

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



SIMULACIÓN POR MEDIO DE EVENTOS DISCRETOS PARA UNA LÍNEA
FLEXIBLE DE CABEZAS DE MOTOR

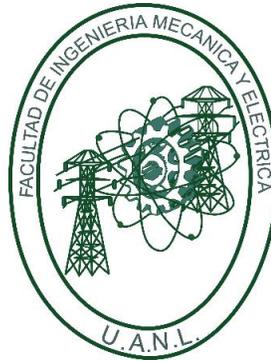
POR

EDGAR STEFF ANDRADE GUTIÉRREZ

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

JULIO 2017

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



SIMULACIÓN POR MEDIO DE EVENTOS DISCRETOS PARA UNA LÍNEA
FLEXIBLE DE CABEZAS DE MOTOR

POR

EDGAR STEFF ANDRADE GUTIÉRREZ

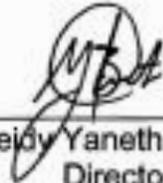
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

JULIO 2017

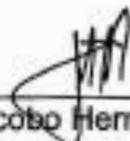
UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis "Simulación por medio de eventos discretos para una línea flexible de cabezas de motor" realizada por el alumno Edgar Steff Andrade Gutiérrez, con número de matrícula 1415633, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Automotriz.

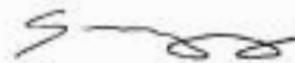
El Comité de Tesis



Dra. Sugehey Yaneth Carranza Bernal
Director



Dr. Jacobo Hernández Sandoval
Revisor



Dr. José Alejandro González Villarreal
Revisor

Vo. Bo.



Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, Junio 2017

DEDICATORIA

A Dios, por darme la oportunidad de vivir esta maravillosa experiencia, bendiciéndome con amigos, maestros y grandes ejemplos que me fueron mostrando poco a poco el camino a seguir.

A mi novia, por estar conmigo en las buenas y en las malas, por ser mi apoyo incondicional y no dejarme caer durante toda esta travesía.

A mi madre, por su apoyo durante esta etapa de mi vida e inspirarme a dar lo mejor de mí.

A mi familia, por sus buenos consejos y creer en mí.

A mis amigos.

AGRADECIMIENTOS

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico durante el desarrollo de este trabajo.

Universidad Autónoma de Nuevo León y la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica por acogerme durante el desarrollo de este proyecto, por formarme con sus valores y enseñanzas.

Nemak por brindar el proyecto y los recursos necesarios para que este proyecto fuera posible.

Driven Center por la infraestructura necesaria para el desarrollo de este trabajo.

Dra. Sugeheidy Janeth Carranza Bernal por brindarme sus enseñanzas, consejos, su ejemplo y sobre todo su paciencia, despertando en mí los valores de responsabilidad, trabajo y pasión a la ciencia y a la investigación. Una mentora y una amiga.

Dr. Jacobo Hernández Sandoval por su legado, sus consejos personales y profesionales, por motivarme a encontrar las mejores soluciones a diferentes adversidades y alentarme siempre a dar lo mejor.

Dr. José Alejandro González Villarreal por sus atenciones, su experiencia y apoyo otorgado.

RESUMEN

La utilización de la manufactura virtual es una gran herramienta para modelar y analizar la logística de producción de sistemas complejos como altamente aleatorizados, complicados y discretos, los cuales pueden ser difíciles de estudiar de la manera tradicional.

Se introduce en este trabajo la optimización de una línea flexible de cabezas de motor donde se modelan y se analizan los sistemas lógicos de producción, eficiencia de trabajo, estadística de capacidad de producción de manera efectiva y utilización mediante el software Plant Simulation; esta plataforma trabaja por medio de la simulación de eventos discretos siendo posible representar cada variable que constituye la línea y por medio de esta manera ofrecer una guía para la optimización de la logística de producción y toma de decisiones científicas.

La simulación de eventos discretos ofrece la posibilidad de representar movimientos y sub-procesos de robots que conforman parte de la logística de producción de cada proceso, de esta manera ser capaces de encontrar cuellos de botellas y actividades sin valor agregado para reducirlas o eliminarlas del proceso y lograr incrementar el rendimiento de la línea de producción.

INDICE

RESUMEN	IV
INDICE	V
INDICE DE FIGURAS.....	VII
INDICE DE TABLAS	IX
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 EVOLUCIÓN DE LA INDUSTRIA	2
1.3 INDUSTRIA 4.0 Y MANUFACTURA ESBELTA.....	3
1.4 MAQUETAS DIGITALES.....	4
1.5 SIMULACIÓN.....	6
1.6 METODOLOGÍA DES.....	8
1.6.1 El proceso de modelado de entrada y salida.....	9
1.6.2 Sistema de Tiempo Discreto	11
1.6.3 Propiedades características de los sistemas de eventos discretos	12
1.7 PLANT SIMULATION®.....	14
1.7.1 Procedimiento de Simulación.....	15
1.7.2 Aplicaciones de la Simulación	16
CAPITULO II.....	18
ANTECEDENTES.....	18
2.1 OPTIMIZACIÓN POR MEDIO DE SIMULACIÓN.....	18
2.2 MANUFACTURA VIRTUAL	28
2.3 OPTIMIZACIÓN DE LÍNEAS DE MANUFACTURA	30
2.4 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	32
2.5 HIPÓTESIS	32
2.6 OBJETIVO GENERAL.....	32
2.7 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	33
2.8 ALCANCES	33
CAPITULO III.....	34
DESARROLLO EXPERIMENTAL	34

3.1 GENERACIÓN DE MODELO DE SIMULACIÓN EN 2D	34
3.1.1 Simulación Inicial.....	35
3.1.2 Simulación de los 3 Bancos.....	39
3.1.3 Introducción de Variables al Modelo de Simulación	42
3.2 GENERACIÓN DEL MODELO EN 3D	47
3.2.1 Modelo en NX	48
3.2.2 Modelo en Plant Simulation	49
<u>CAPITULO IV</u>	<u>51</u>
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	51
4.1 MODELO ACTUAL	51
4.1.1 Resultados del Modelo Actual.....	55
4.2 MODELO ÓPTIMO	57
4.2.1 Banco #1.....	57
4.2.2 Banco #2.....	58
4.2.3 Banco #3.....	59
4.2.4 Simulación del Modelo Óptimo	60
4.2.5 Resultados optimización 1	65
4.2.6 Resultados optimización 2	66
4.2.7 Resultados optimización 3	68
4.3 MODELO DE SIMULACIÓN CON FLUJO DE OPERACIÓN EN LOS 3 BANCOS.....	69
4.3.1 RESULTADOS DEL MODELO DE SINCRONIZACIÓN DE FLUJO EN LOS TRES BANCOS	73
4.4 DISCUSIÓN	76
<u>CAPITULO V.....</u>	<u>81</u>
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	81
<u>ANEXO I.....</u>	<u>84</u>
<u>ANEXO II.....</u>	<u>86</u>
<u>REFERENCIAS</u>	<u>92</u>

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1 Evolución de la Industria [6].....	2
Figura 1. 2 Industria 4.0 [10].....	3
Figura 1. 3 Ejemplo del uso de una maqueta digital (Digital Mock-Up) [15].....	5
Figura 1. 4 Ejemplo de Simulación [19].....	6
Figura 1. 5 Ejemplo de Simulación del Clima Mundial [20]	7
Figura 1. 6 Proceso de Modelado [24].....	10
Figura 1. 7 Ejemplos de Sistema de Tiempo Continuo (izq.) y Tiempo Discreto (der.) [24].	11
Figura 1. 8 Comparación de trayectoria para Sistemas Dinámicos de Variable Continua (CVDS) y Sistemas de Eventos Discretos (DES). En un CVDS; $x(t)$ es generalmente la solución de una ecuación diferencial $\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t)$. En un DES, $x(t)$ es una función constante por partes, ya que el estado salta de un valor discreto a otro cuando se produce un evento [24].	13
Figura 1. 9 Ejemplo de utilización del software Plant Simulation [26].	14
Figura 2. 1 Modelo de simulación de la distribución de las líneas de producción en el software Delmia/Quest [32].	19
Figura 2. 2 Modelo de simulación en eM-Plant de línea de ensamble X4105BC [33].....	20
Figura 2. 3 Modelo de simulación en eM-Plant de línea de ensamble X4105BC después de la optimización [33].	20
Figura 2. 4 Modelo de simulación de la estructura que conforma la línea de producción [34]..	21
Figura 2. 5 a) Línea actual y b) nueva de producción de asientos e interiores automotrices en 2D [35].....	22
Figura 2. 6 a) Línea actual y b) nueva de producción de asientos e interiores automotrices en 3D [35].....	22
Figura 2. 7 Reduce costos y tiempos en implementación de proyectos de optimización [36]. ..	23
Figura 2. 8 a) Línea actual y b) óptima de producción de sillas domésticas [36].....	24
Figura 2. 9 Simulación de trabajadores (a) y robots (b) [37].	25
Figura 2. 10 Modelo de línea de manufactura avanzada compuesta por tornos universales, fresadoras de tipo rodilla, perforadoras de columna redonda y rectificadoras [38].	26
Figura 2. 11 Estadística de recursos de cada estación de trabajo [38].	26
Figura 2. 12 Línea de empaquetamiento [40].....	27
Figura 2. 13 Sistema de manufactura virtual representando una proceso de moldeo [45].....	29
Figura 2. 14 Clasificación de optimización de acercamientos para problemas de equilibrio de líneas de montaje [50].	31
Figura 3. 1 Modelo de simulación de un solo molde en Plant Simulation.....	35
Figura 3. 2 Arranque del ciclo del Banco 2.....	36
Figura 3. 3 Robot ABB1 dejando pallet en banco 2	37
Figura 3. 4 Robot KUKA toma olla del calentador 2 y lo lleva al horno 2 a tomar el aluminio (a). Robot KUKA vacía el aluminio en el banco 2 (b).	37
Figura 3. 5 Cabeza de motor solidificándose en banco 2	38
Figura 3. 6 Robot ABB 2 deja cabeza de motor en línea (conveyor).....	38

Figura 3. 7 Tiempo de simulación del molde	39
Figura 3. 8 Segundo modelo en Plant Simulation	40
Figura 3. 9 Sentado de pallet en banco 3 (a) y sentado de pallet en banco 1 (b).....	41
Figura 3. 10 Vaciado de aluminio del molde 2 (a) y del molde 1 (b)	42
Figura 3. 11 Tiempos de arranque, vaciado del aluminio y solidificación de cada uno de los moldes.....	45
Figura 3. 12 Mu's involucrados en la simulación	45
Figura 3. 13 Grafica de estadística de recurso de los moldes (a) y robots (b).....	46
Figura 3. 14 Modelo de simulación de la línea flexible de cabezas de motor	47
Figura 3. 15 Ejemplo de área de trabajo de Robot ABB.....	48
Figura 3. 16 Modelo inicial en 3D de la línea flexible de cabezas de motor	48
Figura 3. 17 Modelo final en 3D de la línea flexible de cabezas de motor	49
Figura 3. 18 Modelo de simulación en 3D de la línea flexible de cabezas de motor.....	50
Figura 4. 1 Ciclograma del banco 2	52
Figura 4. 2 Ciclograma del banco 1	53
Figura 4. 3 Ciclograma del banco 3	54
Figura 4. 4 Tiempos de arranque, toma de aluminio y solidificación de los bancos 1, 2 y 3	55
Figura 4. 5 Estadística de recursos del banco 1	56
Figura 4. 6 Estadística de recursos del banco 2	56
Figura 4. 7 Estadística de recursos del banco 3	57
Figura 4. 8 Operación del Banco 1 con "pre-llamadas" en la operación de los robots ABB1 y KUKA1	58
Figura 4. 9 Operación del Banco 2 con "pre-llamadas" en los robots ABB1 y KUKA1	59
Figura 4. 10 Banco 3 con nuevo robot para sentado de Pallet.....	60
Figura 4. 11 Colisión entre los robots KUKA1 y ABB1	61
Figura 4. 12 Ciclograma del banco 1 con las tres optimizaciones.....	64
Figura 4. 13 Ciclograma del banco 2 con las tres optimizaciones.....	64
Figura 4. 14 Ciclograma del banco 3 con las tres optimizaciones.....	64
Figura 4. 15 Estadística de recursos de la optimización 1.....	66
Figura 4. 16 Estadística de recursos de la optimización 2.....	67
Figura 4. 17 Estadística de recursos de la optimización 3.....	69
Figura 4. 18 Robot ABB2 trasladándose a extraer pieza en banco 2 mientras se solidifica pieza en banco 3.....	70
Figura 4. 19 Flujo de operación en los tres bancos.....	73
Figura 4. 20 Estadística de recursos del banco 2 durante la simulación del modelo con flujo de los 3 bancos.....	75
Figura 4. 21 Estadística de recursos del banco 1 durante la simulación del modelo con flujo de los 3 bancos.....	75
Figura 4. 22 Estadística de recursos del banco 3 durante la simulación del modelo con flujo de los 3 bancos.....	76
Figura 4. 23 Divergencia de los tiempos de operación de cada banco a través de los cinco modelos de simulación	78

INDICE DE TABLAS

Tabla 3. 1 Tabla de tiempos y movimientos del robot ABB1	43
Tabla 3. 2 Tabla de tiempos y movimientos del robot ABB2	43
Tabla 3. 3 Tabla de tiempos y movimientos del robot KUKA1.....	44
Tabla 4. 1 Tabla de tiempos de movimientos y sub-procesos del robot KUKA1	54
Tabla 4. 2 Tabla de tiempos de movimientos del robot KUKA1 posterior a la segunda optimización.....	62
Tabla 4. 3 Tabla de tiempos para el robot ABB2 posterior a la segunda optimización	63
Tabla 4. 4 Movimientos nuevos (gris) del robot KUKA1	71
Tabla 4. 5 Movimientos nuevos (gris) del robot ABB2.....	72
Tabla 4. 6 Comparación de los bancos de la línea flexible de cabezas de motor en los modelos actual, optimización 1, optimización 2, optimización 3 y flujo con sincronización de los 3 bancos	76
Tabla 4. 7 Impacto de optimización en cada uno de los bancos a través de los cinco modelos de simulación	79
Tabla 4. 8 Porcentajes reales de cada banco con respecto a su tiempo original	80

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

Desde los inicios de la industria, los precios de los productos han dependido principalmente del coste de su fabricación y márgenes de beneficio. Actualmente, la mayoría de los precios de los productos son fijos mientras que las ganancias dependen en la reducción del costo de dichos sistemas [1]. Hoy en día la producción de componentes automotrices es una parte muy importante en la industria automotriz, por tal motivo la industria alcanzará su máximo rendimiento mediante la implementación de estrategias de manufactura [2].

Durante las últimas 3 décadas se han creado diferentes estrategias de manufactura orientadas a lograr objetivos específicos tales como: el diseño, fabricación y calidad de los productos. Esto se ha logrado debido a los avances tecnológicos introducidos por científicos e ingenieros, los cuales han aprovechado eficientemente la utilización de computadoras y programas de cómputo [3].

En el nuevo mercado global tan competitivo, la industria se ha visto forzada a adoptar nuevos conceptos organizacionales y nuevas tecnologías para mejorar el rendimiento de los sistemas de manufactura. Debido a la alta cantidad de variables y parámetros involucrados en la caracterización de dichos sistemas, se ha demostrado que la metodología de Simulación de Eventos Discretos (DES por sus siglas en inglés) es una técnica muy útil para mejorar el rendimiento de dichos sistemas. Como técnica ha sido utilizada para diferentes tipos de dichos

sistemas. Si se elige correctamente, el sistema de simulación es capaz de abordar la mayoría de los ejercicios en una compañía de manufactura [4].

1.2 Evolución de la Industria

Una industria es la parte de una economía que produce bienes materiales los cuales son altamente mecanizados y automatizados. Desde entonces los inicios de la industrialización, los avances tecnológicos han dado lugar a cambios de paradigmas que hoy en día son post-nombradas “revoluciones industriales”, en el campo de mecanización (la llamada primera revolución industrial), del uso intensivo de la energía eléctrica (la llamada segunda revolución industrial), y de la extendida era de la digitalización (nombrada tercera revolución industrial) en la Figura 1.1 se puede observar la evolución de la industria que ha tenido desde el año 1784 hasta la actualidad [5].

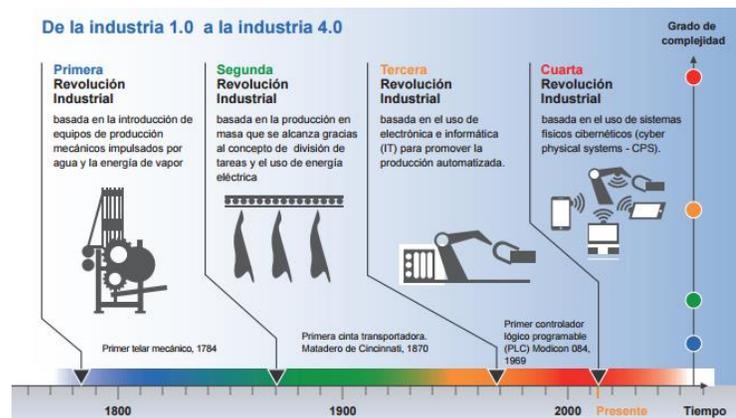


Figura 1. 1 Evolución de la Industria [6].

Las empresas frecuentemente encuentran técnicas y herramientas para mejorar la productividad y la calidad para el éxito a largo plazo con el fin de maximizar la ventaja competitiva. La complejidad en el diseño del flujo de procesos y materiales, así como la programación de órdenes de producción, paros por mantenimiento y cambios de herramientas, han generado que las grandes empresas, busquen crear una sinergia entre los métodos convencionales de producción como la manufactura esbelta (Lean Manufacturing) y el nuevo concepto de industria 4.0 [7].

Este término es la proliferación de sistemas cyber-físicos (CPS por sus siglas en inglés) que verticalmente integran distintos componentes dentro de una fábrica para implementar un sistema de fabricación flexible y reconfigurable, es decir, la “fábrica inteligente”, este es una de las características claves de este concepto [8].

1.3 Industria 4.0 y Manufactura Esbelta

El principal objetivo de la Industria 4.0 es describir un entorno industrial mucho más dinámico y complejo, altamente distribuido y reconfigurable. Con profusión de datos redundantes y que deberá ser enfrentado de una manera holística. Analizando el sistema a controlar, el controlador digital con su algoritmo de control y todo el resto del software interviniente (sistemas operativos de tiempo real, protocolos de red, etc.) como un solo sistema híbrido de gran complejidad y extendido geográficamente. En la Figura 1.2 se muestra las áreas en las que se conforma la Industria 4.0 [9].

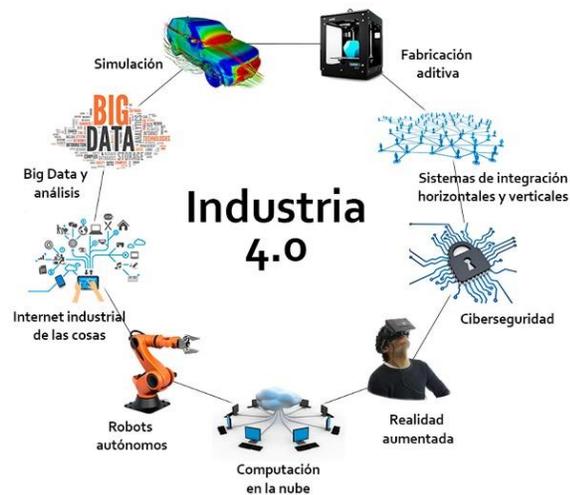


Figura 1. 2 Industria 4.0 [10].

La industria 4.0 envolverá las técnicas de integración CPS a través de la manufactura, logística y el uso del internet de las cosas y servicios en procesos industriales. Estos sistemas interconectados referidos como CPS se

comunicarán entre cada uno de ellos para cumplir con las tareas que se tengan establecidas en el proceso [11].

La manufactura es el arte de transformación de los materiales a productos, hoy en día la ingeniería de la manufactura es definida como una disciplina que envuelve la habilidad de planear, investigar y practicar las maneras de fabricación con la finalidad de desarrollar sistemas, procesos, maquinas, herramientas y equipos para producir productos de alta calidad. Temas fundamentales de la ingeniería de manufactura incluyen: tecnología de los materiales, formado y laminado del metal, procesos de ensamblaje, robots, maquinado tradicional y no tradicional, automatización y manufactura esbelta [12].

La implementación de estrategias de la manufactura esbelta representa una robusta contribución a las secuencias de fase que dirige a la excelencia operativa y a la mejora continua a través de la eliminación de actividades sin valor agregado. Por otro lado, estas prácticas contribuyen substancialmente al rendimiento operacional [13].

1.4 Maquetas Digitales

La evaluación de diferentes escenarios para un proceso en específico es fundamental para el desarrollo exitoso y ejecución de dicho proyecto. En el pasado, muchos expertos han utilizado un sistema de maqueta digital (Digital Mock-Up). La maqueta digital es una tecnología que sirve para hacer efectivo un proceso o trabajo por medio del uso de ambientes virtuales que a través de ellos representan un esquema lógico y físico del comportamiento del sistema, en la Figura 1.3 se observa un ejemplo de este término. Estas maquetas digitales también pueden servir para ahorrar tiempo, dinero y reducir los riesgos de hacer cambios posteriormente en dicho sistema [14].

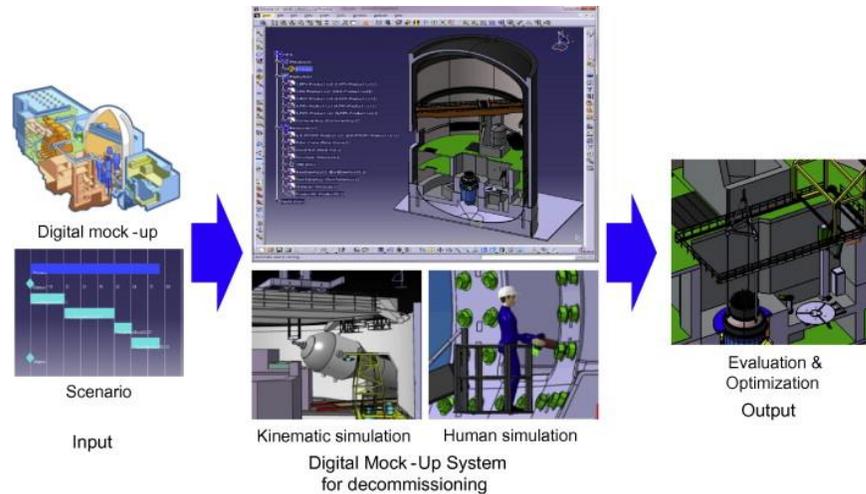


Figura 1. 3 Ejemplo del uso de una maqueta digital (Digital Mock-Up) [15].

En las industrias automotriz, aeroespacial y naval, las maquetas digitales son comúnmente usadas para la examinación de ensambles, disposición de equipos y la comprobación de interferencias. La visualización de una maqueta digital debe contener las siguientes características [16]:

- Ser capaz de cargar todos los modelos de equipos en CAD
- Cumplir con los requisitos de precisión de las aplicaciones
- Tener un buen rendimiento de visualización
- Tener una buena calidad de visualización

En general un modelo de CAD tiene una amplia cantidad de información tales como:

- Información precisa
- Representación de límites
- Historial del modelado
- Visualización de datos
- Información de la manufactura del producto

1.5 Simulación

Muchos de los experimentos de las áreas de ciencia, tecnología y negocios que se hacen hoy en día se ven limitados en su realización debido a que tienen un alto nivel de peligro, son casi imposibles de realizarlos o porque simplemente es demasiado costoso el llevarlos a cabo. En estos casos podemos beneficiarnos con el uso de la simulación por computadora para aclarar nuestro entendimiento de algunas partes del sistema que se encuentran en la realidad, en la Figura 1.4 se observa una persona haciendo uso de la simulación donde él simula que está en la cabina de vuelo de un avión [17, 18].



Figura 1. 4 Ejemplo de Simulación [19]

En la simulación, se usan modelos para crear situaciones específicas de procesos, materiales, dispositivos, etc. con los cuales se puede estudiar el comportamiento que estos tendrían en la vida real. De esta manera se puede ser capaz de llevar a cabo experimentos que en un principio eran demasiado costosos, peligrosos o simplemente imposibles.

Algunas de las veces los modelos pueden ser físicos como por ejemplo el modelo escala de un avión en un túnel de viento o el modelo escala de una planta química. Otros modelos pueden ser abstractos tales como los modelos macroeconómicos que consisten en ecuaciones que relacionan las tasas de interés, el desempleo y la inflación o ecuaciones diferenciales parciales que describen el patrón del clima mundial, en la Figura 1.5 se puede apreciar la simulación del comportamiento del clima mundial [17, 18].

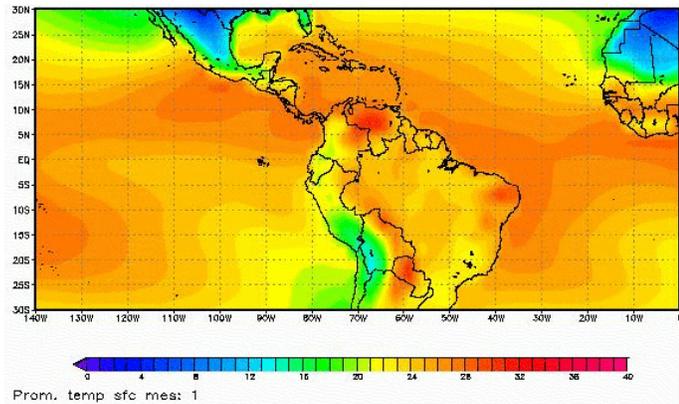


Figura 1. 5 Ejemplo de Simulación del Clima Mundial [20]

En las empresas se utiliza la simulación para predecir las consecuencias que tendrá la toma de una decisión determinada como, por ejemplo:

- Control de Inventarios
- Planes de mantenimiento
- Localización de recursos
- Predicción de ventas o demandas

La simulación permite abordar desde problemas sencillos hasta problemas muy complejos. Aunque esta no pudo ser aplicada de manera satisfactoria hasta la aparición de los primeros ordenadores en los años 40 y 50 [21].

Ventajas:

- Es un método directo y flexible
- La simulación nos permite formular condiciones extremas con riesgos nulos.
- La simulación no interfiere con el mundo real. Permite experimentar.
- Mediante la simulación podemos “influir en el tiempo” de los procesos.
- La simulación nos permite resolver problemas que tienen una solución analítica muy compleja.
- Permite estudiar la interacción entre las diferentes variables del problema.

Desventajas:

- La simulación no genera soluciones optimas globales.

- Una buena simulación puede ser complicada, gran número de variables.
- Cada simulación es única.

1.6 Metodología DES

La Simulación de Eventos Discretos es una herramienta esencial para planear, operar y evaluar sistemas de manufactura. La metodología DES se aplica para modelar un sistema que cambia con el tiempo mediante la representación de los cambios de las variables de estado en puntos separados a través del tiempo [22].

En la mayoría de las simulaciones de manufactura, el tiempo es la variable de mayor importancia. Los modelos DES rastrean principalmente el flujo de entidades dentro de un proceso en particular. Este rastreo se realiza utilizando los tiempos en el que varios eventos ocurren. La principal tarea del modelador es comprender el comportamiento de las variables en el sistema, eventos que pueden cambiar el valor de estas variables y la lógica asociada a cada evento. Este tipo de programas solamente toma en consideración ciertos tiempos que son de importancia para el curso de la simulación, como por ejemplo la entrada o salida de un objeto en la estación [23].

Finalmente, los conceptos más importantes relacionados al modelo de simulación DES, son los siguientes:

- **Sistemas:** una colección de entidades (por ejemplo: instalaciones, procesos, etc.) que comprenden una estructura total
- **Estado de un sistema:** la colección de variables de estado necesaria para describir al sistema en un punto particular en el tiempo
- **Evento:** punto en el tiempo donde la variable estado puede cambiar de valor
- **Modelo:** descripción del comportamiento del sistema (ejemplo: relación lógica)

- Simulación: uso de computadora para evaluar numéricamente un modelo
- Emulación: el modelo de simulación estática sin reglas que definen la dinámica interna (ejemplo: no hay regla de secuenciación dentro de la simulación que le dice a una pieza de trabajo que se encuentra al lado de una estación).

1.6.1 El proceso de modelado de entrada y salida

Los científicos e ingenieros, se ocupan principalmente del análisis cuantitativo de los sistemas y del desarrollo de técnicas de diseño, control y medición explícita del desempeño del sistema en base a criterios bien definidos. Podemos considerar un modelo como un dispositivo que simplemente duplica el comportamiento del propio sistema [24].

Para describir este comportamiento, es necesario desarrollar algunos medios matemáticos; simplificando la notación, se representan las variables de entrada a través de un vector columna $u(t)$ y las variables de salida a través de otro vector de columna $y(t)$; para abreviar, nos referimos a ellos como la entrada y la salida respectivamente [24]. Así, escribiremos:

$$u(t) = \alpha^T \quad \text{Ecuación 1.1}$$

$$\alpha = [u_1(t), \dots, u_p(t)]^T \quad \text{Ecuación 1.2}$$

Donde α denota la transposición de un vector, y de manera similar:

$$y(t) = [y_1(t), \dots, y_p(t)]^T \quad \text{Ecuación 1.3}$$

Para completar un modelo, es razonable postular la existencia de alguna relación matemática entre la entrada y la salida. Se asume que se pueden definir funciones como:

$$y_1(t) = g_1(u_1(t), \dots, u_p(t)), \dots, y_m(t) = g_m(u_1(t), \dots, u_p(t))$$

Ecuación 1.4

Y obtener el modelo del sistema en la forma matemática:

$$y = g(u) = [\beta \dots, \gamma]^T$$

Ecuación 1.5

$$\beta = g_1(u_1(t), \dots, u_p(t))$$

Ecuación 1.6

$$\gamma = g_m(u_1(t), \dots, u_p(t))$$

Ecuación 1.7

Donde $g(u)$ denota el vector columna cuyas entradas son las funciones β ,
 y.

Este es el proceso de modelado más simple, y se muestra en la Figura 1.6.

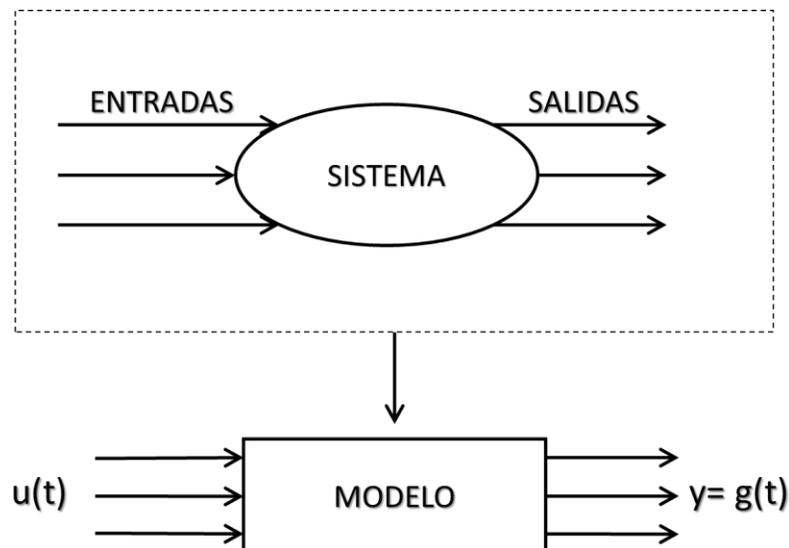


Figura 1. 6 Proceso de Modelado [24].

1.6.2 Sistema de Tiempo Discreto

Considerando que el tiempo es una variable continua, la cual nos permite desarrollar modelos basados en ecuaciones diferenciales, que son particularmente atractivos desde el punto de vista matemático; supongamos que debemos definir las variables de entrada y salida de un sistema en instantes de tiempo específicos, esto da como resultado lo que se llama un sistema de tiempo discreto, en contraste a los de tiempo continuo [25].

En modelos de tiempo discreto, la línea de tiempo se concibe como una secuencia de intervalos definida por una secuencia de puntos $t_0 < t_1 < \dots < t_k < \dots$ se supone que todos los intervalos de la amplitud T son iguales, es decir, $t_{k+1} - t_k = T$ para $k = 0, 1, 2, \dots$ la constante T se denomina como intervalo de muestreo. La variable real t es entonces reemplazada por una variable entera k , que cuenta el número de intervalos transcurridos desde un punto de referencia dado, usualmente $k=0$ [24].

La Figura 1.7 muestra la forma de representar una ruta de muestreo de tiempo continuo $x(t)$ para dar lugar a una ruta de muestreo de tiempo discreto $x(k)$, con el período de muestreo T . Es importante anotar que la discretización en el tiempo no implica discretización del espacio de estado, es decir que el estado todavía puede tomar cualquier valor en el conjunto de números reales, como es el caso de tiempo continuo [24].

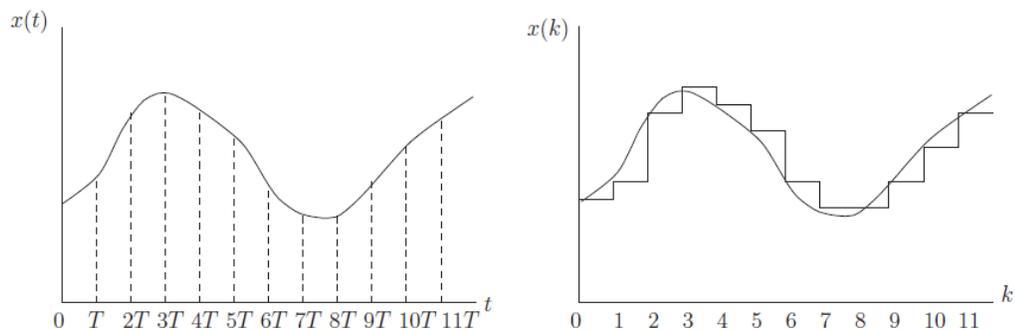


Figura 1. 7 Ejemplos de Sistema de Tiempo Continuo (izq.) y Tiempo Discreto (der.) [24].

Ahora las funciones de entrada y salida $u(t)$ y $y(t)$ que representaban a un sistema de tiempo continuo serán remplazadas por las funciones $u(k)$ y $y(k)$ similarmente, el estado $x(t)$ es remplazado por $x(k)$. Así, el modelo se convierte en [24]:

$$x(k+1) = f(x(k), u(k), k), \quad x(0) = x_0 \quad \text{Ecuación 1.8}$$

$$y(k) = g(x(k), u(k), k) \quad \text{Ecuación 1.9}$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones por medio de ecuaciones diferenciales, se obtiene la descripción del comportamiento dinámico del sistema:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad \text{Ecuación 1.10}$$

$$y(k) = Cx(k) + Du(k) \quad \text{Ecuación 1.11}$$

Donde A, B, C, D son todas matrices constantes que contienen los parámetros del sistema.

1.6.3 Propiedades características de los sistemas de eventos discretos

En contraste a los Sistemas Dinámicos de Variable Continua (CVDS por sus siglas en inglés) los Sistemas de Eventos Discretos deben satisfacer las siguientes propiedades [24]:

- 1 El espacio de estado es un conjunto discreto
- 2 El mecanismo de transición de estado es impulsado por eventos

Muchos sistemas, particularmente tecnológicos, son de hecho sistemas de eventos discretos. Aquí se presentan algunos ejemplos de sistemas de estado discretos:

- El estado de una maquina puede ser seleccionarse de un conjunto tales como {ON, OFF} o {OCUPADA, LIBRE, DAÑADA}
- Cualquier tipo de inventario que consta de entidades discretas (por ejemplo: productos, unidades monetarias, personas, etc.) tienen un espacio de estado natural en íntegros no negativos {0, 1, 2...}.
- La mayoría de los juegos de destreza pueden ser modelados como tiempos de estado discreto. En el ajedrez, por ejemplo, cada configuración de tabla define un estado.

Las dos características fundamentales que distinguen CVDS de DES son claramente revelados cuando se comparan las trayectorias de cada uno de estos sistemas, en la Figura 1.8 se muestra esta diferencia [24].

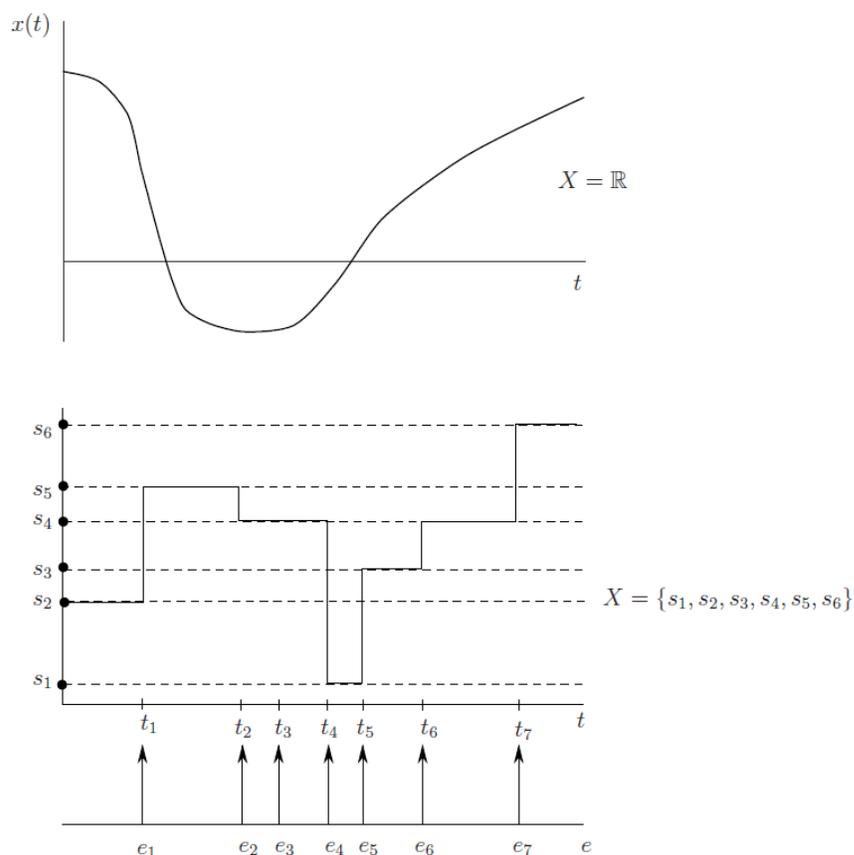


Figura 1. 8 Comparación de trayectoria para Sistemas Dinámicos de Variable Continua (CVDS) y Sistemas de Eventos Discretos (DES). En un CVDS; $x(t)$ es generalmente la solución de una ecuación diferencial $\dot{x}(t)=f(x(t), u(t), t)$. En un DES, $x(t)$ es una función constante por partes, ya que el estado salta de un valor discreto a otro cuando se produce un evento [24].

- Para el CVDS mostrado, el espacio de estado X es un conjunto de números reales, y $x(t)$ puede tomar cualquier valor de este conjunto. la función $x(t)$ es la solución de una ecuación diferencial de la forma general $\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t)$, donde $u(t)$ es la entrada.
- Para el DES, el espacio de estado es un conjunto discreto $X = \{s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6\}$. la trayectoria simple sólo puede saltar de un estado a otro siempre que se produzca un evento. Téngase en cuenta que un evento puede tener lugar, pero no provocar una transición de estado, como es el caso de e_3 . En este punto, no hay ningún análogo a $\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t)$, es decir, no se proporciona ningún mecanismo para especificar como los eventos pueden interactuar con el tiempo o como su tiempo de ocurrencia podría ser determinada.

1.7 Plant Simulation®

El software Plant Simulation® es una herramienta de simulación de eventos discretos que ayuda a crear modelos digitales de los sistemas lógicos (tales como líneas de producción), de manera que se puede explorar las características del sistema y optimizar su rendimiento, en la Figura 1.9 se muestra un ejemplo de la utilización de este software.



Figura 1. 9 Ejemplo de utilización del software Plant Simulation [26].

Estos modelos digitales permiten llevar a cabo experimentos y escenarios hipotéticos sin intervenir a los sistemas de producción existentes. Pueden ser de gran ayuda en el proceso de planificación, mucho antes de que se instalen los sistemas reales de producción [27].

De entre las herramientas que utiliza el software se encuentran: análisis de obstáculos, estadísticas y gráficos. Los cuales permiten a los usuarios evaluar diferentes escenarios de fabricación y con esto tomar decisiones rápidas y fiables en las primeras etapas de planificación de la producción. Este software ayuda en:

- Detectar y eliminar problemas en la línea productiva que de otra manera requerirían costos y tiempo en tomar las medidas correctivas durante la producción.
- Minimizar el coste de inversión de las líneas de producción sin poner en riesgo la producción requerida.

Optimizar el rendimiento y el uso de energía de sistemas de producción ya existentes por medio de adopción de medidas que se han verificado en un entorno de simulación antes de su implementación [26].

1.7.1 Procedimiento de Simulación

De acuerdo a la norma alemana VDI 3633 se recomienda el siguiente enfoque [28]:

- Formulación del problema. - Establecimiento del problema que será estudiando por medio de la simulación.
- Prueba de simulación en mérito: Evaluación del nivel de complejidad de la simulación, por ejemplo: muchos factores a considerar del sistema, datos imprecisos, exploración progresiva de los límites del sistema, etc.
- Formulación de objetivos. – La definición de los objetivos del sistema es un paso muy importante en la preparación del modelo de simulación.

Algunos ejemplos de objetivos frecuentes son los siguientes: minimización de tiempo del proceso, disminución de inventarios, aumentar los tiempos de entrega, entre otros objetivos.

- Recopilación y análisis de datos. – Los datos requeridos para el estudio de la simulación pueden ser estructurados de la siguiente manera: los datos de carga del sistema, datos de la organización y datos técnicos.
- Modelación. – La fase de modelación incluye construcción y pruebas del modelo de simulación. La modelación usualmente consiste en dos etapas:
 1. Derivar un modelo icónico del modelo conceptual
 2. Documentación del resultado de la modelación para posibles cambios en el futuro
- Ejecución de la simulación. – Dependiendo de los objetivos del estudio de simulación, se realizarán experimentos basados en un plan de pruebas. Los datos de entrada y salida, así como los parámetros fundamentales del modelo de simulación deben ser documentados para cada experimento.
- Análisis e interpretación de resultados. - Los valores a cambiar en el sistema modelado dependerán de los resultados de la simulación. La correcta interpretación de los resultados de la simulación influirá significativamente en el éxito del estudio.
- Documentación. - La documentación debe incluir un resumen de la cronología del estudio y documentar el trabajo realizado. Por último, es recomendado describir el modelo de simulación en términos de su estructura y funcionalidad.

1.7.2 Aplicaciones de la Simulación

La simulación se puede utilizar durante la planeación, implementación y operación de los equipos. Algunas de las aplicaciones pueden ser las siguientes [29]:

- **Fase de Planeación:** Identificación de cuellos de botella en la derivación de mejoras potenciales, descubrir potenciales ocultos e inutilizables, mínimo y máximo de utilización, yuxtaposición de diferentes alternativas de planificación, pruebas de argumentos sobre capacidad, eficacia del control, límites de rendimiento, velocidad de producción, volúmenes de existencia y visualización de alternativas de planificación para la toma de decisiones.
- **Fase de Implementación:** Pruebas de rendimiento actual y futuro, análisis de problemas, simulación del sistema en condiciones óptimas y en accidente, entrenamiento de nuevos empleados y simulación de comportamientos de rampa ascendente y descendente.
- **Fase operacional:** Ensayos de alternativas de control, revisión de estrategias de emergencia, programas de accidente, prueba de garantía de calidad, gestión de fallos y determinación de las probables fechas de entrega de productos.

CAPITULO II

ANTECEDENTES

2.1 Optimización por medio de Simulación

Existen diferentes formas de realizar una optimización de una línea de producción basándose en diferentes métodos de simulación. Uno de ellos es utilizado desde su creación en el año 1960 por su desarrollador L.A. Zadeh [30] que es la simulación difusa esta se caracteriza por realizar modelos de simulación probabilísticos utilizando estimaciones matemáticas, esto debido a no contar con la información suficiente o por factores humanos que varíen la simulación.

Posteriormente los métodos de simulación y optimización tomaron un gran auge en las áreas de medicina, ingeniería y economía. En este último se encuentra la contribución de T. de Biolley y J. Paelinck en el año 1966 [31] donde por medio de expresiones logarítmicas (Ecuación 2.1) y las herramientas de simulación que existían en esa época, lograron predecir y optimizar las formulaciones de los modelos económicos de Bélgica.

$$\Delta' \log_{10} \frac{(P-P_g)}{(L-L_g)} = a \left(\frac{l}{P-P_g} \right)^{-1} + b \frac{[\Delta' \log_{10}(L-L_g)]^2}{(l/P-P_g)^{-1}} + C$$

Ecuación 2.1

Otro método que existe para optimizar una línea de producción es el que utilizaron los ingenieros Zailin Guan y Luguang Cao en el año 2011 [32]. Este se basaba en la tecnología de la empresa digital que por medio del software Delmia/Quest® ellos lograron encontrar el esquema lógico óptimo para el

proceso. En la Figura 2.1 se puede apreciar la simulación de línea de producción en el software Delmia/Quest®.

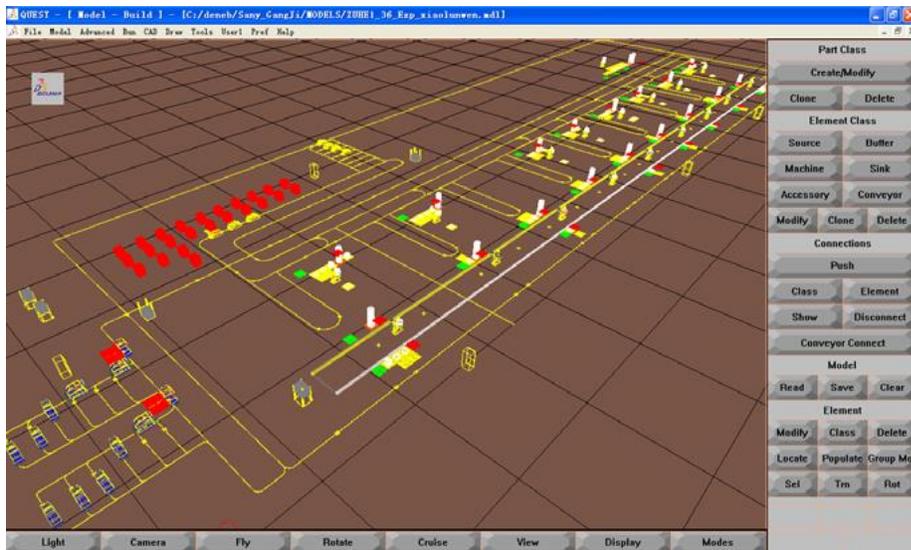


Figura 2. 1 Modelo de simulación de la distribución de las líneas de producción en el software Delmia/Quest [32].

Uno de los métodos actuales que existen para la optimización de líneas es el que utilizaron los ingenieros XinJian Zhou, XiangBin Xu y Wei Zhu en el año 2011 [33]. Este trabajo fue realizado en la plataforma eM-Plant que hoy en día es conocida como Plant Simulation®, un software de la empresa SIEMENS capaz de simular, analizar y optimizar diferentes modelos basados en líneas de producción reales. Optimizaron una línea de ensamblaje de motores diésel X4105BC, por medio del software fue posible tomar importantes decisiones para el incremento del número de ensambles en la línea. En la Figura 2.2 y 2.3 se muestra el modelo de simulación antes y después de la optimización de la línea de ensamble descrita.

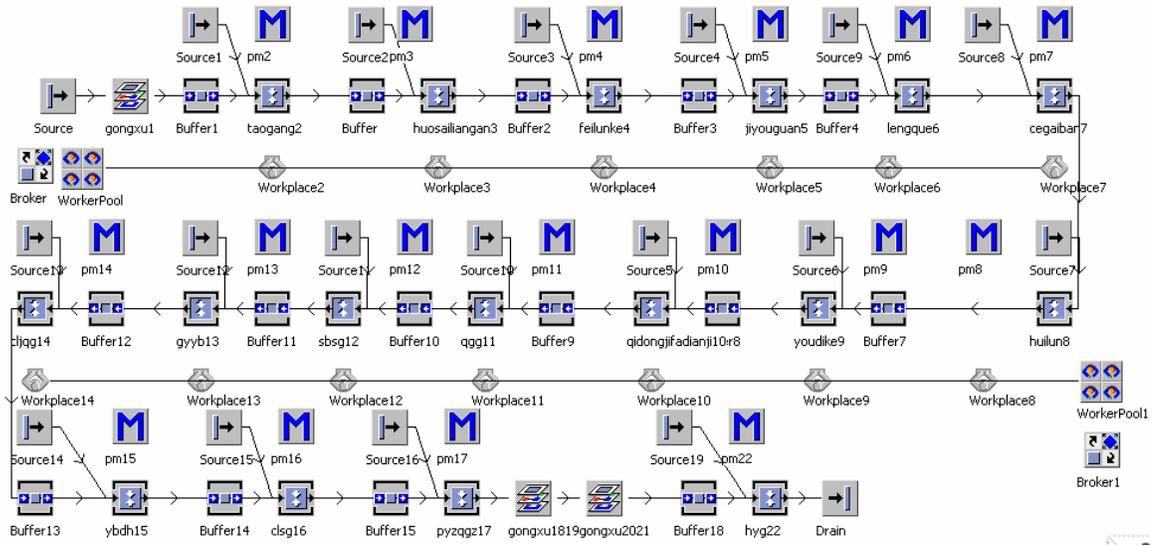


Figura 2. 2 Modelo de simulación en eM-Plant de línea de ensamble X4105BC [33].

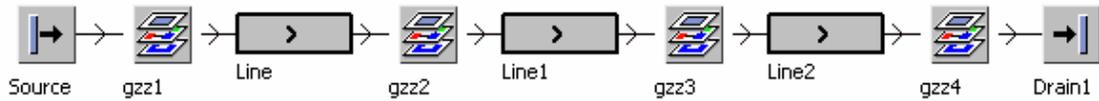


Figura 2. 3 Modelo de simulación en eM-Plant de línea de ensamble X4105BC después de la optimización [33].

Otro proyecto que fue realizado por medio de la simulación de eventos discretos y apoyándose también con la metodología para eventos estocásticos conocida como Decisión de Procesos de Markov (MDP por sus siglas en inglés). La MDP se caracteriza por el cálculo de expectativas de diferentes acciones bajo las condiciones que opera un proceso en particular y encuentra la mejor acción para atacar el problema que un determinado proceso está presentando. En el año 2013 en Beijing, China, los ingenieros Yuan Feng, Wenhui Fan y Yuanhui Qin [34] optimizaron una línea de ensamble automotriz utilizando estas dos metodologías, donde la principal característica de la línea era que existían eventos puntuales que aparecían en el transcurso del proceso. En la Figura 2.4 se muestra el flujo de proceso de esta línea.

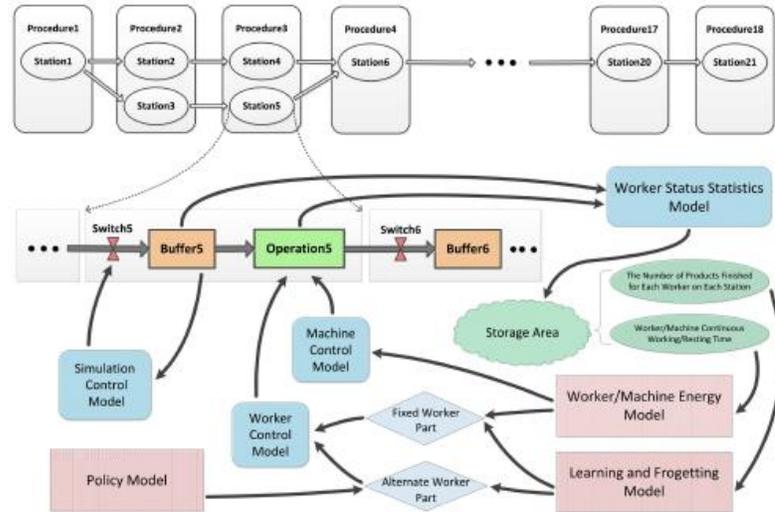


Figura 2. 4 Modelo de simulación de la estructura que conforma la línea de producción [34].

El software Plant Simulation® fue utilizado en el año 2014 por Trebuña [35], Peter et al para la planeación y expansión de una línea nueva en una empresa que se centra en el procesamiento de cuero para la producción de asientos y accesorios de interiores de automóviles. Se generaron simulaciones en 2D y 3D de la línea inicial para describir y entender el funcionamiento del proceso. Como resultado de este procedimiento, se encontraron diversas anomalías y cuellos de botella en los transportadores que conectaban las estaciones de trabajo. Al crear el modelo virtual de la línea nueva tomaron en consideración los resultados de estas simulaciones y la distribución de los equipos con los que la línea iba a contar para tomar estrategias en el momento de su implementación y que no presentara las anomalías observadas en la primera línea. En la Figura 2.5 y 2.6 se muestra la línea actual y nueva de asientos e interiores automotrices en 2D y 3D.

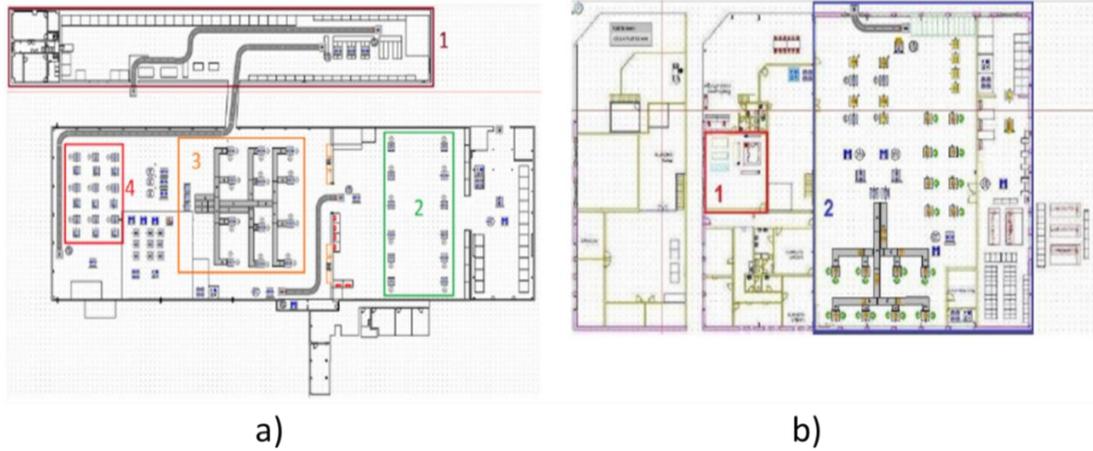


Figura 2. 5 a) Línea actual y b) nueva de producción de asientos e interiores automotrices en 2D [35].

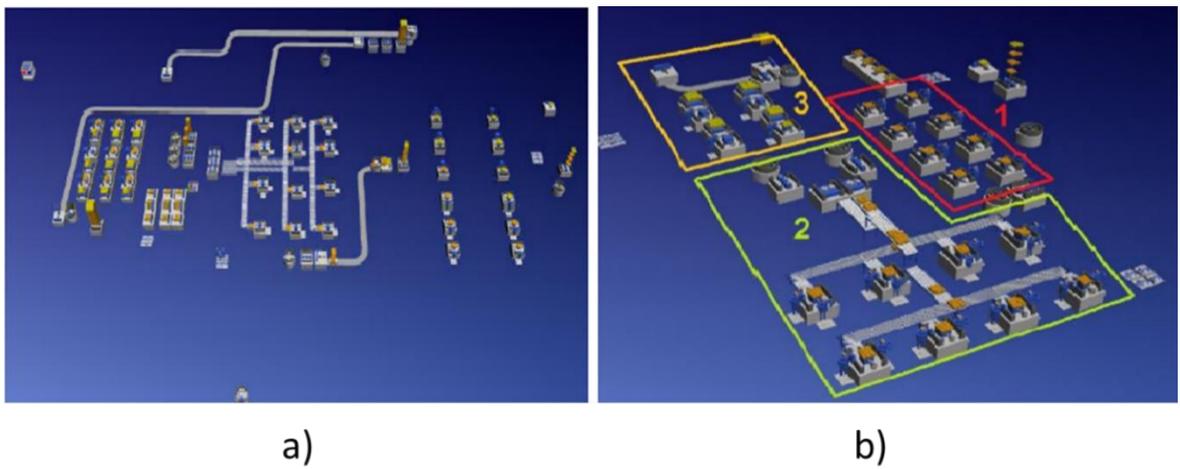


Figura 2. 6 a) Línea actual y b) nueva de producción de asientos e interiores automotrices en 3D [35].

El software es una poderosa herramienta al realizar estudios para eficientar los recursos u optimizar los flujos de procesos o materiales de una empresa, sin tener que invertir en una gran cantidad de tiempo y dinero durante el estudio (Figura 2.7).

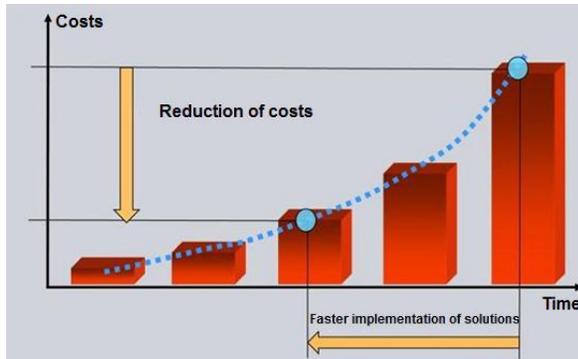


Figura 2. 7 Reduce costos y tiempos en implementación de proyectos de optimización [36].

Tal es el caso del estudio del ingeniero Kliment, Marek et al en el año 2014 [36], donde por medio del software encontró los cuellos de botella y tiempos muertos que presentaba una empresa dedicada en la fabricación de sillas domésticas, en dicho estudio el determino por medio del software los puntos críticos donde existía la mayor cantidad de tiempos muertos:

- Traslado de piezas entre plantas
- Gran cantidad de estaciones de trabajo para un solo proceso
- Máquinas en espera por falta de material

A continuación, se presentan los principales resultados que presento este estudio, así como también en la Figura 2.8 se muestra el modelo original y optimo del proceso.

- Reubicación de línea ubicada en la nave #2 a nave #1 y con esto eliminando el tiempo en llevar las piezas de una planta a otra
- Reducción de estaciones de trabajo por medio de implementación de equipos capaces de realizar varios procesos a la vez
- Eliminación de actividades sin valor agregado

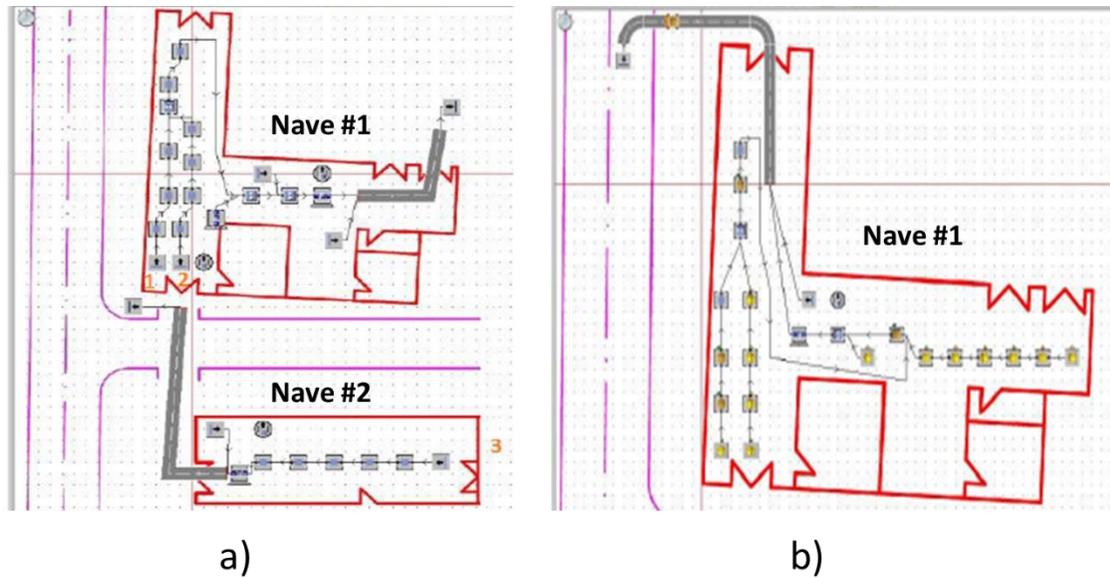


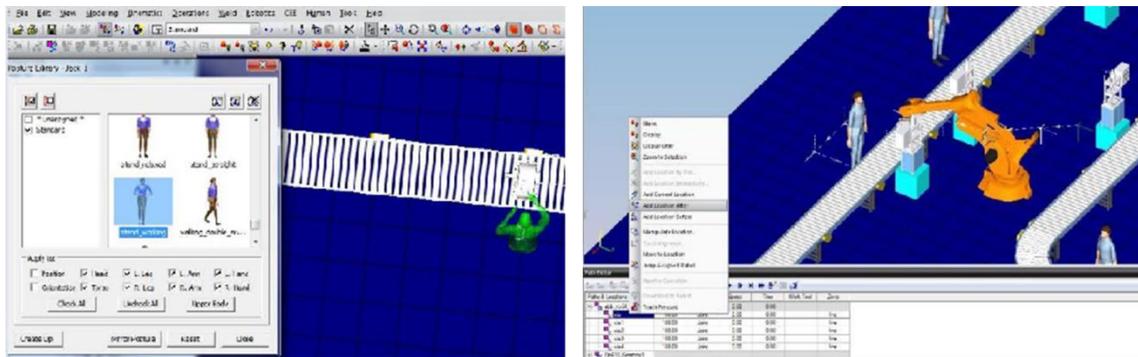
Figura 2. 8 a) Línea actual y b) óptima de producción de sillas domésticas [36].

Una de las grandes necesidades que tienen las compañías que utilizan el concepto de industria digital, es predecir sus procesos antes de ser implementados en el futuro. La simulación en 3D puede mostrar el estado actual, las condiciones en la cual opera un sistema y por supuesto una imagen futura de un sistema que se quiera desarrollar. De esta manera se puede determinar si la implementación de un proyecto es viable o no. Hoy en día se cuenta con una gran variedad de programas de simulación que son capaces de desarrollar este tipo de proyectos, pero no todos ofrecen las mismas herramientas.

Process simulate® es una parte del paquete del software Tecnomatix® similar al Plant Simulation®, pero con más herramientas en la simulación de los modelos en 3D. Este programa se centra primordialmente en la creación de simulaciones de sistemas operando, movimientos de trabajadores, máquinas, productos y objetos que puedan interactuar en los sistemas.

En el año 2014 el ingeniero Peter Trebuña et al [37], realizaron simulaciones de movimientos de trabajadores y de robots para comprobar si este software es útil al momento de describir los pasos de operación de un sistema o proceso. Estableciéndolo como una herramienta viable en la fase de desarrollo

de los proyectos de implementación de procesos. A continuación, se muestra en la Figura 2.9 algunas simulaciones realizadas con este software.



a)

b)

Figura 2. 9 Simulación de trabajadores (a) y robots (b) [37].

La decisión de invertir en un sistema de fabricación representa un proceso de toma de decisiones estratégicas que afectan al éxito a largo plazo, la competitividad y la rentabilidad de una empresa. Un modelo de simulación se utiliza principalmente para estimar las características operativas, como el tiempo de inactividad, la utilización de la capacidad, los tiempos de espera y la productividad. La evaluación de los parámetros de funcionamiento del nuevo equipo de fabricación se completa posteriormente mediante la evaluación de sus impactos financieros.

En recientes trabajos, el ingeniero František Freiberg et al [38], demostraron por medio de su trabajo, que es posible utilizar la simulación de eventos discretos para tomar decisiones de inversión tecnológica en manufactura avanzada, debido a que es una herramienta precisa, rápida de analizar y cuantifica los impactos de diversas opciones. Por medio de la DES y utilizando el software Tecnomatix® determinaron los parámetros de rendimiento que afectaban a una línea de manufactura avanzada en el año 2015 (Figura 2.10).

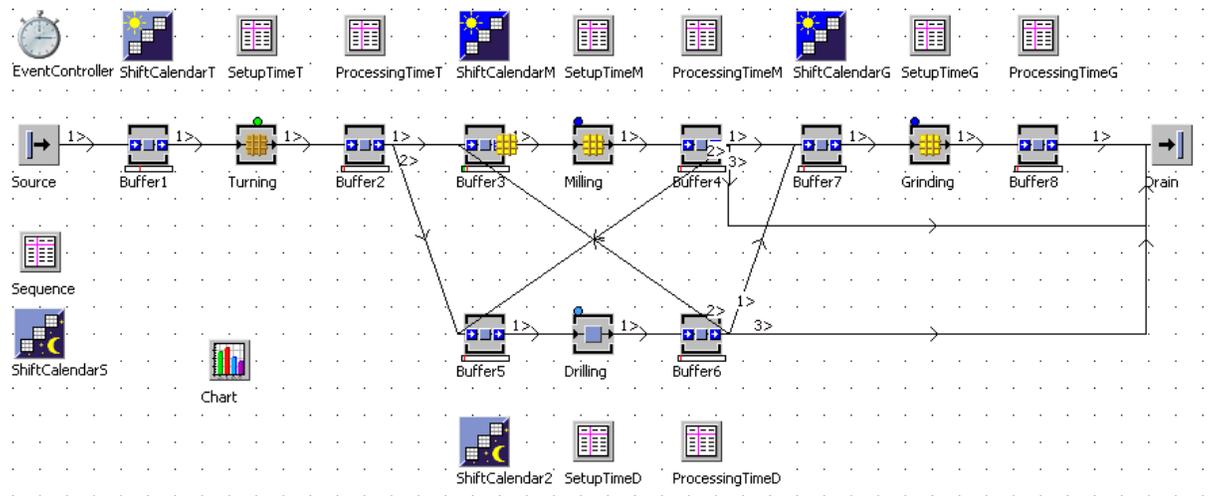


Figura 2. 10 Modelo de línea de manufactura avanzada compuesta por tornos universales, fresadoras de tipo rodilla, perforadoras de columna redonda y rectificadoras [38].

Es importante destacar que el software es capaz de determinar el tiempo de trabajo, de espera, set-up, pausa, tiempo no planeado, entre otras, de cada una de las estaciones de trabajo por medio de estadística de recursos (Figura 2.11). También ha sido utilizado para simulaciones que determinan la transparencia ecológica y económica en los sistemas de fabricación para la producción de múltiples variantes. Con el fin de identificar las ineficiencias, consumo de energía y costos en un sistema de manufactura.

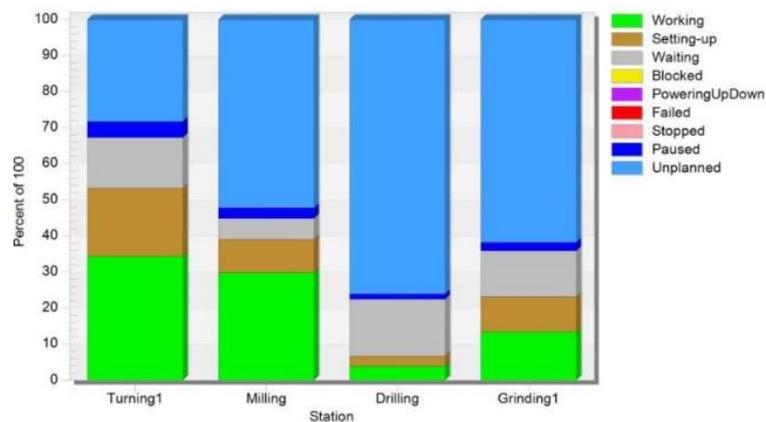


Figura 2. 11 Estadística de recursos de cada estación de trabajo [38].

Mediante el uso de la metodología de diseño de experimentos, la implementación permite el examen detallado de diferentes escenarios, mediante la alternancia sistemática de variantes. Además, es posible rastrear objetos individuales (por ejemplo, productos) y medir su contribución ecológica y económica específica a módulos de proceso único, así como a todo el sistema de fabricación.

Por medio de la transparencia obtenida que estudiaron los ingenieros Andreas Kruse, et al en el año 2015 [39], sobre las ineficiencias en un sistema de fabricación, así como el conocimiento sobre los efectos de la alternancia de factores de influencia (por ejemplo, tiempos de configuración o tasas de desecho de un módulo de proceso específico); proporcionaron un punto de partida para la optimización esbelta y verde en un sistema de fabricación.

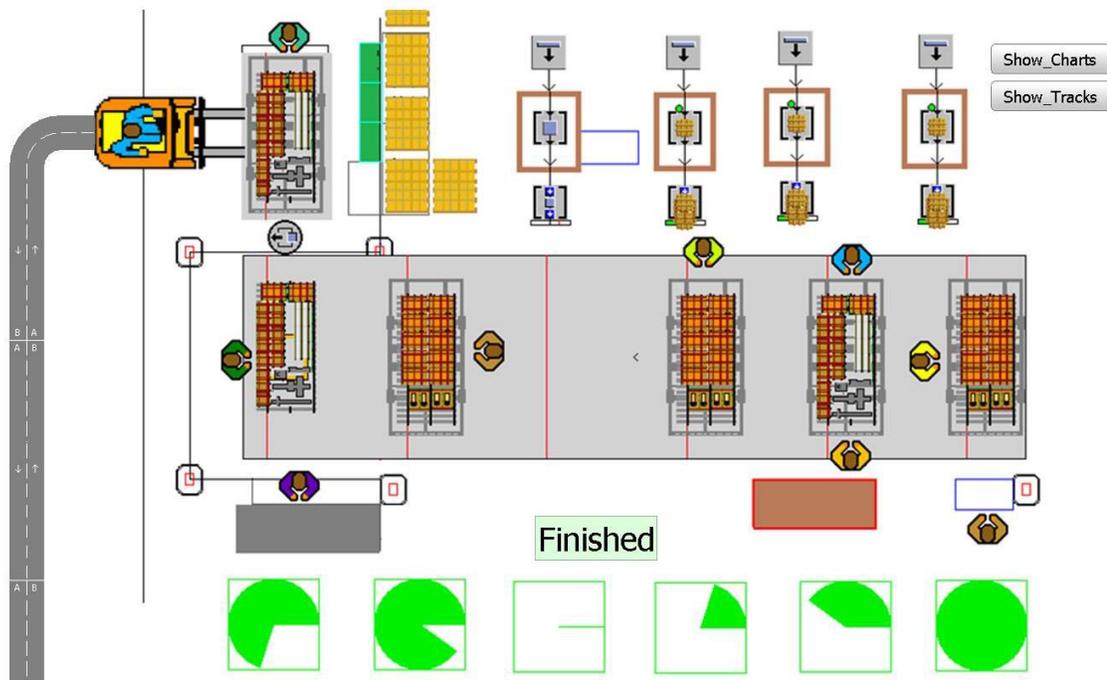


Figura 2. 12 Línea de empaquetamiento [40].

Por ultimo en el año 2016 el ingeniero Branislav Bako, et al [40], por medio de algoritmos de optimización generaron cambios en los planes de producción de una línea de empaque (Figura 2.12) durante la ejecución de las simulaciones

de la línea. Determinaron que, por medio de la utilización de la simulación en conjunto con el apoyo de una planificación detallada, tiene un potencial significativo en la productividad de un proceso, ya que permite revelar posibles complicaciones antes de la acción, proporcionando así las correcciones necesarias para el mismo.

También determinaron que, con el apoyo de un diagrama de Gantt para la producción, se pueden identificar lotes problemáticos o cuellos de botella que pueden tener un impacto en el retraso de entregas a cliente.

2.2 Manufactura Virtual

La manufactura virtual (MV) es considerada como un entorno de realidad aumentada (RA) ejercitado para mejorar todos los niveles de control en un sistema de manufactura discreto o continuo. Los objetos que incluyen la manufactura virtual pueden ser funciones tangibles como intangibles de producción, planificación de procesos, programación, fabricación, control de calidad y sistema de información de gestión [41].

La visión de la manufactura virtual es impulsada por la necesidad de una representación completa de la realidad y modelado multiescala del comportamiento dinámico de los sistemas de producción en todo el ciclo de vida. Los Ingenieros de hoy en día utilizan la simulación multiescala para la adaptación de los comportamientos de sistemas de fabricación reales a un sistema de manufactura virtual [42].

Los sistemas de manufactura discreta fueron definidos por Chryssolouris en el año de 1992 [43] y son las siguientes [44]:

- Taller de trabajo
- Despacho de proyectos
- Sistema celular
- Línea de flujo

Estos diseños ideales para los sistemas de manufactura discreta, junto con los métodos de ensamblaje constituyen el núcleo de la realidad aumentada para definir cualquier aplicación de realidad de manufactura virtual [41]. La Figura 2.13 se observa un ejemplo de este término.



Figura 2. 13 Sistema de manufactura virtual representando una proceso de moldeo [45]

Los sistemas de manufactura discreta utilizan cinco principales elementos para su construcción [44]:

- Una filosofía de producción
- El diseño físico para la fabricación
- Un método discreto para el flujo de materia prima y producto terminado en un sistema de fabricación
- Un método distinto para el flujo de información
- Un método para el flujo de energía

Los sistemas de fabricación y los procesos de manufactura elegidos en el dominio virtual son reconfigurables, así permitiendo una infinidad de posibilidades para el desarrollo de la organización de fabricación aumentada [41]. De modo que, por medio de la manufactura virtual en conjunto de una simulación discreta

se logra establecer una optimización convenientemente en un sistema de fabricación [46].

2.3 Optimización de Líneas de Manufactura

El concepto de manufactura flexible fue desarrollado para mejorar los procesos de producción y su habilidad para reconfigurarse, el cual es de importancia para diferentes áreas de investigación. La principal característica de un sistema de manufactura es el de adaptarse rápidamente a un proceso de producción y responder prontamente en caso de que ocurra algún error durante el programa de trabajo [47].

Immer J. R. mencionó que la principal tarea para la planeación de un plano es optimizar el plano existente para satisfacer los constantes cambios en el mercado [48].

Megumi Ohara, en el proyecto “Extreme Toyota” explica los factores de éxito de Toyota; en donde establece el concepto de “Lean”, que va dirigido a eliminar o minimizar todo tipo de pérdidas de producción desde la fase del diseño de producto, la planeación del plano, producciones en serie y ventas diarias [48].

En 1995 Hillier y So propusieron un método de enumeración para encontrar la cantidad óptima de servidores y la capacidad de buffers en redes abiertas. En el 2000 Spinellis, Papadopoulus y Smith usaron un algoritmo de hibridación para resolver el mismo problema de optimización para una larga línea de producción [49].

En los últimos años, se han desarrollado diversas técnicas de optimización, tales como métodos de programación matemática y algoritmos genéticos (GAs) para la obtención más sencilla de soluciones de una amplia variedad de problemas de optimización; sin embargo, la confianza de las soluciones obtenidas sigue siendo difícil de alcanzar [21].

Se han realizado numerosos estudios sobre la optimización del Balanceo de Líneas de Ensamblaje (ALB por sus siglas en inglés) clasificándolos en dos grupos: El primero lo menciona Baybars en el año 1986 y consiste en algoritmos que intentan determinar la solución óptima. El segundo grupo consiste en procedimientos heurísticos que utiliza principios o dispositivos para reducir la búsqueda en la actividad de resolución de problemas, a un costo de no garantizar la solución óptima [50].

Debido a la complejidad del problema, los procedimientos heurísticos parecen ser más prometedores que los algoritmos de búsqueda óptima. Erel y Sarin en el año 1998 examinaron los procedimientos de ALB y clasificaron los enfoques de optimización en cuatro modelos de productos diferentes, tales como: Modelo Simple Determinista (MSD), Modelo Simple Estocástico (MSE), Modelo Multi/Mixto Determinista (MMD) y Modelo Multi/Mixto Estocástico (MME). En la Figura 2.14 se muestran la clasificación de enfoques de optimización [50].

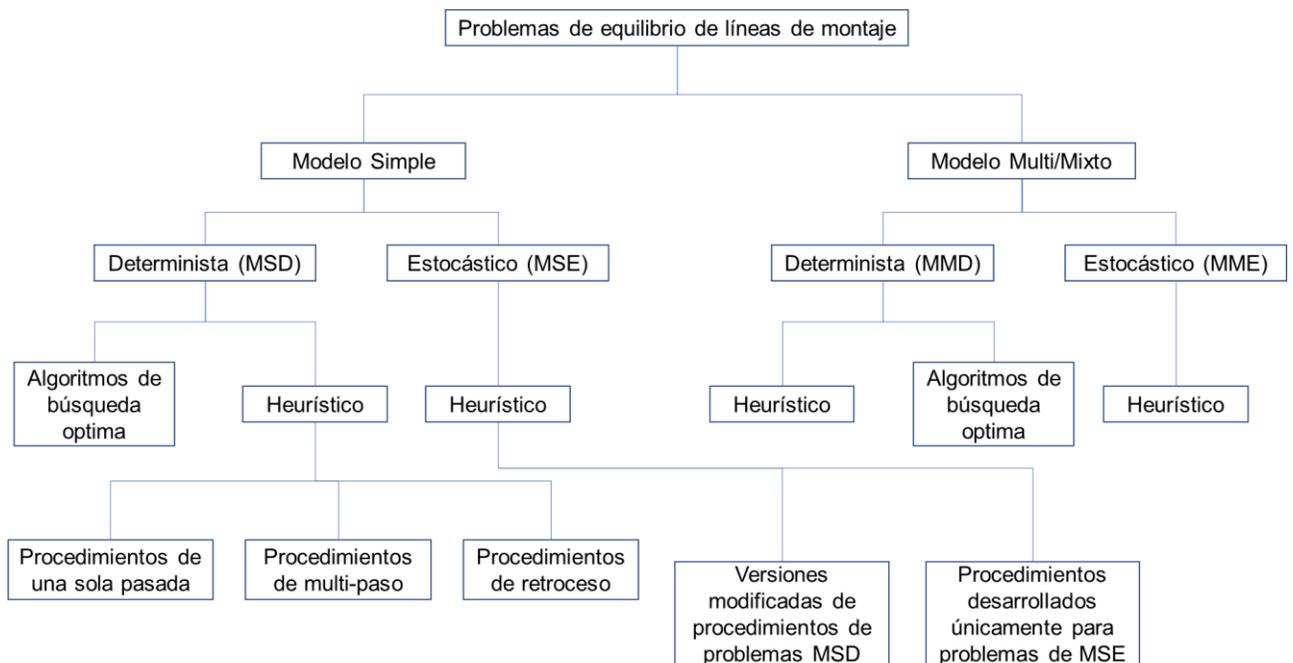


Figura 2. 14 Clasificación de optimización de acercamientos para problemas de equilibrio de líneas de montaje [50].

2.4 Justificación del Problema

Actualmente la fabricación de cabezas de motor exige procesos de alta calidad y de bajo costo, es por eso que las grandes empresas en este ramo buscan exhaustivamente métodos que puedan optimizar sus procesos, sin repercutir en la calidad de sus productos.

La empresa donde se realizará esta investigación se caracteriza por su innovación constante para mantenerse a la vanguardia en los grandes mercados de la industria automotriz a nivel mundial.

El presente trabajo buscara una nueva metodología para la fabricación de cabezas de motor, donde involucre la operación de los tres moldes al mismo tiempo, utilizando herramientas que hoy en día por el avance tecnológico contamos.

2.5 Hipótesis

Es posible obtener una configuración óptima de la línea flexible de cabezas de motor, utilizando simulaciones por medio de eventos discretos en el software Plant Simulation para encontrar configuraciones altamente atractivas.

2.6 Objetivo General

Definir un sistema optimizado de una línea flexible de cabezas de motor por medio de simulaciones de eventos discretos con el software Plant Simulation®, desarrollando diferentes configuraciones y estableciendo los puntos críticos para incrementar su producción.

2.7 Objetivos Específicos

- Diseñar el modelo virtual de la línea flexible de cabezas de motor en Plant Simulation® para generar diferentes configuraciones y visualizar las simulaciones de cada una de ellas.
- Establecer metodología que permita por medio de la interfaz de Plant Simulation® crear cambios en los puntos o elementos críticos en el proceso para encontrar el modelo óptimo de la operación.
- Generar una base de datos por medio de una herramienta de CAD, realizando diferentes modificaciones de acuerdo a los resultados arrojados de las simulaciones para establecer el modelo óptimo.

2.8 Alcances

El presente trabajo de investigación tiene como alcance generar un modelo óptimo del proceso de fabricación de cabezas de motor en la línea flexible utilizando la metodología DES y el software Plant Simulation®. Cabe mencionar que este trabajo tiene como limitante realizar modificaciones y pruebas en la línea que estén afuera del alcance de este proyecto, esto debido al tiempo y costo que esto conlleva. El producto de esta investigación serán recomendaciones que la empresa podrá realizar para el incremento de su productividad.

CAPITULO III

DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este capítulo se introducirá el conjunto de actividades que se realizaron para la elaboración de los modelos en 2D y 3D de la línea flexible de cabezas de motor, para su respectivo análisis, ubicación y determinación de los puntos críticos que la línea contaba. Por medio de esto se crearán recomendaciones y estrategias para la optimización de dicha línea, donde al final se visualizarán en un modelo optimizado.

Es importante determinar que inicialmente se comenzó con la elaboración de los modelos en 2D en el programa Plant Simulation®, posteriormente se realizó el modelo en 3D a escala de la línea flexible en el paquete NX® y por último se elaboró el modelo óptimo de la línea flexible de cabezas de motor.

3.1 Generación de modelo de simulación en 2D

Como primera etapa, se desarrolló el modelo en 2D de la línea flexible de cabezas de motor en el programa Plant Simulation®, se realizaron 3 modelos para lograr representar todas las variables involucradas que constituyen el proceso. A continuación, se muestran los aspectos generales de cada uno de estos modelos.

3.1.1 Simulación Inicial

En este primer modelo es importante destacar la simulación de un solo molde que la línea cuenta, para el establecimiento de la programación y configuración necesaria de todas las variables que el Plant Simulation cuenta y representar los tiempos reales de la línea en la simulación.

A continuación, en la Figura 3.1 se presenta el modelo inicial que se realizó donde representa los sistemas o procesos que constituyen la línea flexible de cabezas de motor. En el Anexo I se muestra la explicación detallada de cada uno de los objetos que cuenta el modelo.

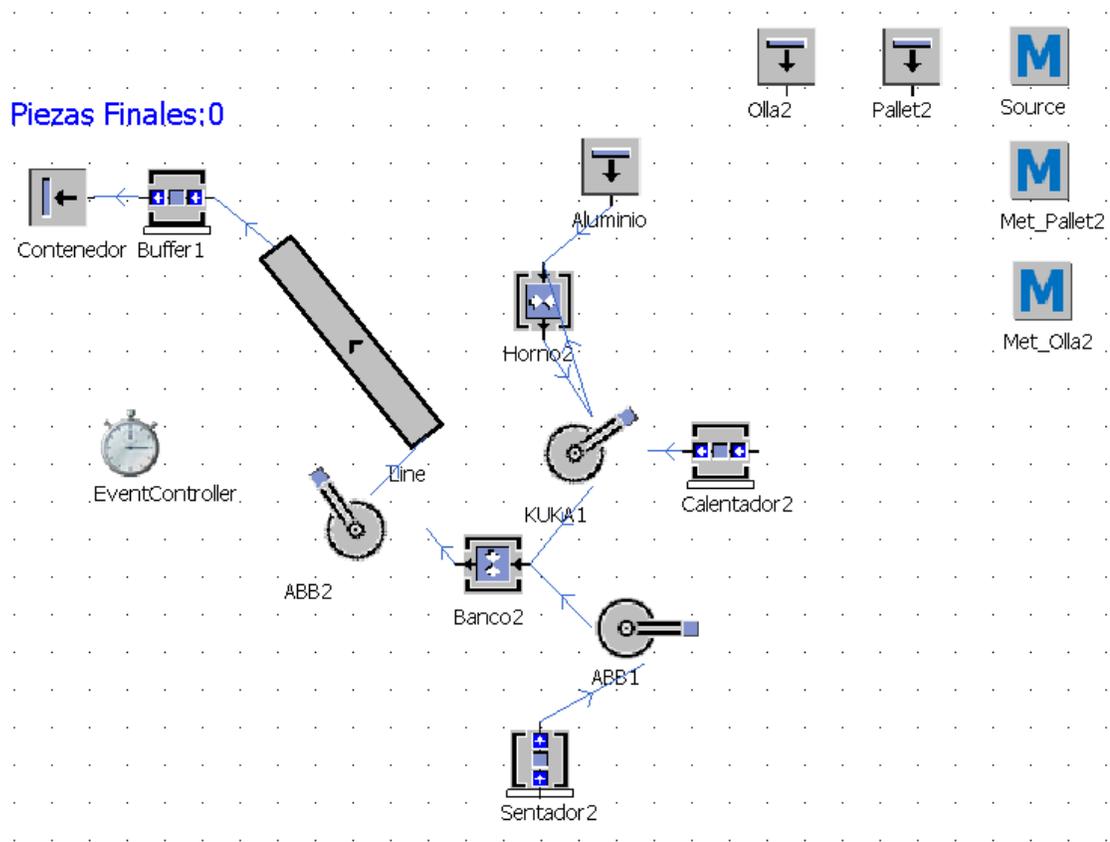


Figura 3. 1 Modelo de simulación de un solo molde en Plant Simulation

En este primer modelo de simulación se observa el molde en medio de los robots KUKA1, ABB # 1 y 2, al cual nos referiremos como banco 2, en donde

cabe destacar que este banco es el único que puede operar con los 3 robots, en cambio los otros 2 bancos que se introducirán más adelante solo pueden operar con 2 o con 1 robot dependiendo el banco que opere. A continuación, se explicará más a detalle el flujo de proceso en el modelo de simulación:

- La fabricación de la cabeza de motor da inicio con un tiempo de preparación del banco de 40 segundos, este tiempo puede variar dependiendo el banco que este en operación. Esto se logra en el modelo de simulación por medio de un método de programación (Met_Pallet2) que se podrá visualizar en el Anexo II. En la figura 3.2 se puede observar el arranque del ciclo

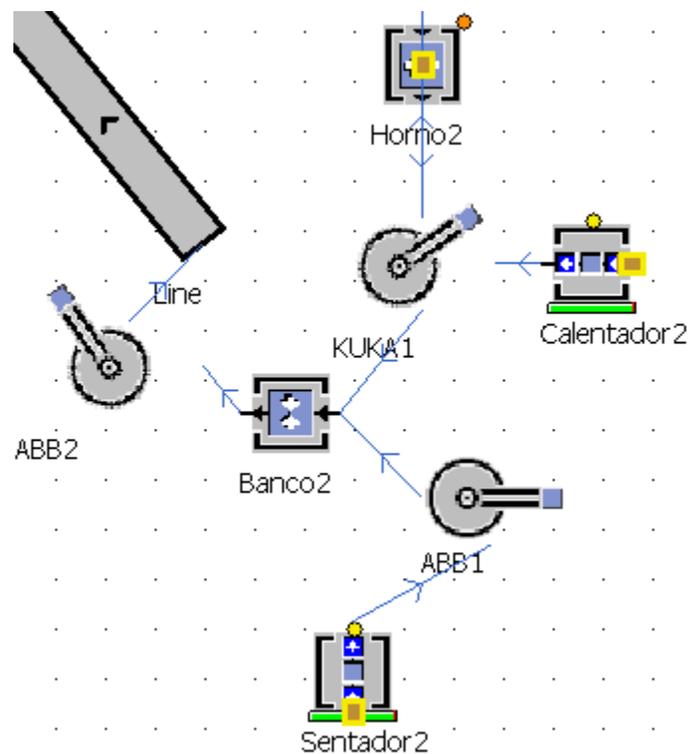


Figura 3. 2 Arranque del ciclo del Banco 2

- Una vez que transcurra el tiempo de arranque el sensor 2 entrega el Pallet y el robot ABB1 lo toma y lo traslada al banco 2.

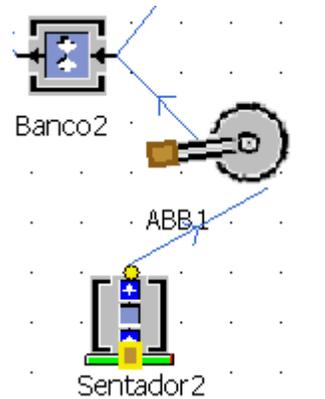


Figura 3. 3 Robot ABB1 dejando pallet en banco 2

- Posteriormente el robot KUKA1 toma la olla del calentador 2 y lo lleva al horno 2 donde de ahí toma el aluminio y lo vacía en el banco 2. Se necesitó de otro método (Met_Olla2) para la entrada de la olla, este método se reporta completo en el Anexo II.

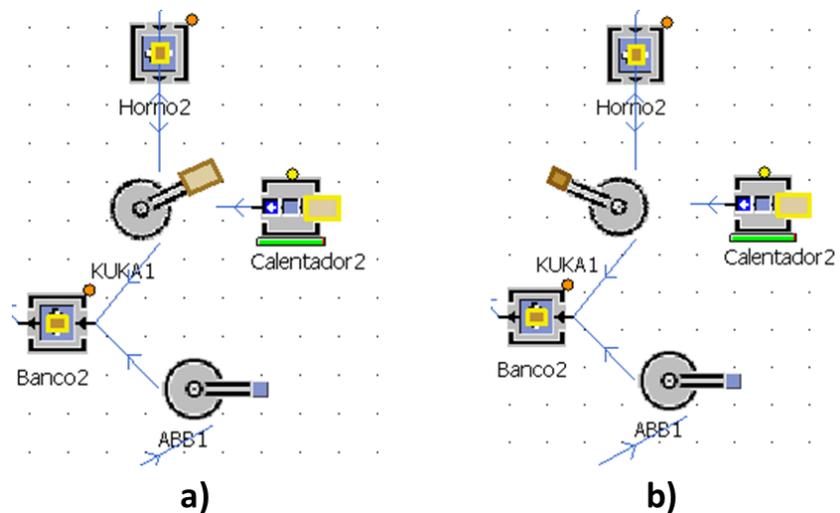


Figura 3. 4 Robot KUKA toma olla del calentador 2 y lo lleva al horno 2 a tomar el aluminio (a). Robot KUKA vacía el aluminio en el banco 2 (b).

- Una vez que el pallet es colocado y el aluminio es vaciado en el banco, sigue un tiempo de solidificación de la cabeza de motor por durante 3 minutos.



Figura 3. 5 Cabeza de motor solidificándose en banco 2

- El Robot ABB 2 toma la cabeza de motor y lo coloca en la línea para que continúe con procesos posteriores.

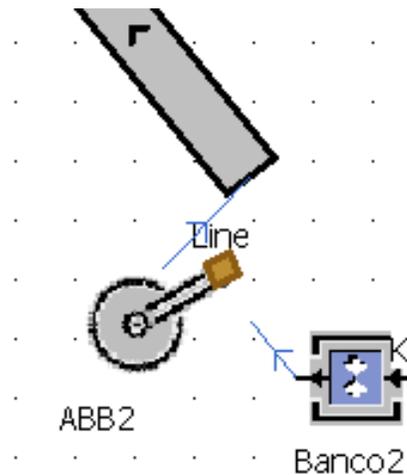


Figura 3. 6 Robot ABB 2 deja cabeza de motor en línea (conveyor)

- Por último, el tiempo ciclo de la simulación del primer molde es de 5 minutos con 45 segundos, que es el tiempo real que tarda la línea en fabricar una cabeza de motor.

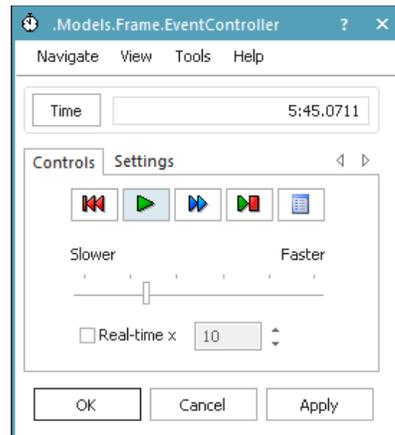


Figura 3. 7 Tiempo de simulación del molde

3.1.2 Simulación de los 3 Bancos

En este segundo modelo se desarrolló la simulación de los otros 2 moldes con los que cuenta la línea, nos referiremos a ellos como banco 1 y 3 respectivamente, cabe mencionar que lo primordial de este modelo fue la programación que se tuvo que realizar para la operación del modelo. A continuación, se muestra en la Figura 3.8 el segundo modelo, así como también la explicación de las principales características de este modelo.

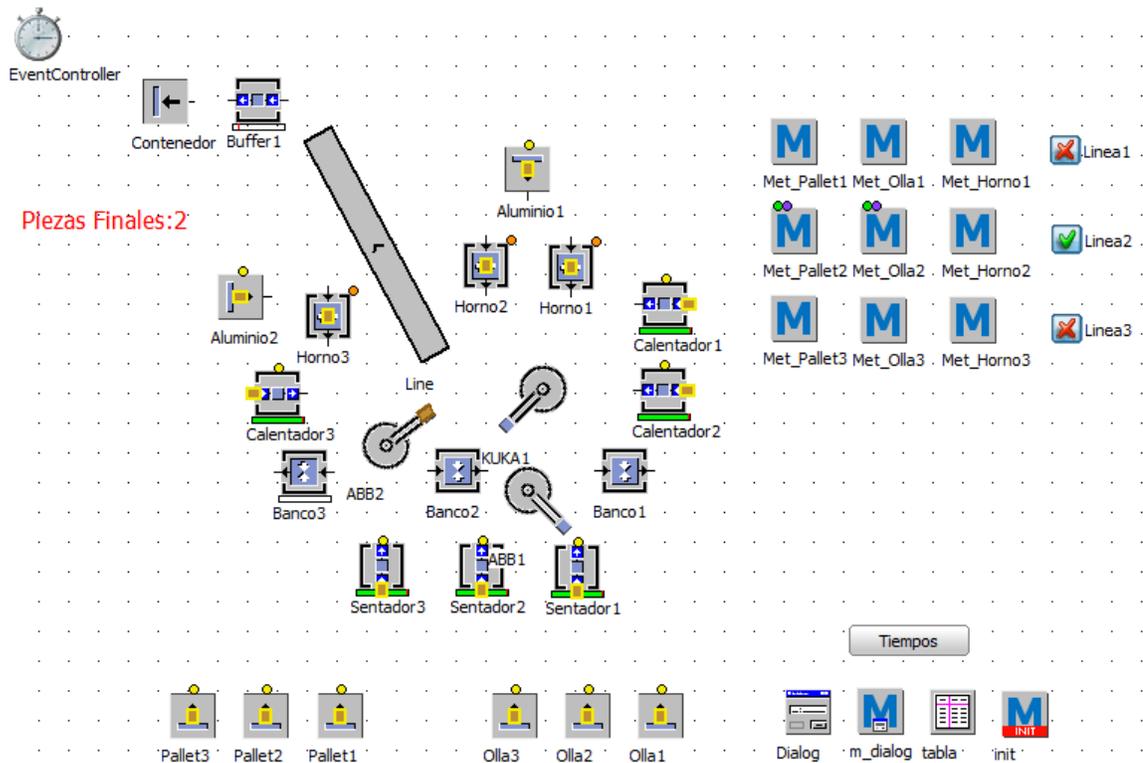


Figura 3. 8 Segundo modelo en Plant Simulation

Dentro de las principales características que podemos encontrar en este modelo, fue la introducción del banco 1 y 3, además de los sentadores 1 y 3 donde a través de ellos entrará el pallet que será sentado en sus respectivos bancos. Es importante hacer mención que en cada banco le corresponde un determinado pallet, ya que en la línea real cada banco fabrica un prototipo diferente de cabeza de motor.

También se añadieron los hornos 1 y 3 donde se estará tomando el aluminio que será vaciado en los bancos 1 y 3, dependiendo el molde que vaya operar. Otro punto importante que se deberá tomar en cuenta para esta investigación, es que la línea flexible no es capaz de funcionar con los 3 bancos al mismo tiempo debido a que solo se cuenta con un diagrama de flujo donde solamente opera un molde a la vez. Se propondrá por medio de la simulación un flujo de proceso de la línea flexible de cabezas de motor que sea capaz de operar

con los 3 bancos al mismo tiempo y con esto reduciendo los tiempos-ciclo de fabricación de este producto.

A continuación, se describe a detalle el flujo del proceso de los bancos 1 y 3, así como también las configuraciones que se debieron tomar para lograr la simulación de este segundo modelo en Plant Simulation®.

- Los pallets que serán sentados en los bancos 1 y 3 respectivamente, entrarán por el sentador 1 y 3. En el caso del banco 1 el pallet será tomado y sentado por el robot ABB 1 y en el caso del banco 3 por el robot ABB 2. En el Anexo II se encuentra la programación de los Sentadores (Met_Pallet 1 y 3) requerida para la simulación.

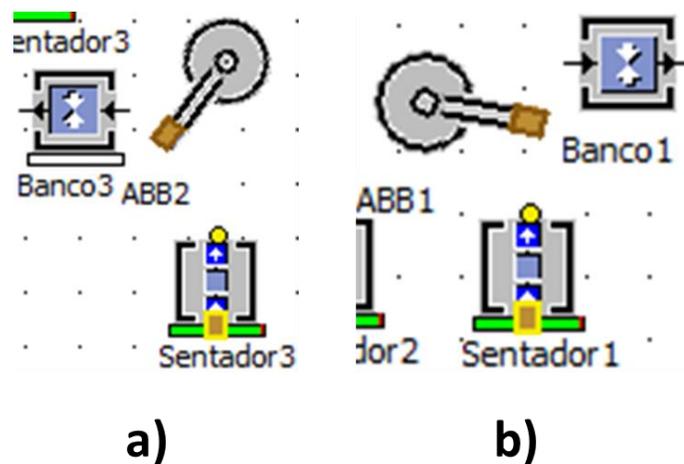


Figura 3. 9 Sentado de pallet en banco 3 (a) y sentado de pallet en banco 1 (b)

- El vaciado del aluminio se llevará por medio de la toma de las ollas en los calentadores 1 y 3, seguido de esto será tomado el aluminio fundido en el horno 1 y 3 y al final se vaciará en los bancos 1 y 3 respectivamente. En el Anexo II se reporta la programación de entrada de las ollas (Met_Ollas 1 y 3) y hornos (Met_Horno 1 y 3).

Es importante destacar que el robot KUKA1 realizará la alimentación del aluminio para el banco 1 y el robot ABB 2 para el banco 3.

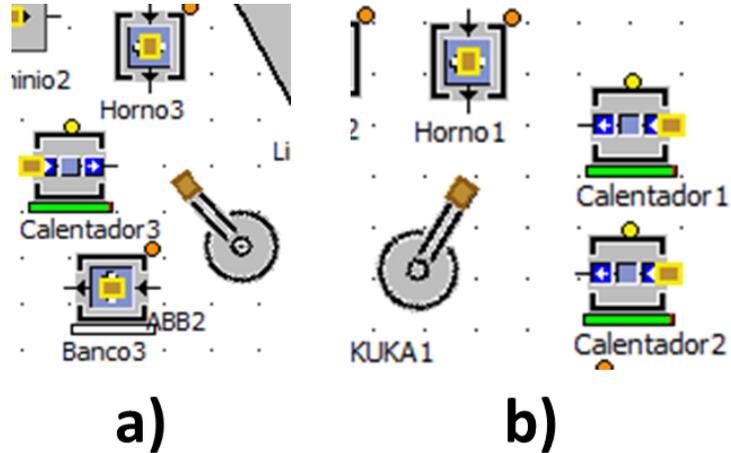


Figura 3. 10 Vaciado de aluminio del molde 2 (a) y del molde 1 (b)

- Por último, la cabeza de motor solidifica en los bancos y es llevado al transportador para sus trabajos posteriores. Es importante destacar que el robot ABB 2, es el que realiza todas las actividades para el banco 3, en cambio el banco 1 es alimentado por medio de los robots KUKA1 y ABB 1.

3.1.3 Introducción de Variables al Modelo de Simulación

El siguiente modelo de simulación representa la línea real, ya que en este modelo se podrá visualizar todas las variables que involucran la operación de la línea flexible y por medio de esto se realizaran las configuraciones necesarias para alcanzar el modelo óptimo. Las principales características de este modelo son las siguientes:

- Introducción de tablas de tiempos donde se puede modificar los tiempos de cada movimiento y proceso (toma de pinzas, sentador,

etc.) que los robots deben de realizar para la operación del proceso de cada uno de los bancos.

Tabla 3. 1 Tabla de tiempos y movimientos del robot ABB1

	string 1	string 2	real 3	real 4	stri 5
string	from	to	Movingtime	Processtime	
1	Default Angle	Sentador2	5.00	5.00	
2	Sentador2	Banco2	10.00	10.00	
3	Banco2	Default Angle	2.00	0.00	
4	Default Angle	Sentador1	5.00	6.25	
5	Sentador1	Banco1	10.00	5.10	
6	Banco1	Default Angle	2.00	0.00	
7	Sentador2	Default Angle	5.00	5.00	
8	Banco2	Sentador2	10.00	10.00	
9	Sentador1	Default Angle	5.00	6.25	
10	Banco1	Sentador1	10.00	5.10	
11					
12					
13					
14					

Tabla 3. 2 Tabla de tiempos y movimientos del robot ABB2

	string 1	string 2	real 3	real 4	string 5
string	from	to	Movingtime	Processtime	
1	Default Angle	Banco2	5.00	8.00	
2	Banco2	Line	10.00	0.00	
3	Line	Default Angle	2.00	0.00	
4	Default Angle	Sentador3	5.00	6.25	
5	Sentador3	Banco3	10.00	5.10	
6	Banco3	Calentador3	8.00	10.00	
7	Calentador3	Horno3	10.00	0.00	
8	Horno3	Buffer	23.96	22.77	
9	Banco3	Line	20.62	20.06	
10	Line	Sentador3	8.00	10.00	
11	Sentador3	Banco2	5.00	10.00	
12	Banco3	Banco2	5.00	10.00	
13	Calentador3	Banco2	5.00	10.00	
14	Horno3	Banco2	5.00	10.00	
15	Buffer	Banco2	5.00	10.00	
16	Banco2	Default Angle	5.00	8.00	
17	Line	Banco2	10.00	0.00	
18	Default Angle	Line	2.00	0.00	
19	Sentador3	Default Angle	5.00	6.25	
20	Banco3	Sentador3	10.00	5.10	
21	Calentador3	Banco3	4.00	10.00	
22	Horno3	Calentador3	10.00	0.00	
23	Buffer	Horno3	23.96	22.77	

Tabla 3. 3 Tabla de tiempos y movimientos del robot KUKA1

	string 1	string 2	real 3	real 4	string 5
string	from	to	Movingtime	Processtime	
3	Calentador2	Horno2	5.00	0.00	
4	Calentador1	Horno1	10.00	0.00	
5	Horno2	Banco2	10.00	20.00	
6	Horno1	Banco1	23.96	22.77	
7	Banco1	Line	20.62	20.06	
8	Banco2	Calentador2	2.50	2.50	
9	Line	Calentador2	2.50	2.50	
10	Line	Calentador1	6.00	2.60	
11	Horno2	Calentador1	6.00	2.60	
12	Horno1	Calentador2	6.00	2.60	
13	Banco2	Horno1	10.00	20.00	
14	Banco1	Horno2	23.96	22.77	
15	Banco1	Calentador2	5.00	10.00	
16	Banco2	Calentador1	5.00	10.00	
17	Horno1	Horno2	5.00	0.00	
18	Calentador2	Default Angle	2.50	2.50	
19	Calentador1	Default Angle	4.00	4.60	
20	Horno2	Calentador2	5.00	0.00	
21	Horno1	Calentador1	10.00	0.00	
22	Banco2	Horno2	10.00	20.00	
23	Banco1	Horno1	23.96	22.77	
24	Line	Banco1	20.62	20.06	
25	Calentador2	Banco2	2.50	2.50	
26	Calentador2	Line	2.50	2.50	
27	Calentador1	Line	6.00	2.60	
28	Horno2	Horno2	6.00	2.60	
29	Horno1	Horno1	6.00	2.60	
30	Banco2	Banco2	10.00	20.00	
31	Banco1	Banco1	23.96	22.77	
32	Banco1	Banco1	5.00	10.00	
33	Banco2	Banco2	5.00	10.00	
34	Horno2	Horno1	5.00	0.00	

- Se añadieron tablas de tiempos junto con su respectiva programación para modificar los tiempos de vaciado, solidificación y arranque de cada uno de los bancos. En la Figura 3.11 se observa la tabla de tiempos y en el Anexo II la programación (init y m_dialog) que se necesitó para este paso.

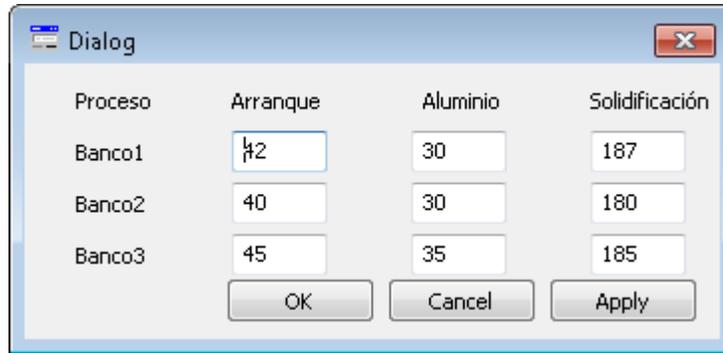


Figura 3. 11 Tiempos de arranque, vaciado del aluminio y solidificación de cada uno de los moldes

- Se dan de alta todos los MU's (pallets, ollas, aluminio, etc.) necesarios que serán involucrados en el proceso de simulación, así como la programación necesaria (ver Anexo II métodos: *init, Met_KUKA1, Met_ABB1 y Met_ABB2)) de los robots para poderlos identificar y reconocer donde deberán ser posicionados.

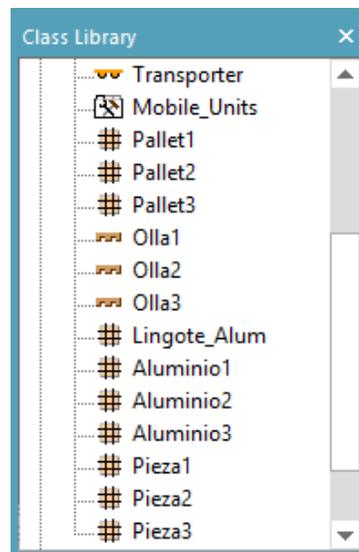


Figura 3. 12 Mu's involucrados en la simulación

- Una de las maneras que se podrá visualizar los tiempos de trabajo, espera, bloqueo, paro, etc., de los moldes y robots es por medio de

graficas donde serán muy útiles al ubicar los puntos críticos del proceso.

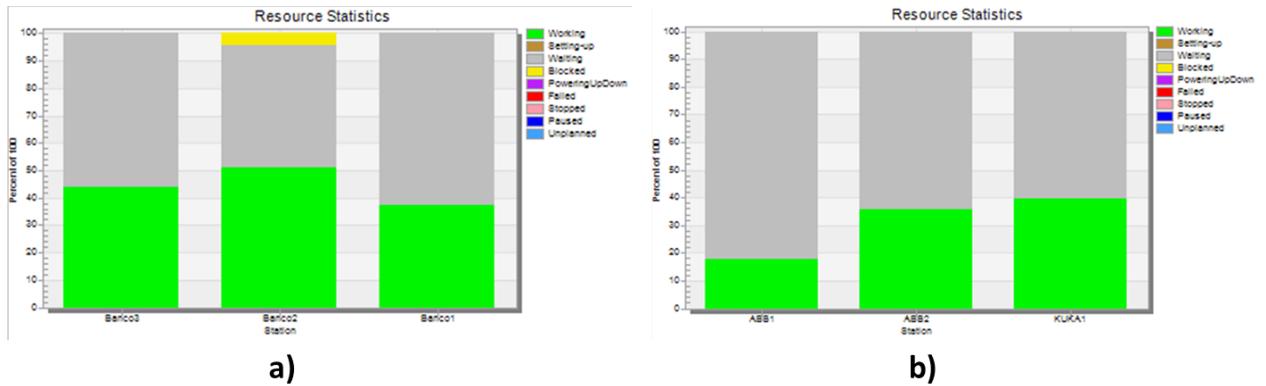


Figura 3. 13 Grafica de estadística de recurso de los moldes (a) y robots (b)

- Es importante recordar que este modelo es el que representa todas las variables involucradas en el proceso. Este modelo servirá para realizar los análisis correspondientes para la determinación de los puntos críticos donde existan actividades sin valor agregado. Por último, cabe mencionar que los nombres que aparecen en este modelo son los que corresponden a los sistemas reales que constituyen a la línea flexible de fabricación de cabezas de motor.

En la Figura 1.14 se representa el modelo final de la línea flexible de cabezas de motor con el que se estará comparando con el modelo óptimo que se explicará más adelante.

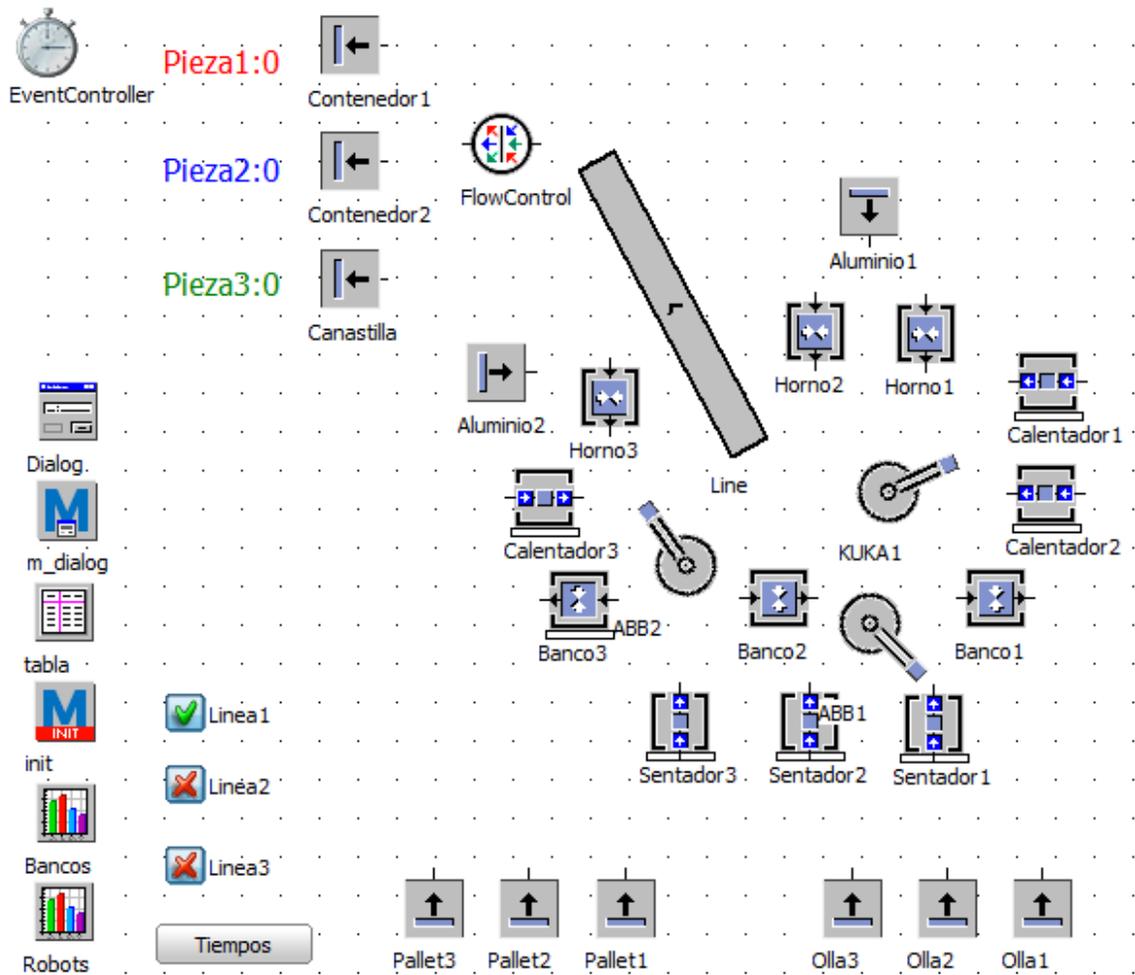


Figura 3. 14 Modelo de simulación de la línea flexible de cabezas de motor

3.2 Generación del modelo en 3D

En esta sección se detallan los pasos realizados para la generación del modelo en 3D de la línea flexible de cabezas de motor. Es importante comprender que la generación de este modelo nos servirá para la representación a detalle de la línea, porque a través de ella podremos visualizar la ubicación exacta de cada uno de los elementos o procesos que la componen, así como también las áreas de trabajo de los robots (Figura 3.15), una vez obtenido este modelo seremos capaces de realizar modificaciones al modelo real del Plant Simulation® y validarlas con el modelo en 3D.

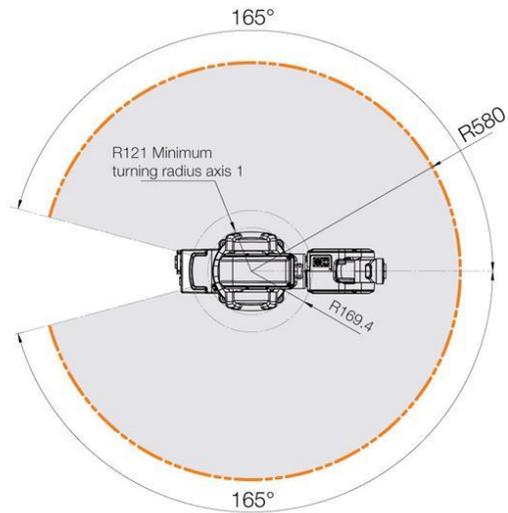


Figura 3. 15 Ejemplo de área de trabajo de Robot ABB

3.2.1 Modelo en NX

Para la generación del modelo en 3D en la plataforma NX®, se partió de un modelo inicial que fue proporcionado por la empresa. En este modelo se puede visualizar la distribución de los moldes, hornos, robots, calentadores, pinzas, sentadores, entre otras cosas. En la Figura 3.16 se muestra el modelo 3D de la línea.

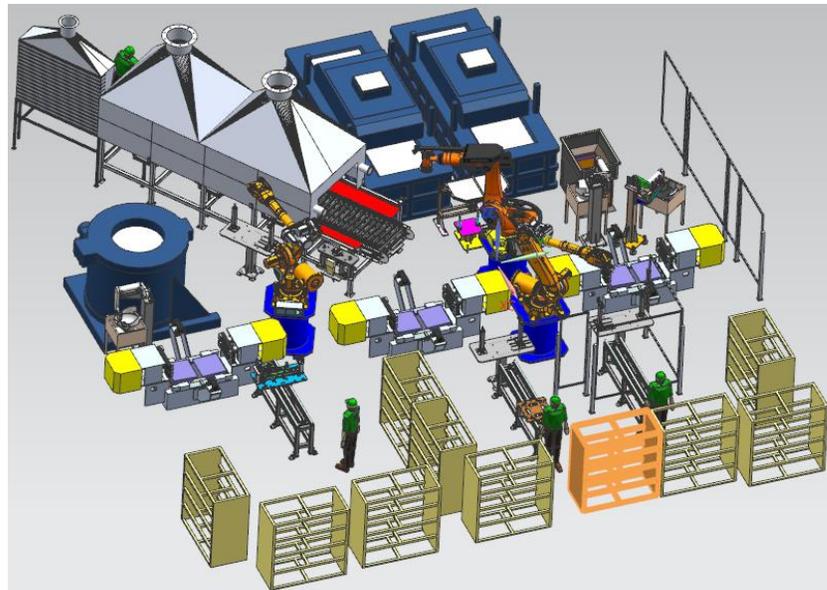


Figura 3. 16 Modelo inicial en 3D de la línea flexible de cabezas de motor

A partir de este modelo se han anexado algunos elementos faltantes, por ejemplo: guardas, hornos, contenedores, etc., así como también la modificación del horno que se encuentra seguido al banco #3.

Para el diseño de estos elementos faltantes fue imprescindible el levantamiento en campo de estos para su respectiva modelación. A continuación, en la Figura 3.17 se puede observar el modelo final con el que se estará trabajando para la validación de los modelos en Plant Simulation® de la línea flexible de cabezas de motor.

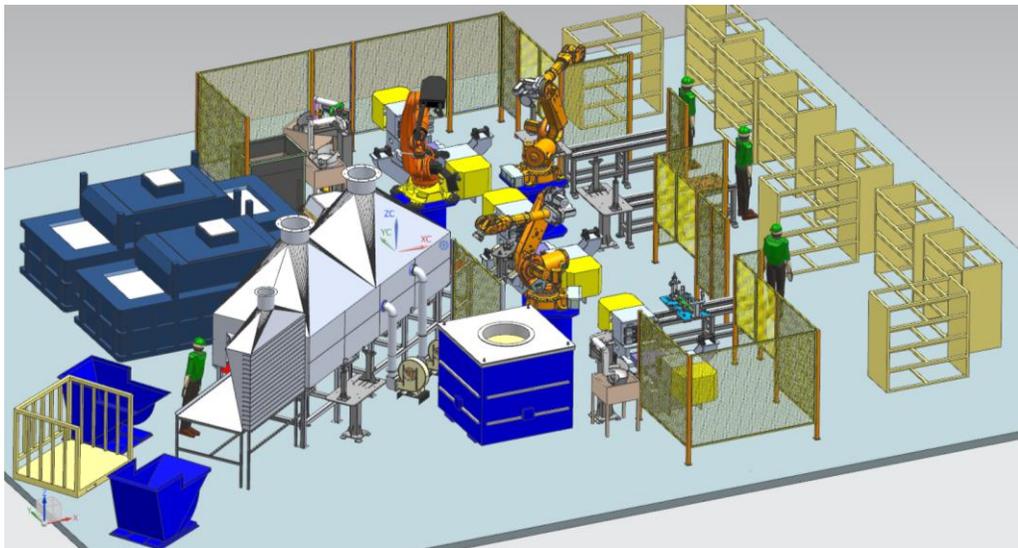


Figura 3. 17 Modelo final en 3D de la línea flexible de cabezas de motor

3.2.2 Modelo en Plant Simulation

Una vez que se modeló el 3D en la plataforma NX®, se importaron los elementos en formato JT al programa Plant Simulation®, cabe mencionar que los elementos que se importaron al programa solamente fueron aquellos que son primordiales para la simulación, por ejemplo: bancos, hornos, calentadores, sentadores, ollas y robots.

Los elementos que fueron importados al programa tomaran un papel importante en la simulación en 3D, debido a que como anteriormente se había mencionado estos elementos son con los que los robots interactúan todo el tiempo y llevan el flujo del proceso para la fabricación de la cabeza de motor.

Por último, es importante destacar que por medio de este modelo de simulación en 3D se visualizaron las áreas de trabajo de los robots ABB #1 y 2 y del robot KUKA1 para validar que no existieran colisiones entre ellos y los elementos que componen la línea, en la Figura 3.18 se observa el modelo en 3D.

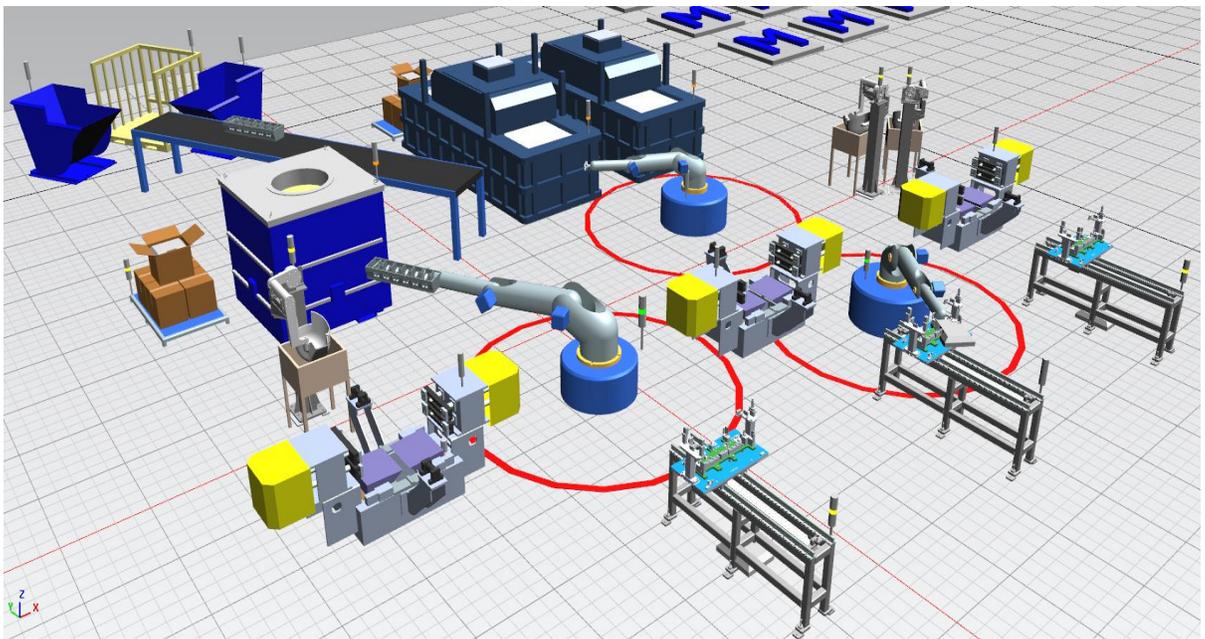


Figura 3. 18 Modelo de simulación en 3D de la línea flexible de cabezas de motor

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se interpretarán los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas de los diferentes modelos generados, así como también una discusión en torno a los resultados obtenidos.

Es importante recordar que para esta investigación se realizaron siete modelos de simulación, de los cuales los primeros tres fueron para simular todas las variables involucradas de la línea flexible de cabezas de motor, los otros tres son propuestas de optimización para dicha línea y el último modelo es un cambio en el flujo de operación para que opere con los tres bancos al mismo tiempo.

Al final de este capítulo se utilizarán los resultados de los modelos de simulación: actual, óptimo y flujo de operación en los tres bancos para realizar una discusión de las ventajas y desventajas de cada uno de los modelos.

4.1 Modelo Actual

Para la simulación del modelo actual, primero se realizó un análisis profundo en los ciclogramas de cada uno de los bancos, esto para representar todas las variables dentro de la simulación. En la Figura 4.1 se muestra el ciclograma del banco 2.

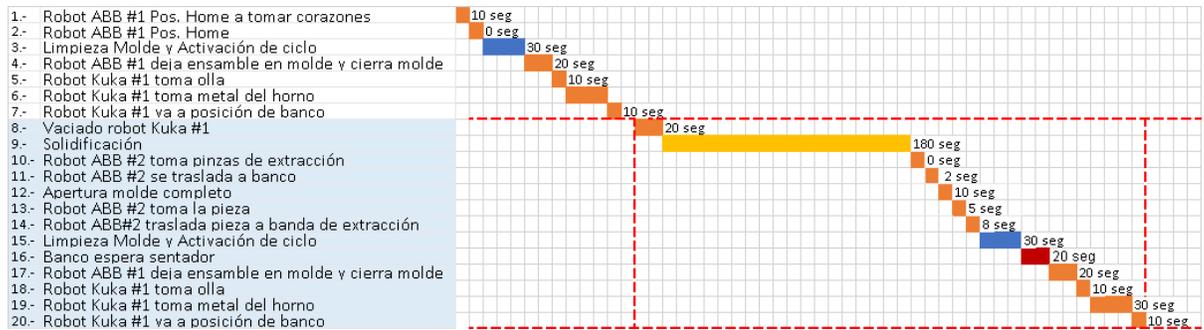


Figura 4. 1 Ciclograma del banco 2

En este ciclograma se observa que el proceso da inicio con la toma del corazón por parte del robot ABB #1, es importante mencionar que en el segundo ciclo este tiempo varía desde 10 segundos hasta 20 segundos para este banco, debido a que en el segundo ciclo el operador debe invertir un determinado tiempo en colocar el pallet en su lugar para que el robot lo tome y lo coloque en el banco.

Posteriormente a lo antes mencionado el flujo del proceso se vuelve cíclico, por lo cual se simulará el proceso desde la activación del molde y el colocado del pallet tomando en cuenta el tiempo que se tarda el operador en preparar el pallet para que este sea tomado por el robot. Los ciclogramas de los bancos 1 y 3 son similares a los del banco 2, lo único que cambiará es que para el banco 3 todo el flujo del proceso es con el robot ABB2, mientras que para el banco 1 son los robots KUKA1 y ABB1.

Otro punto importante a considerar para las simulaciones del modelo real, son los cambios de herramienta que estarán ejecutando los robots ABB2 y KUKA1 para las colocaciones de pallet, toma de olla y extracción de pieza para los bancos 1 y 3, en el caso del robot ABB1 no presenta este problema debido a que su única función es la colocación del corazón en el banco 1 o 2 dependiendo el que este en operación.

Para el banco 1 el robot KUKA1 es el encargado de vaciar el metal en el molde y extraer la pieza una vez que esta solidificada, donde el robot toma un tiempo de 9.52 y 3.36 segundos respectivamente en tomar las pinzas y

trasladarse al banco para extraer la pieza, seguido de esto, el robot espera 4.9 segundos para la apertura del molde, 6.17 segundos en tomar la pieza y 5.2 segundos en trasladar la pieza al transportador. En la Figura 4.2 se observa el ciclograma del banco 1 donde después del tiempo de solidificación aparecen los tiempos de estos movimientos y sub-procesos.

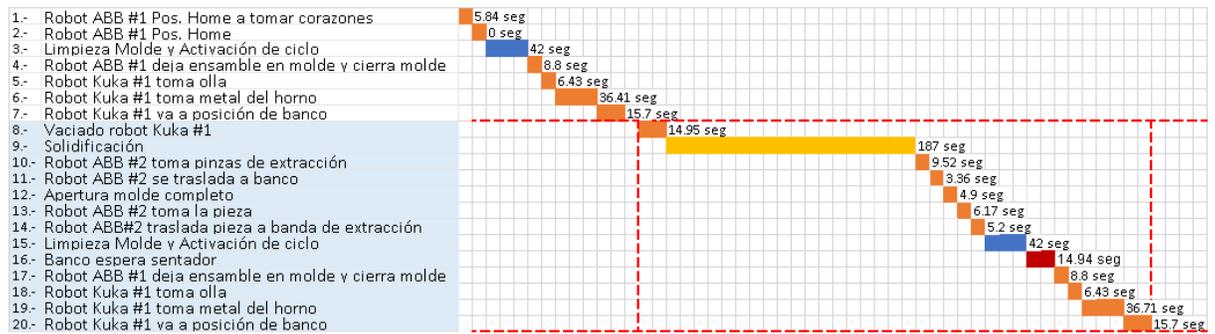


Figura 4. 2 Ciclograma del banco 1

Una de las maneras para representar en la simulación estos tiempos es como se explicó en el subtema del Modelo #3 Simulación de la Línea Real, que en base a tablas de movimientos de cada uno de los robots podemos introducir el tiempo que se toma en realizar un determinado movimiento, y el tiempo si es el caso, para los sub-procesos (toma de pinzas, tiempo de espera, etc.) que ese movimiento conlleve.

Los tiempos que toman los robots KUKA1 y ABB2 en extraer la pieza, apertura de molde y toma de pinzas se simulará como un solo movimiento para cada uno de los bancos, esto para hacer más simple la simulación y no contar con elementos excesivos en la maqueta digital. Para lograr esto se suman los tiempos de traslado de la toma de pinzas, el tiempo de traslado del robot en trasladar la pieza del banco al conveyor como un solo movimiento y los tiempos de toma de pinzas, apertura de molde y toma de pieza como un solo sub-proceso y se introducen en la tabla correspondiente del robot.

Un ejemplo de lo antes mencionado es el movimiento del robot KUKA1 del banco1 al transportador donde el tiempo de los movimientos es de 8.56 segundos

y el tiempo de los sub-procesos es de 20.59 segundos para extraer la pieza del banco y trasladarla al conveyor. En la Tabla 4.1 se observa la tabla de tiempos de los movimientos y sub-procesos que cuenta el robot KUKA1.

Tabla 4. 1 Tabla de tiempos de movimientos y sub-procesos del robot KUKA1

	string 1	string 2	real 3	real 4
string	from	to	Movingtime	Processtime
1	Default Angle	Calentador2	2.50	5.00
2	Default Angle	Calentador1	2.00	2.43
3	Calentador2	Horno2	2.50	0.00
4	Calentador1	Horno1	2.00	0.00
5	Horno2	Banco2	10.00	20.00
6	Horno1	Banco1	15.70	14.95
7	Banco1	Line	8.56	20.59
8	Banco2	Calentador2	2.50	5.00
9	Line	Calentador2	2.50	2.50
10	Line	Calentador1	2.00	2.43

Para el banco 3 como antes habíamos mencionado el robot ABB2 es el que lleva todas las operaciones en el banco (colocación del pallet, vaciado del metal y extracción de pieza), pero demorando más tiempo para cada uno de los movimientos y sub-procesos debido a cambios de herramientas, se dejara las mismas configuraciones antes mencionadas para este banco. En la Figura 4.3 se puede observar el ciclograma del banco 3.



Figura 4. 3 Ciclograma del banco 3

Por último, los tiempos de arranque, toma de metal y solidificación de cada uno de los bancos se introducen en el cuadro de dialogo que se colocó en el modelo en la Figura 4.4 se observa el cuadro de dialogo con estos tiempos.

Proceso	Arranque	Aluminio	Solidificación
Banco1	42	36.41	187
Banco2	30	30	180
Banco3	28.79	52.5	255

Figura 4. 4 Tiempos de arranque, toma de aluminio y solidificación de los bancos 1, 2 y 3

4.1.1 Resultados del Modelo Actual

En esta sección se explicará el tiempo-ciclo de cada uno de los bancos del modelo actual de la línea flexible de cabezas de motor y también se detallará el motivo de porque se obtuvieron esos tiempos por medio de graficas donde involucren los elementos o componentes que participan en la operación de cada uno de los bancos.

El tiempo-ciclo de operación del banco 1 (Figura 4.5) es de 5:55.38 minutos donde el 53% de la operación se lleva en el banco que corresponde a la solidificación, otro 10% se lleva en el horno donde es la toma del metal, un 7% en el robot ABB1 para el colocado del corazón, otro 18% en el robot KUKA en el vaciado del metal y un 12% en el set-up del banco.

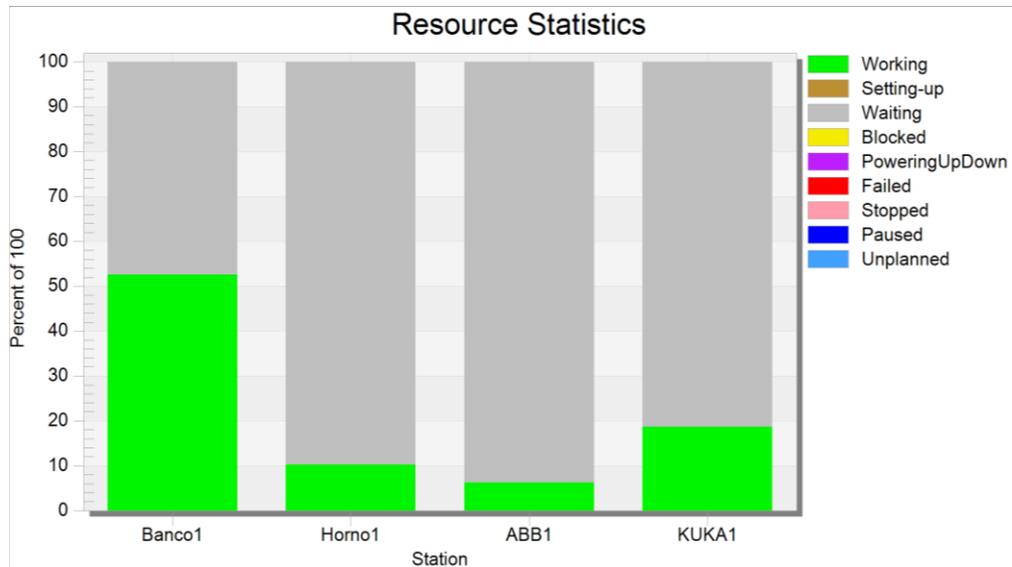


Figura 4. 5 Estadística de recursos del banco 1

Para el banco 2 su tiempo-ciclo es de 5:45.09 minutos donde el 8.7% corresponde al arranque del ciclo, 52% de la solidificación de la pieza en el banco, 3.3% de bloqueo debido a la espera de la extracción de la pieza en el banco, 8% de la toma del metal y un 28% en movimientos por parte de los robots ABB1, ABB2 y KUKA1. En la Figura 4.6 se puede apreciar la estadística de recursos del banco 2.

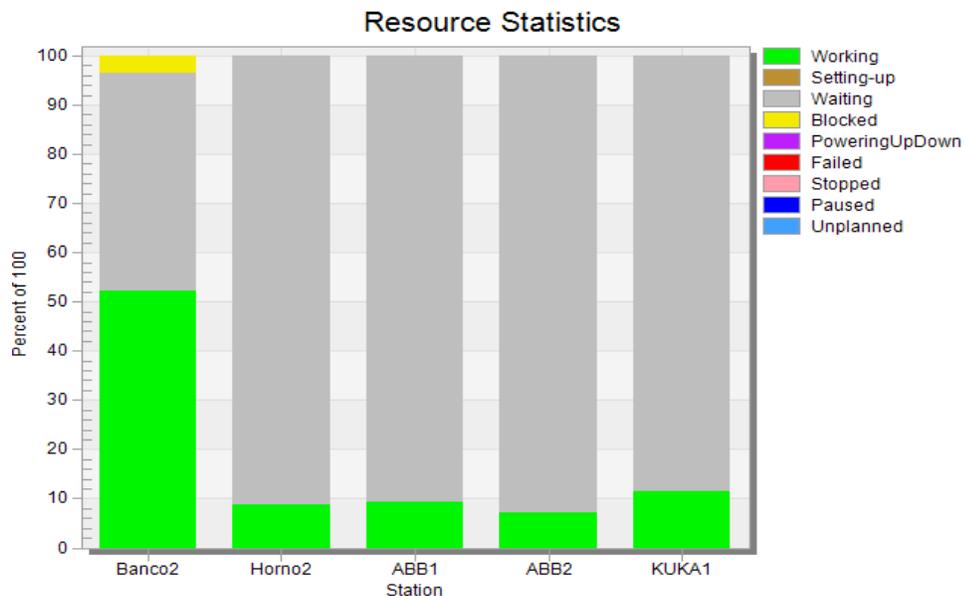


Figura 4. 6 Estadística de recursos del banco 2

Por último, el tiempo-ciclo del banco 3 es de 7:54.94 minutos donde el 6% corresponde al arranque del ciclo, el 54% corresponde a la solidificación de la pieza en el banco, 11% en la toma del metal del horno y 29% en los movimientos por parte del robot ABB2. En la Figura 4.7 se podrá apreciar la estadística de recursos del banco 3.

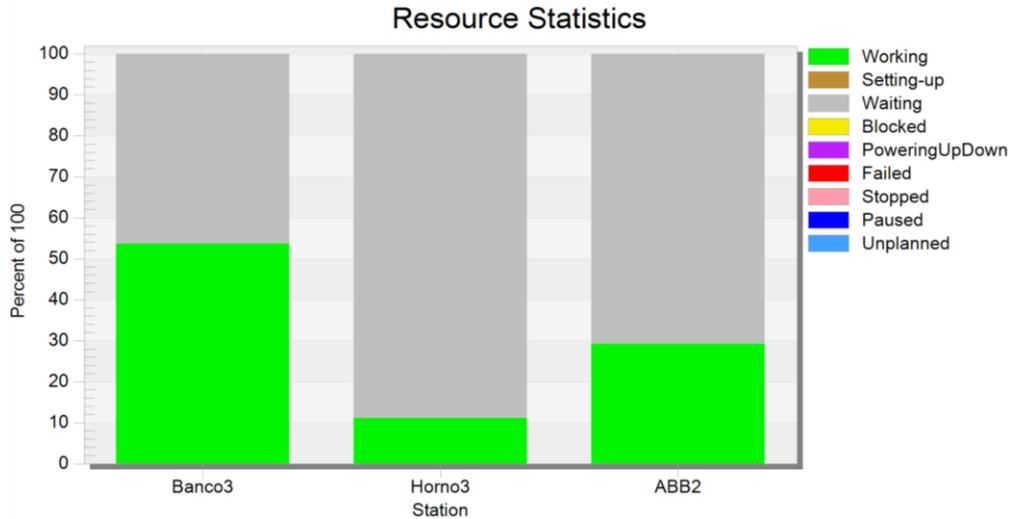


Figura 4. 7 Estadística de recursos del banco 3

4.2 Modelo óptimo

Para la generación del modelo de simulación óptimo de la línea flexible de cabezas de motor se realizó un análisis de tiempos y movimientos en cada uno de los bancos que conforman la línea, esto para identificar acciones o movimientos sin valor agregado que incrementan los tiempos de producción en la línea. A continuación, se detallará cada uno de las adecuaciones que se realizaron en cada uno de los bancos para la eliminación de tiempos muertos.

4.2.1 Banco #1

Actualmente los robots de la línea flexible de cabezas de motor se encuentran sincronizados escalonadamente, esto quiere decir que cuando un robot está operando, los otros robots no son capaces de operar debido a que se

pueden generar colisiones entre ellos y con esto incrementando los tiempos de ciclo en la línea.

Por tal razón, se propone realizar una técnica conocida como “pre-llamadas” para que los robots puedan operar al mismo tiempo, evitando que colisionen entre ellos, debido a que un robot llamará al otro cuando termine su operación, por ejemplo el robot ABB1 podrá arrancar su operación colocando el pallet en el banco, mientras el robot KUKA1 puede estar tomando la olla con el aluminio pero este no vaciara el aluminio hasta que el robot ABB1 coloque el pallet en el banco y llame al robot KUKA1 para que realice el proceso de vaciado en dicho banco (Figura 4.8).

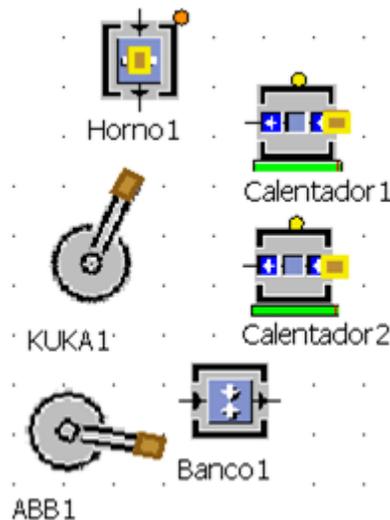


Figura 4. 8 Operación del Banco 1 con "pre-llamadas" en la operación de los robots ABB1 y KUKA1

4.2.2 Banco #2

El único banco capaz de operar con los 3 robots de la línea es el banco 2, por tal motivo, este banco es el que cuenta con el menor tiempo de ciclo comparándolo con los otros 2 bancos, sin embargo, para la reducción de tiempos en su producción se propondrá la misma técnica que se mencionó en el banco 1, dejando un retraso entre el robot ABB1 y el KUKA1 de 10 segundos.

En la Figura 4.9 se observar el banco 2 operando con “pre-llamadas” en los robots KUKA1 y ABB1.

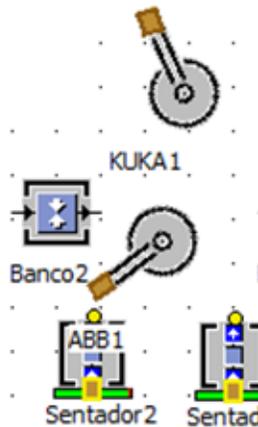


Figura 4. 9 Operación del Banco 2 con "pre-llamadas" en los robots ABB1 y KUKA1

4.2.3 Banco #3

En la optimización del banco 3 se propone la introducción de un robot adicional, debido a que actualmente el banco es solamente alimentado por el robot ABB2, el robot debe estar cambiando constantemente de pinzas para colocar el pallet, tomar el aluminio del horno con la olla y sacar la pieza con la pinza-extractora, por tal motivo incrementando los tiempos de ciclo de dicho banco.

La función de este robot será la colocación del pallet en el banco 3, mientras el robot ABB2 tendrá las funciones de vaciado de metal y extracción de la pieza. En la Figura 4.10 se puede observar la ubicación del nuevo robot en el banco 3 y en el Anexo II la programación (Met_KUKA2) para su debida operación.

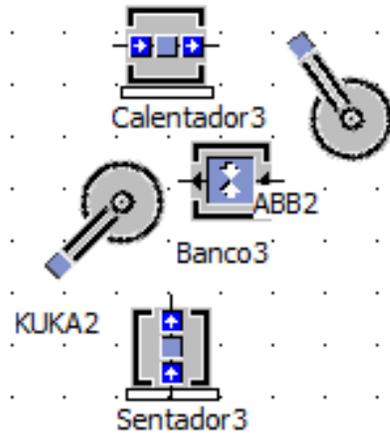


Figura 4. 10 Banco 3 con nuevo robot para sentado de Pallet

También se propondrá la introducción de las “pre-llamadas” en este banco para la reducción de tiempos en la toma del metal con el robot ABB2 mientras el robot nuevo esté colocando el pallet en el banco, habiendo un retraso entre ellos de 11.25 segundos para que no se genere una colisión entre estos robots.

4.2.4 Simulación del Modelo Óptimo

Durante las simulaciones del modelo actual y analizando detenidamente los cicloramas de cada uno de los bancos se encontraron tres áreas de oportunidad para la reducción de tiempos de operación en cada uno de los bancos de la línea flexible de cabeza de motor.

La primera optimización que se implementó en el modelo fue la introducción de las pre-llamadas que anteriormente se explicó en la generación del modelo óptimo, donde su principal característica es la sincronización de los robots del colocado del pallet y vaciado del metal, de esta manera los robots pueden estar haciendo actividades diferentes al mismo tiempo, reduciendo el tiempo-ciclo de la operación.

Para esta optimización se eliminó el tiempo que el robot encargado del vaciado del metal debía esperar en lo que fuera sentado el pallet en el banco, sin

embargo, durante esta simulación se observaron colisiones entre ambos robots (Figura 4.11), por tal motivo se decidió dejar un pequeño retraso entre estos para evitar esta situación.

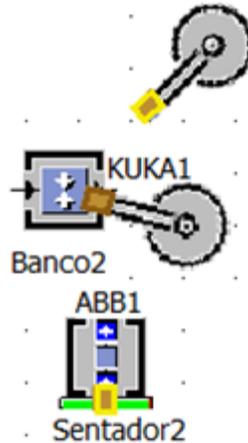


Figura 4. 11 Colisión entre los robots KUKA1 y ABB1

Es importante destacar que para la implementación de las pre-llamadas en el banco 3 es ineludible agregar un robot más en la línea flexible de cabezas de motor, ya que con un solo robot es imposible colocar el pallet y al mismo tiempo estar tomando el metal para vaciarlo en el banco.

La segunda optimización que se implementó en el modelo óptimo es en el robot responsable de la extracción de la pieza de cada uno de los bancos, se observó durante las simulaciones que mientras la pieza se está solidificando en el banco el robot puede aprovechar este tiempo para ir por la pinza extractora y posicionarse en el lugar debido para tomar la pieza una vez que este haya terminado de solidificarse.

Para esta simulación se eliminaron los tiempos de traslado y toma de pinzas en las tablas de los robots KUKA1 y ABB2 que son los responsables de extraer la pieza en los bancos 1, 2 y 3, cabe recordar que anteriormente se explicó que estos tiempos van implícitos en un solo movimiento para simplificar el modelo de simulación, quedando solamente en consideración los tiempos de

traslado de pieza del banco al conveyor y los tiempos de apertura de molde y toma de pieza como los sub-procesos involucrados en esta operación.

Un ejemplo de esto lo tenemos en el banco 1, anteriormente se había mencionado que el tiempo de los movimientos es de 8.56 segundos y el tiempo de los sub-procesos es de 20.59 segundos para extraer la pieza del banco y trasladarla al transportador, quedando ahora en 5.2 segundos para los movimientos y en 11.07 segundos para los sub-procesos.

En la Tabla 4.2 se puede observar el cambio en el tiempo que toma el robot KUKA1 en extraer la pieza del banco 1.

Tabla 4. 2 Tabla de tiempos de movimientos del robot KUKA1 posterior a la segunda optimización

	string 1	string 2	real 3	real 4
string	from	to	Movingtime	Processtime
1	Default Angle	Calentador2	2.50	5.00
2	Default Angle	Calentador1	2.00	2.43
3	Calentador2	Horno2	2.50	0.00
4	Calentador1	Horno1	2.00	0.00
5	Horno2	Banco2	10.00	20.00
6	Horno1	Banco1	15.70	14.95
7	Banco1	Line	5.20	11.07
8	Banco2	Calentador2	2.50	5.00
9	Line	Calentador2	2.50	2.50
10	Line	Calentador1	2.00	2.43

Para los bancos 2 y 3 el encargado de extraer la pieza es el robot ABB2, pasando los tiempos para el banco 2 de 10 a 8 segundos para los movimientos y quedando igual los tiempos de los sub-procesos debido a que este banco no contaba desde un inicio con toma de pinzas por operar con los 3 robots a cambio de los otros bancos que solo operan con 2. Para el banco 3 los tiempos pasan de 20.62 a 10.22 segundos para los movimientos y 20.06 a 6.99 en lo sub-procesos que van involucrados en la extracción de la pieza. En la Tabla 4.3 se pueden observar cómo quedan los tiempos para el robot ABB2.

Tabla 4. 3 Tabla de tiempos para el robot ABB2 posterior a la segunda optimización

	string 1	string 2	real 3	real 4
string	from	to	Movingtime	Processtime
1	Default Angle	Banco2	0.00	10.00
2	Banco2	Line	8.00	5.00
3	Line	Default Angle	2.00	0.00
4	Default Angle	Calentador3	2.00	4.60
5	Calentador3	Horno3	2.00	0.00
6	Horno3	Banco3	23.96	22.77
7	Banco3	Line	10.22	6.99
8	Line	Calentador3	2.00	4.60
9	Line	Banco2	0.00	10.00

Por último, la tercera optimización que se encontró oportuno implementar en el modelo fue durante la preparación del corazón (pallet) antes de que el ciclo vuelva a comenzar, ya que, de acuerdo a los ciclogramas, este sub-proceso se realiza después de que se termine el ciclo anterior, demorando el tiempo de arranque del ciclo continuo. Un ejemplo de esto se mencionó en el banco 2 en el cual este tiempo pasa de 10 a 20 segundos del primer al segundo ciclo respectivamente.

Posterior a esta optimización el tiempo de la toma del pallet será solamente lo que el robot tarda en tomarlo y no considerando lo que se tarda el operador en colocarlo para el siguiente ciclo, ya que lo realizará durante la solidificación de la pieza del ciclo anterior. De esta manera quedando para el banco 1 en 5.84 segundos, para el banco 2 en 10 segundos y para el banco 3 en 11.25 segundos para la toma del pallet.

En las Figuras 4.12, 4.13 y 4.14 se observan los ciclogramas de cada uno de los bancos posterior a estas tres optimizaciones.

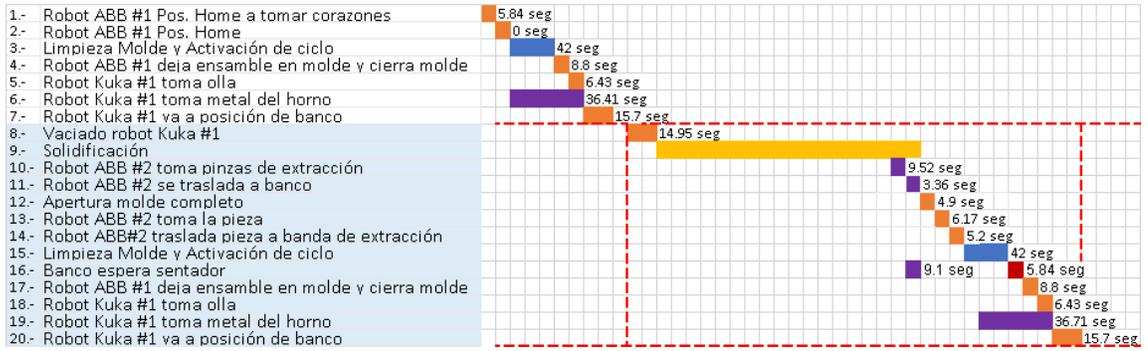


Figura 4. 12 Ciclograma del banco 1 con las tres optimizaciones



Figura 4. 13 Ciclograma del banco 2 con las tres optimizaciones

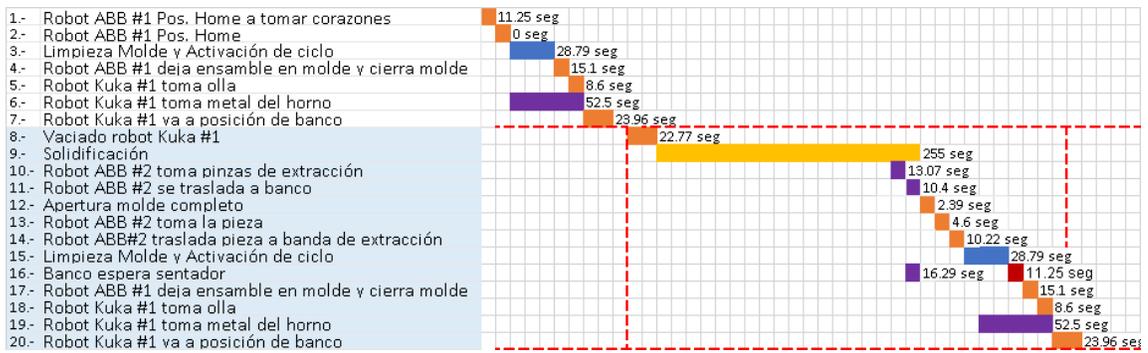


Figura 4. 14 Ciclograma del banco 3 con las tres optimizaciones

4.2.5 Resultados optimización 1

En este modelo de simulación donde se implementó la metodología de las “pre-llamadas” en cada uno de los robots que componen la línea para la operación sincronizada por parte de estos, se observaron discrepancia en los porcentajes de operación de cada uno de los elementos con respecto al modelo anterior y los tiempos-ciclos disminuyeron para cada uno de los bancos.

El tiempo-ciclo para el banco 1 disminuyó de 5:55.38 a 5:04.58 minutos y los cambios de porcentajes de los elementos involucrados para la operación de este banco fueron de: solidificación de un 53% a un 61.80%, toma de metal del horno de un 10% a un 12%, movimientos del robot ABB1 de un 7% a un 6%, movimientos del robot KUKA1 de un 18% a un 22.50% y set-up quedando igual al modelo anterior.

Para el caso del banco 2, el tiempo ciclo paso de 5:45.09 a 4:55.00 minutos y los cambios de porcentajes de operación de cada uno de sus elementos fueron los siguientes: solidificación paso de un 52% a un 60.50%, toma de metal del horno paso de un 8% a un 10%, movimientos del robot ABB1 de un 9% a un 10.50%, movimientos del robot ABB2 de un 7% a un 8%, movimientos del robot KUKA1 de un 12% a un 13.50% y set-up y block quedando igual al modelo anterior.

Por último, el tiempo-ciclo del banco 3 disminuyó de 7:54.94 a 7:11.05 minutos y los cambios de porcentajes fueron: solidificación de 54% a 59.50%, toma de metal de 11% a 13%, movimientos del robot ABB2 de 29% a 23.50% y movimientos del robot KUKA 2 de 0% a 7% y set-up quedando igual al modelo anterior.

En la Figura 4.15 se podrá observar la estadística de recursos del modelo de simulación de la optimización 1.

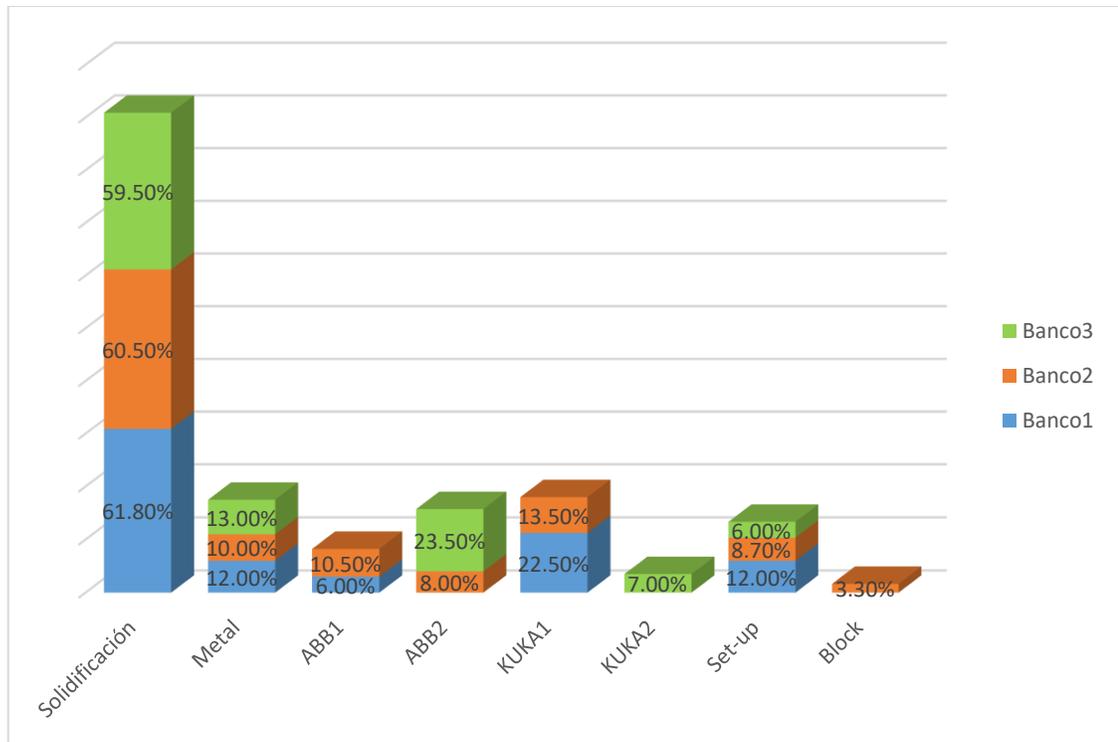


Figura 4. 15 Estadística de recursos de la optimización 1

4.2.6 Resultados optimización 2

Durante las simulaciones previas del modelo actual se logró observar un punto de oportunidad para el aumento de producción en la fabricación de cabezas de motor, de tal modo se implementó la optimización 2 que consiste en la toma de las pinzas de extracción durante la solidificación de la pieza en sus respectivos bancos, en la Figura 4.16 se puede observar los porcentajes de operación de cada uno de los elementos que componen la línea.

En este modelo de simulación se puede observar una reducción en los tiempos-ciclos de cada uno de los bancos que van de 5:04.58 a 4:51.70 minutos para el banco 1, de 4:55.00 a 4:53.00 minutos para el banco 2 y de un 7:11.05 a 6:47.58 minutos para el banco3.

En el caso del porcentaje de operación se observa un incremento en la solidificación de cada uno de los bancos que corresponden de un 2.2% para el

banco 1, un 1% para el banco 2 y un 3% para el banco 3. En el caso de la toma de metal se observa un incremento de un 1% y un 0.5% en los hornos de los bancos 1 y 2 respectivamente.

Por último, en el caso de los movimientos se observa un descenso en los porcentajes de operación en los bancos 1 y 3 que van de 4% y 3% respectivamente; en el caso del banco 2 se permanecen iguales estos porcentajes de operación debido a que este banco es el único que opera con los 3 robots (KUKA1, ABB1 y ABB2) que componen a la línea, de esta manera estableciendo a cada uno de estos a una sola operación (colocado del corazón, vaciado del metal, extracción de pieza) y de esta manera evitando pérdidas de tiempos por cambios de herramientas (pinzas, ollas, sentador, etc.).

En la Figura 4.16 se podrá observar la estadística de recursos del modelo de simulación de la optimización 2.

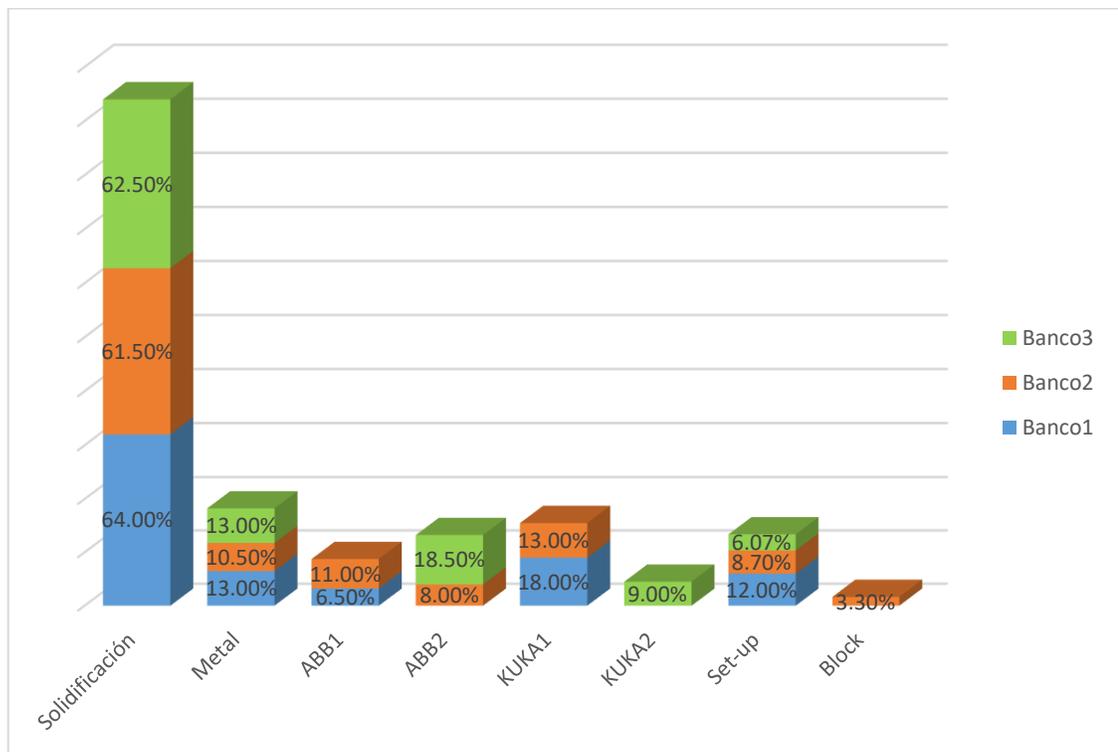


Figura 4. 16 Estadística de recursos de la optimización 2

4.2.7 Resultados optimización 3

Para esta optimización se implementó en el modelo la preparación del corazón durante la solidificación de la pieza en los bancos, similar a lo de la optimización 2 con la toma de pinzas de extracción durante el mismo proceso. Para este modelo se volvieron observar descensos en los tiempos-ciclos e incrementos en los porcentajes de operación en la solidificación, toma de metal y movimientos de cada uno de los bancos.

El banco 1 tuvo una disminución en su tiempo-ciclo de 4:51.70 a 4:42.60 minutos y sus incrementos de porcentajes de operación fueron: en la solidificación del 2%, toma de metal del 0.5% y movimientos del 1%.

Para el caso del banco 2 su tiempo-ciclo bajo de 4:53.00 a 4:43.00 minutos y sus aumentos de porcentajes de operación fueron: solidificación del 2% y movimientos del 2.5%.

Por último, el banco 3 su tiempo ciclo paso de 6:47.58 a 6:31.29 minutos y los aumentos de porcentajes de operación de sus elementos fueron de: solidificación del 2.5%, toma de metal del 0.5% y movimientos del 0.5%.

En la Figura 4.17 se puede observar la estadística de recursos para el modelo de simulación de la optimización 3.

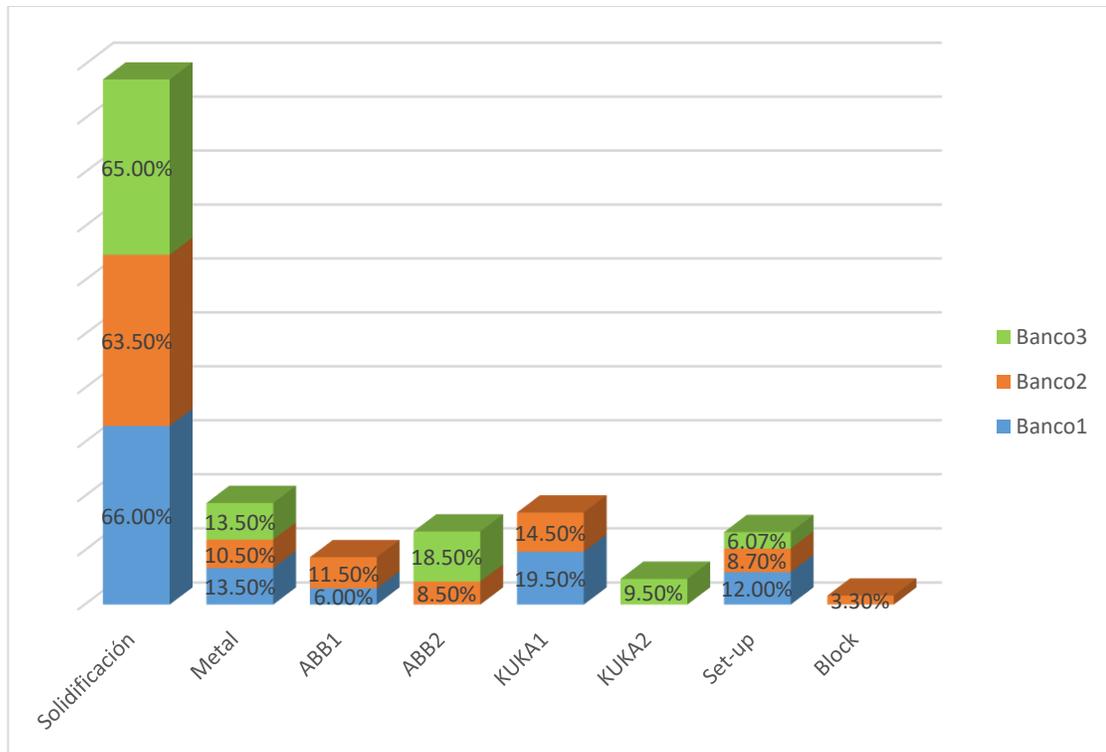


Figura 4. 17 Estadística de recursos de la optimización 3

4.3 Modelo de Simulación con flujo de operación en los 3 bancos

Uno de los objetivos de este proyecto es encontrar un flujo de proceso para la operación de los tres bancos al mismo tiempo, ya que la línea no es capaz de sincronizar los bancos sin generar una colisión o seguir un flujo adecuado. Por tal motivo en esta sección se introducirá un último modelo donde se logró lo antes mencionado.

Para la obtención de este modelo fue necesario introducir a la simulación movimientos y sub-procesos que anteriormente no se contaban, ya que ahora los robots deben de servir a todos los bancos a la vez, un ejemplo es el robot ABB2 que después de vaciar el metal en el banco 3, mientras se solidifica esta pieza; extrae la pieza del banco 2 que ya se ha solidificado, para regresar al banco 3 a extraer la cabeza del motor y comenzar el ciclo nuevamente.

En la Figura 4.18 se muestra el momento preciso cuando el robot ABB2 se dirige al banco 2 a extraer la pieza durante la solidificación de la pieza del banco 3.

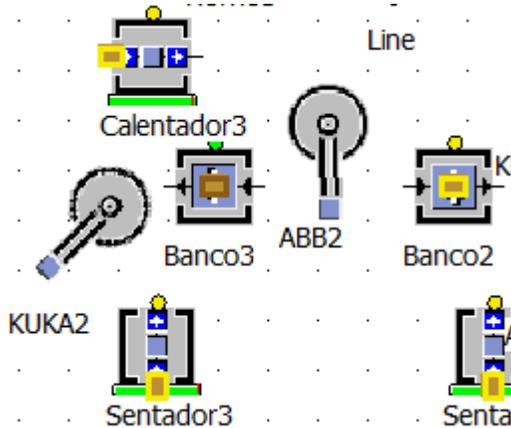


Figura 4. 18 Robot ABB2 trasladándose a extraer pieza en banco 2 mientras se solidifica pieza en banco 3.

Los tiempos de los movimientos nuevos fueron obtenidos mediante la medición de las distancias del modelo 3D y asemejándolas a tiempos de operaciones que recorrían la misma trayectoria, dejando 2 ± 1 segundos de más en los casos donde el robot deba evitar obstáculos u objetos que se encuentren en la trayectoria.

Para el robot KUKA1 las trayectorias nuevas son: Horno2 \rightarrow Calentador1, Horno1 \rightarrow Calentador2, Banco2 \rightarrow Horno1, Banco1 \rightarrow Horno2, Banco1 \rightarrow Calentador2, Banco2 \rightarrow Calentador1, Horno1 \rightarrow Horno2, Banco2 \rightarrow Banco1. En la Tabla 4.4 se puede observar los movimientos nuevos del robot KUKA1, así como también los tiempos de cada uno de los movimientos y sub-procesos.

Tabla 4. 4 Movimientos nuevos (gris) del robot KUKA1

	string 1	string 2	real 3	real 4
string	from	to	Movingtime	Processtime
1	Default Angle	Calentador2	2.50	5.00
2	Default Angle	Calentador1	2.00	2.43
3	Calentador2	Horno2	2.50	0.00
4	Calentador1	Horno1	2.00	0.00
5	Horno2	Banco2	10.00	20.00
6	Horno1	Banco1	15.70	14.95
7	Banco1	Line	5.20	11.07
8	Banco2	Calentador2	2.50	5.00
9	Line	Calentador2	2.50	2.50
10	Line	Calentador1	2.00	2.43
11	Horno2	Calentador1	3.00	2.43
12	Horno1	Calentador2	3.00	5.00
13	Banco2	Horno1	5.20	0.00
14	Banco1	Horno2	5.20	0.00
15	Banco1	Calentador2	2.22	5.00
16	Banco2	Calentador1	3.60	2.43
17	Horno1	Horno2	2.50	0.00
18	Banco2	Banco1	4.00	11.07

En el caso del robot ABB2 las trayectorias nuevas son: Banco3 → Banco2, Horno3 → Banco2, Line → Banco2, Line→Horno3. En la Tabla 4.5 se puede observar los movimientos nuevos del robot ABB1.

Tabla 4. 5 Movimientos nuevos (gris) del robot ABB2

	string 1	string 2	real 3	real 4
string	from	to	Movingtime	Processtime
1	Default Angle	Banco2	0.00	10.00
2	Banco2	Line	8.00	5.00
3	Line	Default Angle	2.00	0.00
4	Default Angle	Calentador3	2.00	4.60
5	Calentador3	Horno3	2.00	0.00
6	Horno3	Banco3	23.96	22.77
7	Banco3	Line	10.22	6.99
8	Line	Calentador3	2.00	4.60
9	Line	Banco2	0.00	10.00
10	Banco3	Banco2	3.60	10.00
11	Horno3	Banco2	5.00	10.00
12	Line	Horno3	3.00	0.00

Cabe mencionar que los tiempos de los sub-procesos son similares a los ya conocidos, debido a que siguen siendo las mismas operaciones (toma de pinzas, toma de olla, apertura de molde, etc.) durante los traslados, únicamente presentando discrepancia en los tiempos de los movimientos debido a las distancias y obstáculos que los robots deben de evitar.

Por último, los movimientos de los robots ABB1 y KUKA2 seguirán siendo los mismos debido a que estos robots solamente tienen como función el colocado del pallet en sus respectivos bancos y no pueden alimentar otro banco (para el caso del robot ABB1) hasta que hayan colocado el pallet del banco en operación y hayan regresado a su ángulo inicial.

En la Figura 4.19 se muestra el modelo de simulación con flujo de operación de los tres bancos.

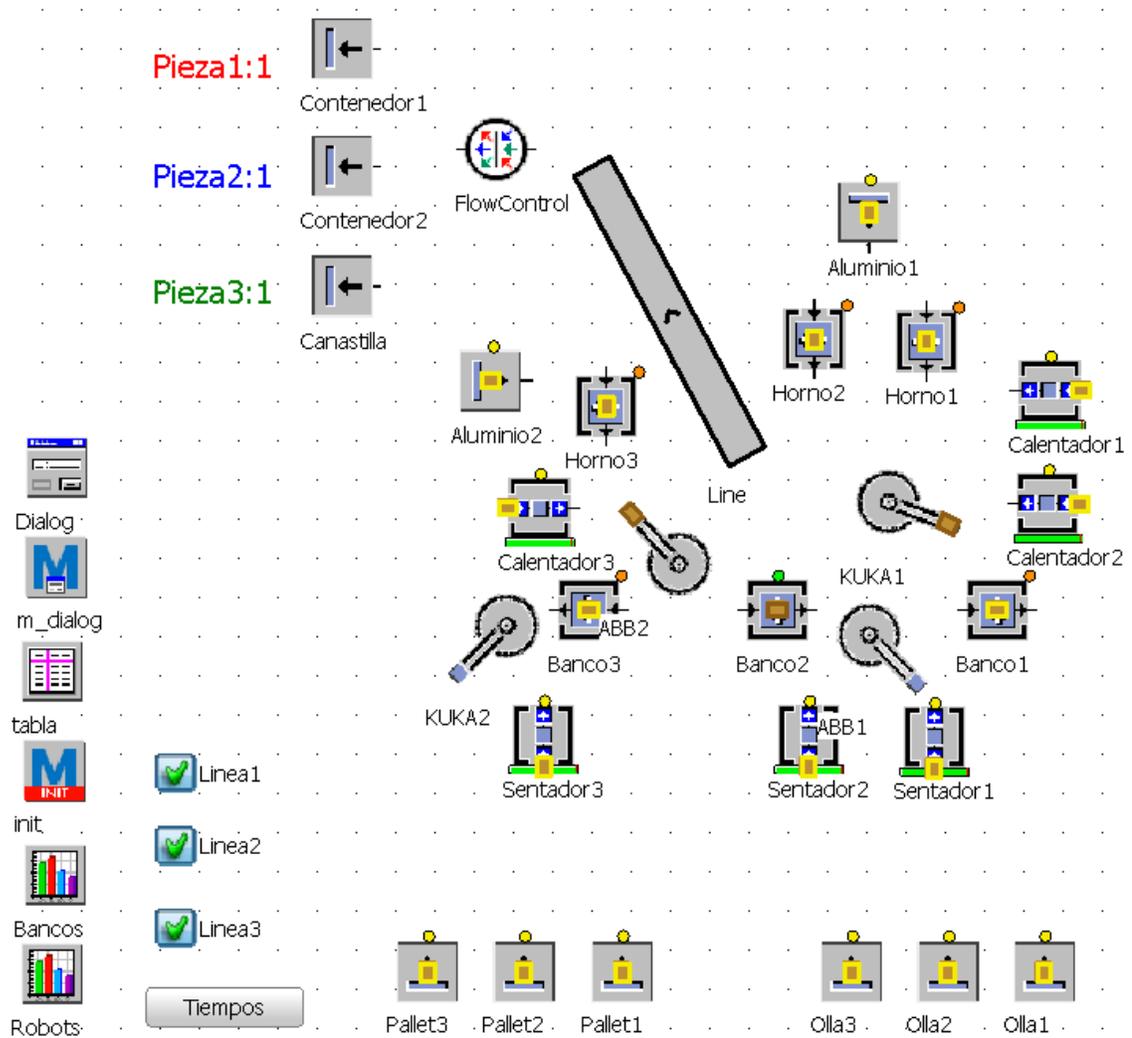


Figura 4. 19 Flujo de operación en los tres bancos

4.3.1 Resultados del modelo de sincronización de flujo en los tres bancos

Se realizó un quinto modelo de simulación que se caracteriza por la sincronización de flujo en la operación de los tres bancos que conforman la línea, para este modelo se interpretarán los resultados en tres momentos de la simulación que corresponderán al inicio y final de ciclo de cada uno de los bancos, se analizará de esta manera ya que los flujos de los bancos de este modelo son continuos y en una sola simulación se podrá analizar toda la línea.

Al comienzo de la simulación se observa que el banco 3 es el primero en arrancar su operación de acuerdo a los tiempos que tiene establecidos en sus

elementos, posteriormente conforme la simulación transcurre los bancos 2 y 3 comienzan su operación respectivamente.

También se observa que el banco 2 es el primero en terminar su operación con un tiempo-ciclo de 5:19.10 minutos y sus porcentajes de operación de sus procesos son: 56.5% en la solidificación, 9.5% en la toma de metal, 15.5% en los movimientos del robot ABB1, 25.5% movimientos del robot ABB2, 26.5% movimientos del robot KUKA1, 8.7% de set-up y 4.5% de bloqueo. En la Figura 4.20 se podrá apreciar la estadística de recursos de este banco durante la simulación.

Se continúa con la simulación y se observa que el siguiente banco en terminar su operación es el banco 1 con un tiempo-ciclo de 5:51.62 minutos con porcentajes de operación en sus procesos de: 53% en la solidificación, 10.5% en la toma del metal, 29% en movimientos del robot KUKA1, 12% de set-up y 6.5% de bloqueo, en la Figura 4.21 se podrá observar su estadística de recursos durante la simulación.

Por último, el banco 3 es el último en terminar su operación con un tiempo-ciclo de 6:48.50 minutos con porcentajes de operación en sus equipos de: 62.5% en la solidificación, 13.5% en la toma del metal, 28.5% en los movimientos del robot ABB2, 7% en movimientos del robot KUKA2, 6.07% en set-up y 4% de bloqueo, en la Figura 4.22 se podrá observar la estadística de recursos de este banco.

También es importante mencionar que el tiempo total que tarda la línea en fabricar las piezas de los tres bancos serán 6:48.50 minutos que es cuando el último banco termina su operación y de esta manera concluye la operación de todos los bancos que conforman la línea, cabe mencionar que cada uno de los bancos da comienzo a un nuevo ciclo una vez que depositan la pieza solidificada al transportador.

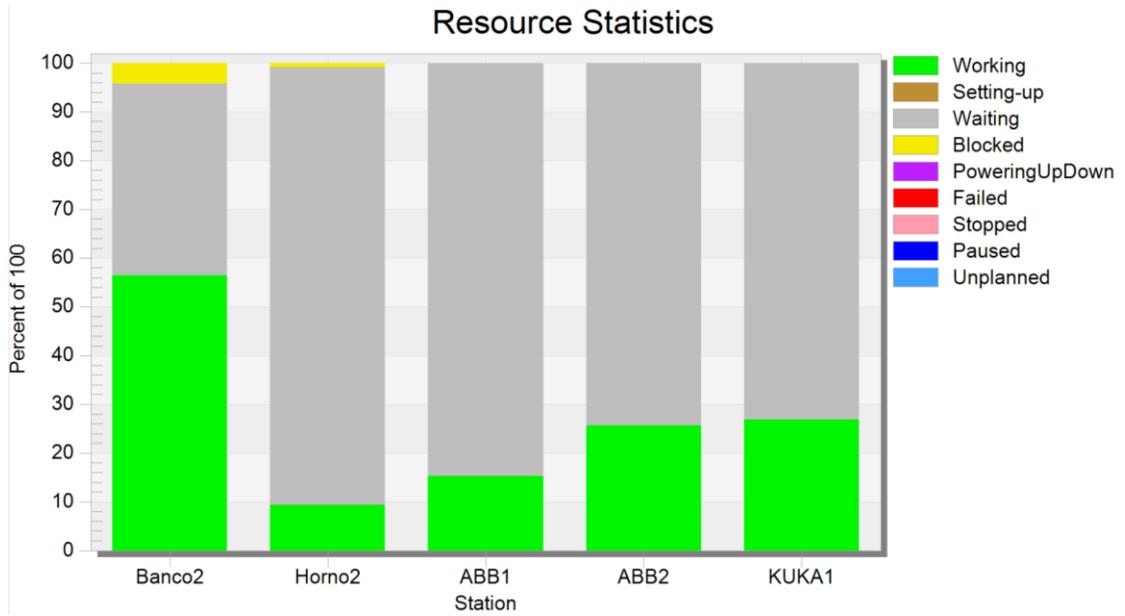


Figura 4. 20 Estadística de recursos del banco 2 durante la simulación del modelo con flujo de los 3 bancos.

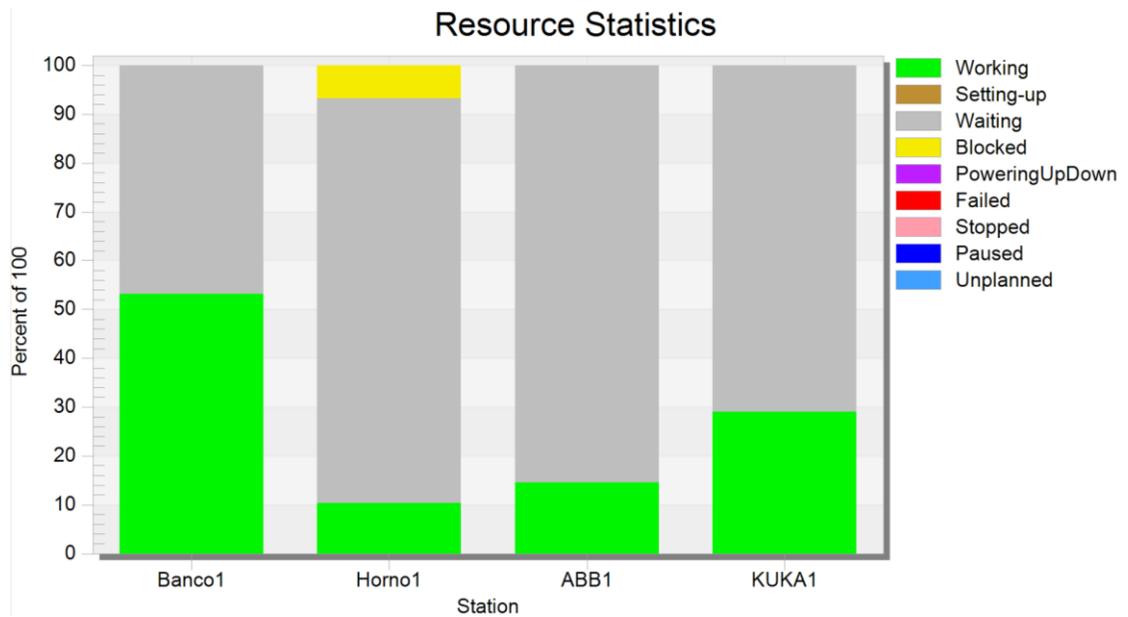


Figura 4. 21 Estadística de recursos del banco 1 durante la simulación del modelo con flujo de los 3 bancos.

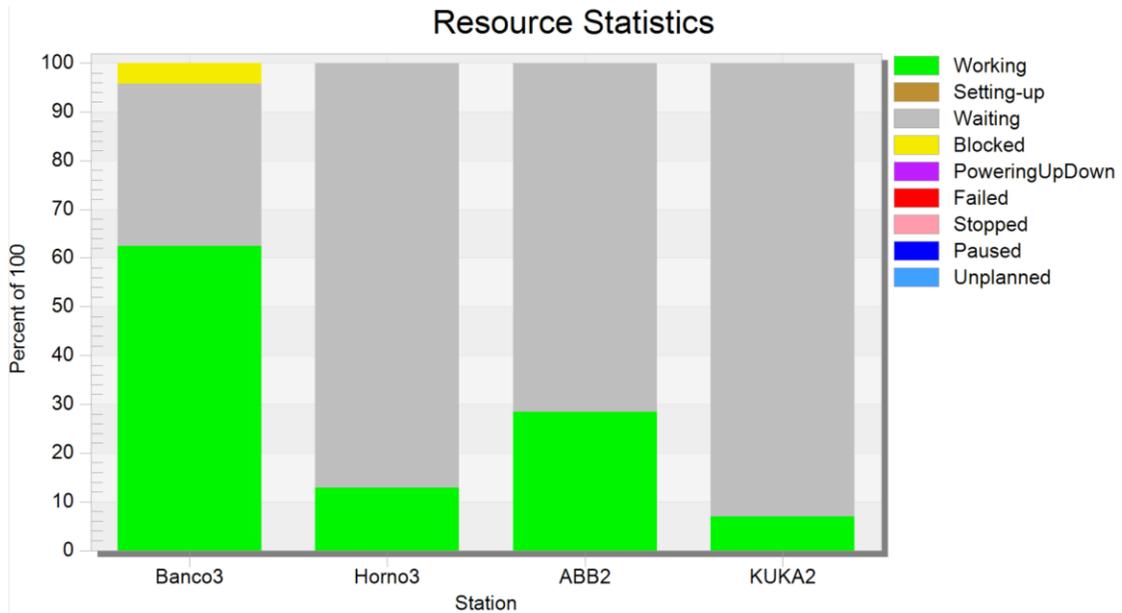


Figura 4. 22 Estadística de recursos del banco 3 durante la simulación del modelo con flujo de los 3 bancos.

4.4 Discusión

En esta sección se compararán los resultados obtenidos de los cinco modelos con la finalidad de ver las ventajas y desventajas que tienen uno con respecto al otro, también se detallara algunas características de algunas simulaciones que se fueron encontrando durante el análisis de los resultados. A continuación, en la Tabla 4.6 se podrá visualizar la comparativa de tiempos de los bancos de la línea flexible de cabezas de motor en los modelos actual, optimización 1, optimización 2, optimización 3 y flujo con sincronización de los tres bancos.

Tabla 4. 6 Comparación de los bancos de la línea flexible de cabezas de motor en los modelos actual, optimización 1, optimización 2, optimización 3 y flujo con sincronización de los 3 bancos

Mod. Banco	Actual	Opt. 1	Opt. 2	Opt. 3	Flujo
Banco #1	5:55:00	5:04:00	4:52:02	4:42:00	5:51:00
Banco #2	5:45:00	4:55:00	4:53:00	4:43:00	5:19:00
Banco #3	7:54:00	7:11:00	6:47:00	6:31:00	6:48:00
Total	19:34:00	17:10:00	16:32:02	15:56:00	6:48:00

En la tabla se distingue una amplia divergencia en los tiempos de operación de cada uno de los bancos a través de los cinco modelos de simulación realizados, se observa un descenso en los tiempos de operación de cada uno de ellos, así como también en los tiempos totales que corresponden a la suma de los tiempos de los tres bancos en cada uno de los modelos.

Para el caso de los tres bancos se aprecia una reducción en los tiempos de operación consecutiva desde el modelo actual hasta alcanzar el menor tiempo de operación en la optimización 3 que corresponde a la implementación de las pre-llamadas, toma de pinzas y preparación del corazón durante la solidificación.

Se contempla en el modelo de simulación con sincronización de flujo en los tres bancos que se vuelve a incrementar los tiempos de operación de cada uno de ellos, debido a que en este modelo cuenta con un mayor número de movimientos y sub-procesos por parte de cada uno de los robots y con esto demorando la operación de cada banco.

También se percibió en este modelo que existían colisiones entre los robots KUKA1 y ABB1 debido a que los periodos del vaciado del metal ocurrían primero que los del sentado del corazón, que quiere decir esto, que se vaciaba primero el metal en el banco sin antes estar el corazón ya colocado, entonces al llegar el otro robot con el corazón se generaba la colisión entre estos. Al realizar un análisis profundo se encontró que las colisiones se generaban debido a la implementación de las pre-llamadas en estos robots causando una desincronización entre estos al estar alimentando a los dos bancos consecutivamente.

El tiempo total de cada modelo correspondiente a la suma del tiempo de operación de todos los bancos, se observa que se disminuye conforme a las optimizaciones que se fueron implementando en las simulaciones, pero teniendo un mayor impacto en el modelo de simulación con sincronización de flujo de los tres bancos, debido a que este es el único modelo capaz de operar con todos los bancos que componen la línea al mismo tiempo, a pesar de que este modelo

vuelve a aumentar los tiempos-ciclos de cada uno de los bancos, el tiempo total solamente depende de la finalización de operación del ultimo banco que este liberando la pieza.

En la Figura 4.23 se puede examinar la divergencia de los tiempos de operación que existe en cada uno de los bancos a través de los cinco modelos de simulación: actual, optimización 1, optimización 2, optimización 3 y flujo.

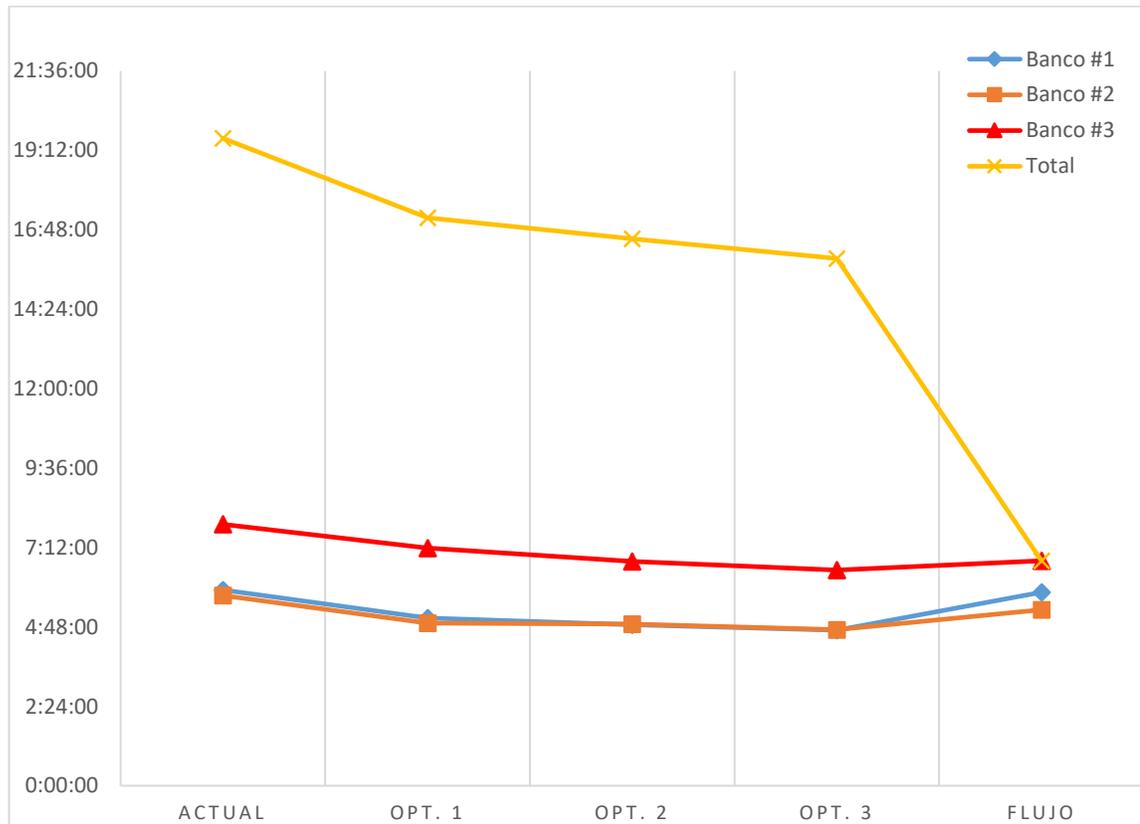


Figura 4. 23 Divergencia de los tiempos de operación de cada banco a través de los cinco modelos de simulación

Los porcentajes de optimización se fueron calculando conforme a los resultados de los tiempos-ciclos de cada uno de los bancos a través de los cinco modelos de simulación, se observa en la Tabla 4.7 que la optimización de mayor impacto fue la optimización 1 que va desde los 9.07% para el banco 3 hasta los 14.37% de reducción para el banco 1, posteriormente como se fueron implementando las otras optimizaciones (colocación de pinzas y preparación del

corazón durante la solidificación) en el modelo fueron disminuyendo el impacto de optimización de cada uno de los bancos.

Tabla 4. 7 Impacto de optimización en cada uno de los bancos a través de los cinco modelos de simulación

Mod. Banco	Actual	Opt. 1	Opt. 2	Opt. 3	Flujo
Banco #1	0.00%	14.37%	3.37%	2.83%	1.13%
Banco #2	0.00%	14.49%	0.58%	2.90%	7.54%
Banco #3	0.00%	9.07%	5.06%	3.38%	13.92%
Total	0.00%	12.64%	3.00%	3.03%	65.25%

También se encontró que el banco 1 es el que tuvo mayor impacto en la reducción de su tiempo-ciclo por la implementación de las tres optimizaciones, pero teniendo el menor impacto con respecto a los otros bancos en el último modelo de simulación debido a que al momento de estar operando con los tres bancos en sincronía, el banco 2 finaliza sus procesos más rápido que las de este banco, de tal manera que da prioridad por parte de los robots al servicio de este banco y demorando los tiempos de operación del banco 1.

Observando la simulación con sincronización de flujo de los tres bancos se descubre que el banco 3 es el que menos le afecta la sincronización de todos los bancos, es imprescindible que esto ocurra en este banco ya que está prácticamente aislado de los otros dos, siendo alimentado por los robots ABB2 y KUKA2, el único momento en el que uno de sus robots se retira de este es cuando la pieza del banco 2 está lista para ser extraída al transportador, pero normalmente esto ocurre cuando la pieza del banco 3 está en su proceso de solidificación, de tal manera que no afecta al flujo de operación de este banco.

Reduciendo los porcentajes de impacto de optimización en cada uno de los bancos se puede apreciar los porcentajes reales de los tiempos-ciclos con respecto al tiempo original de cada uno de los bancos. En la Tabla 4.8 se pueden observar los porcentajes reales de cada uno de los bancos con respecto a sus tiempos originales.

Tabla 4. 8 Porcentajes reales de cada banco con respecto a su tiempo original

Mod. Banco	Actual	Opt. 1	Opt. 2	Opt. 3	Flujo
Banco #1	100.00%	85.63%	82.26%	79.44%	98.87%
Banco #2	100.00%	85.51%	84.93%	82.03%	92.46%
Banco #3	100.00%	90.93%	85.86%	82.49%	86.08%
Total	100.00%	87.36%	84.35%	81.32%	34.75%

Por último, se obtiene que se requiere un 34.75% del tiempo total para la fabricación de las tres piezas con el último modelo de simulación propuesto, siendo el de mayor impacto al querer operar con los tres bancos, debido a que los otros modelos no son capaces de operar con los tres bancos a la vez por tener una configuración escalonada, que quiere decir esto, que primero debe terminar el ciclo un banco para comenzar con el del siguiente y así sucesivamente hasta terminar la fabricación de las tres piezas.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se interpretarán las conclusiones derivadas de este estudio, así como también algunas recomendaciones que se podrán implementar en la línea flexible de cabezas de motor para su incremento en la producción de la fabricación de este elemento automotriz.

Se obtuvieron modelos de simulación donde se logró representar todas las variables involucradas dentro del proceso de la línea flexible de cabezas de motor, alcanzando establecer configuraciones altamente atractivas en la línea para su optimización.

Por medio de la interfaz del software Plant Simulation se produjeron cambios en los puntos y elementos críticos con la finalidad de encontrar el flujo del proceso adecuado para la optimización de la línea, cabe mencionar que el modelo CAD nos sirvió para la validación de estas modificaciones y análisis de los modelos propuestos.

Se consiguieron incrementos en los porcentajes de producción en los bancos 1, 2 y 3 que van desde 9.07% a 14.37% con la implementación de las pre-llamadas (optimización 1) en los robots que brindan servicio a cada uno de estos bancos.

En el banco #3 se obtuvo una reducción de 43 segundos por la implementación de un cuarto robot (KUKA2) a la línea, además de la imposición de las pre-llamadas en el banco.

Se observó una reducción en los tiempos, como un alza en los porcentajes de optimización debido a la implementación de la optimización 2 y 3 al modelo correspondientes a la preparación del pallet y toma de pinzas de extracción durante la solidificación del banco.

En el último modelo propuesto en este estudio, se presenta un porcentaje de optimización del 1.13% a un 13.92% en los bancos, el cual se caracteriza por una sincronización de flujo por parte de los tres bancos que cuenta la línea, siendo inferior esta optimización con respecto a la implementación de la optimización 1, 2 y 3 al modelo actual, pero es un 43.58% mayor al porcentaje total con operación de los tres bancos al mismo tiempo y estableciendo al modelo las tres optimizaciones propuestas, en este sentido, este modelo impacta considerablemente en el incremento de la producción, si se requiere operar con los tres bancos al mismo tiempo, ya que con los otros modelos solo puede operar un banco a la vez en un proceso escalonado, aumentando los tiempos de fabricación de las cabezas de motor.

Si se establece el modelo con sincronización de flujo de los tres bancos a la línea real, se recomienda establecer la optimización 1 (pre-llamadas) al banco 1, ya que si se implementa en el banco 2 y 3 se corre el riesgo de presentar colisiones entre los robots KUKA1 y ABB1. Las optimizaciones 2 y 3 (preparación de pallet y toma de pinzas de extracción durante solidificación) son factibles implementarse a la línea sin suscitar algún conflicto en su operación.

Para el caso que se quiera operar con un solo banco a la vez en la línea flexible de cabezas de motor, se recomienda decretar la optimización 1, 2 y 3 en cada uno de los bancos, teniendo un mayor incremento en la producción si se establecen estas optimizaciones en la línea, teniendo un incremento en la producción del 20.57% para el banco 1, 17.97% para el banco 2 y un 17.51% para el banco 3.

Se percibieron resultados favorables con la utilización de la simulación de eventos discretos para la optimización de la logística de producción en una línea

flexible de cabezas de motor, donde se implicaron procesos, sub-procesos, tiempos de traslados y retrasos en la simulación, teniendo así un mejor concepto en la operación de dicha línea y logrando establecer los puntos y elementos críticos para su respectiva optimización, representándolos en modelos de simulación para sus consiguientes estudios.

La simulación de eventos discretos puede otorgar otro panorama para la optimización de líneas de manufactura, donde se busque la localización de áreas de oportunidad para el incremento en la producción o eliminación de procesos u sub-procesos sin valor agregado.

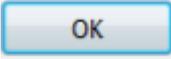
Con el desarrollo de este trabajo se obtuvo un impacto tecnológico al optimizar una línea flexible de cabezas de motor en su condición original a una línea con un mayor rendimiento al lograr una ganancia en su producción del 65.25% a través de modelos de simulación en la plataforma Plant Simulation.

El impacto científico de este trabajo fue que a través de este estudio se logró abrir un nuevo panorama para el estudio de líneas de producción con sistemas robotizados, donde se presente una logística de producción discreta y compleja al estudiarla de la manera tradicional.

ANEXO I

En este anexo se describe la simbología para la generación del modelo de la línea flexible de cabezas de motor en 2D.

Elemento	Descripción
 SingleProc	Estación de proceso simple (torneado, fresado, soldadura, estampado, etc.)
 Assembly	Estación de ensamble
 Source	Fuente de materiales u objetos (metales, moldes, arena, pinzas, etc.)
 Drain	Dren de salida de materiales, productos terminados u objetos
 Buffer	Buffer de almacenamiento de productos, materiales u objetos
 Connector	Conector de unión de entre estaciones de trabajo, fuentes, drenes, etc.
 PickAndPlace	Brazo robótico que simula la operación traslado de objetos de un punto a otro
 FlowControl	Control de flujo que clasifica y separa diferentes tipos de objetos involucrados en la simulación
 Line	Línea que representa las bandas o conveyors que trasladan objetos de un punto a otro

 <p>Dialog</p>	<p>Cuadro de dialogo que se utiliza para la captura de datos de diferentes variables involucradas en la simulación</p>
 <p>TableFile</p>	<p>Tabla de datos para la captura y ejecución de diferentes variables involucradas en el proceso</p>
 <p>Chart</p>	<p>Gráfico donde se muestra la estadística de operación de diferentes estaciones de trabajo</p>
 <p>Method</p>	<p>Método de captura en el lenguaje nativo del software para la ejecución de diferentes comandos u algoritmos de operación de las diferentes estaciones de trabajo involucradas en la simulación</p>
 <p>EventController</p>	<p>Control de eventos donde se representa el tiempo real o en escala de la operación del proceso</p>
 <p>Button</p>	<p>Dispositivo que se utiliza para la apertura o cierre de cuadros de diálogos o para la ejecución de un comando dentro de la simulación</p>
 <p>Checkbox</p>	<p>Caja de chequeo donde se habilita o deshabilita diferentes comandos o procedimientos dentro de la simulación</p>
 <p>Display</p>	<p>Monitor donde se representa el status de operación de una estación de trabajo, dren, fuente, etc.</p>

ANEXO II

En este anexo se describe la programación en el idioma nativo del software Plant Simulation necesaria para la operación de cada uno de los componentes.

❖ Met_Pallet1

```
if Linea1.value = False then
    Sentador1.exitLocked := True

else
    Sentador1.exitLocked := False
    waituntil Banco1.empty and ABB1.empty and KUKA1.empty;
    wait (9.1)
    @.move;
end
```

❖ Met_Pallet2

```
if Linea2.value = False then
    Sentador2.exitLocked := True

else
    Sentador2.exitLocked := False
    waituntil Banco2.empty and ABB1.empty and ABB2.empty;
    wait (10);
    @.move;
end
```

❖ Met_Pallet3

```
if Linea3.value = False then
    Sentador3.exitLocked := True

else
    Sentador3.exitLocked := False
    waituntil Banco3.empty and ABB2.empty;
    WAIT (tabla[1,3])
    @.move;
end
```

❖ Met_Olla1

```
if Linea1.value = False then
  Calentador1.exitLocked := True
else
  Calentador1.exitLocked := False
  waituntil Banco1.empty and KUKA1.empty and ABB2.empty and Banco2.empty;
  WAIT ( 14.94 + tabla [1,1] + 8.8)
  @.move;
end
```

❖ Met_Olla2

```
if Linea2.value = False then
  Calentador2.exitLocked := True
else
  Calentador2.exitLocked := False
  waituntil Banco2.empty and KUKA1.empty and ABB2.empty and ABB1.empty and Banco1.empty;
  WAIT (20 + tabla[1,2] + 20)
  @.move;
end
```

❖ Met_Olla3

```
if Linea3.value = False then
  Calentador3.exitLocked := True
else
  Calentador3.exitLocked := False
  waituntil Banco3.empty and ABB2.empty ;
  WAIT (27.54 + tabla [1,3] + 15.1 )
  @.move;
end
```

❖ Met_Horno1

```
if Linea1.value = False then
  Horno1.ExitLocked := True
else
  Horno1.ExitLocked := False
end
```

❖ Met_Horno2

```
if Linea2.value = False then
  Horno2.ExitLocked := True
else
  Horno2.ExitLocked := False
end
```

❖ Met_Horno3

```
if Linea3.value = False then
  Horno3.ExitLocked := True
else
  Horno3.ExitLocked := False
end
```

❖ Init

```
var a:Object

a :=tabla[0,5]
a.ProcTime := tabla[1,5]

a :=tabla[0,6]
a.ProcTime := tabla[1,6]

a :=tabla[0,7]
a.ProcTime := tabla[1,7]

a :=tabla[0,9]
a.ProcTime := tabla[1,9]

a :=tabla[0,10]
a.ProcTime := tabla[1,10]

a :=tabla[0,11]
a.ProcTime := tabla[1,11]
```

❖ M_dialog

```
param action: string

switch action
case "Option"

case "Apply"
    tabla[1,1]:=str_to_num(?.getValue("ET_Arranque1"))
    tabla[1,2]:=str_to_num(?.getValue("ET_Arranque2"))
    tabla[1,3]:=str_to_num(?.getValue("ET_Arranque3"))

    tabla[1,5]:=str_to_num(?.getValue("ET_Horno1"))
    tabla[1,6]:=str_to_num(?.getValue("ET_Horno2"))
    tabla[1,7]:=str_to_num(?.getValue("ET_Horno3"))

    tabla[1,9]:=str_to_num(?.getValue("ET_Solidificación1"))
    tabla[1,10]:=str_to_num(?.getValue("ET_Solidificación2"))
    tabla[1,11]:=str_to_num(?.getValue("ET_Solidificación3"))

case "Close"

end
```

❖ *Init (Robots)

```
is
  i:integer;
  from_:string;
  to_:string;

do
  self.~.getTimesTable(self.~.temp_table);

  --delete all values
  self.~.temp_table.delete;

  -- fill new
  for i := 1 to self.~.times_table.yDim loop
    from_:=self.~.times_table["from",i];
    to_:=self.~.times_table["to",i];

    self.~.temp_table[from_,to_]:=num_to_time(self.~.times_table["Movingtime",i]+self.~.times_table["Processtime",i]);
  next;
  -- write back the table
  self.~.setTimesTable(self.~.temp_table);
end;
```

❖ Met_ABB1

```
if @.name= "Pallet2" then
  WAIT (tabla[1,2])
  ?.setDestination (Banco2, false);

elseif @.name= "Pallet1" then
  WAIT (tabla[1,1])
  ?.setDestination (Banco1, false);

else
  debug;
end
```

❖ Met_ABB2

```
if @.name= "Pallet3" then
    ?.setDestination (Banco3, false);
elseif @.name= "Olla3" then
    ?.setDestination (Horno3, false);
elseif @.name= "Aluminio3" then
    ?.setDestination (Buffer, false);
elseif @.name= "Pieza3" then
    ?.setDestination (Line, false);
elseif @.name= "Pieza2" then
    ?.setDestination (Line, false);
else
    debug;
end;
```

❖ Met_KUKA1

```
if @.name= "Olla2" then
    ?.setDestination (Horno2, false);
elseif @.name= "Olla1" then
    ?.setDestination (Horno1, false);
elseif @.name= "Aluminio2" then
    ?.setDestination (Banco2, false);
elseif @.name= "Aluminio1" then
    ?.setDestination (Banco1, false);
elseif @.name= "Pieza1" then
    ?.setDestination (Line, false);
else
    debug;
end
```

❖ Met_KUKA2

```
if @.name= "Pallet3" then
    WAIT (tabla[1,3])
    ?.setDestination (Banco3, false);
else
    debug
end
```

REFERENCIAS

- [1] M. Mohamed Esa, N. A. Abdul Rahman, and M. Jamaludin, "Reducing High Setup Time in Assembly Line: A Case Study of Automotive Manufacturing Company in Malaysia," *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 211, pp. 215–220, 2015.
- [2] R. Nurcahyo and A. D. Wibowo, "Manufacturing Capability, Manufacturing Strategy and Performance of Indonesia Automotive Component Manufacturer," *Procedia CIRP*, vol. 26, pp. 653–657, 2015.
- [3] D. R. Tobergte and S. Curtis, "Sistemas Avanzados de Manufactura y su Potencial Aplicación a la Industria Mexicana," *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2013.
- [4] P. F. Cunha and R. M. Mesquita, "The Role of Discrete Event Simulation in the Improvement of Manufacturing Systems Performance.pdf," pp. 137–146, 1996.
- [5] H. Lasi, P. Fettke, H. G. Kemper, T. Feld, and M. Hoffmann, "Industry 4.0," *Bus. Inf. Syst. Eng.*, vol. 6, no. 4, pp. 239–242, 2014.
- [6] F. M. Vargas Jimenez, "Evolución Industrial 4.0," *Linked in*, 2015. [Online]. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/la-revolución-industrial-40-francisco-manuel-vargas-jimenez-6054913116007866368>.
- [7] J. Choomlucksana, M. Ongsaranakorn, and P. Suksabai, "Improving the productivity of sheet metal stamping subassembly.pdf," *Sci. Direct*, vol. 2, pp. 102–107, 2015.
- [8] S. Wang, J. Wan, D. Zhang, D. Li, and C. Zhang, "Towards smart factory for Industry 4.0: A self-organized multi-agent system with big data based feedback and coordination," *Comput. Networks*, vol. 101, pp. 158–168, 2015.
- [9] E. de la Fuente López and R. Mazaeda Echeverría, "Industria 4.0." 2016.
- [10] V. Saenz García, "Los 9 pilares tecnológicos de la Industria 4," *Industria 4.0*, 2015. [Online]. Available: <http://industria-4.blogspot.mx/2015/06/los-9-pilares-tecnologicos-de-la.html>.
- [11] A. Abraham, S. Kovalev, and V. Tarassov, *Proceedings of the First International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (IIT'16)*, vol. 1. Poland: Springer International Publishing AG Switzerland, 2016.
- [12] M. P. Groover, *Modern Manufacturing*. 2011.
- [13] R. Álvarez, R. Calvo, and M. M. Peña, "Redesigning an assembly line through lean.pdf," pp. 949–958, 2009.
- [14] S. K. Kim, H. S. Park, K. W. Lee, and C. H. Jung, "Development of a digital mock-up system for selecting a decommissioning scenario," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 33, no. 14–15, pp. 1227–1235, 2006.
- [15] K. Jeong *et al.*, "The digital mock-up system to simulate and evaluate the dismantling scenarios for decommissioning of a NPP," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 69, pp. 238–245, 2014.

- [16] G. Sun, "A digital mock-up visualization system capable of processing giga-scale CAD models," *CAD Comput. Aided Des.*, vol. 39, no. 2, pp. 133–141, 2007.
- [17] S. Torbert, *Applied computer science*, vol. 7, no. 1. USA: Springer, 2011.
- [18] F. M. Dekking, C. Kraaikamp, H. P. Lopuhaa, and L. E. Meester, *A Modern Introduction to Probability and Statistics*. Netherlands: Springer-Verlag London Limited 2005, 2005.
- [19] CONCEPTDEFINICION.DE, "Definición de Simulación," *marzo 17, 2015*. [Online]. Available: <http://conceptdefinicion.de/simulacion/>. [Accessed: 11-Mar-2016].
- [20] G. Ltda, "El Tiempo y el Clima a su Favor," 2011. [Online]. Available: <http://www.geoentropica.com/galeria/>.
- [21] O. L. J. Rodr, "Simulación , Método de Montecarlo," pp. 1–24, 2011.
- [22] G. Popovics and L. Monostori, "An approach to Determine Simulation Model Complexity," *Procedia {CIRP}*, vol. 52, pp. 257–261, 2016.
- [23] B. Kádár, A. Pfeiffer, and Z. Vén, "Discrete Event Simulation of Production System with Web-Based Support." pp. 3–9.
- [24] C. G. Cassandras and S. Lafortune, *Introduction to Discrete Event Systems*. 2008.
- [25] S. Bangsow, *Use cases of discrete event simulation*. 2012.
- [26] S. AG, "Tecnomatix Plant Simulation Release Notes," *Simulation*, no. January, pp. 1–7, 2008.
- [27] P. Simulation, "Tecnomatix."
- [28] S. Bangsow, *Tecnomatix Plant Simulation - Modelling and programmen by means and examples*. 2008.
- [29] S. Bangsow, *Manufacturing Simulation with Plant Simulation and Simtalk*. Germany, 2009.
- [30] C. Kahraman, *Production Engineering and Management under Fuzziness.pdf*. Turkey: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- [31] T. de Biolley and J. Paelinck, "A Dynamic for the Belgian Economy_Simulation and Optimization.pdf," *Natl. Found. Sci. Res.*, pp. 155–207, 1969.
- [32] Z. Guan, L. Cao, C. Wang, Y. Cui, and X. Shao, *Simulation of logistics system with aspect of pallet requirements optimization based on digital factory*, vol. 122 LNEE. 2011.
- [33] D. Li and Y. Liu, *Computer and Computing Technologies in Agriculture VII*, 3 Part., vol. 419. Springer Heidelberg Dordrecht London New York, 2014.
- [34] G. Tan, G. Kin Yeo, and S. J. Turner, *AsiaSim 2013.pdf*, 13th ed. Springer Heidelberg Dordrecht London New York, 2013.
- [35] P. Trebuña, M. Kliment, M. Edl, and M. Petrik, "Creation of simulation model of expansion of production in manufacturing companies," *Procedia Eng.*, vol. 96, no. Figure 1, pp. 477–482, 2014.

- [36] M. Kliment, R. Popovič, and J. Janek, "Analysis of the production process in the selected company and proposal a possible model optimization through PLM software module tecnomatix Plant Simulation," *Procedia Eng.*, vol. 96, pp. 221–226, 2014.
- [37] P. Trebuña, R. Popovič, and S. Křos, "Methodology of the creation of human and robot operation in the tecnomatix process simulate," *Procedia Eng.*, vol. 96, pp. 483–488, 2014.
- [38] F. Freiberg and P. Scholz, "Evaluation of Investment in Modern Manufacturing Equipment Using Discrete Event Simulation," *Procedia Econ. Financ.*, vol. 34, no. 15, pp. 217–224, 2015.
- [39] A. Kruse, S. Butzer, T. Drews, and R. Steinhilper, "A Simulation-based Framework for Improving the Ecological and Economic Transparency in Multi-variant Production," *Procedia CIRP*, vol. 26, pp. 179–184, 2015.
- [40] B. Bako and P. Božek, "Trends in Simulation and Planning of Manufacturing Companies," *Procedia Eng.*, vol. 149, no. June, pp. 571–575, 2016.
- [41] A. R. Wasim Ahmed Khan, *Virtual Manufacturing*, 1st ed. London: Springer, 2011.
- [42] S. O. F. Ayadehe *et al.*, "Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformables Factories," vol. 1, pp. 8–14, 2010.
- [43] M. Prof and G. Chryssolouris, "Prof . George Chryssolouris," pp. 1–2, 2017.
- [44] F. Group, "Standards for Engineering Design MECHANICAL ENGINEERING," 2006.
- [45] "17/1/2017 DELMIA planeacion y simulacion de la produccion de forma virtual," no. September 2008, pp. 3–5, 2017.
- [46] J. Liu, Y. Li, and Z. Li, "Application of virtual manufacturing in fields cultivate machines," *IFIP Int. Fed. Inf. Process.*, vol. 294, pp. 1461–1466, 2009.
- [47] A. Morosan, I. Sarkany, and F. Sisak, "Intelligent system for optimization of production in flexible manufacturing lines," *INES 2012 - IEEE 16th Int. Conf. Intell. Eng. Syst. Proc.*, pp. 217–222, 2012.
- [48] X. Li and Y. Song, "Optimization of Facilities Layout Based on Lean Manufacturing," pp. 1165–1173, 2013.
- [49] M. Zhang and A. Matta, "Discrete Event Optmization: Worksation and Buffer Allocation Problem in Manufacturing Flow Lines," *Proceeding 2016 Winter Simul. Conf.*, pp. 2879–2890, 2016.
- [50] B. Song, "INTELLIGENT REAL TIME OPTIMIZATION SYSTEM FOR LINE-BALANCING CONTROL IN APPAREL MANUFACTURE," pp. 11–34, 2008.