencias del conocimiento minimiza el trabajo detenido. Los resultados demuestran un mejoramiento de un cincuenta por ciento en la proporción de trabajo detenido. La solución es completamente aplicable a secuencias de ensamble de componentes estructurales metálicos, donde algunas pocas competencias se aplican de una manera repetida y la variedad de partes a ensamblar es alta. La gestión del flujo de trabajo contribuye a lograr los objetivos de producción.

Palabras clave: Aeroespacial, Algoritmo ARIZ-85C, Ingeniería y Tecnología, Línea de ensamble, Organización de la producción, Secuencia de ensamble, Tecnología industrial, TRIZ.

## ABSTRACT.

The start of a manufacturing process in the aerospace industry faces several challenges to meet production schedules. The objective of this study is to determine a concept solution that, applied to the assembly sequence of parts and aerospace components, allows to minimize the work stopped, when problematic situations arise, such as; the absence of any part to assemble, or a tool, or the presence of a quality anomaly in the process. Call this approach of minimization, workflow management.

Currently it may be more important to change from a problem-solving mode, which is more or less random, to a workflow management mode, together with the problem, in a systemic way. The application of the Theory of Solution of Problems of Invention, TRIZ, provides an ideal work framework to generate a solution concept. The management of the work flow through the configuration of the assembly sequence in minimum units of rational work and based on knowledge competences minimizes the work stopped. The results show an improvement of fifty percent in the proportion of work stopped. The solution is completely applicable to assembly sequences of metal structural components, where a few competences are applied in a repeated manner and the variety of parts to assemble is high. Workflow management helps achieve production goals.

Keywords: Aerospace, Algorithm ARIZ-85C, Assembly line, Engineering and Technology, Industrial technology, Organization of production, Assembly sequence, TRIZ.

## ÍNDICE DE CONTENIDO.

	Página
Carta liberación asesor	i
Carta liberación revisor 1	ii
Carta liberación revisor 2	iii
Resumen	iv
Índice de figuras	viii
Índice de tablas	ix
Glosario	x
Capítulo 1 Introducción	1
1.1 Definición del problema.	1
1.2 Justificación.	2
1.3 Hipótesis de trabajo.	3
1.4 Objetivo general.	3
1.5 Objetivos específicos.	4
Capítulo 2 Marco teórico.	5
2.1 Tipología de procesos de manufactura.	5
2.2 Línea de ensamble.	9
2.3 Línea de ensamble en la industria aeroespacial.	16
2.4 Estado de la técnica.	22
2.5 Teoría de solución de problemas de invención: TRIZ.	36
2.6 Algoritmo ARIZ-85C.	43
Capítulo 3 Procedimiento de investigación.	47
3.1 Aplicación del algoritmo ARIZ-85C	47
	vi

3.1.1 Paso 1: Análisis del problema.	47
3.1.2 Paso 2: Análisis del modelo del problema.	56
3.1.3 Paso 3: Definición del Resultado Ideal Final (IFR).	57
3.1.4 Paso 5: Aplicación la base del conocimiento TRIZ.	60
3.1.5 Paso 6: Cambio o sustitución del problema.	61
3.1.6 Paso 7: Análisis del método de resolución de contradicciones físicas.	62
3.2 Método del experimento.	64
Capítulo 4 Resultados.	67
4.1 Experimentación.	67
4.1.1 Paso 1: Identificación de los tipos de actividades.	67
4.1.2 Paso 2: Mapeo de los cuadernos de ensamble y los tipos de actividades.	67
4.1.3 Paso 3: Agrupar las actividades en unidad mínima de trabajo racional (UMTR).	68
4.1.4 Paso 4: Determinar las zonas de trabajo en el avión que son afectadas.	70
4.1.5 Paso 5: Preparación de la secuencia de ensamble por la unidad mínima de trabajo racional.	71
4.1.6 Paso 6: Análisis comparativo entre la secuencia de ensamble actual y la propuesta por el concepto de solución.	73
Conclusiones.	82
Aportaciones de la tesis.	85
Recomendaciones.	86
Referencias bibliográficas.	87

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Adaptación de la matriz de productos y procesos para los procesos de manufactura. ....	6
Figura 2: Esquema de operaciones de procesado o producción continua. ....	8
Figura 3: Esquema de operaciones de ensamble.....	8
Figura 4: Arreglo de línea de ensamble.....	11
Figura 5: Arreglo de línea de ensamble en forma recta.....	13
Figura 6: Arreglo de línea de ensamble en forma de "U". ....	14
Figura 7: Tipos de línea por tipo de producto. ....	15
Figura 8: Tipología de una línea de ensamble. ....	16
Figura 9 Clasificación de la industria automotriz y aeroespacial. ....	18
Figura 10: Impacto en los costos. ....	23
Figura 11: Diagrama de precedencias.....	29
Figura 12: Categorización de los sistemas de suministro. ....	33
Figura 13: Concepto de ensamble en "espinas de pescado". ....	34
Figura 14: Sistema de paro de posición fija de Toyota.....	36
Figura 15. Proceso básico de TRIZ.....	37
Figura 16: Convertir contradicciones técnicas en físicas. ....	38
Figura 17. Relación campo-sustancia.....	40
Figura 18: Aplicación del algoritmo de ARIZ. ....	42
Figura 19: Flujo del algoritmo ARIZ-85. ....	46
Figura 20: Red de flujo de problemas (NoP).....	48
Figura 21: Formulación de la contradicción técnica. ....	52
Figura 22: Representación gráfica del modelo.....	53
Figura 23: Modelación del problema.....	55
Figura 24: Modelo campo-sustancia del problema. ....	55
Figura 25: Intensificación de IFR-1.....	58
Figura 26: Efecto de la contradicción física. ....	59
Figura 27: Situación actual.....	61
Figura 28: Solución concepto. ....	62
Figura 29: Representación del componente aeroespacial.....	65

Figura 30: Relación de actividades y unidades mínima de trabajo racional (UMTR).....	70
Figura 31: Diagrama de árbol para las UMTR.....	72
Figura 32: Diagrama de Pareto .....	80

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Diferencias entre línea de ensamble automotriz y aeroespacial .....	19
Tabla 2: Resultados línea móvil del programa Boeing 737.....	21
Tabla 3: Problemas potenciales y soluciones potenciales.....	49
Tabla 4: Mapa de actividades y cuadernos de ensamble .....	68
Tabla 5: Distribución de ensamble de soportes en los cuadernos de ensamble....	74
Tabla 6: Distribución de número de parte contra las unidades mínimas de trabajo racional.....	75
Tabla 7: Tabla de ejemplos de situaciones problemáticas.....	78

## GLOSARIO

ARIZ	Algoritmo de Solución de Problemas de Invención.
CPGI	Indicador de rendimiento del equipo al logro del objetivo.
Cpk	Indicador de capacidad de proceso.
DfA	Diseño para el ensamble.
DPE	Ingeniería de procesos digital
IFR	Resultado ideal final.
KBS	Sistema basado en el conocimiento.
MOKA	Metodología orientada a la aplicación basada en el conocimiento.
NoP	Red de problemas.
OT	Tiempo operacional.
OZ	Zona operacional.
Pb	Problema potencial.
Phc	Restricción física.
PLM	Administración del ciclo de la vida del producto.
PPR	Producto-Proceso-Recurso
Ps	Solución potencial.
SFR	Recursos sustancia-campo.
TAKT	Referente al tiempo de consumo del cliente.
TC	Restricción técnica.
TRIZ	Teoría de Solución de Problemas de Invención.
UMTR	Unidad mínima de trabajo racional.





# CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

En la industria aeronáutica de México se trabaja continuamente para lograr una manufactura de clase mundial, que permita instalar un sistema de producción robusto y flexible, optimizando la capacidad y control del proceso por medio del mejoramiento continuo y una sistemática eliminación del desperdicio en todos sus niveles. Por ello, se desarrollan estrategias que permitan reducir costos, mejorar el tiempo de entrega y entusiasmar la preferencia del cliente. La puesta en marcha de una línea móvil de ensamble para la fabricación de componentes aeroespaciales promoverá la necesidad real y esencial que impulse la continua detección y solución del problema.

La línea de ensamble móvil abrirá las puertas a discusiones acerca de las fortalezas, debilidades, oportunidades y barreras organizacionales que permitan llevar a otro nivel de desempeño operacional el negocio. El producto se compone, principalmente, de elementos metálicos y sistemas unidos por algún tipo de sujeción, con unos cuantos miles de pasos de ensamble a realizar. El proceso de ensamble es, en su mayor parte, manual por ello se depende de la habilidad humana intrínseca para realizar la operación, siendo una variable importante dentro de la correcta ejecución del trabajo. El proceso actual está sujeto a enfrentarse a situaciones del tipo estocásticas donde el ensamble de partes se puede ver interrumpido por la presencia de diferentes situaciones problemáticas, como; la ausencia de alguna parte a ensamblar, o una herramienta, o la presencia de una anomalía de calidad en el proceso, por ejemplo. Esta condición impide el progreso planeado del trabajo y por ende el establecimiento de un esquema de producción armonizado al consumo del cliente, como lo es una línea de ensamble móvil.

## 1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.

La declaración del problema se define en términos de ¿qué?, ¿dónde?, ¿cuándo? y ¿qué tan extenso? Como se muestra a continuación:

- o ¿Qué desviación se observa específicamente? Respuesta: Entre 2 y 3 unidades de producto terminado no entregadas a tiempo al cliente.
- o ¿Dónde se ha observado dicha desviación? Respuesta: En el programa de ensamble metálico estructural.
- o ¿Desde cuándo se ha observado la desviación? Respuesta: Desde la aceleración del ritmo de producción.
- o ¿Cuál ha sido la extensión o tendencia de la desviación? Respuesta: Se observa una tendencia a incrementar desde la aceleración del ritmo de producción.

Tomando en cuenta el análisis realizado, la definición del problema queda de la siguiente manera:

Existe un retraso en los envíos al cliente entre 2 y 3 unidades de producto terminado en el programa de ensamble estructural metálico, condición que ha aumentado desde la aceleración del ritmo de producción.

## 1.2 JUSTIFICACIÓN.

Este estudio tiene su justificación en implementar una gestión del flujo de trabajo que minimice las interrupciones del ensamble y soporte la futura puesta en marcha de una línea móvil de ensamble. La línea móvil de ensamble con una gestión del flujo del trabajo establecerá una referencia, tanto interna como externa, en el proceso dentro de la organización, además de que será pionera en dicho tipo de ensamble. Servirá para probar conceptos nuevos de operación dentro de la organización. El gestionar de manera sistemática el flujo del trabajo pondrá, forzosamente, a las funciones de soporte del proceso en constante reto y expondrá las oportunidades organizacionales en sus funciones, dando paso a la mejora continua aumentando el valor agregado con la visión hacia lograr una producción con "Justo a tiempo".

La solución al problema en el cumplimiento del calendario de envíos tiene un alto impacto en los arranques de nuevos programas de producción ya que, se tiene en

juego la reputación de la empresa ante clientes con una alta exigencia e implícitamente está vinculado un costo al no cumplimiento.

Adicionalmente a los aspectos ya mencionados, una documentación adecuada del proyecto permitirá la transferencia del conocimiento, tanto a futuras generaciones como a procesos similares en otros sitios de manufactura dentro y fuera de la organización.

### 1.3 HIPÓTESIS DE TRABAJO.

La hipótesis de trabajo se plantea de la siguiente manera:

La gestión del flujo de trabajo en el ensamble de una aeronave minimiza la proporción de trabajo detenido y mantiene la repetitividad del mismo, cuando el proceso se enfrenta a una situación problemática.

### 1.4 OBJETIVO GENERAL.

El objetivo general de este estudio es proveer una solución concepto aplicable a la secuencia de ensamble en componentes aeroespaciales, que minimice la proporción de operaciones de ensamble detenidas a través de la gestión del flujo de trabajo.

La variable dependiente cuantificable es la proporción del trabajo detenido, cuando se enfrenta a una situación problemática.

$$\textit{Proporción del trabajo detenido} = \frac{\sum \textit{Operaciones detenidas}}{\sum \textit{Operaciones del ensamble}} \times 100$$

La solución se deriva con uso del método científico de la teoría de solución de problemas de invención, TRIZ, la cual promueve la investigación e innovación.

## 1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

Los objetivos específicos se plantean de la siguiente manera:

1. Encontrar el sistema de restricciones para el problema específico (abstracción del problema utilizando el algoritmo ARIZ-85C).
2. Determinación de una solución concepto basado en una situación ideal buscada.
3. Realización del experimento en un proceso de ensamble actual.
4. Experimentación para probar la factibilidad de implementación del concepto solución.
5. Evaluación cuantitativa y cualitativa de la solución concepto contra la situación actual en tres aspectos objetivo:
  - i. Mejorar la proporción de trabajo detenido en al menos un 15%.
  - ii. Mejorar la precisión del cálculo del progreso del trabajo en al menos un 85%.
  - iii. Mejorar la habilidad manual del operador, a través de, incrementar la repetitividad del trabajo.

## CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO.

### 2.1 TIPOLOGÍA DE PROCESOS DE MANUFACTURA.

En el momento que se toma la decisión de producir algo con la finalidad de comercializarlo, es necesario comprender cómo se va a producir y las diferentes estrategias para alcanzar el resultado deseado. Jacob, Chase y Aquilano(1), denominan proceso a una parte cualquiera de una organización que toma insumos y los transforma en producto que, según espera, tendrá un valor más alto para ella que los insumos originales.

La relación de un producto y su proceso tiene 3 elementos: 1) volumen; 2) diseño del producto; 3) tipo de proceso. Krajewski, Ritzman, Malhotra(2), definieron una estructura del proceso de manufactura, que llamaron "Opciones de Proceso" con la cual tipificaron los tipos de proceso. La figura 1 muestra dicha relación.

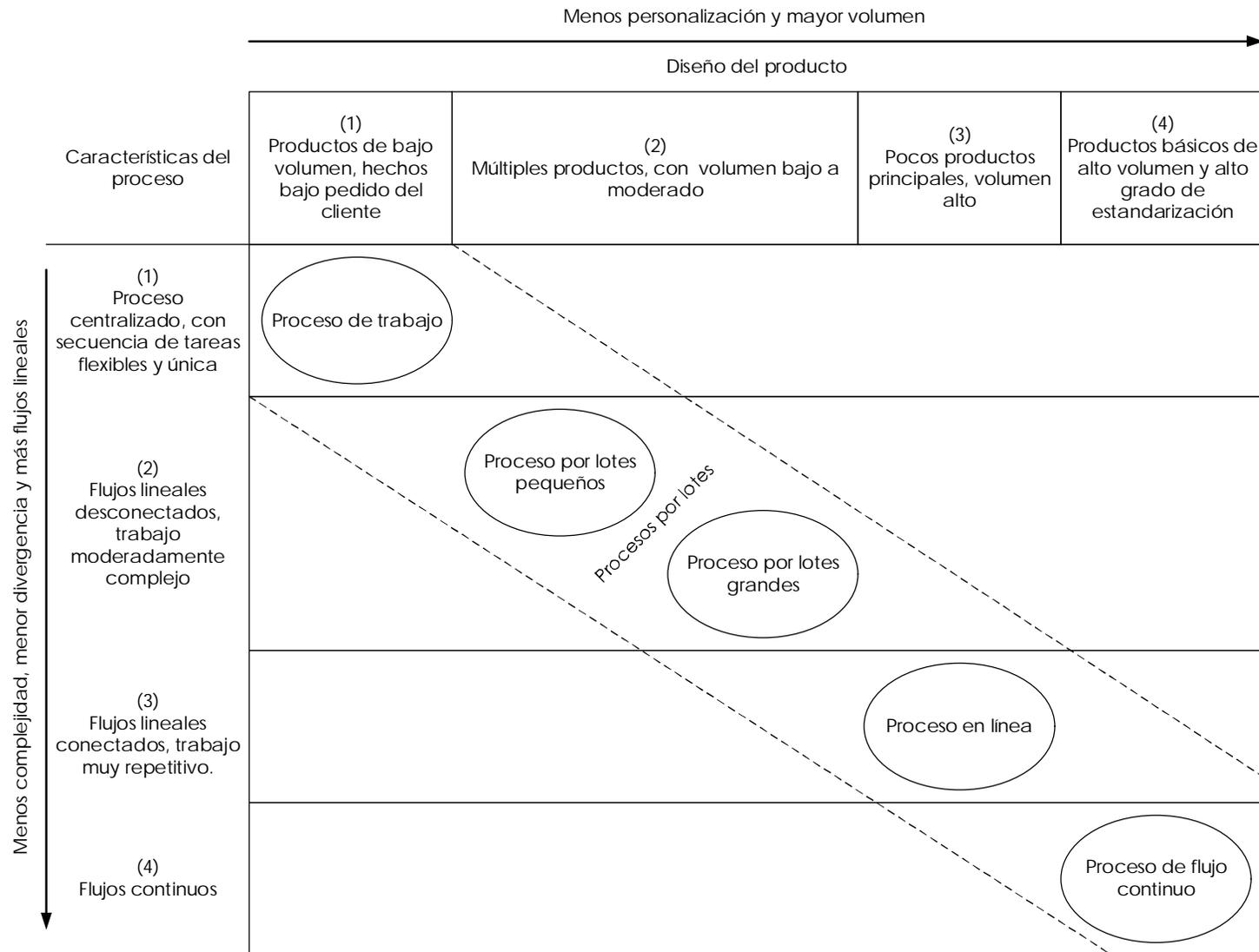


Figura 1: Adaptación de la matriz de productos y procesos para los procesos de manufactura.

Krajewski, Ritzman, Malhotra(2), definen 4 opciones de proceso de manufactura, que conviene entender y ubicar.

- a. Procesos de trabajo. Organiza los recursos semejantes en un entorno común donde la tecnología y recurso humano tienen un alto grado de personalización, complejidad, y una divergencia alta en su secuencia de fabricación. El volumen de producción está relacionado con la realización del pedido por parte del cliente. Ejemplo; Maquinado de un metal vaciado, ensamble de un satélite espacial, etc.
- b. Procesos por lotes. Esta opción es, y por mucho, la más común en la práctica. Un proceso de este tipo tiene volúmenes promedio moderados y su divergencia es muy grande como para dedicar un proceso distinto a cada producto. El flujo es flexible sin que exista una secuencia estándar de pasos a seguir. Ejemplo, el ensamble de componentes que van a formar parte de una línea de ensamble dedicada.
- c. Proceso en línea. Este se sitúa entre un flujo continuo y por lotes. Los volúmenes son altos y los productos están altamente estandarizados, la divergencia es mínima y se mantiene poco inventario entre los pasos de procesamiento. Los pedidos de producción no están directamente relacionados con los pedidos del cliente. Se mantienen inventarios para cuando el cliente desee consumirlos. Ejemplo, fabricación de automóviles, electrodomésticos, computadoras, etc.
- d. Proceso de flujo continuo. Representa el extremo de la producción estandarizada de alto volumen y flujos de línea rígidos. La divergencia del proceso es insignificante. La distinción principal entre este tipo de proceso y el proceso en línea es que los materiales fluyen a través del proceso sin detenerse hasta que se termina el lote, o en algunos casos no es factible detener. Los procesos en línea, por otro lado, pueden detenerse en cualquier momento.

Las estrategias de producción tienen una estrecha relación con la generación de inventarios. Hoy en día la búsqueda continua de maximizar el capital circulante ha

determinado la competitividad de una organización. En palabras sencillas, es la rapidez de comprar y vender un producto. Existen dos estrategias de producción usando los inventarios; 1) Fabricación bajo pedido y 2) Fabricación para almacenar.

La combinación entre el proceso de producción por lotes con la estrategia de mantener los inventarios se le conoce como "producción en masa" o manufactura tradicional.

Otro enfoque dentro del mundo de la manufactura, es clasificado por Groover(3), en dos categorías; 1) Operaciones de procesado, las cuales transforman los materiales en componentes o partes y el material es consumido de manera continua, ejemplo: petroquímica, laminado, fundición, etc. como lo muestra la figura 2 (3), y 2) Operaciones de ensamble, las cuales unen los componentes o partes para formar el producto deseado y los componentes son consumidos por lotes y fluyen a través de una serie de puestos de trabajo, como lo muestra la figura 3 (3).

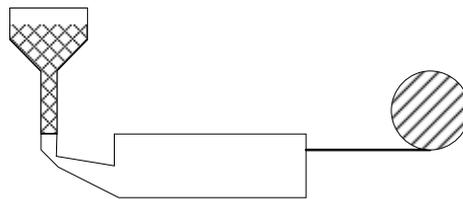


Figura 2: Esquema de operaciones de procesado o producción continua.

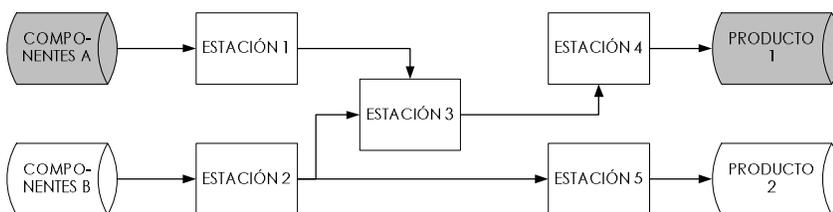


Figura 3: Esquema de operaciones de ensamble.

Utilizando los conceptos mencionados anteriormente, el ensamble de un componente aeroespacial se clasifica dentro del tipo de "procesos por trabajo", en un esquema de fabricación sobre pedido, donde los componentes son ensamblados y fluyen a través de una secuencia de estaciones de trabajo.

## 2.2 LÍNEA DE ENSAMBLE.

Al caminar y observar una planta de manufactura en funcionamiento, podemos apreciar claramente dos tipos de flujo principales; 1) flujo de materiales y 2) flujo de personas(4). Estos convergen con una serie ordenada de pasos que van transformando físicamente la materia prima en el producto final deseado por algún o algunos clientes.

El principio es sistémico, simple, lineal y predecible. Pero, ¿qué sucede cuando dichos flujos se interrumpen en algún punto?, seguramente un cliente o accionista no estará satisfecho con el resultado. En resumidas cuentas, el punto de equilibrio entre la satisfacción del cliente y los accionistas es la meta única de cualquier negocio, además de la generación de efectivo. Esto nos lleva a una siguiente pregunta lógica, ¿cuándo sabremos si estamos en ese balance esperado? La respuesta está en el tiempo de entrega, esta variable única, dependiente y fácilmente medible, funge como un "termómetro" de sincronía con el cliente y los accionistas. Ronald J. Egan de Maynards and Company, lo define como *El tiempo de respuesta es aquel que toma desde la recepción hasta la entrega de una orden*(5).

### 2.2.1 Definición y características.

H.B. Maynard and Company, Inc.(6), define la línea de ensamble como una serie de estaciones de trabajo manuales o automáticas a través de las cuales uno o varios productos son ensamblados secuencialmente.

Chase, Jacobs y Aquilano(1) se refieren a un ensamble en línea continua que está ligado por algún tipo de aparato que maneja los materiales. El supuesto común es que los pasos siguen alguna forma de ritmo y que el tiempo permitido para el procesamiento es el mismo en todas las estaciones de trabajo.

De ambas generalidades mencionadas aún existen importantes diferencias entre los tipos de líneas de ensamble que las caracterizan unas de otras:

- 1) Los dispositivos mecánicos que mueven las partes (bandas, rodillos, transportadores, grúas aéreas, carros, etc.),

- 2) La configuración física de la línea (U, recta, en forma de "S", con ramificaciones),
- 3) Pasos rítmicos (mecánico o humano),
- 4) La mezcla de productos (uno solo o varios),
- 5) Las características de la estación (operadores sentados, de pie estáticos o en movimiento) y,
- 6) La extensión de la línea (pocos o muchos trabajadores).

Las líneas de ensamble fueron introducidas al ambiente industrial con el objetivo de incrementar la producción. Como muchas otras técnicas de ingeniería industrial, estas fueron motivadas por propósitos bélicos. La industria del consumo utilizó los principios de una línea de ensamble para así reducir sus costos y aumentar la productividad.

Actualmente, y con el avance tecnológico, los métodos de línea de ensamble se caracterizan por contar con una alta eficiencia operativa y se adaptan rápidamente a los diferentes esquemas de mercado.

Las líneas de ensamble se caracterizan también por contener procesos concurrentes, es decir, múltiples actividades realizadas en paralelo alimentando una línea principal. Esto reduce drásticamente el tiempo de ciclo (tiempo de entrega) total del producto, pero tiene su grado de complejidad al sincronizar y controlar múltiples actividades realizadas en el mismo momento.

LaScola Neddy y Bipanda(7) atribuyen las siguientes características a un flujo que resulta con la mejor eficiencia y reducción de costos:

- 1) El producto siempre debe moverse hacia adelante, es decir, acercarse al cliente.
- 2) Mantener el flujo continuo la mayor parte del tiempo.
- 3) Minimizar las interrupciones cuando se detone una orden.
- 4) Los patrones de flujo deben ser adaptables.
- 5) El flujo de producción debe mejorar la calidad
- 6) Los patrones de flujo de producción deben tomar en cuenta la incertidumbre y dependencia.

El arreglo de una línea de ensamble contiene las características mencionadas. El producto siempre se mueve en un mismo sentido y no genera contra-flujos, se promueve el flujo continuo del material y las interrupciones son detectadas inmediatamente. Además, los patrones de flujo pueden concurrir y adaptarse a un ritmo especificado, los errores de calidad se atacan en el momento para poder mantener el flujo y, finalmente, se puede crear inventarios de seguridad en puntos específicos para proteger al cliente ante situaciones de incertidumbre.

La figura 4 (7) muestra el arreglo ideal de una línea de ensamble (o también conocido como concepto de “espinas de pescado”), donde convergen diferentes flujos conformando un producto terminado.

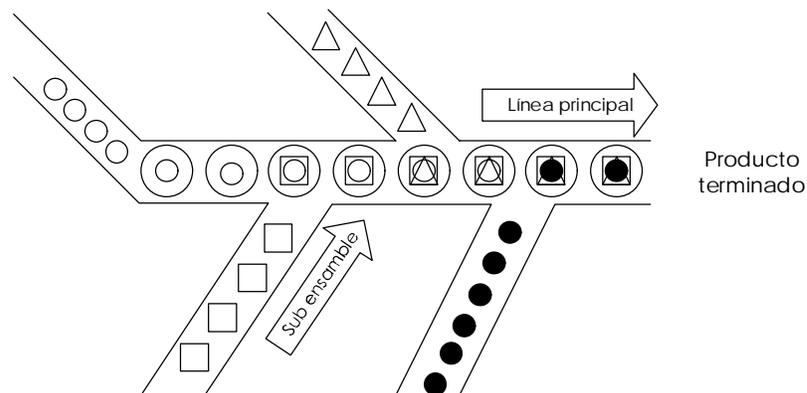


Figura 4: Arreglo de línea de ensamble.

## 2.2.2 Términos y notaciones.

Al balancear una línea de ensamble, tenemos que entender los siguientes conceptos básicos(6):

1. Elemento de trabajo. Las tareas de ensamble y manufactura pueden ser descompuestas en elementos de trabajo ( $T_i$ ), estas pueden ser definidas como pequeñas tareas discretas requeridas para llevar a cabo el ensamble.
2. Tareas de ensamble. Es el conjunto de varios elementos de trabajo.
3. Estaciones de trabajo. Es el lugar físico donde se reúnen una o varias tareas de ensamble. Aquí se lleva a cabo la interacción del flujo de materiales, información y gente.

4. Dispositivos de manejo de materiales. Son elementos mecánicos para mover una parte de una estación de trabajo a otra.
5. Tiempo "takt". Es el tiempo disponible neto dividido entre la demanda del cliente. El propósito del tiempo "takt" es igualar el ritmo de producción con la demanda del cliente(8).
6. Contenido de trabajo o tiempo de proceso. Es la suma aritmética del tiempo de las diferentes tareas de ensamble,  $T_{total} = \sum_{i=1}^k T_i$ , donde  $T_i$  = tiempo de cada elemento de trabajo.
7. Tiempo ciclo. Es el tiempo que pasa el producto en la estación de trabajo. Esto incluye ambas actividades; de valor agregado y de no valor agregado.
8. Tiempo de entrega total de producción. Es el tiempo total que el producto está en toda la corriente de valor, desde la primera estación de trabajo hasta la preparación para ser enviado al cliente.
9. Secuencia de ensamble. Por cada tarea de ensamble se identifica su(s) predecesor(es), y su(s) sucesor(es). El diagrama de precedencias ayuda a entender gráficamente estas relaciones entre tareas.
10. Restricción. Cada tarea de ensamble tiene un tipo de relación con su predecesor y su sucesor. El tipo de relación normal que utilizaremos aquí es "INICIO <= FIN", es decir, la tarea no comienza hasta que termine su predecesor.

### 2.2.3 Tipología de una línea de ensamble.

Desde luego que el reto más grande y estudiado es el balanceo de una línea de ensamble contra el ritmo de demanda del cliente. Los resultados tienen implicaciones en su distribución física y tipos de productos que se fabrican en ellas. En muchas ocasiones el ejercicio arroja como resultado tiempos asimétricos entre estaciones, por consiguiente, las distribuciones y combinaciones deben ser flexibles para minimizar el efecto de desbalanceo.

Boysen, N., Fliedner, M., y Scholl, A. tipifican las líneas de ensamble en referencias a los problemas de balanceo en sus operaciones(9).

Los cuales se explican a continuación:

### 2.2.3.1 Línea de ensamble por su distribución física.

El auge de la producción en masa permitió que el arreglo en línea recta fuera el más utilizado, donde los ensambladores o técnicos altamente especializados realizan una o dos actividades repetitivas. Al igual que un servicio de lavado automotriz, el producto sigue una trayectoria uniforme y continua. Los recursos están dispuestos alrededor de la línea y difícilmente se llegan a compartir. El desafío principal de una distribución lineal es agrupar las actividades en estaciones de trabajo, alcanzando la tasa de producción deseada con la menor cantidad de recursos.

La figura 5 muestra un arreglo típico en línea recta (10).

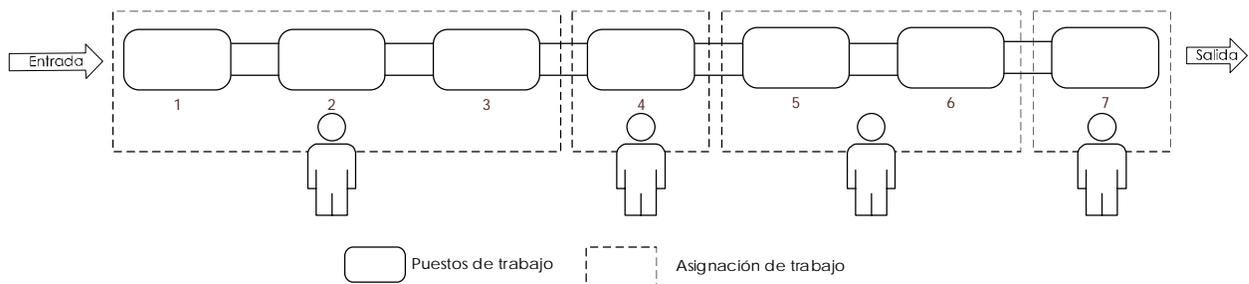


Figura 5: Arreglo de línea de ensamble en forma recta.

Con la llegada del concepto de producción "Justo a tiempo" se comenzaron a utilizar nuevas configuraciones, esto derivó en arreglos en forma de "U", donde esencialmente se buscaba que los trabajadores caminaran la mínima distancia para operar varias estaciones de trabajo, lo cual impactó significativamente en la flexibilidad de la línea. Usualmente se conoce este tipo de arreglo como célula de manufactura en forma de "U", ilustrada en la figura 6 (10).

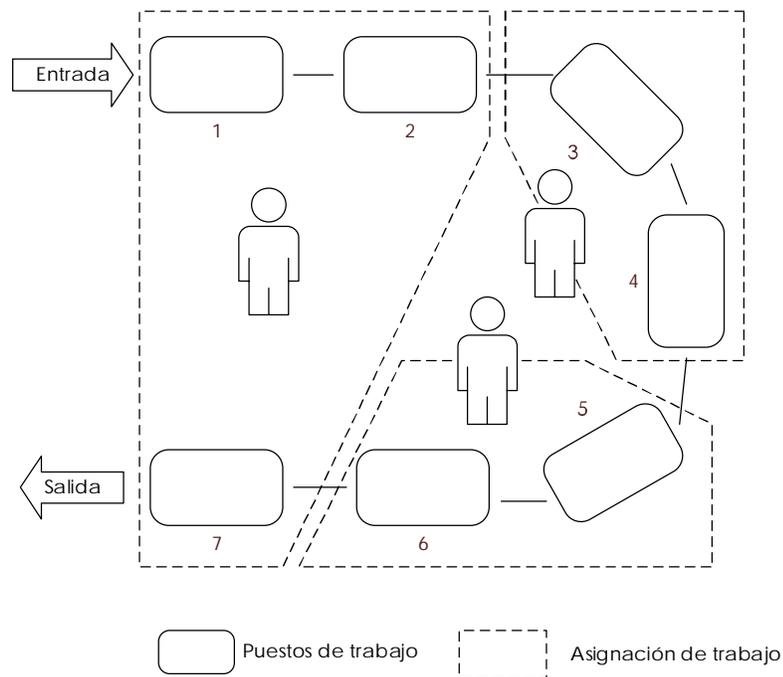


Figura 6: Arreglo de línea de ensamblado en forma de "U".

### 2.2.3.2 Líneas de ensamblado por tipo de producto.

Cuando uno o varios productos con procesos similares son fabricados regularmente en alto volumen, se puede determinar que están en una línea de ensamblado de modelo único. Esto es el ejemplo de un proceso químico o la fabricación de botellas de plástico.

Sin embargo, en los tiempos actuales, este esquema de producción se tiene que compartir con otro tipo de productos. Dos nuevas formas de organización se pueden identificar(9):

1. Línea de mezcla de productos, produce piezas de diferentes modelos en una secuencia arbitraria de mezcla. La secuencia de producción es importante para conservar la eficiencia de la línea, ya que el tiempo de ensamblado puede diferir considerablemente entre los distintos modelos.
2. Línea multi-modelos, produce una secuencia de lotes (cada uno contiene un tipo similar de producto) con operaciones intermedias de ajuste.

Estos arreglos se muestran en la figura 7 (9).

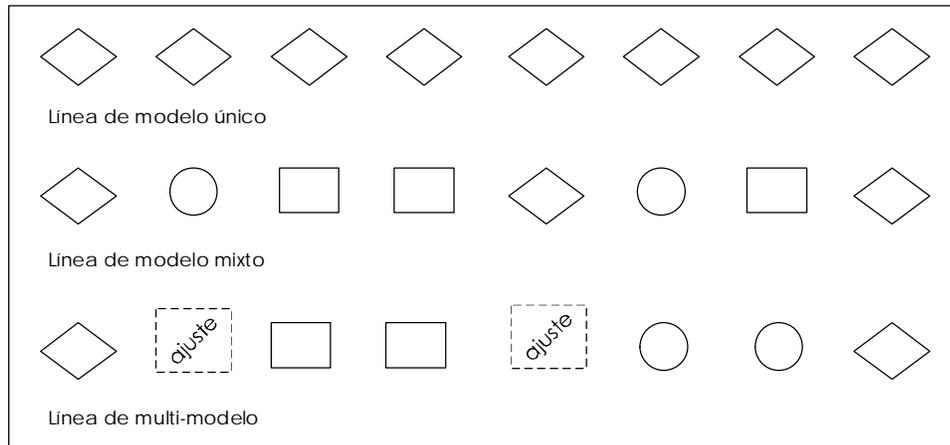


Figura 7: Tipos de línea por tipo de producto.

### 2.2.3.3 Línea de ensamble por su tipo de control.

Los sistemas de ensamble pueden distinguirse con respecto al tipo de control en el movimiento de trabajo entre las estaciones. El tipo de control tiene consecuencias de gran alcance para la decisión de balanceo del proceso(9), enlistadas a continuación:

1. Aquellas líneas de ensamble, donde un valor fijo de tiempo restringe el contenido de trabajo en las estaciones, se le conoce como *línea de pulso*. En un caso típico, el tiempo ciclo es el mismo para todas las estaciones de manera que, pueden empezar al mismo tiempo bajo un mismo ritmo de producción fijo.
2. En una línea sin pulso, las partes no necesitan esperar hasta que transcurra un tiempo determinado, más bien se transfieren cuando las operaciones requeridas hayan terminado.

### 2.2.3.4 Línea de ensamble por el nivel de automatización.

Dos tipos de ensamble se identifican por el nivel de automatización:

1. Línea de ensamble manual; A pesar de los grandes avances en la tecnología, aún existen sistemas de ensamble que dependen completamente de la labor manual, sobre todo cuando las piezas son de manejo frágil y tienen que ser manipuladas constantemente.

2. Líneas de ensamble completamente automáticas son implementadas cuando el medio ambiente de trabajo es hostil y riesgoso para el ser humano o cuando la precisión de los mecanismos automáticos permite economizar la labor humana en gran medida.

A manera de resumen se puede expresar que la configuración de una línea de ensamble tiene diferentes variantes que determinan su arreglo final y que tendrá un efecto significativo en los elementos de salida. La figura 8 muestra una clasificación gráfica de la tipología en una línea de ensamble (11).

Número de modelos	Modelo único	Mezcla de modelos	Multi-modelo
Tipo de control	Ritmica	Arritmica asincronica	Arritmica sincronica
Frecuencia	Primera instalación		Reconfiguración
Nivel de automatización	Línea ensamble manual		Línea ensamble automática

Figura 8: Tipología de una línea de ensamble.

### 2.3 LÍNEA DE ENSAMBLE EN LA INDUSTRIA AEROESPACIAL.

La industria automotriz ha sido referente histórico en la industria de la transformación, desde los inicios de la administración científica con Frederick W. Taylor hasta las más avanzadas tecnologías promovidas por la industria automotriz 4.0 alemana. La industria aeroespacial ha buscado emular los sorprendentes resultados de la industria automotriz, adoptando sus principios y herramientas en la administración de la producción. *Boeing Aerospace* se aventuró con la implementación de una línea de ensamble móvil en la fase final de ensamble del avión comercial 737 (12), presionado por el auge comercial de su competidor directo el Airbus A320.

### 2.3.1 Diferencias entre una línea de ensamble automotriz y aeroespacial.

Utilizando la clasificación de los procesos de Krajewski, Ritzman, Malhotra(2), podemos ubicar ambos tipos de industria. Ver la figura 9.

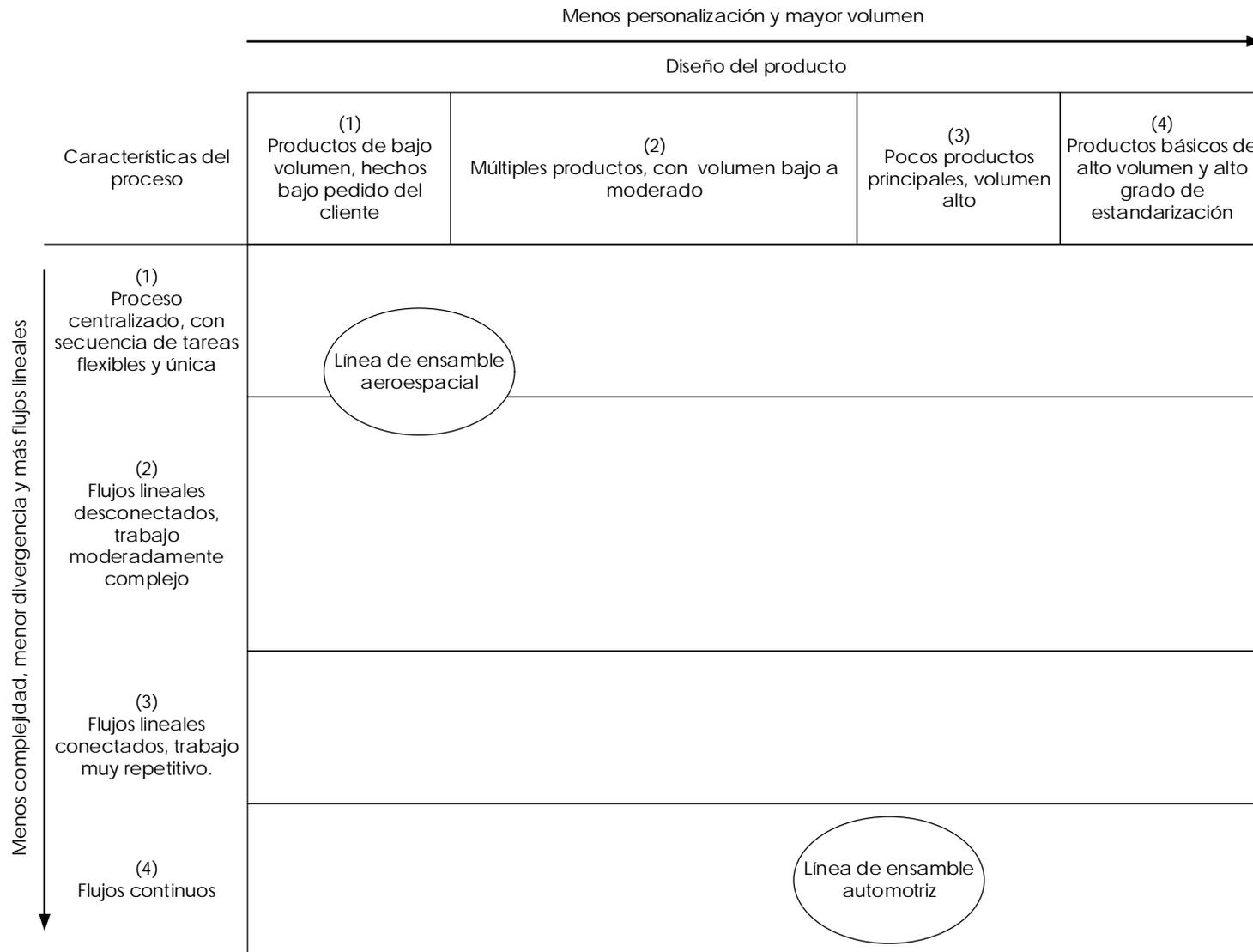


Figura 9 Clasificación de la industria automotriz y aeroespacial.

La tabla No. 1 describe las principales similitudes y distinciones entre líneas de ensamble automotriz y aeroespacial.

Tabla 1. Diferencias entre línea de ensamble automotriz y aeroespacial.

Características	Línea de ensamble Automotriz	Línea de ensamble Aeroespacial
Ambiente de producción	"Hacer para almacenar"	"Hacer por orden"
Organización de los recursos	Centralizado al producto	Centralizado al producto
Tecnología de proceso	Alto grado de automatización	De muy bajo a nulo grado de automatización
Grado de especialización de los recursos humanos	De bajo a moderado	Muy especializado
Secuencia de ensamble	Muy repetitivo y estandarizado	Muy divergente
Mezcla de modelo	Elevada	Único modelo, especialmente en línea de ensamble final.
Tipo de manufactura	Línea de ensamble	Línea de ensamble
Volumen	92 millones de autos anuales(13)	1,500 unidades anuales(14)

Una línea de ensamble, ya sea automotriz o aeroespacial, tiene el mismo propósito a pesar de las condiciones tan diferentes que se pueden encontrar.

En resumen, en la industria aeroespacial los cambios de ritmo de producción son más abruptos, el costo de mano de obra es más elevado, y la secuencia de ensamble tiene gran divergencia (a pesar de ser una línea de único modelo). Por último, el tiempo de ciclo es mucho menor en la industria automotriz.

Podemos concluir que una línea de ensamble aeroespacial tradicional tiene las siguientes características generales:

1. Se trabaja bajo un ámbito de "Hacer por Orden", es decir, el volumen de producción está supeditado a los pedidos colocados por los clientes,
2. Conforme el producto es ensamblado, el proceso se comienza a centralizar, lo que significa que tanto los recursos tecnológicos como humanos, se organizan y mueven alrededor del producto,
3. La tecnología y el recurso humano tiene un alto grado de especialización y complejidad,
4. La secuencia de fabricación tiene una alta divergencia y en ocasiones es única,
5. Operaciones de ensamble, con la característica de que el progreso del trabajo puede detenerse en cualquier momento y es organizado por estaciones de trabajo fijas de inicio a fin, como la descrita por Groover(3).
6. Tipo de línea de ensamble para un único modelo, poco o nada flexible.

Bajo esta descripción podemos entender que se trata de un esquema de ensamble muy dependiente del recurso humano, difícil de automatizar y estandarizar, la actividad de mover partes y controlarlas se vuelve un verdadero reto administrativo y operativo.

### 2.3.2 Línea de ensamble móvil en la industria aeroespacial.

La industria automotriz, pionera en el desarrollo de sistemas de mejora continua en sus procesos de transformación, ha influenciado, de manera significativa, en muchos otros sectores. La industria aeroespacial, específicamente Boeing Inc., comenzó a adoptar los principios de la manufactura esbelta a gran escala con la puesta en marcha de la línea móvil para el programa de aviones comerciales 737 en Renton, Washington(12). A partir de ese momento, Boeing ha adoptado la filosofía de manufactura esbelta como parte de su sistema de producción en muchos de sus programas de fabricación aeroespacial. Los resultados han sido considerables y a gran escala.

La tabla 2 muestra en números los logros según Boeing (12).

Tabla 2. Resultados línea móvil del programa Boeing 737

Concepto	Mejora %
Reducción del tiempo de ciclo	46%
Reducción de inventarios en almacén	59%
Reducción de inventarios en proceso	55%
Reducción de espacio físico	21%

Los porcentajes de reducción son significativos considerando que la industria aeroespacial tiene un ritmo de mercado mucho menor que el de la industria automotriz. Dentro de la industria aeroespacial son pocas las empresas que tienen casos de aplicación de una línea móvil de ensamble documentado, destacan; *Boeing, Airbus, Pratt&Whitney* y *Tryumph Aerospace*.

Podemos definir una línea móvil dentro de la industria aeroespacial como:

“Posiciones de trabajo sobre un transportador con movimiento continuo balanceado al tiempo takt, donde la velocidad es igual o ligeramente mayor al ritmo de consumo”.

Donde se puede observar las siguientes características:

1. Los pasos del proceso están en secuencia considerando las restricciones de espacio.
2. La carga de trabajo está balanceada contra el tiempo takt y los cuellos de botella son minimizados.
3. Existen métricas de control de desempeño en la ejecución del plan de trabajo,
4. Las partes, sub-ensambles, herramientas y consumibles son surtidos a la línea en la cantidad y acomodo correcto, y en el punto de uso.
5. Las líneas de pre-ensamble son creadas para liberar carga de trabajo en la ruta crítica de ensamble.
6. Las instrucciones de ensamble son documentadas y estandarizadas, existe un tiempo estándar de operación, secuencia de pasos y nivel de inventario mínimo y máximo determinado.

7. Los problemas durante la ejecución son oportunamente identificados y comunicados por medio de dispositivos visuales fácilmente notables.

Las metodologías de aplicación de estos conceptos pueden variar en el estilo y forma de administrar de cada organización. El objetivo es común denominador: Reducción del costo unitario, tiempo de entrega y mejora de la calidad.

## 2.4 ESTADO DE LA TÉCNICA.

Esta sección analiza el estado de la técnica para una línea de ensamble en la industria aeroespacial. Entendemos por "estado de la técnica" o "estado del arte" como todo lo que se ha hecho accesible al público, por escrito o a través de cualquier otro medio, antes de la fecha de solicitud de una patente(15).

Numerosas herramientas y metodologías se han desarrollado a lo largo del tiempo y muchas de ellas se complementan con el objetivo de explorar diferentes caminos en la puesta en marcha de producción de un producto.

Recientemente, la explotación de recursos computacionales ha permitido obtener y analizar datos de una forma más amplia y rápida, es así que la manufactura digital ha jugado un papel importante en el diseño conceptual concurrente de una línea de ensamble en la industria aeroespacial.

Actualmente existen herramientas de simulación establecidas tal como el Análisis de Elemento Finito y fluidos dinámicos que mejoran el desempeño estructural y aerodinámico de un avión, pero un buen diseño puede verse degradado si las restricciones de manufactura y costo son significativas, y no fueron consideradas durante la etapa de diseño del producto.

Tradicionalmente, aspectos de manufactura y control de costos en etapas conceptuales del diseño no han estado soportadas por tecnologías preventivas, a cierto grado, como otros aspectos en el desarrollo de una aeronave. Durante la fase de diseño

conceptual se determina hasta el 80% del costo final de la aeronave y para el caso de las estructuras de aeronaves convencionales construidas a partir de partes de piezas, hasta el 30% del costo final se invierte durante las operaciones de montaje(16).

Los impactos en los cambios de diseño en etapas de compra de equipos y manufactura son de gran relevancia, y su aumento en el impacto del costo es significativo a medida que transcurre el tiempo. La figura 10 (16) muestra una relación del impacto del costo en los cambios de diseño en las diferentes etapas del producto.

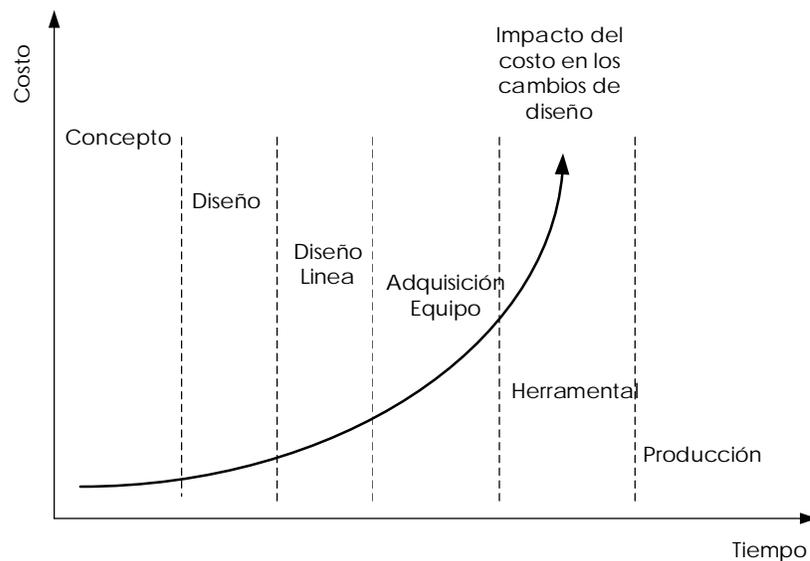


Figura 10: Impacto en los costos.

#### 2.4.1 Diseño de una línea de ensamble en la industria aeroespacial.

Se han realizado diferentes acercamientos alrededor de la gestión del ciclo de vida del producto (PLM Product Lifecycle Management) en la industria aeroespacial, complementándola con la utilización de herramientas computacionales avanzadas, tal es el caso de la Manufactura Digital, que nos arroja como principal ventaja la visualización del producto y su manufactura antes de colocar el primer ladrillo en la fábrica.

La Manufactura Digital ayuda a mejorar los procesos relacionados con la producción y, en última instancia, la rentabilidad del producto. Igualmente, eleva la importancia de

los procesos de fabricación en relación con el ciclo de vida de un producto y ofrece mejoras tangibles a la planificación, diseño e implementación de los procesos de fabricación(17).

La estrategia de Manufactura Digital se ha interrelacionado satisfactoriamente con la ingeniería de diseño concurrente, donde se utilizan sistemas basados en el conocimiento (KBS, Knowledge Based Systems) con el propósito de generar modelos de línea de ensamble factibles durante la fase conceptual en el desarrollo de una estructura aeroespacial.

"Airbus Defense and Space" ha implementado el diseño concurrente en una de sus líneas de ensamble utilizando la metodología de herramientas orientadas a la aplicación basada en el conocimiento (MOKA, Methodology of Oriented to Knowledge Based Application), con el objetivo de obtener un conjunto de resultados que les permita comprender las principales características de éxito en la puesta en marcha de una línea de ensamble en sus etapas tempranas de industrialización. Tales características son relacionadas con la maquinaria, herramientas y herramientas a ser usados, necesidad de espacio, logística y mano de obra(18).

El uso de herramientas digitales, como "Delmia Digital Process Engineering, Delmia DPE ©" toma los datos de salida de MOKA para visualizar y simular los escenarios alternativos, asimismo se prueban nuevas vertientes; escenarios "¿Qué pasa si?".

Las soluciones de Delmia Manufactura Digital son elaboradas bajo el modelo: Producto, Proceso, Recurso (PPR). Dicha estructura provee un eje central conectando todos los datos relacionados con las actividades de manufactura, incluyendo datos de diseño, instrucciones de proceso y recursos disponibles.

La optimización de los procesos de fabricación en un entorno virtual y la integración perfecta con el entorno de diseño y otros sistemas del negocio son dos de los principales beneficios de la fabricación digital.

Delmia Manufactura Digital contiene 3 módulos individuales de análisis que son(16):

1. DELMIA Ingeniería de Procesos (DPE, Delmia Process Engineer) es usado desde la fase de diseño conceptual y a través de la pre-planeación, planeación detallada hasta la fase de producción. Proporciona un ambiente de rápido reconocimiento de riesgos en el proceso, reutilización de procesos probados, cambios de ingeniería rastreables y decisiones y una manera más eficiente de acceder al proceso basado en el conocimiento.
2. DELMIA V5 DPM trabaja en un ambiente CAD, diseñado para optimizar la ingeniería de procesos y los procesos de ensamble de manufactura, permitiendo a los usuarios crear, simular y validar los planes de procesos de manufactura de una fase de planeación. Numerosos escenarios “¿Qué pasa sí?” pueden ser probados con un mínimo de impacto en el costo conforme el proceso se lleva a cabo en un ambiente virtual, antes que los equipos y herramientas sean adquiridos.
3. DELMIA QUEST® provee un ambiente muy colaborativo en el desarrollo y prueba del flujo de manufactura durante el diseño de producción. El diseño puede ser mejorado, pueden ser minimizados los niveles de riesgo y costos y la eficiencia de los procesos maximizada digitalmente, antes de que cualquier inversión sea realizada. QUEST es usado en conjunto con DELMIA MS Excel programa de balanceo, para identificar los cuellos de botella en el proceso y optimizar los niveles de carga de trabajo de los operadores.

Boeing utilizó con éxito DELMIA QUEST® para simular diferentes escenarios de balanceo de línea en la implementación de la línea móvil en el programa de aviones comerciales 747(19). El proyecto utilizó las herramientas de simulación en ambiente de intensa carga de producción, mientras continúa aplicando la mejora continua a la línea móvil.

En el futuro, iteraciones de simulación más rápidas, los modelos desplegados y los modelos de realimentación en tiempo real mejorarían aún más el valor de las prácticas de simulación del proceso de fabricación(19).

#### 2.4.2 Implementación de una línea de ensamble móvil en la industria aeroespacial.

Los dos principales fabricantes de aeronaves comerciales; Boeing y Airbus han puesto en marcha una línea de ensamble con movimiento continuo, como lo hemos descrito anteriormente. Ambas empresas han incursionado en el desarrollo de un esquema de manufactura diferente al tradicional, coincidiendo en los mismos objetivos: reducción del costo unitario, reducción del tiempo de entrega y mejora de calidad.

Cada fabricante utilizó una secuencia diferente de pasos lógicos para lograrlo, pero con un enfoque similar, donde se pueden entender muchas similitudes en las características claves de sus respectivas líneas de ensamble.

Boeing empleó una metodología de 9 pasos, que se describe a continuación(20):

1. Mapeo de la corriente de valor. Crear un entendimiento del flujo de los materiales, información y personas a través de la corriente de valor.
2. Balanceo de línea. Crear una distribución uniforme de la carga de trabajo entre las posiciones de trabajo y conocer el tipo de restricciones para distribuir mejor los recursos.
3. Trabajo Estándar. Elaboración de Instrucciones de trabajo que declaren la manera más rápida, segura y menos costosa (niveles de inventario).
4. Administración visual. Implementación de esquemas visuales de rápida detección de un problema.
5. Surtimiento en el punto de uso. Preparación de almacenes junto a la línea de ensamble para el surtimiento bajo un esquema de "justo a tiempo". Preparación del conjunto de partes, herramientas, consumibles, información para un tiempo corto de producción determinado.
6. Líneas de sub-ensambles. Identificación de la ruta crítica de ensamble y creación de líneas de sub-ensambles que alimenten la línea principal de ensamble.
7. Mejoras sustanciales en el proceso. Rompimiento de actividades donde las partes más costosas se envían lo más cerca posible del cliente.

8. Línea de ensamble en "pulso". La línea está balanceada y existe "algo" que marca el ritmo de producción a seguir. Existe un esquema de "jalar" en la producción.
9. Línea de ensamble móvil. El producto se mueve a una velocidad igual al consumo de cliente o ligeramente mayor, mientras es realizado el trabajo.

Boeing implementó su primera línea de ensamble móvil, en la fase final del ensamble del avión, donde ya no es necesario el uso de herramientas de posicionamiento ni maquinaria o equipo de gran tamaño.

Igualmente, Airbus utilizó una metodología de 5 fases basándose en los principios de la manufactura esbelta, que se describen a continuación(21):

1. Creación de flujo continuo. Análisis detallado de los procesos de producción y la optimización de las secuencias de trabajo, preparación de diagramas de precedencia para entender las restricciones técnicas de ensamble y de espacio y balanceo de trabajo entre las posiciones.
2. Mejora Continua. Logro de mejoras tangibles en el proceso tomando en cuenta las sugerencias de los empleados.
3. Resolución inmediata de los problemas. Instalación de equipos de respuesta rápida a los problemas de calidad e instalación de mecanismos de administración visual en el progreso del trabajo.
4. Enfoque en las actividades de valor agregado. Surtimiento de las partes acorde a las necesidades de producción, surtimiento en órdenes de producción cortas (máximo 2 horas), acomodo del material basado en el uso y evitar actividades de desempaque.
5. Sistema "Jalar". Señal de surtimiento cuando se haya consumido el material.

Haciendo de lado los elementos mencionados anteriormente, que van un poco más allá del propósito intrínseco de una línea de ensamble móvil, podemos decir que las líneas móviles de ensamble de Boeing y Airbus tienen aspectos en común, que caracterizan el proceso de fabricación:

1. Se determina una secuencia técnica de ensamble considerando las restricciones de espacio,
2. La carga de trabajo está balanceada contra el tiempo de consumo del cliente y los cuellos de botella son minimizados,
3. Existen mecanismos de control de desempeño en la ejecución del trabajo contra el plan de trabajo,
4. Las partes, sub-ensambles, herramientas y consumibles son surtidos a la línea en la cantidad y acomodo correcto y en el punto de uso,
5. Son creadas líneas de pre-ensamble para liberar carga de trabajo en la ruta crítica de ensamble acortando el tiempo de ciclo,
6. Las instrucciones de ensamble son documentadas y estandarizadas, existe un tiempo estándar de operación, secuencia de pasos y nivel de inventario mínimo y máximo determinado,
7. Los problemas durante la ejecución son oportunamente identificados y comunicados por medio de dispositivos visuales fácilmente notables y está cercano un equipo multifuncional de respuesta rápida para el control de la calidad.

#### 2.4.3 Características de una línea de ensamble móvil en la industria aeroespacial.

Esta sección tiene como objetivo detallar de una forma resumida y clara las características de una línea de ensamble en la industria aeroespacial.

##### 2.4.3.1 Secuencia de pasos de proceso basado en las restricciones de espacio.

La manufactura de un producto requiere partir la cantidad total de trabajo en un conjunto de operaciones individuales llamadas "tareas". Niebel(22) lo define como Mínimo Elemento Racional de Trabajo, que no puede ser sub-dividido en cualquier otra tarea factible de realizar. Cada tarea requiere un tiempo determinado, equipo, materiales y recurso humano capacitado. Las condiciones tecnológicas y ergonómicas generan restricciones entre la precedencia de cada tarea observada. Cuando estas precedencias son organizadas visualmente tenemos como resultado un diagrama de precedencias, como lo muestra la Figura 11 (22).

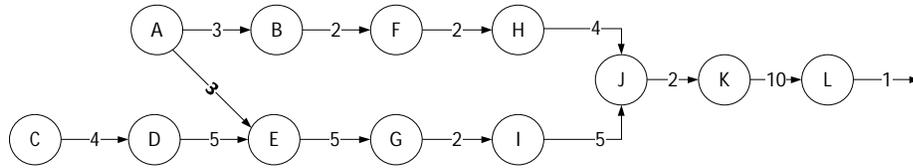


Figura 11: Diagrama de precedencias.

Cada nodo representa una tarea y cada tarea tiene un peso en unidad de tiempo, cada lazo presenta la restricción que existe entre las tareas. La figura 11 representa un diagrama de precedencias con 12 tareas  $n=12$ . Por ejemplo, para comenzar la tarea "E" tienen que estar completadas las tareas "A" y "D" previamente (Predecesores directos) y la tarea "C" (predecesores indirectos), del otro extremo, la tarea "E" debe estar completada para poder comenzar la tarea "G" (sucesor directo) y las tareas "I", "J", "K", "L" como sucesores indirectos. Las restricciones en la secuencia de pasos o tareas pueden clasificarse en dos tipos: La primera son restricciones técnicas de ensamble, las cuales se relacionan exclusivamente con la factibilidad del ensamble desde el punto de vista de diseño, por ejemplo, localizar el tornillo y apretar. La segunda restricción está relacionada con la posición y espacio disponible para ejecutar la tarea. Cuando dos tareas que técnicamente no son dependientes, pero están en el mismo espacio físico, y que no pueden ejecutarse al mismo tiempo, tienen este tipo de restricción, entonces, su secuencia en su plan de producción es lineal, es decir sucede primera una y después la otra.

El ensamble de una aeronave tiene muchas restricciones, como este último tipo mencionado, por lo que es muy común que los ensambladores estén agrupados en un mismo espacio simultáneamente. La adecuada secuenciación con restricciones del tipo de espacio ayuda de gran manera a mejorar la eficiencia en el uso de los recursos.

#### 2.4.3.2 Balanceo de la carga de trabajo al ritmo de consumo del cliente.

Dentro del campo de investigación de operaciones la definición de problema de balanceo de línea, según Becker y Scholl(23), es la siguiente:

“Dado un conjunto de tareas con diferentes duraciones, un conjunto de restricciones de precedencia entre ellas, y un conjunto de estaciones de trabajo, se debe asignar a cada tarea una estación de trabajo de tal forma que ninguna restricción de precedencia sea violada y la asignación de tiempo sea óptima”.

Estableciendo un criterio de idealidad tenemos dos variables objetivo en el problema de balanceo de línea:

1. Ya sea un tiempo de ciclo especificado, que no pueda ser excedido por la suma de las duraciones de todas las tareas asignadas a cualquier estación de trabajo, y la cantidad de estaciones de trabajo debe ser minimizada, o
2. El número de estaciones es fijo y la línea de tiempo ciclo es igual a la suma más alta de las duraciones de las tareas asignadas a la estación de trabajo. Dicho tiempo de ciclo debe ser minimizado.

Becker y Scholl(23) mencionan una importante característica dentro de un problema de balanceo de línea: la variabilidad de los tiempos en las tareas. Cuando la varianza esperada de los tiempos de las tareas es lo suficiente pequeña, como en el caso de un proceso altamente automatizado, los tiempos de las tareas se consideran determinísticos. Por el contrario, ante una variabilidad considerable, la cual es debida, principalmente, por una inestabilidad humana respecto al ritmo de trabajo, habilidades y motivación, así como la falla humana en procesos complejos, se considera como tiempo de tareas estocásticos. Además, las variaciones de tiempo estocásticos se pueden mitigar por efecto del aprendizaje o mejoras sucesivas en el proceso de producción.

#### 2.4.3.3 Control del desempeño en la ejecución del plan.

El control del progreso en la construcción de una aeronave se basa en unidades de trabajo atrasadas o adelantadas, es decir, cuántas unidades de trabajo no se cumplieron y cuántas unidades de trabajo se adelantaron en referencia al tiempo de ejecución planeado. La métrica dominante es la cantidad de unidades de trabajo retrasado al calendario de producción, que es prácticamente la reconciliación entre

las unidades de trabajo que deberían haberse completado contra las realmente completadas en un momento específico.

Victoria Gastelum(24), propuso para Boeing una métrica que soporta la mejora continua y mide la capacidad de cumplimiento al plan de producción, que es un indicador que complementa la tradicional métrica de cantidad de unidades de trabajo atrasadas contra el calendario de producción. Esto le llama Índice de rendimiento del equipo al logro del objetivo.

Este indicador, para el que podemos usar el acrónimo de CPGI (Crew Performance to Goal Index), está basado en el mismo cálculo del indicador de control estadístico de proceso, llamado índice de capacidad o  $C_{pk}$ .

El primer paso para calcular el "CPGI" es determinar para todas las unidades de trabajo la diferencia numérica en unidades de tiempo entre la fecha planeada y la fecha real de término. Lo ideal es que sea cero, pero siendo realistas, es imposible que todos los trabajos se completen exactamente en la hora y fecha planeada. Los datos van mostrar valores positivos y negativos, esto es, algunos trabajos terminarán antes o después de su fecha planeada.

El segundo paso es especificar los límites de tolerancia para esta diferencia calculada. Esto depende de la administración de la operación, determinar cuántos días de retraso o adelanto se considera una situación normal a la variación del proceso.

Como último paso y utilizando el teorema de límite central, se puede calcular el valor estándar de "Z" y por ende el valor del índice de capacidad.

El índice CPGI es altamente complejo, involucrando la ejecución de miles de trabajos proveyendo una métrica para entender la variabilidad que existe en el cumplimiento del plan de producción, una característica significativa cuando se tiene una línea de ensamble móvil y, que trabaja en sincronía con los flujos de materiales, personas e información.

#### 2.4.3.4 Surtimiento al punto de uso.

La fabricación de una aeronave tiene un constante y ajetreado flujo de materiales. Muchas partes, componentes pre-ensamblados, consumibles, tornillería, documentos, etc. son llevados constantemente al área de producción. El equipo de producción se enfrenta repetidamente a problemas de manejo y control, como su adecuado almacenamiento en proceso, identificación y disposición en caso de un problema de calidad. Acomodar el conjunto (llamemos a esto: "kit") de todos los materiales necesarios, basado en la secuencia de ensamble, surtirlo en la fecha planeada por el calendario de producción y en el lugar físico de uso, genera un ritmo de fabricación sincronizado con el consumo del cliente, lo cual es un requisito indispensable para una línea móvil de ensamble.

Johansson(25) distingue entre los sistemas de suministro de materiales, por su selección de números de parte de piezas expuestas en las estaciones de ensamble y la forma en que se ordenan dichas partes en las estaciones. Realiza una clasificación con respecto a tres tipos de suministro, como se muestra en la figura 12 (25):

1. Suministro continuo.
2. Suministro por lotes.
3. Suministro por conjunto, llamado "Kitting".

El suministro continuo presenta todos los números de parte en la línea de ensamble. El material está ordenado por número y se distribuye a la línea de ensamble en unidades adecuadas para su manejo. El suministro por lotes solo presenta una selección de números de parte en la estación de ensamble conectados a una serie de objetos de ensamble específicos, similar al suministro continuo. El suministro por conjunto "Kitting" presenta material en la estación de montaje ordenados por unidad de trabajo de ensamble, lo que significa que un conjunto "kit" contiene un grupo de números de parte para una unidad de trabajo específica.

	Selección de número de parte	Todos los números de parte
Ordenados por número de parte	LOTES	CONTINUO
Ordenados por unidad de trabajo de ensamble	EN CONJUNTO "KITTING"	

Figura 12: Categorización de los sistemas de suministro.

Bozer, Yavuz A. McGinnis y Leon F.(26), identifican las siguientes ventajas y desventajas al usar un esquema de surtimiento en conjunto "kitting".

Ventajas:

1. Ahorro de espacio en el área de fabricación reduciendo el inventario de partes en proceso manteniendo la mayor parte del inventario en el almacén.
2. Como la mayoría de los componentes no están físicamente en el área, los cambios de modelo son más sencillos debido a los bajos movimientos de partes.
3. Ofrece un mejor control y flexibilidad en el manejo y transporte de los contenedores del "kit" a través del proceso de ensamble.
4. Facilita el envío del material a la estación de trabajo.
5. Provee un mejor control de los costos en los materiales perecederos.
6. Ofrece un incremento potencial en la calidad y productividad de la estación de trabajo por la reducción de daño o extravío de partes.
7. Ayuda a mantener el tamaño del lote de producción bajo.
8. Ayuda a facilitar la automatización de la línea de ensamble, siempre manteniendo cantidades y acomodo estándar de surtimiento.

Desventajas:

1. La preparación del "kitting" consume tiempo y esfuerzo, generalmente requiere intervención humana.
2. Es probable que se tenga que incrementar el espacio para almacenar, especialmente donde se hace la preparación del "kitting".
3. Demanda adicional para la planeación.
4. La presencia de piezas temporalmente faltantes, obligan a surtir el "kitting" incompleto, afectando la productividad de la operación.

5. Cuando sucede un problema en la línea de ensamble se requiere manejar las excepciones de manera especial, como surtir piezas adicionales a la línea.
6. Si existen piezas faltantes en los "kits" se comienza a dar un efecto de "canibalismo" entre las estaciones de trabajo, es decir, se toman piezas de los "kits" existentes, generando una pérdida del control.

#### 2.4.3.5 Rompimiento de las operaciones y paralelismo de operaciones.

La implementación de una línea móvil de ensamble tiene que tener una configuración tipo "espina de pescado", es decir, se identifican los procesos principales de transformación que, no necesariamente es la ruta crítica de ensamble, después se identifican los sub-procesos de ensamble, donde el objetivo es crear líneas de alimentación paralelas y reducir lo más posible las operaciones secuenciales.

La figura 13 (7) muestra el arreglo con el concepto tipo "espina de pescado"

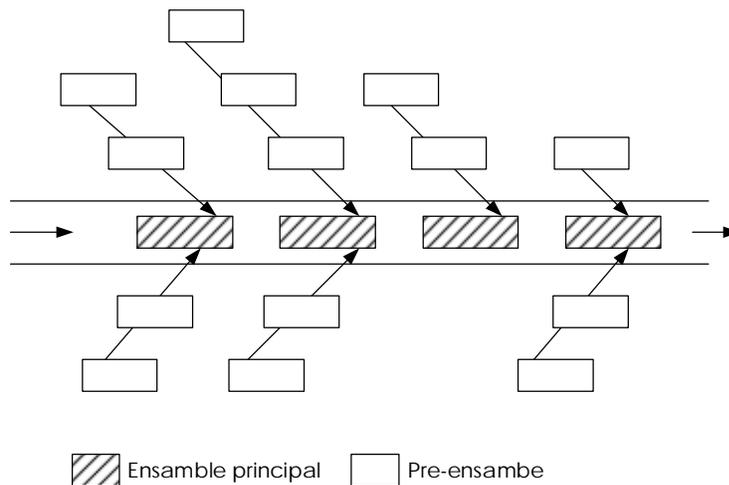


Figura 13: Concepto de ensamble en "espina de pescado".

#### 2.4.3.6 Trabajo estandarizado.

El trabajo estandarizado dentro de una industria manufacturera es un elemento medular en la gestión de la operación.

Yasuhiro Monden(27) describe el trabajo estandarizado como el uso mínimo de operadores para la producción, para lograr 3 objetivos. El primer objetivo del trabajo estandarizado es lograr productividad trabajando eficientemente sin ningún movimiento de desperdicio. El orden estandarizado de varias operaciones a ser ejecutadas por cada operador se le conoce como rutina estándar de operación. El segundo objetivo es lograr el balanceo del trabajo entre todas las tareas a realizar contra el tiempo "takt" o ritmo de consumo del cliente. El tercer objetivo es la determinación de la mínima cantidad de materiales a tener en la estación de trabajo para mantener el proceso sin esperas. A esto se le nombra como inventario estándar en proceso.

El trabajo estándar es la base fundamental de la eficiencia operativa a través de la repetitividad del trabajo.

#### 2.4.3.7 Sistema de respuesta rápida al control de la calidad.

El propósito principal de un equipo de respuesta rápida al control de la calidad es proteger al cliente y re-activar el proceso. Michel Greif(28) determina 3 principios que deben implementarse para alcanzar un rápida respuesta al control de la calidad:

1. Transmisión oportuna y efectiva de la respuesta.
2. Colocar el mensaje visual cerca de la persona receptor.
3. Asegurar que la información es repartida en el grupo.

Responder oportunamente al problema, significa prevenirlo de su persistencia. En procesos automáticos, este paso es fácil de lograr, pero en procesos con dependencia humana, es más complicado. Colocar el mensaje muy próximo a la persona que se encargará de analizarlo, aumenta la probabilidad de descubrir las causas de origen, de lo contrario, mientras más tiempo transcurre entre la detección y el análisis, las causas del problema son más complicadas de encontrar.

Toyota ha logrado desarrollar un sistema para minimizar o anular el paro de la línea de producción ante un problema detectado. A esto le llama "Paro de Posición Fija"(29). Esto es especialmente útil para reducir los paros de línea cuando el operador está

atrasado en la secuencia de ensamble. Existen marcas en el piso, que indican el progreso de trabajo conforme el producto se mueve. Si el supervisor inmediato responde rápida y oportunamente, puede realizar los ajustes antes que la línea tenga que parar por completo. La figura 14 (29) muestra el esquema mencionado:

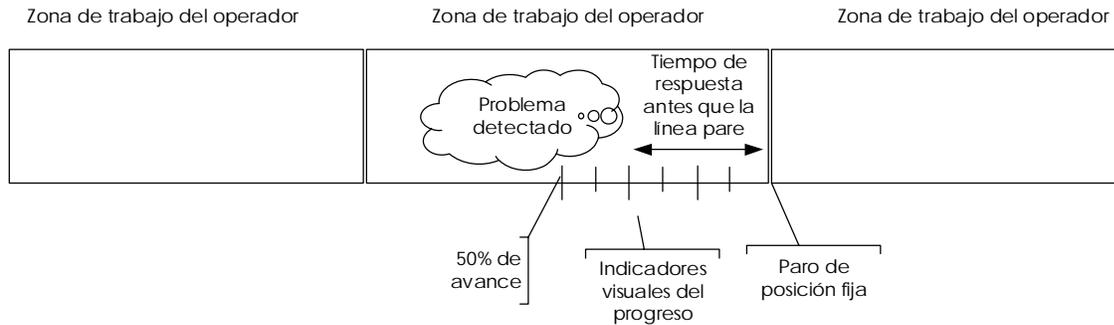


Figura 14: Sistema de paro de posición fija de Toyota.

Asimismo, se pueden configurar pequeños espacios de "reserva" por si el trabajo no puede completarse en la zona de trabajo asignada con el objetivo de absorber paros menores de no más de 10 min. Desde luego que estas "reservas" son pequeñas para no esconder los problemas en los inventarios.

## 2.5 TEORÍA DE SOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE INVENCION: TRIZ.

La Teoría de Solución de Problemas de Invención, TRIZ (*Teoria Reshenia Izobrietatelskij Zadach*, acrónimo en el idioma ruso)(30), provee una estructura de análisis para establecer una solución específica a través de la abstracción del problema.

TRIZ surge con la grandiosa visión de un desconocido ingeniero mecánico soviético, Genrij Saulovich Altshuller (1926-1998). A partir del año 1946 cuando estaba laborando como analista en la oficina de registro de derecho de autor, estudió miles de patentes en las solicitudes de registro. Después de varios años llega a la sorprendente conclusión de que existen únicamente 40 principios de inventiva, los cuales se repetían una y otra vez en los reportes que revisaba(31).

TRIZ es considerado como una filosofía, un método y un conjunto de definiciones de problemas y herramientas para su resolución. TRIZ puede ser usado de múltiples formas, tanto como un proceso global que permite a los usuarios analizar y proponer oportunidades de mejora sistemáticamente con la aplicación rigurosa del algoritmo propuesto, así como utilizar aisladamente las distintas herramientas dependiendo del contexto situacional.

El objetivo general de TRIZ es la construcción de la definición de un problema y el proceso para su solución, ya sea técnico o no técnico, simple o complejo, altamente restrictivo o una simple situación, innovador o pequeños cambios de mejora, o enfocado en productos, procesos o servicios.

La metodología de TRIZ ha podido encapsular los principios de una buena práctica de inventiva y agruparlos en una estructura de trabajo genérica.

El proceso básico por el cual todo esto ocurre se ilustra en la figura 15 (30).

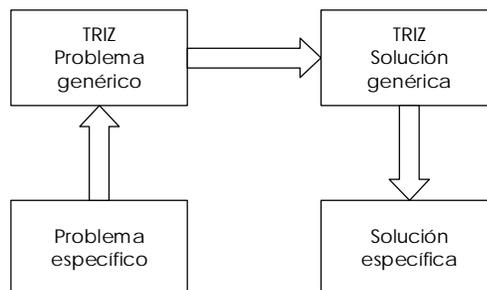


Figura 15. Proceso básico de TRIZ.

TRIZ utiliza el mismo principio de solución de problemas por abstracción, como lo hace la disciplina de álgebra para resolver un sistema de ecuaciones(30).

### 2.5.1 Los cuatro pilares del TRIZ.

Esta sección provee un breve resumen de los cuatro pilares fundamentales del TRIZ(32). El primero, tiene que ver con el sistema de contradicciones. La gran aportación de TRIZ a la solución del problema es la identificación de la contradicción técnica en el sistema. Una contradicción técnica existe cuando se intenta mejorar un parámetro (digamos A)

y otro los deteriora (digamos B). Por ejemplo, cuando intentamos hacer un producto más fuerte haciéndolo más grueso, pero a su vez se hace más pesado. Ahora supongamos que tenemos un solo parámetro (digamos C) y, que por alguna razón queremos incrementar, pero a su vez reducir, cuando en un mismo parámetro se crea una contradicción, TRIZ llama a esta condición; contradicción física. En pocas palabras, una contradicción técnica se puede desglosar en una o varias contradicciones físicas. Esta observación esta explicada en la figura 16 (30).

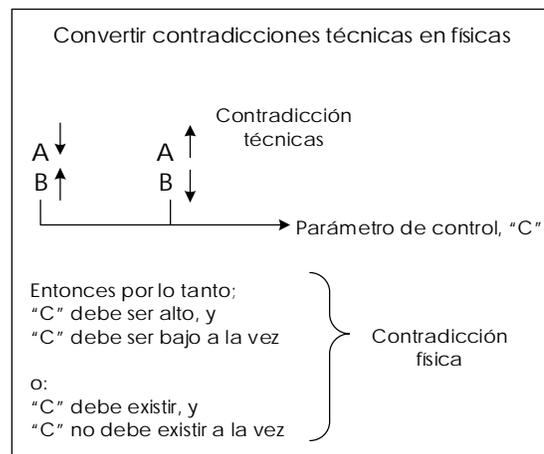


Figura 16: Convertir contradicciones técnicas en físicas.

De esta forma podemos ver que para cada problema de invención en el cual tenemos identificado la contradicción técnica, podemos identificar la contradicción física específica en términos de parámetro de control. Al hacer esta identificación, colocamos nuestro problema específico en el conjunto abstracto de todos los problemas inventivos que tienen contradicciones físicas.

El segundo pilar de TRIZ tiene que ver con la idealidad del sistema. La formulación de idealidad es utilizada para la definición del problema y promueve en los analistas a romper el esquema tradicional de pensamiento de iniciar con la situación actual a iniciar con la descripción de la situación ideal, IFR (Ideal Final Result).

La ley de la idealidad creciente menciona que un sistema técnico evoluciona en dirección a incrementar su grado de idealidad. Este término es definido como el

cociente de la suma de los efectos deseados del sistema,  $U_i$ , dividido entre la suma de los efectos nocivos,  $H_j$ .

$$Idealidad = I = \sum U_i \div \sum H_j$$

Los efectos deseados incluyen todos los resultados valiosos de la función del sistema. Los efectos nocivos incluyen el costo del sistema, el espacio que ocupa, el combustible que usa, el ruido que produce, los efluentes, etc. Por lo tanto, esta ley establece que a medida que el sistema evoluciona, la suma de  $U_i$  tiene una tendencia hacia arriba y la suma del  $H_j$  tiende hacia abajo(30).

El tercer elemento importante de TRIZ es la utilización de los recursos. TRIZ hace énfasis en el uso de todos los recursos del sistema existente, que no han sido utilizados a su máximo potencial. La metodología utiliza herramientas que permiten el descubrimiento del uso de los recursos en diferentes niveles del sistema. Una herramienta poderosa es el análisis de campo sustancia(33).

El concepto "Sustancia" es todo aquello que tiene una estructura, fija o variable y que puede ser detectada con los sentidos o con instrumentos adecuados, por ejemplo: una manzana, una persona, el aire atmosférico, el agua, un clavo, el suelo, etc.(31). Por otro lado, el concepto "campo" es cualquier tipo de energía que existe en el universo y que es posible detectar con los sentidos o con instrumentos(31).

La representación gráfica del "campo-sustancia" es una herramienta útil para el análisis del modelo del problema. Dicho análisis tiene la siguiente connotación(31):

- Línea completa: efecto deseado.
- Línea curvada: efecto nocivo.
- Línea punteada: efecto deseado pero insuficiente.

Además, se tienen las siguientes relaciones:

Una sustancia genera un campo:



Un campo es aplicado a una sustancia:

C → S

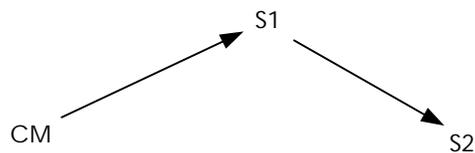
La sustancia subíndice 1 actúa de alguna forma con la sustancia subíndice 2:

S1 → S2

El campo subíndice 1 actúa de alguna forma sobre el campo subíndice 2:

C1 → C2

Por ejemplo, se representa el esquema campo-sustancia de un martillo que golpea un clavo, como lo muestra la figura 17 (31):



Donde:

CM = Campo mecánico que se aplica al martillo.

S1 = Martillo

S2 = Clavo es golpeado

Figura 17. Relación campo-sustancia.

El último elemento importante de TRIZ es el pensamiento del espacio, tiempo y escala. La metodología de TRIZ promueve el cambio de perspectiva hacia los problemas, ayudando al analista a maximizar y minimizar el tiempo, espacio y escala del problema para identificar soluciones potenciales, es así como los principios de separación fueron establecidos para este propósito. TRIZ busca la eliminación de las contradicciones mediante la aplicación de una o varios principios de separación(34):

1. Separación en el tiempo. Es una característica que se hace más grande en un cierto momento específico y más pequeña en otro. Ejemplo: Las alas de un avión son más grandes durante el despegue y durante el vuelo su tamaño reduce.
2. Separación en el espacio. Es una característica que se hace más grande en un cierto lugar y más pequeña en otro. Ejemplo: un conglomerado de pequeños negocios independientes.
3. Separación entre las partes y el todo. Es una característica que tiene un valor a nivel sistema y un valor opuesto a nivel componente. Ejemplo: La cadena de una bicicleta es rígida a nivel micro, pero flexible a nivel macro.

4. Separación de acuerdo a una condición. Una característica que es alta bajo una condición y pequeña bajo otra. Ejemplo: Una coladera es porosa con respecto al agua, pero rígida con respecto a los sólidos.

La identificación de las contradicciones físicas junto con el uso de los principios de separación constituye el uso de la abstracción para resolver un problema(30).

Utilizando los conceptos de idealidad y contradicciones técnicas es posible controlar substancialmente el proceso de solución de problemas de invención. La función de idealidad controla la dirección de búsqueda, mientras que la contradicción técnica indica el obstáculo que debe ser removido. Sin embargo, estas contradicciones se ocultan ingeniosamente dentro de la declaración del problema. Esto requiere una táctica racional que permita paso a paso progresar hacia la solución del problema. El algoritmo de solución de problemas de invención (ARIZ-85C)(33), proporciona un marco de trabajo para llegar a una solución concepto.

La figura 18 (33) muestra el esquema conceptual de la aplicación de ARIZ.

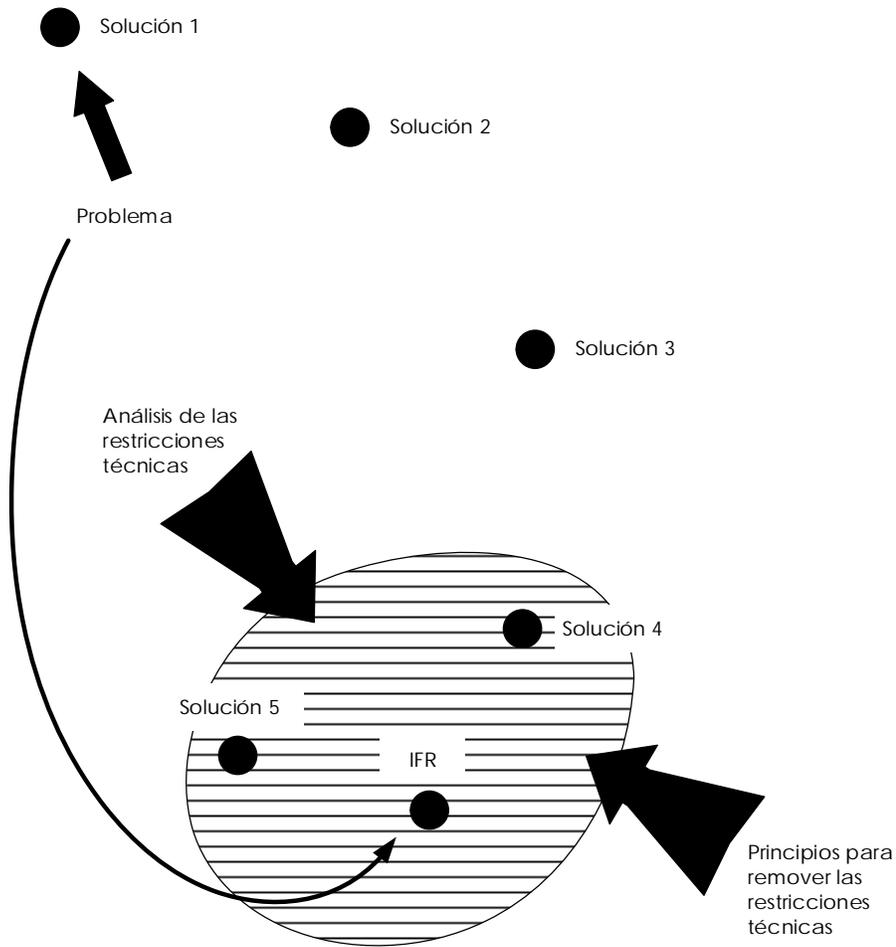


Figura 18: Aplicación del algoritmo de ARIZ.

El algoritmo ARIZ-85C es adaptable, es decir, el mismo problema puede ser resuelto a través de diferentes enfoques, dependiendo de quién esté resolviendo el problema y cómo lo tenga que resolver. ARIZ-85C no ignora la personalidad individual del analista, por lo contrario, estimula la utilización de la creatividad del inventor, por lo tanto, el camino desde la declaración del problema hasta la solución puede ser llevado a cabo de maneras diferentes. El inventor actúa acorde a su experiencia, conocimiento y creatividad. El algoritmo únicamente mantiene al analista a salvo de cometer un error grave(33).

La metodología TRIZ ha sido ampliamente utilizada en muchos ámbitos de la vida.

Christian Spreafico y Davide Russo(35), en su artículo: "TRIZ industrial case studies, a critical survey" publicado en el año 2015, determinan que en un estudio de más de doscientas publicaciones, de diversas fuentes, un poco más del 50% están relacionadas con los campos de energía y electricidad, aparatos domésticos, ingeniería mecánica, automotriz y electrónica. Las empresas utilizan TRIZ para mejorar la calidad, reducir la contaminación, lanzamiento de un nuevo producto, mejora de la productividad, innovación en el proceso/producto, reducción de consumo de energía, mejora en la seguridad y reducción de costos.

Continuando con la misma línea de investigación, TRIZ ha sido utilizado con estos propósitos:

- Análisis de etapas tempranas del diseño.
- Optimización y robustecimiento del diseño.
- Toma de decisión y pronósticos.
- Eco-diseño.
- Diseño para X.

## 2.6 ALGORITMO ARIZ-85C.

El algoritmo ARIZ 85-C es un conjunto de procedimientos lógicos secuenciales para analizar una situación inicial y determinar soluciones efectivas utilizando conceptos fundamentales de TRIZ. Consideremos que una situación inicial puede ser transformada en un problema particular cuando introducimos restricciones a las funciones, es decir, cuando identificamos sus contradicciones técnicas.

El significado de ARIZ es algoritmo para la solución de problemas de innovación, (*Algoritm Reshenia Izobrietatelskij Zadach*, acrónimo en el idioma ruso). La codificación 85C es la versión documentada (37).

El algoritmo desempeña tres funciones principales (36):

1. Responder las preguntas de cómo utilizar los elementos individuales de TRIZ y, organizarlos de manera que obtengamos la mejor solución posible,
2. Funciona como un algoritmo analítico para el pensamiento humano (no para un pensamiento binario computacional) que gentilmente nos guía de una declaración inicial de un problema a una elegante solución innovadora, y
3. Nos hace más creativos, innovadores y nos ayuda a evitar la inercia psicológica, que es nuestro enemigo a vencer.

La estructura de trabajo del algoritmo ARIZ-85C se conforma de 4 etapas y nueve pasos principales, mencionados a continuación(37):

Etapa 1: Situacional.

Paso 1: Análisis del problema. El propósito principal es la transición de una situación problemática inicial indefinida a una definición extremadamente simplificada y claramente formulada, llamada: modelo del problema.

Paso 2: Modelación del problema. El objetivo principal es identificar los recursos disponibles (espacio, tiempo, sustancias y campos) que pueden ser útiles para el problema.

Etapa 2: Operacional.

Paso 3: Definición del Resultado Ideal Final. El resultado del tercer paso es la imagen formulada de la situación ideal y las contradicciones físicas que obstaculizan el logro de la situación ideal deben ser identificadas.

Paso 4: Utilización y aplicación de recursos. La utilización de procedimientos sistémicos para aumentar la disponibilidad de los recursos.

Paso 5: Aplicando la base del conocimiento. Se moviliza toda la experiencia acumulada en la base del conocimiento de TRIZ.

Etapa 3: Síntesis.

Paso 6: Cambiando o sustituyendo el problema. Los problemas simples son resueltos por la eliminación de las contradicciones físicas. Los problemas complejos (no típicos) usualmente se asocian con la declaración del problema,

que termina con la remoción de las restricciones iniciales, creadas por la inercia mental.

Paso 7: Analizando el método de resolución de contradicciones físicas. El propósito principal es la verificación de la calidad de la solución concepto obtenida.

Paso 8: Aplicación de la Solución del Problema. La idea de innovación no solo resuelve el problema en particular, sino también provee una aplicación universal a problemas análogos. El propósito del octavo paso es maximizar la utilización de los recursos descubiertos al obtener la solución concepto.

Etapa 4: Perfección.

Paso 9: Analizar el proceso de solución de problemas. El problema solucionado a través de ARIZ tiene que incrementar la creatividad potencial de la persona, esto se logra con la comprobación del proceso de resolución de problema de invención.

El flujo del algoritmo es muy dinámico y evalúa constantemente la solución del problema. La figura 19 esquematiza el flujo de los pasos del algoritmo ARIZ-85C (38).

En el anexo A (37) se muestra la estructura de trabajo detallada del algoritmo ARIZ-85C.

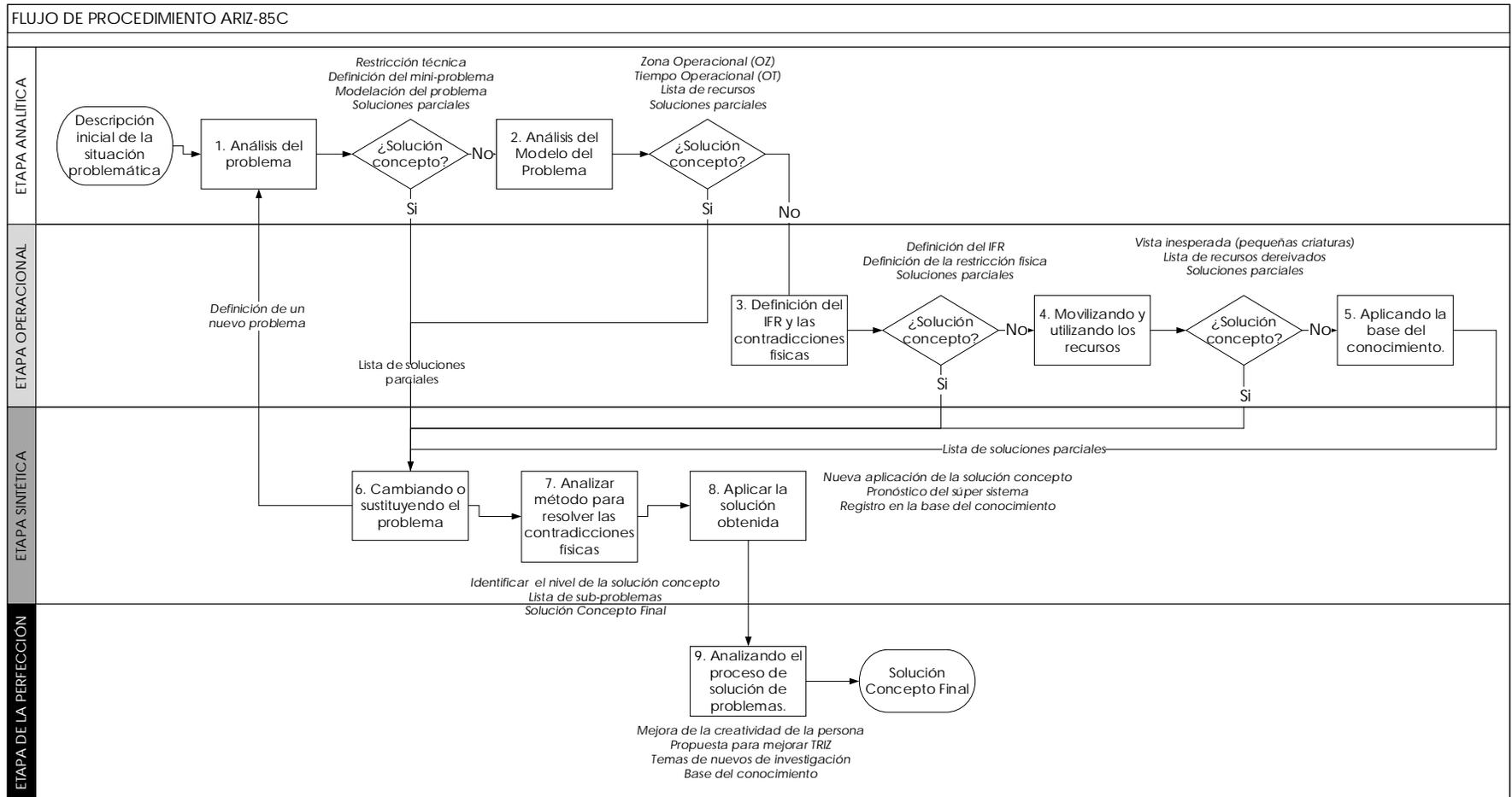


Figura 19: Flujo del algoritmo ARIZ-85.

## CAPÍTULO 3 PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN.

### 3.1 APLICACIÓN DEL ALGORITMO ARIZ-85C

Las siguientes secciones detallan el cómo se aplica el algoritmo a través de la abstracción del problema.

#### 3.1.1 Paso 1: Análisis del problema.

##### Tarea 1.0: Preparación de la red de flujo de problemas (NoP).

Partiendo desde la declaración de nuestro problema a estudiar y utilizando los elementos de una línea de ensamble móvil estudiados anteriormente, la figura 20 muestra la red de flujo de problemas y sus soluciones potenciales.

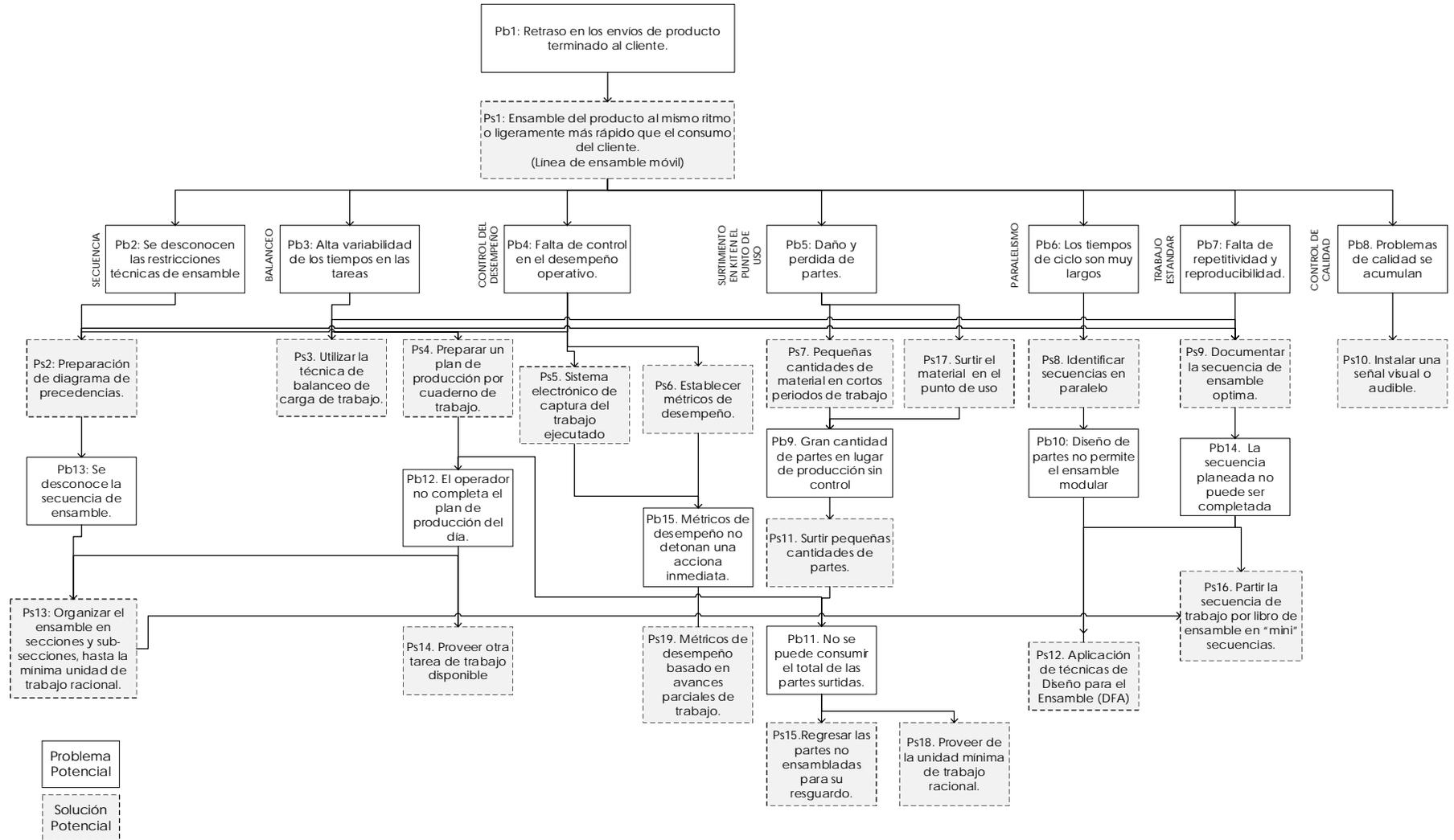


Figura 20: Red de flujo de problemas (NoP).

La red de flujos de problemas nos muestra 15 problemas y 19 soluciones potenciales. Se tomaron en cuenta los 7 elementos principales que conforman una línea de ensamble móvil, de los cuales, se planteó un problema potencial por cada uno de ellos. La tabla 3 muestra la lista de problemas potenciales y soluciones potenciales de la red de flujos de problemas (NoP, Network of Problems).

Tabla 3. Problemas potenciales y soluciones potenciales.

Problema Potencial		Solución Potencial	
Pb1	Retrasos en los envíos del producto terminado al cliente. El flujo del trabajo no tiene "Algo" que marque el ritmo del progreso de producción.	Ps1	Mover el producto de manera continua al mismo ritmo de consumo del cliente, mientras el trabajo es realizado.
Pb2	Se desconocen las restricciones técnicas y de espacio que afectan la secuencia de ensamble.	Ps2	Preparación de diagrama de precedencias basado en las restricciones técnicas y de espacio.
Pb3	Alta variabilidad de los tiempos en las tareas asignadas a los recursos.	Ps3	Utilizar la técnica de balanceo de carga de trabajo: Ponderación de rango posicionado y calcular la eficiencia del balanceo.
Pb4	Se desconoce el impacto de la falta de control en el desempeño operativo.	Ps4	Preparar un plan de producción por cuaderno de trabajo por día por empleado.
Pb5	Daño de partes en piso de producción, mucho manejo.	Ps5	Instalar un sistema electrónico de captura del trabajo ejecutado.
Pb6	Los tiempos de ciclo son muy largos	Ps6	Establecer métricas de desempeño por cuadernos de ensamble completados.

Problema Potencial		Solución Potencial	
Pb7	Falta de repetitividad y reproducibilidad en la ejecución de las tareas.	Ps7	Establecer métricas de desempeño.
Pb8	Falta de repetitividad y reproducibilidad en la ejecución de las tareas.	Ps8	Identificar secuencias de ensamble que puedan realizarse en paralelo.
Pb9	Gran cantidad de partes en lugar de producción sin control.	Ps9	Documentar la secuencia de ensamble óptima.
Pb10	Diseño de partes no permite el ensamble modular.	Ps10	Instalar una señal visual o audible o ambas para llamar la atención inmediata.
Pb11	No se puede consumir el total de las partes en el KIT / Cuaderno de trabajo.	Ps11	Surtir en el punto de uso el conjunto de pequeñas cantidades de partes para un máximo de 2 h de trabajo.
Pb12	El operador no completa el cuaderno de trabajo.	Ps12	Aplicación de técnicas de Diseño para el Ensamble (DfA).
Pb13	Se desconoce la secuencia de ensamble a una unidad de trabajo más pequeña.	Ps13	Organizar el ensamble en secciones y sub-secciones, hasta la mínima unidad de trabajo racional.
Pb14	La secuencia planeada en el cuaderno de ensamble no puede ser completada.	Ps14	Proveer otra tarea de trabajo disponible
Pb15	Métricas de desempeño no detonan una acción inmediata de impacto (No se sabe con facilidad qué parte tiene qué problema).	Ps15	Regresar las partes no ensambladas para su resguardo y reprogramación.
	Espacio vacío	Ps16	Partir la secuencia de trabajo por cuadernos de ensamble en

Problema Potencial		Solución Potencial	
			“mini” secuencias de trabajo (unidades mínimas de trabajo racional).
	Espacio vacío	Ps17	Surtir el material del cuaderno de ensamble en el punto de uso.
	Espacio vacío	Ps18	Proveer de la unidad mínima de trabajo racional (el operador de ensamble no almacena en el punto de uso partes y componentes).
	Espacio vacío	Ps19	Métricas de desempeño basadas en avances parciales de trabajo. Una unidad mínima de trabajo racional (por parte o conjuntos de partes a ensamblar).

El análisis de red de flujos de problemas (NoP) nos arroja que las soluciones potenciales 13, 14, 16, 18 y 19 relacionan la mínima cantidad de trabajo racional como elemento común. Esto nos permite partir hacia una definición del problema más precisa y encontrar el sistema de restricción a mitigar.

#### Tarea 1.1: Formulación del problema específico.

El objetivo de esta tarea es encontrar el sistema de restricciones técnicas partiendo de una definición específica del problema.

Tomando en cuenta el planteamiento de la hipótesis de trabajo y el análisis de la red de flujo de problemas (NoP), la descripción del problema específico se queda de la siguiente forma:

La secuencia de ensamble actual no tiene un elemento que permita adaptarse a los cambios no planeados y mantener la repetitividad y eficiencia operacional esperada, cuando se enfrenta a una o varias situaciones problemáticas.

El parámetro que genera una contradicción técnica en esta situación es la secuencia de ensamble, por lo tanto, el sistema de contradicciones técnicas queda planteado de la siguiente manera:

Tc1: La secuencia de ensamble estándar provee la repetitividad y eficiencia en el desempeño del progreso del trabajo, pero no se ajusta a cambios no planeados, derivado de una situación problemática presentada.

Tc2: La secuencia de ensamble por la "mínima unidad de trabajo racional" se adapta a los cambios no planeados, pero afecta a la repetitividad y eficiencia en el desempeño del progreso del trabajo.

La figura 21 muestra el esquema de relación del problema específico y las restricciones técnicas planteadas.

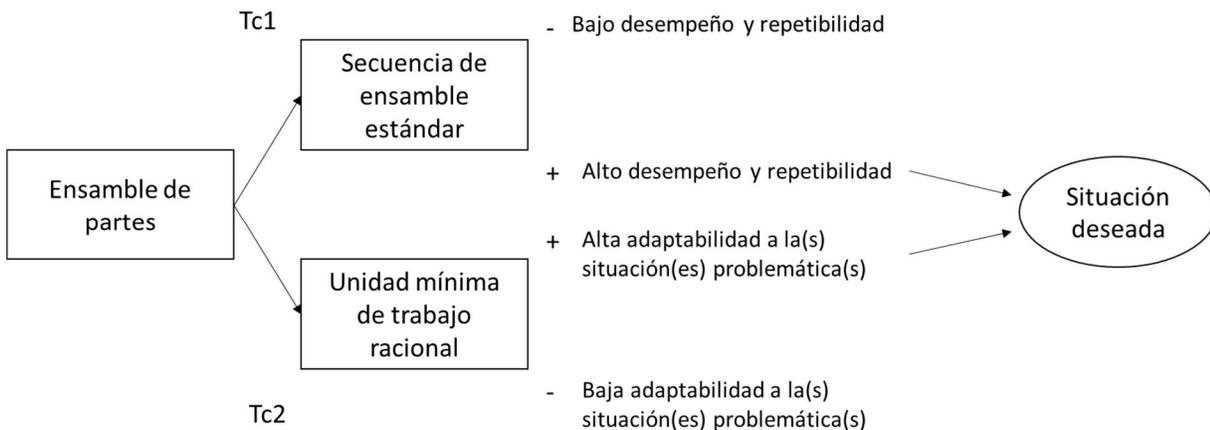


Figura 21: Formulación de la contradicción técnica.

### Tarea: 1.2 Definiciones de los elementos de conflicto.

Los elementos que entran en el conflicto son:

- Producto o resultado: partes ensambladas (cantidad).
- Herramientas: competencia para realizar el ensamble (repetitividad).

### Tarea: 1.3 Formulación del sistema de contradicciones.

El objetivo de esta tarea es crear el modelo de nuestro problema e identificar el tipo de relación que existe. Se examinan tres elementos; 1) secuencia de ensamble estándar, 2) desempeño y repetitividad y 3) adaptación a la situación problemática.

El efecto entre el desempeño y repetitividad contra la capacidad de adaptación a la situación problemática es insuficiente.

La figura 22 muestra la representación del modelo.

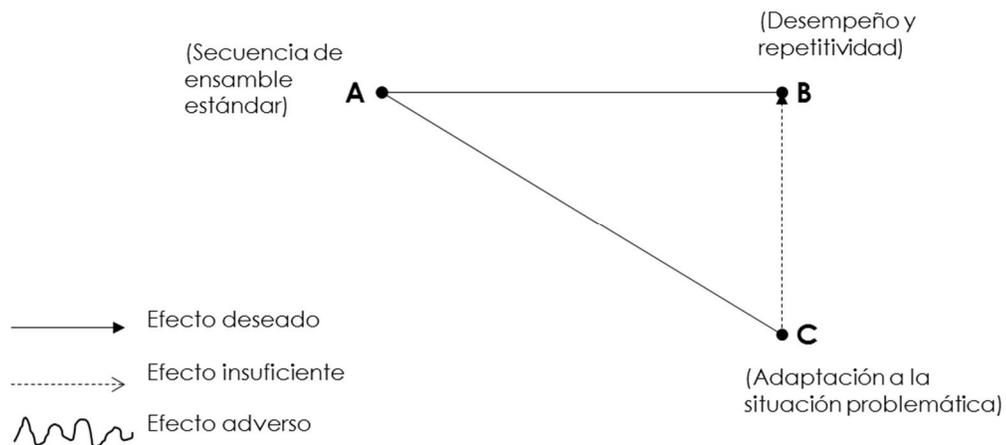


Figura 22: Representación gráfica del modelo.

### Tarea: 1.4 Selección del sistema de contradicción a desarrollar.

Tomando en cuenta el análisis de red de flujos de problemas y considerando que la función principal es minimizar la cantidad de partes detenidas en el ensamble, la contradicción seleccionada es: el ensamble por la "unidad mínima de trabajo" se

adapta a los cambios no planeados, pero afecta a la repetitividad y eficiencia en el desempeño del progreso del trabajo.

#### Tarea 1.5: Reforzamiento (intensificación) del conflicto.

Intensificar el conflicto indicando el estado extremo (acción) de los elementos.

Para nuestro análisis, se considera que el recurso humano desconoce el ensamble de las partes. Nunca se ha probado su conocimiento y habilidad, por lo tanto, el conflicto intensificado es: existe un desconocimiento del ensamble, lo que afecta a la repetitividad del trabajo a pesar de tener una mínima cantidad de trabajo racional a realizar.

#### Tarea 1.6: Descripción del modelo del problema.

Este es el último paso de la fase de análisis situacional del algoritmo. La modelación del problema culmina con la descripción específica.

Podemos describir nuestro problema como:

1. Par de conflicto: Partes ensambladas y conocimiento de la competencia.
2. Conflicto intensificado: El conocimiento de la competencia es nulo, lo que afecta a la repetitividad del trabajo a pesar de tener una mínima cantidad de trabajo racional a realizar.
3. Descripción del problema específico: Es necesario encontrar el elemento "X" en la secuencia de ensamble estándar que ayude a mantener la repetitividad y alto desempeño del operador y que permita continuar con el ensamble ante una situación problemática.

La figura 23 muestra una representación esquemática de la modelación del problema.

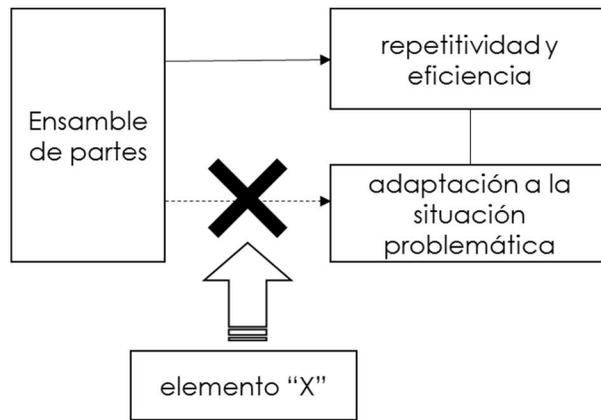


Figura 23: Modelación del problema.

Tarea 1.7: Aplicación de los estándares de inventiva.

Con el objetivo de usar los principios de inventiva, el modelo analítico del problema se transforma en un modelo campo-sustancia del problema. Esto nos lleva al segundo paso del algoritmo.

La figura 24 muestra el esquema del modelo campo-sustancia del problema.

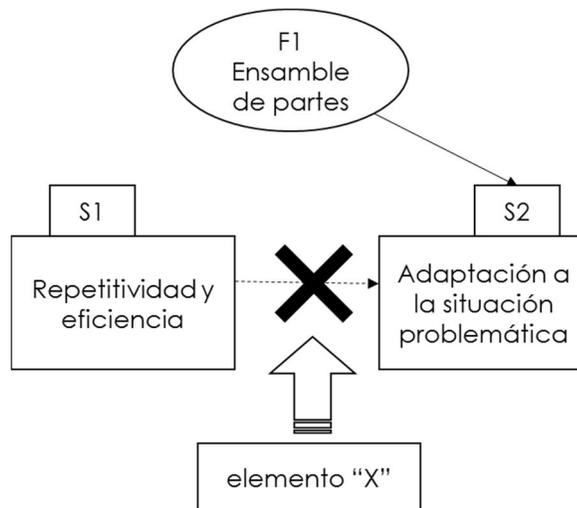


Figura 24: Modelo campo-sustancia del problema.

### 3.1.2 Paso 2: Análisis del modelo del problema.

El objetivo de este paso es crear una lista completa de recursos de tiempo, espacio, sustancia y de campo disponible para resolver el problema.

#### Tarea 2.1: Definición de la zona operacional (OZ).

La zona operacional (OZ) es el espacio donde el conflicto indicado aparece en el modelo del problema.

Nuestro análisis nos lleva a identificar el ensamble de las partes como zona operacional (OZ).

#### Tarea 2.2: Definición del tiempo operacional (OT).

Se debe identificar el tiempo operativo cuando hay recursos disponibles de tiempo. El tiempo operativo (OT) se identifica en dos momentos: 1) justo cuando ocurre el conflicto (T1) y 2) el tiempo antes del conflicto (T2).

Para nuestro análisis quedó de la siguiente manera:

T1: Es el tiempo que al operador le toma realizar un ensamble con falta de conocimiento.

T2: Es el tiempo utilizado por el operador antes de encontrar una situación problemática.

#### Tarea 2.3: Definición de los recursos sustancia-campo (SFR).

Los recursos sustancia-campo (SFR) son recursos internos del sistema, recursos externos disponibles y recursos del súper-sistema.

El objetivo de esta tarea es identificar los recursos disponibles que posteriormente serán evaluados para identificar la(s) solución(es) potenciales, considerando la relación campo-sustancia. La figura 24 muestra dicha relación.

El análisis del problema nos arroja la siguiente información:

Recursos internos (herramientas):

- secuencia de la unidad mínima de trabajo racional.
- conocimiento de la competencia (tipo, nivel de habilidad y experiencia).

Recursos externos (medio ambiente):

- secuencia de ensamble estándar.
- capacitación y formación, ya sea interna o externa.

Recursos del súper sistema:

- Diseño para el ensamble.
- Reclutamiento de personal.

Hasta aquí hemos terminado con la fase situacional del problema, donde se han utilizado diversas tácticas para desmenuzar la situación en un problema más acotado, lo que nos permitirá identificar las contradicciones físicas en el problema.

### 3.1.3 Paso 3: Definición del Resultado Ideal Final (IFR).

El objetivo de este paso es la identificación de la Contradicción Física (PhC) que impide el logro de la IFR.

#### Tarea 3.1: Formulación del IFR-1.

Tenemos que encontrar un elemento "X" sin complicar el sistema y sin efectos colaterales perjudiciales que, elimine *<indicar la acción dañina>*, durante el *< tiempo operacional (OT)>* y dentro de la *< zona operacional (OZ)>* y, mantener la disponibilidad de la herramienta para proveer *<indicar la acción útil>*.

Entonces la IFR-1 está de la siguiente manera:

Un elemento "X" que permite continuar con el progreso del trabajo y minimiza la baja repetitividad y eficiencia durante el proceso de ensamble cuando se enfrenta a una situación problemática.

#### Tarea 3.2: Intensificar la definición del IFR-1.

Esta tarea intensifica la formulación de IFR-1 con la introducción de requerimientos adicionales, utilizando el análisis de SFR. Para esto usamos la siguiente guía:

“Los <recursos existentes> eliminan el <efecto negativo> en la <zona operativa> dentro del <tiempo operativo> y provee el <efecto útil> sin complicar el sistema y sin dañar algún efecto lateral”.

Nuestra IFR-1 intensificada con un recurso resultó de la siguiente manera:

“La <secuencia de ensamble con la unidad mínima de trabajo racional> elimina la <baja repetitividad y poca eficiencia en el ensamble>, en el momento en que el <operador realiza el ensamble> derivado de un <paro por una situación problemática> que permita mantener <el progreso del trabajo>”.

Considerando otro recurso, podemos describirla así:

“El <conocimiento de la competencia (tipo, nivel de habilidad y experiencia)> elimina la <baja repetitividad y poca eficiencia en el ensamble>, en el momento que el <operador realiza el ensamble> derivado de un <paro por una situación problemática> que permita mantener <el progreso del trabajo>”.

La figura 25 muestra esta inclusión de un recurso al modelo campo-sustancia del problema.

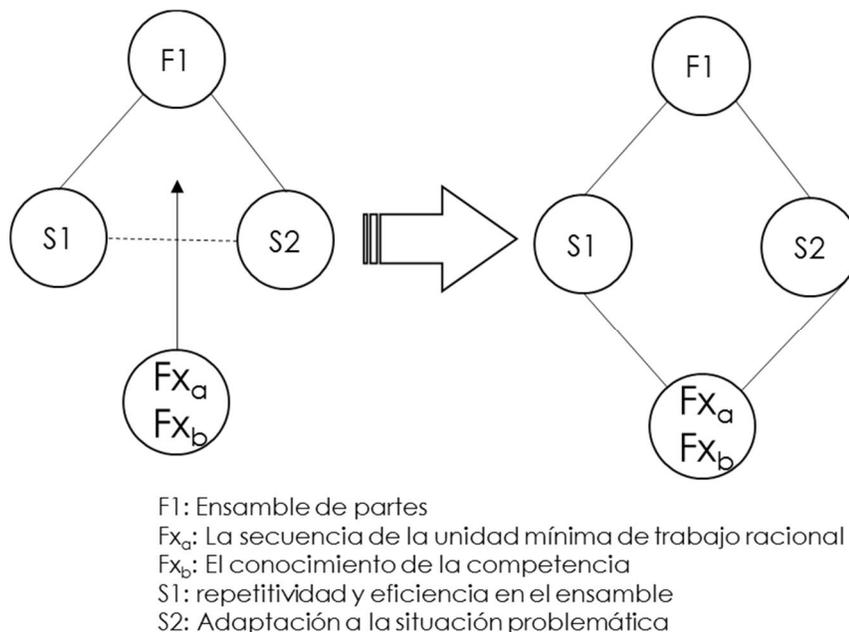


Figura 25: Intensificación de IFR-1.

### Tarea 3.3: Identificar las contradicciones físicas.

Para poder definir la contradicción física en nuestro modelo de campo-sustancia utilizaremos el siguiente modelo: El <elemento> (o parte de la zona operacional) tiene que <indicar la característica> para <desempeñar> y no tiene que <indicar la característica> para <indicar la acción>.

Por lo tanto, podemos determinar lo siguiente:

La <secuencia por la unidad mínima de trabajo racional> debe <permitir la repetitividad y eficiencia del ensamble> y adaptarse al <conjunto de competencias> actuales, pero no debe ser lo < suficientemente desglosada > que demande una <reconfiguración> completa de la secuencia estándar de ensamble del avión.

La figura 26 esquematiza el efecto de la contradicción física contra las sustancias.

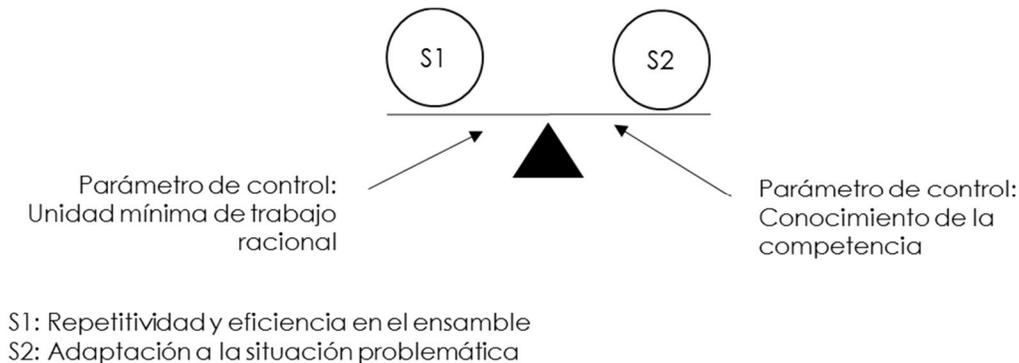


Figura 26: Efecto de la contradicción física.

### Tarea 3.5: Formulación del IFR-2.

La zona operacional (OZ) tiene que indicar los estados opuestos durante el tiempo operacional indicado.

La formulación de nuestra IFR-2 queda de la siguiente manera:

La secuencia de <ensamble de partes> tiene que distinguir (desmenuzar) los grupos de competencias requeridos por una persona para reducir el tiempo desde que <el

*operador se detiene por una situación problemática hasta que la parte es ensamblada>.*

Con esto podemos identificar una solución potencial a nuestro problema:

“La secuencia de ensamble debe estar basada en el conjunto o grupo de competencias necesarios para realizar el ensamble de las partes”.

La formulación de la IFR-2 nos permitió identificar una solución factible potencial para revertir el efecto adverso entre las sustancias.

Utilizando la base del conocimiento de TRIZ es necesario analizar las contradicciones físicas utilizando los principios de separación para eliminación de las mismas.

Esto nos lleva a la tarea 5.3 del algoritmo del paso No. 5

### 3.1.4 Paso 5: Aplicación la base del conocimiento TRIZ.

#### Tarea 5.3: Aplicando los principios de separación para eliminación de contradicciones físicas.

Separación en tiempo: La secuencia de ensamble de la unidad mínima de trabajo racional no debería solicitar dos o más grupos distintos de conocimiento al mismo momento.

Separación en espacio: La secuencia de ensamble de la unidad mínima de trabajo racional no debería solicitar dos o más grupos distintos de conocimientos en el mismo espacio donde se ejecuta el trabajo.

Hasta aquí hemos terminado con la fase de análisis situacional y operacional del algoritmo. Se ha identificado una solución potencial al problema y se analizaron los principios de separación para eliminar el efecto adverso de la contradicción física.



La solución concepto.

La preparación de una secuencia de ensamble por la unidad mínima de trabajo racional, basándose en la clasificación y agrupación de las competencias requeridas, ayuda a minimizar el trabajo detenido en el ensamble de partes, ante una o varias situaciones problemáticas.

La figura 28 muestra el esquema de la solución concepto:

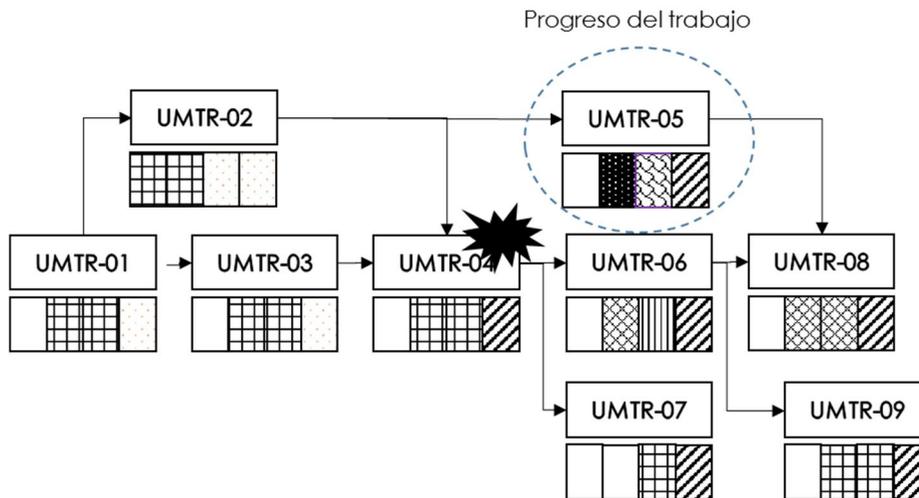


Figura 28: Solución concepto.

### 3.1.6 Paso 7: Análisis del método de resolución de contradicciones físicas.

El objetivo es verificar la calidad del concepto de solución obtenida.

#### Tarea 7.2 Pre-evaluación de la solución del problema.

- ¿El concepto de solución proporciona el requisito principal de IFR-1 (el elemento sin complicar el sistema)?

Recordemos que la IFR-1 se describió de la siguiente manera:

Un elemento "X" que permite continuar con el progreso del ensamble y minimiza la baja repetitividad y eficiencia en el trabajo, cuando se enfrenta a una situación problemática.

El concepto solución proporciona el elemento "X" a la declaración del IFR-1 ya que rompe las unidades de trabajo actuales, permitiendo identificar porciones más pequeñas factibles de re-agrupar por el tipo de competencia requerida, minimizando así, la detección del trabajo ante una situación problemática.

b) ¿Qué contradicción física (si la hay) se resuelve con el concepto de solución?

Recordemos que la contradicción física se planteó de la siguiente manera:

La secuencia por la unidad mínima de trabajo racional debe permitir la repetitividad y eficiencia del ensamble y adaptarse al conjunto de competencias actuales, pero no debe ser lo suficientemente desglosada que demande una reconfiguración completa de la secuencia estándar de ensamble del avión. El concepto solución permite definir la unidad mínima de trabajo racional, es decir, un conjunto de competencias para realizar una porción del trabajo más reducida. Esta agrupación permite establecer una secuencia más adaptable ante situaciones problemáticas sin reconfigurar la manufactura del avión.

c) ¿El nuevo sistema contiene al menos un elemento fácilmente controlable? ¿Qué elemento? ¿Cómo se controla?

El concepto solución contiene como elemento controlable; el conjunto de actividades y conocimiento que conforman una competencia. Cada cuaderno de ensamble puede ser disgregado en unidades mínimas de trabajo racional y estas a su vez relacionadas con las competencias convenientemente definidas.

La reagrupación de las competencias es un elemento controlable, es decir, se puede regresar al estado original y cambiar de nuevo sin complicaciones.

d) ¿El concepto de solución encontrado para el Modelo de Problema de "un solo ciclo" se ajusta a las condiciones reales?

El concepto solución se ajusta a las condiciones reales del problema, ya que el tipo de proceso de producción de una aeronave puede ser desglosado en múltiples actividades y estas pueden ser reagrupadas.

### Tarea 7.3: Evaluación de problemas potenciales con la aplicación de la solución concepto.

- a) ¿Qué problemas potenciales podrían aparecer durante el diseño de realización del nuevo sistema técnico? Anotar los posibles problemas que pueden requerir invención, diseño, cálculo, la superación de desafíos organizacionales, etc.

La solución concepto no podría ser aplicada en toda la secuencia de ensamble actual de la aeronave. Podrían existir ciertos ensambles en que la secuencia por la unidad mínima de trabajo racional no tendría ventaja alguna, esto por restricciones de diseño de las partes.

### 3.2 MÉTODO DEL EXPERIMENTO.

La siguiente sección refiere al paso No. 8 del algoritmo que implica la aplicación del concepto solución determinado.

A continuación se hace una descripción del contenido del experimento.

#### 1. Objetivo general:

Probar la hipótesis de trabajo planteada para este estudio utilizando la solución concepto determinada.

#### 2. Objetivos específicos:

- Probar la factibilidad de implementación del concepto solución.
- Determinar y comparar cuantitativamente la condición actual contra la solución concepto, considerando los 3 tipos de problemas más recurrentes  
Proveer una secuencia de ensamble basada en las unidades mínimas de trabajo racional.

#### 3. Alcance:

El experimento se realizará en una estación de trabajo en particular, en la cual se lleva a cabo el ensamble de un componente aeroespacial menor. Queda fuera de este experimento la modificación de los cuadernos de ensamble y el plan de producción actual.

La figura 29 muestra una representación gráfica del tipo de ensamble.



Figura 29: Representación del componente aeroespacial.

El alcance de este experimento es evaluar únicamente el ensamble de los soportes metálicos, ya que representan un conjunto de competencias y actividades genéricas de ensamble que se pueden extrapolar a otros tipos de componentes fácilmente.

Realizando el análisis de tipos y cantidad de partes, tenemos 95 partes a ensamblar en 66 números de parte distintos, los cuales se distribuyen en 28 cuadernos de ensamble.

#### 4. Pasos del experimento:

Paso 1: Identificar los tipos de actividades actuales de los cuadernos de ensamble.

Paso 2: Realizar un mapeo a los cuadernos de ensamble y los tipos de actividades.

Paso 3: Agrupar las actividades/competencias en UMTR (unidad mínima de trabajo racional).

Paso 4: Determinar las zonas de trabajo en el avión que son afectadas.

Paso 5: Preparación de la secuencia de ensamble por la unidad mínima de trabajo racional, basándose en la clasificación y agrupación de las competencias requeridas.

Paso 6: Análisis comparativo entre la secuencia de ensamble actual y la propuesta por el concepto de solución.

## CAPÍTULO 4 RESULTADOS.

### 4.1 EXPERIMENTACIÓN.

#### 4.1.1 Paso 1: Identificación de los tipos de actividades.

Los 28 cuadernos de ensamble a analizar tienen las siguientes actividades;

1. Medición y trazado.
2. Barrenado.
3. Localización y centrado.
4. Avellanado.
5. Limpieza de área.
6. Instalación.
7. Aplicación de pintura.
8. Remoción de pintura.
9. Preparación de superficie.
10. Enmascarado y desenmascarado.
11. Aplicación de químicos.
12. Prueba eléctrica.
13. Aplicación de torque.
14. Aplicación de sellador.
15. Inspección visual.

#### 4.1.2 Paso 2: Mapeo de los cuadernos de ensamble y los tipos de actividades.

La tabla No. 4 representa la distribución de las actividades que se realizan por cuadernos de ensamble. Los recuadros sombreados en gris indica la actividad que aplica.

Son 15 tipos de actividades, las cuales se distribuyen en 28 cuadernos de ensamble.

Tabla 4. Mapa de actividades y cuadernos de ensamble

Actividades / Cuadernos de ensamble	Medición y Trazado	Barrenado	Localización y centrado	Avellanado	Limpieza area	Instalación (sujeción)	Pintura	Remoción de pintura	Preparación de superficie.	Enmascarar / desensamcarar	Aplicación de químicos	Prueba eléctrica (conductividad)	torque	sellador	Inspección visual
1 XA0001															
2 XA0002															
3 XA0003															
4 XA0004															
5 XA0005															
6 XA0006															
7 XA0007															
8 XA0008															
9 XA0009															
10 XA0010															
11 XA0011															
12 XA0012															
13 XA0013															
14 XA0014															
15 XA0015															
16 XA0016															
17 XA0017															
18 XA0018															
19 XA0019															
20 XA0020															
21 XA0021															
22 XA0022															
23 XA0023															
24 XA0024															
25 XA0025															
26 XA0026															
27 XA0027															
28 XA0028															

Aplica  
 No aplica

#### 4.1.3 Paso 3: Agrupar las actividades en unidad mínima de trabajo racional (UMTR).

La agrupación de las actividades en unidades mínima de trabajo racional se determinó realizando una observación directa en el momento de la ejecución del trabajo. Se tomó en cuenta en donde se podría romper la secuencia actual que permitiera progresar con el trabajo a pesar de tener problemas, como los mencionados a continuación:

- Faltante de alguna herramienta.
- Faltante de algún número de parte.
- Una no conformidad en el ensamble (defecto de calidad).

Se realizaron entrevistas con los técnicos de ensamble y se llegó a esta clasificación y agrupación en las siguientes unidades mínimas de trabajo racional (UMTR):

1. Trazado para el posicionamiento
2. Realización del barrenado.
3. Instalación.
4. Preparación de superficie.
5. Prueba eléctrica.
6. Limpieza y aplicación de pintura.
7. Aplicación de sellador.
8. Aplicación de torque.
9. Inspección visual.

La figura 30 muestra la relación de las actividades y las unidades mínima de trabajo racional (UMTR).

Se puede concluir que es fácil y factible fraccionar los cuadernos de ensambles actuales en unidades mínimas de trabajo racional (UMTR) y agruparlos acorde a su tipo de competencia.

Podemos observar que incluso de 15 actividades iniciales, se redujo a 9 unidades mínimas de trabajo racional (UMTR). Por ejemplo; las actividades de remoción de pintura, preparación de la superficie y enmascarado/desenmascarado se agrupan en una UMTR llamada preparación de superficie y como consecuencia un solo operador puede llevarlas a cabo.

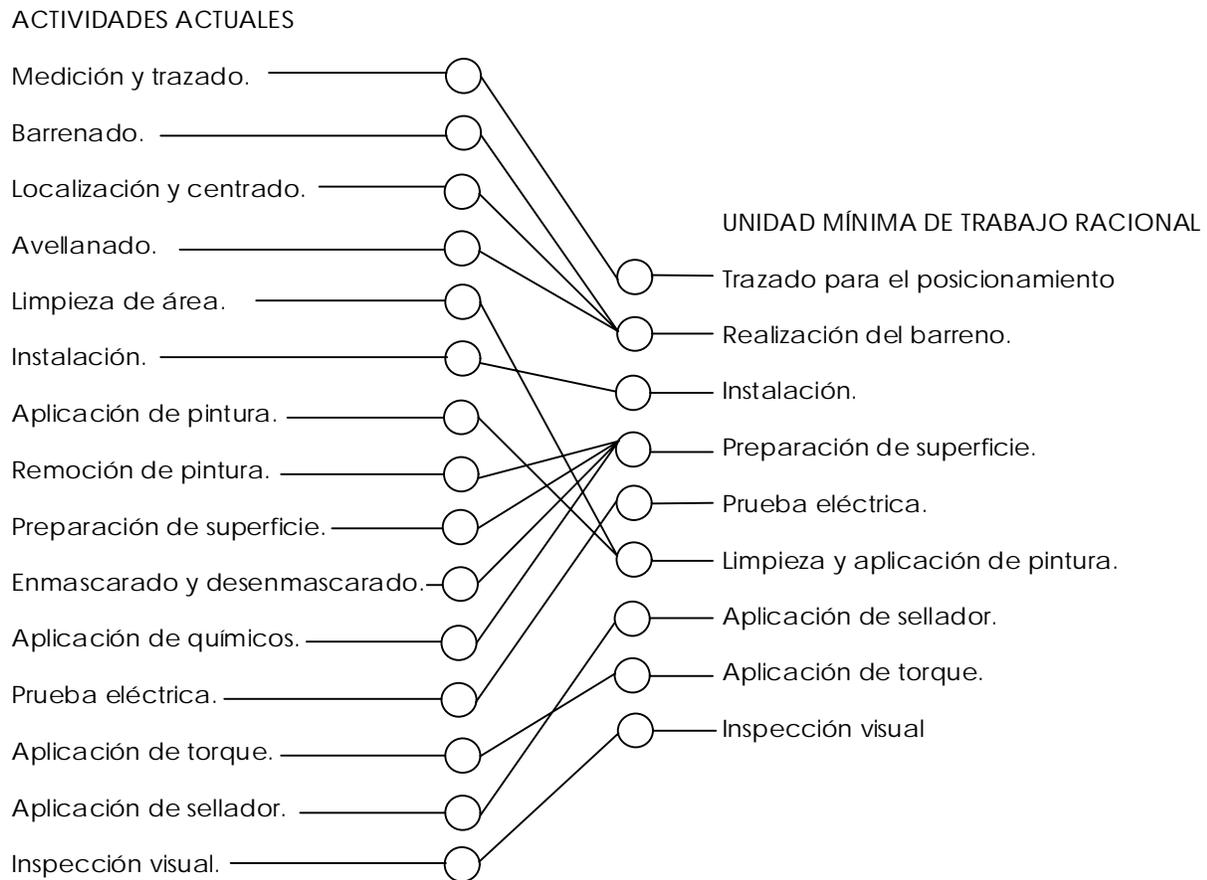


Figura 30: Relación de actividades y unidades mínima de trabajo racional (UMTR).

#### 4.1.4 Paso 4: Determinar las zonas de trabajo en el avión que son afectadas.

La identificación de las zonas de trabajo en el avión ayuda a optimizar la ejecución del ensamble y poder mantener una densidad del recurso humano fija y focalizada que mejore la eficiencia del trabajo.

Dentro del componente solo cabe una sola persona sentada en el interior. La densidad de recurso humano influye en la determinación de las zonas del trabajo.

Para el experimento se determinaron 3 zonas de trabajo: frente, en medio y trasera.

4.1.5 Paso 5: Preparación de la secuencia de ensamble por la unidad mínima de trabajo racional.

El mapeo de actividades contra cuadernos de ensamble nos permitió identificar ciertas similitudes durante el ensamble de soportes metálicos.

La figura 31 muestra un diagrama de árbol con las combinaciones de secuencias de ensamble por las unidades mínima de trabajo racional (UMTR).

Se puede observar que se tienen 10 secuencias de ensamble diferentes para ensamblar los 95 soportes metálicos requeridos.

En conclusión, el ensamble se simplifica ya que la solución concepto utiliza 9 actividades diferentes distribuidas en 10 secuencias de ensamble, en comparación con el ensamble actual, que utiliza 15 actividades distribuidas en 28 cuadernos de ensamble. Esto ayudará a mantener a los operadores enfocados en las mismas unidades mínimas de trabajo racional (UMTR) y así, aumentar su habilidad en el ensamble.

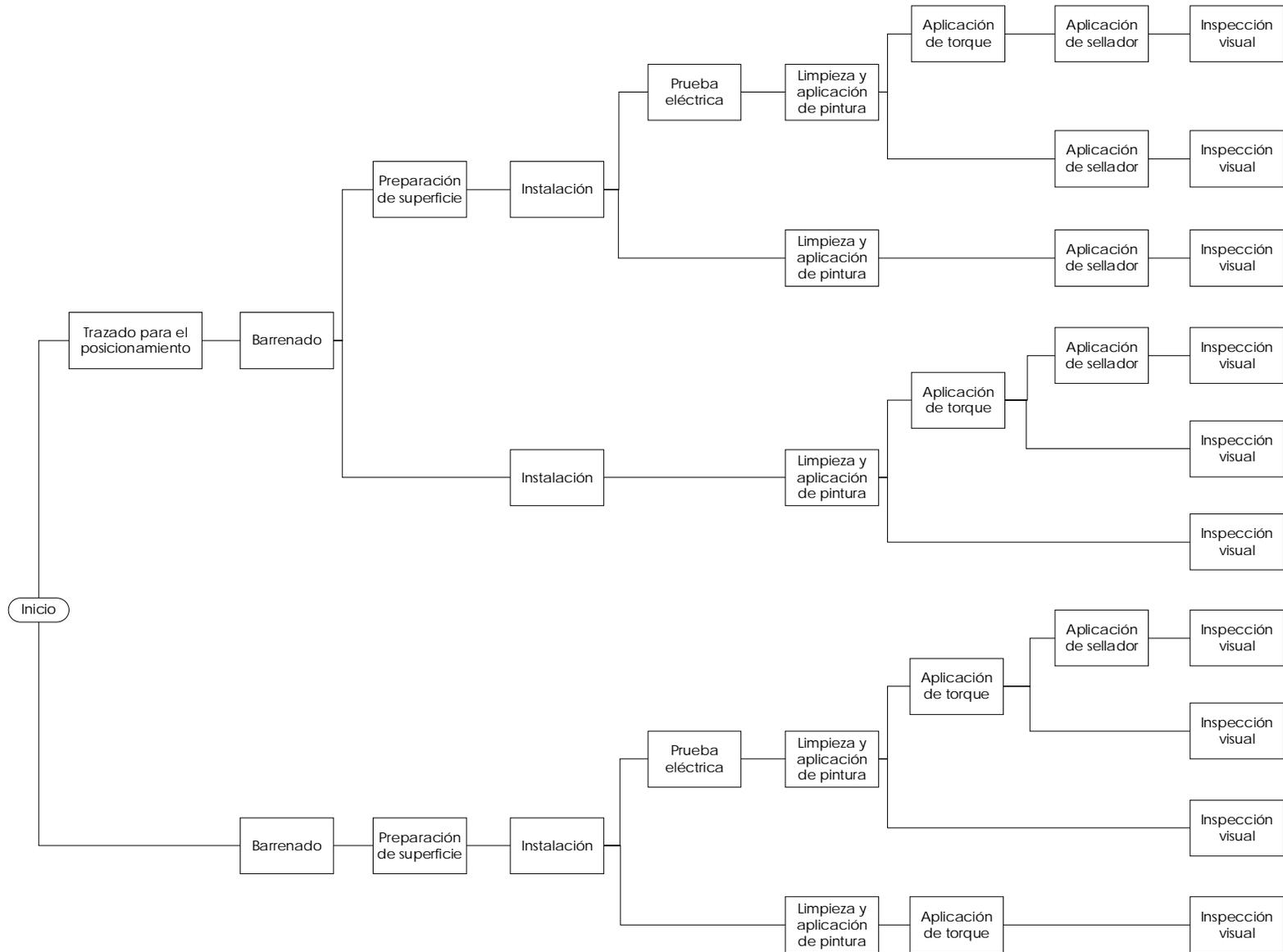


Figura 31: Diagrama de árbol para las UMTR.

#### 4.1.6 Paso 6: Análisis comparativo entre la secuencia de ensamble actual y la propuesta por el concepto de solución.

El experimento abarca el análisis de la solución concepto en el ensamble de 95 soportes metálicos distribuidos en 28 cuadernos para el componente aeroespacial.

La tabla 5 muestra la distribución de los soportes metálicos en los cuadernos de ensamble. Hay más de un tipo de soporte metálico ensamblados en el mismo cuaderno de ensamble, es decir, tenemos 95 partes a instalar con 66 números de partes diferentes, distribuidos en 28 cuadernos de ensamble.

Por ejemplo, podemos ver que el soporte con el número de parte 054 se ensambla 18 veces en 6 cuadernos de ensamble distintos.

La tabla 6 muestra la distribución de los soportes metálicos con las unidades mínimas de trabajo racional (UMTR) definidas para nuestra solución. La parte sombreada en gris muestra qué unidad mínima de trabajo racional (UMTR) se utiliza para ensamblar qué número de parte. Por ejemplo, las unidades mínimas de trabajo racional (UMTR) de barrenado, instalación y limpieza y aplicación de pintura son comunes para ensamblar los 66 números de parte.

La suma total de las unidades mínima de trabajo racional (UMTR) para ensamblar los 66 números de parte es de 428 (suma de todos los recuadros sombreados en gris en la tabla No. 6). Este dato nos ayudará más adelante comparar cuantitativamente la situación actual contra la solución concepto determinada.

Tabla 5. Distribución de ensamble de soportes en los cuadernos de ensamble.

Cuadernos de ensamble / Número de parte de ensamble	XA0001	XA0002	XA0003	XA0004	XA0005	XA0006	XA0007	XA0008	XA0009	XA0010	XA0011	XA0012	XA0013	XA0014	XA0015	XA0016	XA0017	XA0018	XA0019	XA0020	XA0021	XA0022	XA0023	XA0024	XA0025	XA0026	XA0027	XA0028
001	1																											
002													1															
003							1																					
004								1																				
005							1																					
006									1																			
007									1																			
008							1																					
009									1																			
010									1																			
011								1																				
012								1																				
013								1																				
014								1																				
015								1																				
016							1	1																				
017							1																					
018			1																									
019			1																									
020			1																									
021			1																									
022				1	1																							
023					1																							
024					2																							
025															1													
026															1													
027															1													
028															1													
029							1																					
030							1																					
031				1																								
032				1																								
033					1																							
034															1													
035		1																										
036					1																							
037					1																							
038					1																							
039					1																							
040															1													
041															1													
042				1																								
043															1													
044				1																								
045																	2	1										
046																				1								
047																					1			1				
048																						1		1				
049																								1		1		
050																							1					1
051																	1											
052																		1										
053																1												
054									2	1	2	1				6	6											
055																1												
056																2												
057																	2											
058																		1										
059																				1								
060																							1	1				1
061																							1					
062																			1									
063																							2					
064																										1		
065																								1				
066																												

Tabla 6. Distribución de número de parte contra las UMTR

Unidades mínima de trabajo racional / Número de parte de ensamble	Trazado para el posicionamiento	Realización del barrenado.	Preparación de superficie.	Instalación.	Prueba eléctrica.	Limpeza y aplicación de pintura.	Aplicación de torque.	Aplicación de sellador.	Inspección visual
001									
002									
003									
004									
005									
006									
007									
008									
009									
010									
011									
012									
013									
014									
015									
016									
017									
018									
019									
020									
021									
022									
023									
024									
025									
026									
027									
028									
029									
030									
031									
032									
033									
034									
035									
036									
037									
038									
039									
040									
041									
042									
043									
044									
045									
046									
047									
048									
049									
050									
051									
052									
053									
054									
055									
056									
057									
058									
059									
060									
061									
062									
063									
064									
065									
066									

Para poder cuantificar el impacto de la solución concepto en el experimento se simularon 3 situaciones, donde se evaluó la proporción de afectación en el progreso del trabajo.

A continuación, se mencionan tres ejemplos de situaciones problemáticas más comunes en la operación:

1. Faltante de alguna herramienta.
2. Faltante de algún número de parte.
3. No conformidad en el ensamble (defecto de calidad en el ensamble).

La tabla 7 muestra los cálculos del ejercicio de cuantificación, que permite llegar a las siguientes conclusiones:

#### 1. Situación problemática referente al faltante de alguna herramienta.

Se toma el ejemplo de la ausencia del óhmetro, ya que se considera una herramienta especial de medición para la prueba eléctrica y por lo regular el equipo no está disponible para ser usado en todo momento.

La situación actual está siendo afectada en un 46%, ya que 13 cuadernos de ensamble de un total de 28 están detenidos por esta situación.

La solución concepto detiene el ensamble en un 33%, ya que son 141 unidades mínimas de trabajo racional detenidas, incluyendo la prueba eléctrica y todo lo que sucede a partir de esta.

Se concluye que por la ausencia del óhmetro la solución concepto minimiza la proporción de trabajo detenido en un 28% contra la situación actual.

#### 2. Situación problemática referente a algún faltante de parte.

Se emula los ejemplos de la falta de algún número de parte, tanto uno que sea muy repetitivo como uno que se ensamble una sola vez.

Para el cálculo se considera el número de parte 054 que se ensamble 18 veces en 6 cuadernos de ensamble distintos y el número de parte 001 que se ensamble 1 sola vez. Para calcular la magnitud de unidades mínimas de trabajo racional detenidas, se multiplica la cantidad de partes a ensamblar por las UMTR detenidas a partir del proceso de instalación (ver tabla No. 6). Es decir:

- Magnitud de UMTR detenidas para el número de parte 054:
  - (5 UMTR detenidas) x (18 partes) = 90

Se puede concluir que para el número de parte más repetitivo el efecto de minimización el trabajo detenido es nulo, de manera contraria cuando el número de parte se ensambla una sola vez el efecto es más significativo, con un 74% comparado con la situación actual.

3. Situación problemática referente a la presencia de una no conformidad de calidad en el ensamble.

De manera similar que el ejemplo anterior, se toma un cuaderno de ensamble que instale la mayor cantidad de partes como uno que solo instale una parte.

El cuaderno de ensamble XA0017 instala la mayor cantidad, con 4 números de parte distintos para un total de 10 soportes metálicos (ver tabla No. 5). Es decir:

- El número de parte 053 se instala 1 vez.
- El número de parte 054 se instala 6 veces.
- El número de parte 055 se instala 1 vez
- El número de parte 057 se instala 2 veces.

Para calcular la magnitud de unidades mínimas de trabajo racional detenidas, se multiplica la cantidad de partes a ensamblar por la UMTR detenidas a partir del proceso de barrenado (ver tabla No. 6). Es decir:

- Magnitud de UMTR detenidas para el número de parte 053:
  - (6 UMTR detenidas) x (1 parte) = 6
- Magnitud de UMTR detenidas para el número de parte 054:
  - (7 UMTR detenidas) x (6 partes) = 42

- Magnitud de UMTR detenidas para el número de parte 055:
  - (6 UMTR detenidas) x (1 parte) = 6
- Magnitud de UMTR detenidas para el número de parte 057:
  - (7 UMTR detenidas) x (2 partes) = 14

Este cálculo nos arroja un total de 68 UMTR detenidas para instalar los 10 soportes metálicos, si detenemos a partir del proceso de barrenado.

El cuaderno de ensamble XA0001 instala la parte con número 001 únicamente, por lo tanto, el cálculo es más sencillo. Solamente son 6 UMTR detenidas a partir del proceso de barrenado (ver tabla No. 6).

El efecto de mejoramiento es negativo para el ejemplo del cuaderno de ensamble XA0017, de manera contraria para el cuaderno de ensamble XA0001 con un porcentaje de mejora del 53% con respecto a la situación actual.

Tabla 7. Tabla de ejemplos de situaciones problemáticas.

Situación hipotética	Descripción del efecto		Porcentaje de afectación (%)		% de mejoramiento
	Actual	Solución	Actual	Solución	
Falta de herramienta. Ejemplo: óhmetro	13 cuadernos de ensamble contienen la prueba eléctrica. (Ver tabla No. 4)	Son 141 UMTR detenidas, incluyendo la prueba eléctrica y todas las UMTR que le suceden. (Ver tabla No. 6)	13/28 = 46%	141/428 = 33%	28%
Falta de partes. Ejemplo: Número de parte 054	Este número de parte afecta a 6 cuadernos de ensamble. (Ver tabla No. 5)	El efecto es a partir de la instalación, esto implica que 5 UMTR estarán detenidas. 18 partes no ensambladas (Ver tabla No. 5) por 5 UMTR detenidas (ver tabla No. 6)	6/28 = 21%	90/428 = 21%	efecto nulo

Situación hipotética	Descripción del efecto		Porcentaje de afectación (%)		% de mejoramiento
	Actual	Solución	Actual	Solución	
Falta de partes. Ejemplo: Número de parte 001	Este número de parte afecta a un solo cuaderno de ensamble. (Ver tabla No. 5)	Este número de parte afecta a partir de la instalación, esto implica que 4 UMTR estarán detenidas. (Ver tabla No. 6)	1/28 = 3.5%	4/428 = 0.9%	74%
No conformidad en el barrenado	Un cuaderno de ensamble detenido: XA0017	Este ejemplo detiene el ensamble de 10 soportes metálicos en 5 números de parte distintos (053, 054, 055 y 057) a partir del barrenado. La magnitud del problema es de 68 UMTR detenidas.	1/28 = 3%	68/428 = 15%	Efecto negativo
	Cuaderno de ensamble XA0001 detenido.	Este ejemplo detiene el ensamble en 1 número de parte (001) a partir del barrenado, es decir 6 UMTR detenidas. (Ver tabla No. 6)	1/28 = 3%	6/428 = 1.4%	53%

El análisis comparativo demuestra que la solución concepto mejora en relación con la situación actual, con un promedio del 50% (promediando los tres ejemplos mencionados en la tabla No. 7), cuando la secuencia de ensamble tiene una gran variedad de números de parte a ensamblar, de modo contrario cuando la secuencia de ensamble tiene pocos números de parte, pero una gran cantidad, la solución propuesta no tiene un efecto benéfico al progreso del trabajo, contra la situación actual.

La figura 32 muestra el diagrama de Pareto con la frecuencia de repetición de número de parte en el ensamble para el centro de trabajo donde se realiza el experimento.

Diagrama de Pareto de la frecuencia de repetición de número de parte

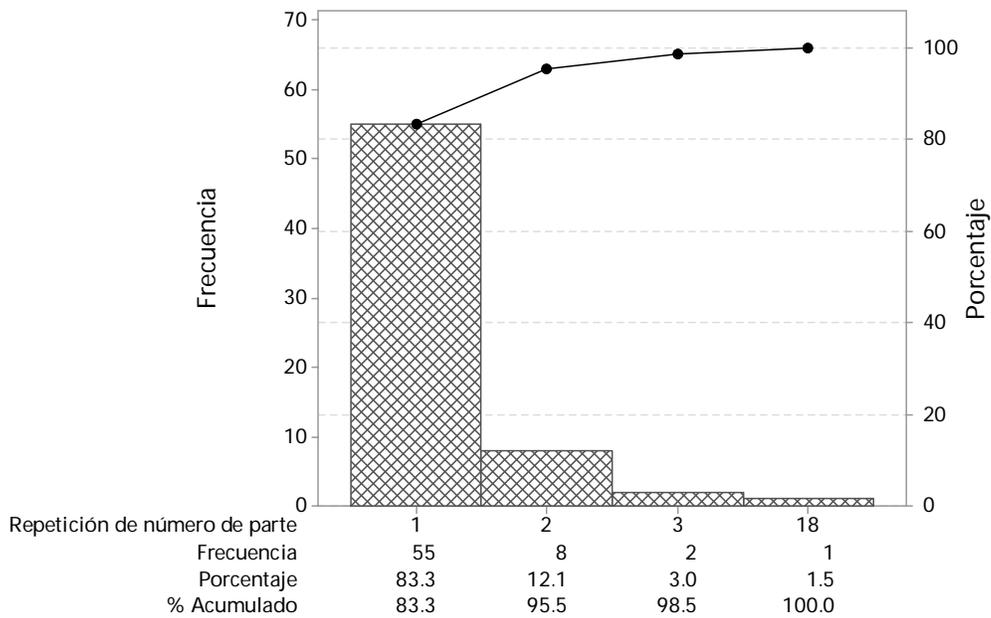


Figura 32: Diagrama de Pareto

El resultado muestra que el 83% del total de números de parte, solo se ensamblan una sola vez, es decir, la variedad en el ensamble es muy alta.

Podemos concluir que la solución concepto tiene un alto impacto para el ensamble de los 95 soportes metálicos analizados en el experimento.

Asimismo, la solución concepto incrementa la resolución del sistema de medición del progreso del trabajo, ya que aumenta la base de 28 unidades (situación actual: cuadernos de trabajo) a 428 unidades (solución concepto: unidades mínimas de trabajo racional) para instalar los 95 soportes metálicos.

Para poder calcular la proporción de mejora entre la situación actual y la solución concepto, utilizaremos la inversa de las unidades de medida, como se muestra a continuación:

$$\frac{1}{28} \rightarrow \frac{1}{428}$$

Calculando la proporción de mejora nos arroja que la solución concepto mejora un 93% contra la situación actual.

## CONCLUSIONES.

El planteamiento del objetivo general en este estudio es proveer una solución concepto aplicable a la secuencia de ensamble en componentes aeroespaciales, que minimice la proporción de operaciones de ensamble detenidas a pesar de presentarse algunas situaciones problemáticas, llámese a esto como un tipo de gestión de flujo de trabajo.

Con los resultados presentados se establece las siguientes conclusiones respecto objetivos específicos planteados:

- Objetivo específico No. 1: Encontrar el sistema de restricciones para el problema específico (abstracción del problema).

Conclusión: La aplicación del algoritmo ARIZ-85C permitió encontrar el sistema de restricción, a través de la abstracción del problema.

- Objetivo específico No. 2: Determinación de una solución concepto basado en una situación ideal buscada.

Conclusión: La aplicación del algoritmo ARIZ-85C permitió encontrar una solución concepto que mitiga el efecto del sistema restrictivo planteado.

- Objetivo específico No. 3: Realización del experimento en un proceso de ensamble actual.

Conclusión: Se realizó un experimento aislado y controlado que representa el ensamble metálico estructural de componentes aeroespaciales. La solución concepto permite la secuenciación de las unidades mínimas de trabajo racional para el ensamble de componentes aeroespaciales.

- Objetivo específico No. 4: Experimentación para probar la factibilidad de implementación del concepto solución.

Conclusión: La solución concepto es factible de aplicar a la secuencia de trabajo actual. Los cuadernos de ensamble se pueden fraccionar en unidades mínimas de trabajo racional y agruparlos por tipos de competencia.

- Objetivo específico No. 5: Evaluación cuantitativa y cualitativa de la solución concepto contra la situación actual en tres aspectos:
  - i. Mejorar la proporción de trabajo detenido en al menos 15%.  
Conclusión: La secuenciación del ensamble utilizando las unidades mínimas de trabajo racional para gestionar el flujo del trabajo ante la presencia de problemas en el proceso, minimiza la proporción de trabajo detenido en un 50% promedio cuando existe una alta variedad de partes a ensamblar.
  - ii. Mejorar la precisión del cálculo del progreso del trabajo en al menos un 85%.  
Conclusión: La solución concepto aumentó al menos un 90% la resolución del sistema de medición del progreso del trabajo. La unidad de medida para el progreso del trabajo actual es en cuadernos de ensamble completados. Cuando el operador se detiene por alguna circunstancia, deja el cuaderno inconcluso, y la métrica del progreso del trabajo se ve afectada. La organización de la secuencia de ensamble en unidades mínimas de trabajo racional provee una mayor cantidad de unidades de medición, generando un impacto positivo en la métrica de producción, lo que significa que mayor cantidad de cuadernos son medidos y completados.
  - iii. Mejorar la habilidad manual del operador, a través de, incrementar la repetitividad del trabajo.  
Conclusión: La secuencia de ensamble por unidades mínimas de trabajo racional organiza el trabajo por tipo de competencias, y así, mantiene enfocados a los operadores de ensamble en un cierto tipo de proceso. El hecho de que los operadores repitan determinadas operaciones con una mayor frecuencia, no solamente incrementa las

habilidades y conocimiento en esta maniobra, sino que se infiere que se eleva la eficiencia y repetitividad en la ejecución.

La conclusión contra la hipótesis de trabajo planteada, se menciona de la siguiente manera:

La gestión del flujo de trabajo en el ensamble de una aeronave minimiza la proporción de trabajo detenido y mantiene la repetitividad del mismo, cuando el proceso se enfrenta a una situación problemática, por lo tanto la hipótesis de trabajo es aceptada.

Asimismo se puede concluir que, de acuerdo a la literatura consultada, no hay temas estudiados a profundidad acerca de la gestión del flujo de trabajo para sostener el progreso del mismo.

El estado de la técnica estudiado nos indica que existen numerosos tipos de problemas de balanceo en una línea de ensamble y, a su vez, herramientas computacionales que agilizan el tiempo de respuesta en la toma de decisión, minimizando el riesgo, sin embargo los sistemas de gestión en la industria están siendo afectados por los cambios en las condiciones de negocio, esto da a entender que puede ser más importante cambiar el modo solución de problemas, que es más o menos aleatorio a un modo de gestión del problema de manera permanente que busque innovación sistémica, científica y estructurada.

Existe una gran cantidad de estudios documentados con respecto al uso de sistemas informáticos que emulan condiciones actuales y a pesar de eso, la ejecución del trabajo en la vida real es del tipo estocástica, es por eso que la solución propuesta al problema abre oportunidades de estudio con respecto a la manera en que se configura la secuencia de ensamble de una aeronave, tomando en cuenta la agrupación de competencias necesarias y lograr minimizar el efecto negativo ante una situación problemática potencial.

## APORTACIONES DE LA TESIS.

La propuesta de aporte u originalidad del estudio es la gestión del flujo del trabajo ante la presencia de diferentes situaciones problemáticas, a través de la creación de secuencias de ensamble utilizando las unidades mínimas de trabajo racional.

Se identifica una solución práctica y factible de aplicar, que ayuda a minimizar el trabajo detenido, y por ende el cumplimiento de los calendarios de producción.

La solución promueve dentro del proceso de manufactura pasar de un modo de solución del problema, que es aleatorio, a un modo de gestión del flujo del trabajo que busque constantemente el progreso del trabajo.

La aportación a la base del conocimiento científico es la aplicación de la teoría de solución de problemas de invención, TRIZ, a un problema actual en la industria aeroespacial en México. Se documenta la aplicación del algoritmo ARIZ-85C en un problema concreto.

A pesar de existir numerosas publicaciones relacionadas al uso de las técnicas basadas en la teoría de solución de problemas de invención, no hay evidencia de su aplicación para una línea de manufactura en la industria aeroespacial, por lo tanto el aporte al conocimiento es relevante a través de su documentación.

## RECOMENDACIONES.

Se recomienda el empleo de las unidades mínimas de trabajo racional en la elaboración de las secuencias de ensamble para el componente aeroespacial estudiado, así como el resto de los ensambles de características similares que se realizan en la empresa.

Se sugiere al departamento de métodos y manufactura analizar y poner en práctica las ventajas de la solución concepto que se presenta, en las secciones del ensamble con mayor impacto potencial en el logro del calendario de producción.

El involucramiento del operador de producción fue crucial para entender la estructura de las unidades mínimas de trabajo racional y su secuencia de ensamble. Se recomienda al departamento de aprendizaje organizacional documentar estos elementos mencionados, en etapas tempranas durante el lanzamiento de un nuevo programa, con el fin de realizar ajustes en los cuadernos de ensamble de manera oportuna.

La utilización de la teoría de solución de problemas de invención ha sido aplicada en diversos ramos de la industria, donde se ha comprobado su importancia en el resultado. Se recomienda utilizar las diferentes herramientas que ofrece la teoría de solución de problemas de invención, TRIZ, para innovar en los procesos de manufactura de componentes aeroespaciales, ya sea para definir toda una estrategia de producción, como lo es una línea de ensamble móvil o, aplicarlas en secciones aisladas que tengan un alto impacto, logrando así el cumplimiento de los calendarios de envío y por ende en la satisfacción total del cliente.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

1. CHASE, Richard B., JACOBS, F. Robert and AQUILANO, Nicholas J. *ADMINISTRACIÓN DE OPERACIONES. Producción y cadena de suministros*. 12a. Ed. McGraw-Hill, 2009.
2. KRAJEWSKI, Lee J., RITZMAN, LARRY, P. and MALHOTRA, Manoj K. *ADMINISTRACIÓN DE OPERACIONES. Procesos y cadenas de valor*. 8a. Ed. 2008.
3. GROOVER, Mikell P. MANUFACTURING PROCESSES. In : MAYNARDS (ed.), *Maynard's Industrial Engineering Handbook*. 5a. Ed. McGraw-Hill, 2004.
4. ROTHER, Mike and SHOOK, John. *LEARNING TO SEE Value Stream Mapping to Create Value and Eliminate Muda*. 1.2 Ed. THE LEAN ENTERPRISE INSTITUTE, 1999.
5. EGAN, Ronald J. SUPPORTING LEAN FLOW PRODUCTION STRATEGIES. In : *Maynard's Industrial Engineering Handbook*. 5a. Ed. Maynards and Company INC., 2004.
6. BIDANDA, Bopaya, SUNANTA, Owat, CARNAHAN, Brian, BILLO, Richard and MINNICH, Jhon. ASSEMBLY LINE BALANCING. In : MCGRAW-HILL (ed.), *Maynard's Industrial Engineering Handbook*. 5a. Ed. 2004.
7. LASCOLA NEDDY, Kim and BIDANDA, Bopaya. PRODUCTION FLOW STRATEGIES. In : MAYNARD (ed.), *Maynard's Industrial Engineering Handbook*. 5a. Ed. McGraw-Hill, 2004.
8. MARSWINSKI, Chet, SHOOK, John and SCHROEDER, Alexis. *LEAN LEXICON a graphical glossary for lean thinkers*. 4a. ed. Cambridge, MA : Institute Lean Enterprise, 2008.
9. BOYSEN, Nils, FLIEDNER, Malte and SCHOLL, Armin. *A classification of assembly line balancing problems*. Hamburgo, 2006.
10. HALL, Robert W. *Attaining Manufacturing Excellence: Just in time, Total Quality, Total People Involvement*. 1a. Ed. Dow Jones-Irwin, 1987.
11. BOYSEN, Nils, FLIEDNER, Malte and SCHOLL, Armin. *Assembly line balancing□: Which model to use when□?* Hamburgo, 2006.
12. BOEING FRONTIERS. 737 line aims to accelerate its record-setting assembly pace. *Boeing Frontiers*. 2005. Vol. 03, no. 8, p. 8-10.
13. PROMEXICO. *La industria automotriz mexicana: Situación actual, retos y*

- oportunidades*. 1a. Ed. Promexico, 2016.
14. FEMIA. *Programa Estratégico de la Industria Aeroespacial*. Mexico City, 2012.
  15. PROTECTIA. PROTECTIA Patentes y Marcas. [online]. 2014. Available from: <http://www.protectia.eu/>
  16. BUTTERFIELD, J, MAWHINNEY, P, CROSBY, S, PRICE, M, CURRAN, R, ARMSTRONG, C G and RAGHUNATHAN, S. An Integrated Approach to the Conceptual Development of Aircraft Structures Focusing on Manufacturing Simulation and Cost. . 2005. No. September, p. 1–10.
  17. TECH-CLARITY. Digital Manufacturing. The PLM Approach to Better Manufacturing Processes. *Solutions*. 2004.
  18. MAS, F., RÍOS, José, MENÉNDEZ, José Luis, HERNÁNDEZ, Juan Carlos and VIZÁN, Antonio. *Concurrent conceptual design of aero- structure assembly lines*. 2008.
  19. LU, R.F. and SUNDARAM, S. Manufacturing process modeling of Boeing 747 moving line concepts. In : *Proceedings of the Winter Simulation Conference*. IEEE, 2002. p. 1041–1045.
  20. BECKER, Dan. *The Boeing 737 / 757 Lean Story*. 2003.
  21. ALTFELD, Hans-henrich. *Lean Manufacturing in the Aircraft Industry*. 2010.
  22. NIEBEL, B W. *Motion and time study*. 9a. Ed. The University of Michigan, 2007.
  23. BECKER, Christian and SCHOLL, Armin. 21: *A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing*. Jena, 2003.
  24. GASTELUM, Victoria Elena. *APPLICATION OF LEAN MANUFACTURING TECHNIQUES FOR DESIGN OF THE AIRCRAFT ASSEMBLY LINE*. Massachusetts Institute of Technology, 2002.
  25. JOHANSSON, M.I. Kitting systems for small parts in manual assembly systems: Production Research Approaching the 21st Century. *Production Research Journal*. 1991. P. 225–230.
  26. BOZER, Yavuz A. and MCGINNIS, Leon F. Kitting versus line stocking: A conceptual framework and a descriptive model. *International Journal of Production Economics*. 1992. Vol. 28, no. 1, p. 1–19.
  27. MONDEN, Yasuhiro. *Toyota Production System an integrated approach to just in time*. 3a. Ed. Chapman & Hall, 1998.
  28. GRIEF, Michel. *The Visual Factory, Building participation through shared*

- information. 1a. Ed. Press, Productivity, 1989.
29. LIKER, Jeffrey K. and MEIER, David. *The Toyota Way Fieldbook. A practical guide fro implementing Toyota ´s 4P´s*. 1a. Ed. McGraw-Hill, 2006.
  30. KAPLAN, Stan. *An Introduction to TRIZ The Russian Theory of Inventive Problem Solving*. 1a. Ed. Farmington : Ideation International Inc., 2016.
  31. MONTERRUBIO, Rafael Oropeza. *TRIZ, La metodología más avanzada para acelerar la innovación tecnológica sistemática*. 1ra. Mexico City : Panorama, 2005.
  32. MANN, Darrell. *An Introduction to TRIZ□: The Theory of Inventive Problem Solving. Creativity and innovation management - TRIZ*. 2001. Vol. 10, no. 2, p. 123–125.
  33. ALTSHULLER, Genrich. *The Innovation Algorithm TRIZ systematic innovation and technical creativity.pdf*. 2a. Ed. Technical Innovation Center, INC, 2007.
  34. CALUYO, Felicito S. *Innovation and the Theory of Inventive Problem Solving (TRIZ)*. In : . Felicito S. Caluyo, 2014.
  35. SPREAFICO, Christian and RUSSO, Davide. *TRIZ industrial case studies□: a critical survey*. In : *Procedia CIRP*. Elsevier, 2016. p. 51–56.
  36. BUKHMAN, Isak. *ARIZ-85C Algorithm for Inventive Problem Solving*. 2010. TRIZ Solution LLC.
  37. ALTSHULLER, Genrich. *ALGORITHM OF INVENTIVE PROBLEM SOLVING*. 1985. Genrich, Altshuller.
  38. KUCHARAVY, Dmitry. *ARIZ Theory and Practice*. 2006. Strasbourg Cedex : INSA Strasbourg.

