

**Universidad CEU Cardenal Herrera**

**Departamento de Ciencias Físicas, Matemáticas y de la Computación**



**ANÁLISIS DE LOS SUB-TIEMPOS DE  
CICLO TÉCNICO PARA LA MEJORA DEL  
RENDIMIENTO DE LAS LÍNEAS DE  
FABRICACIÓN.**

TESIS DOCTORAL

Presentada por: Eduardo Garcia Magraner

Dirigida por: Nicolás Montés Sánchez

VALENCIA 2016



TESIS DOCTORAL

**ANÁLISIS DE LOS SUB-TIEMPOS DE CICLO  
TÉCNICO PARA LA MEJORA DEL RENDIMIENTO  
DE LAS LÍNEAS DE FABRICACIÓN.**

---

Memoria presentada para la obtención del grado de Doctor Ingeniero Computación y Producción Industrial por la Universidad CEU Cardenal Herrera.

Fdo. EDUARDO GARCIA MAGRANER

VºBº del director:

DR. NICOLÁS MONTÉS SÁNCHEZ

Valencia, 15 de Julio de 2016

---



# TESIS DOCTORAL

## ANÁLISIS DE LOS SUB-TIEMPOS DE CICLO TÉCNICO PARA LA MEJORA DEL RENDIMIENTO DE LAS LÍNEAS DE FABRICACIÓN.

Autor: Eduardo Garcia Magraner

Dirigida por: Dr. Nicolás Montés Sánchez

### TRIBUNAL CALIFICADOR

PRESIDENTE:

**Dr.D.Luis Gracia Calandin**

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática.  
Universidad Politécnica de Valencia

VOCALES:

**Dr.D.Ubaldo Augusto Pineda Castillo**

FERROVIAL Para FORD S.L

SECRETARIO:

**Dr.D.Marta Covadonga Mora Aguilar**

Departamento de Ingeniería Mecánica.  
Universidad Jaume I de Castellón

SUPLENTE:

**Dr.D.Antonio Falcó Montesinos**

Departamento de Ciencias Físicas, matemáticas y de la computación.  
Universidad CEU Cardenal Herrera.

**Dr.D.Nuria Rosillo Guerrero**

Departamento de Ciencias Físicas, Matemáticas y de la Computación.  
Universidad CEU Cardenal Herrera.

*Detrás de cada equivocación esta la prueba de nuestros intentos,  
admitir, recordar y aprender para seguir.El convencimiento es uno  
de los estándares del liderazgo.*

Henry Ford (1863-1947) Industrial Estadounidense

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría dar las gracias a todas aquellas personal que me han formado profesionalmente y que me han enseñado en todos estos años, no solo en cuestiones técnicas, sino también, que considero lo más importante, en el aspecto humano.

A mis compañeros de trabajo donde de todos y cada uno de ellos sigo aprendiendo de sus consejos y de sus correcciones.

A Nicolás Montés, con el cual he conectado desde el minuto uno que me entreviste en su despacho hace ya unos años. Supo entender mi inquietud y lo transformó en un sueño técnico, en la Tesis.

A mis padres y hermanos, siempre padecedores en la distancia.

A mis suegros, Victor y Luisa por su motivación y apoyo desde el primer día que cogí los libros universitarios.

A mi cuñada Begoña, por su seguimiento en cada paso.

Y para finalizar, y sobretodo, quiero dedicar y agradecer esta Tesis a mi mujer Lourdes y a mis dos hijos Hugo y Yaiza.

A mi mujer, porque ella ha “sufrido y vivido” cada uno de mis pasos que he ido realizando: mi carrera trabajando a turnos, mis Master examinándome a distancia...mi Doctorado, ella siempre me ha apoyado y ayudado con todo su amor y comprensión, sobretodo en mis momentos de silencio, cuando te invade la desesperación de “no llegar” a todo. Siempre se ha sacrificado por mí.

A mis hijos, a ambos les animo a crecer como personas, madurar, sentir y que sean ellos y solo ellos los que se tienen que cuestionar sus sueños, sus proyectos.



---

## RESUMEN

Una línea de producción, fabricación o montaje se puede definir como un grupo de operaciones secuenciales establecidas en una factoría y donde el producto se mueve a través de ellas mientras el producto final es construido. Cada máquina u operario realiza un trabajo concreto que debe de terminarse antes de que el producto se mueva a la siguiente posición de la línea.

Desde los tiempos de Henry Ford y el famoso modelo-T, desde la evolución del modelo-T hasta la fecha los sistemas de producción han cambiado radicalmente. Con el fin de dar una respuesta a los clientes, cada vez con mayor exigencia para ser más competitivos, las empresas se han adaptado para permitir la individualización de los productos. Sin embargo, el ámbito científico no ha seguido el ritmo de la industria, produciendo un gap importante entre las necesidades de la industria y las respuestas que la ciencia da a los problemas industriales. Según varios autores, Boysen, N., Fliedner, M., Scholl, A., una de las razones de este déficit podría ser el hecho de que los trabajos de investigación a menudo consideran modelos individuales o simplificados de forma aislada. Los sistemas de montaje reales requieren una gran cantidad de estos modelos básicos en muchas combinaciones posibles. La presente tesis trata de acercar el mundo académico y universitario a los procesos de producción real y actual en el sector del automóvil mediante el uso exclusivo de líneas de producción y modelos reales de la planta de carrocerías de Ford Almussafes (Valencia).

En el segundo capítulo se propone una mejora del modelo matemático de las líneas de producción existente en la actualidad. El modelo actual está basado en términos a largo plazo (long terms) y términos a corto plazo (Short terms), [4]. Los términos a largo plazo son principalmente utilizados para la planificación de procesos, aglutinando líneas y zonas de la factoría. Los términos a corto plazo se refieren a un periodo de funcionamiento de la máquina y es utilizado principalmente para el control de procesos. El modelo matemático propuesto en esta tesis profundiza y redefine los términos corto plazo a través de los mini-términos y el micro-término. Un mini-término puede ser definido como una parte de la máquina, en una política de mantenimiento preventivo o en una avería, en el que podría ser sustituido de una manera fácil y más rápida que otra parte sub-dividida de la máquina. También un mini-término se podría definir como una subdivisión de la máquina que nos permite comprender y estudiar el comportamiento de esta de una manera más simple. Un micro-término se define como cada parte del mini-término que podría ser dividido, hasta

---

llegar al nivel de profundidad que el usuario requiera. Por lo tanto, el tiempo de ciclo probabilístico de cada máquina es una concatenación de los tiempos de ciclo probabilísticos de los mini-términos y micro-términos donde cada uno podría tener un modelo de distribución probabilística diferente.

Una vez que se obtiene el tiempo de ciclo modelado para cada mini-término y micro-término, el modelado de la línea de producción se completa con una máquina de estados finitos que nos permite simular el comportamiento de la línea. Los resultados de la simulación nos dan la tasa de producción, generalmente expresada en Jobs per Hour (JPH). Con el fin de validar el modelo, en el capítulo 2 se utiliza la línea de soldadura completa ubicada en la fábrica Ford en Almussafes (Valencia). Se aisló una unidad de soldadura para poder medir los tiempos de sub-ciclo, mini-términos, en este caso el movimiento del robot, el movimiento de la pinza de soldadura y la acción de soldadura, obteniendo la distribución probabilística del tiempo de cada tarea. Los resultados de la simulación nos proporcionan la tasa de producción máxima que coincide con la ERR (Engineering Running Rate), que es la tasa de producción máxima establecida por los Ingenieros de la planta, demostrando el por qué no es posible alcanzar el ERC (Engineering Running Capacity), el ideal definido en el momento de la instalación de la línea.

El capítulo 3 analiza cómo afecta el deterioro de los componentes de las máquinas a la tasa de producción. Para ello se seleccionan 5 patologías típicas de la línea de soldadura de Ford Almussafes, que son, el agarrotamiento y la fatiga que se genera en la válvula proporcional que controla la presión de la pinza de soldadura, el deterioro del cilindro neumático que mueve la pinza, el deterioro del transformador que transmite la corriente eléctrica que produce la soldadura, una pérdida de presión y una pérdida de velocidad del brazo robot. Para poder analizar el efecto, se seleccionaron componentes de la planta Ford en uso y cuyo comportamiento se consideraba ideal ya que no producían ninguna alarma de mal funcionamiento. Se midieron los tiempos de cada mini término con cada una de las patologías y se obtuvo la distribución probabilística que se introdujo en el simulador. Los resultados muestran cómo afecta cada una de las patologías en la producción, llegándose a reducir hasta en un 50% para el caso más desfavorable, esto es, si la patología 2, agarrotamiento del cilindro neumático, se produce en la unidad 4 de la estación de trabajo 7.

---

En realidad, los resultados mostrados en el capítulo 3 se obtuvieron mediante el uso de un modelo de línea de soldadura simplificado, promedio del caso real. En realidad, la línea de soldadura es capaz de fabricar las 68 versiones diferentes de un modelo de vehículo que fabrica FORD S.L. en la factoría de Almussafes y donde los puntos de soldadura, ubicación en la carrocería, etc varían en función de cada uno de ellos. Además, los modelos y el orden en el que se fabrican también es una variable a tener en cuenta ya que depende de las demandas del mercado. En el capítulo 4 se mejora el análisis realizado en el capítulo 2 y 3 mediante el uso del modelo real de la línea, esto es, para los 68 modelos actuales. A la entrada del simulador se utiliza la frecuencia relativa de los modelos demandados por el mercado en el mes de Marzo de 2015. En este caso, la producción en el caso más desfavorable se reduce sobre un 40% de valor promedio en función del orden de fabricación de los modelos. El simulador también nos permite realizar el análisis particularizado para cada modelo, mostrando un desbalanceo entre las estaciones y modelos e indicando posibles acciones de mejora.

De los capítulos anteriores y de las pocas publicaciones donde se hace hincapié en la relevancia de la monitorización en tiempo real, se puede concluir que la mejora del rendimiento de las líneas de producción pasa imperativamente por los sistemas de monitorización y control en tiempo real. Las líneas de producción reales son un ente vivo y en constante cambio. En estos, se fabrican distintos modelos y variantes de estos (podemos estar hablando de miles de variantes), se añaden nuevos modelos a líneas antiguas, se introducen mejoras tecnológicas, se producen averías y deterioros de componentes, etc, etc. Por ello, en el capítulo 5 se sientan las bases para el desarrollo de un sistema inteligente de mejora continua que nos permita, por un lado monitorizar y controlar la línea de producción y por otro proponer mejoras en su rendimiento de la línea. El sistema de monitorización se ha instalado en la línea de laterales ya que contiene todos los componentes que puedan llegar a intervenir en todos los casos, desde el factor humano hasta robots y sistemas automatizados. El sistema actual es capaz de detectar el cuello de botella en dinámico y si el tiempo de ciclo de cada estación está siendo afectado por el deterioro de algún mini-término.



## ABSTRACT

A production line, manufacturing or assembly can be defined as a group of sequential operations set in a factory and where the product moves through them while the end product is built. Each machine or operator performs a particular job that must be completed before the product moves to the next position of the line.

Since the days of Henry Ford and the famous Model-T, from the evolution of the model-T to date production systems have changed radically. In order to respond to customers increasingly demand to be more competitive, companies have adapted to allow for customization all product. However, the scientific community has not kept pace with the industry, producing a significant gap between the needs of industry and science gives answers to industrial problems. According to several authors, Boysen, N., Fliedner, M.Scholl, A., one of the reasons for this deficit could be the fact that research often consider individual or simplified models in isolation. Actual assembly systems require a lot of these basic models in many combinations. This thesis aims to bring the academic and university processes real and current production in the automotive sector through the executive use of production lines and real models of the Ford plant bodies Almussafes (Valencia) world.

In the second chapter it improved mathematical model of existing production lines currently proposed. The current model is based on long-term and short terms, [4]. The long-term are mainly used for process planning, bringing together lines and areas of the factory. The terms are short-term processes. The mathematical model proposed in this thesis explores and redefines the terms short term through the mini terms and the micro terms. A mini-term may be defined as a part of the machine, in a policy preventive maintenance or a breakdown, which could be replaced in an easy and faster than the other hand sub-divided machine. Also a mini-term could be defined as a subdivision of the machine that allows us to understand and study the behavior of this in a more simple way. A micro-term is defined as each of the mini-term it could be divided to the level of depth that the user requires. Therefore, the cycle time probabilistic each machine is a concatenation of times the cycle probabilistic terms mini and micro terms where each could have a different probability distribution model.

Once the modeling cycle time for each mini-term and micro-term is obtained, modeling the production line is completed by a finite state machine that allows us to simulate the behavior of the line. The simulation results give us the production rate, usually expressed in Jobs per Hour (JPH).

In order to validate the model, in chapter 2 complete weld line located at the Ford factory in Almussafes (Valencia) is used. A welding unit was isolated to measure the time sub-cycle, mini-terms, in this case the robot movement, the movement of the welding gun and welding action, obtaining the probability distribution of the time of each task. The simulation results provide us with the maximum production rate that matches the ERR (Engineering Running Rate), which is the maximum production rate established by engineers of the plant, showing that it is not possible to achieve the ERC (Engineering Running Capacity), the ideal defined at the time of installation of the line.

Chapter 3 analyzes how it affects the deterioration of machine components to production rate. To this five typical pathologies of the welding line Ford Almussafes, which are, stiffness and fatigue generated in the proportional valve that controls the pressure of the welding gun is selected, the deterioration of the pneumatic cylinder that moves the clamp, deterioration of the transformer to transmit electrical welding current producing a pressure loss and a loss of speed of the robot arm. To analyze the effect of the Ford plant components they were selected in use and whose behavior is considered ideal because it did not produce any alarm malfunction. Each mini-term times with each of the pathologies and the probability distribution that was introduced in the simulator obtained were measured. The results show how it affects each of the pathologies in production, getting it to reduce up to 50% for the worst case, that is, if the condition 2 stiffness of the pneumatic cylinder, occurs in unit 4 of the station work in 7.

Indeed, the results shown in chapter 3 were obtained by using a simplified model line welding, average real case. This weld line is capable of producing 68 different versions of a vehicle models manufactured FORD S.L. in the factory of Almussafes and where the soldering points, location on the body, etc. vary depending on each. In addition, the models and the order in which they are made is also a variable to consider because it depends on market demands. In chapter 4, is improved the analysis in chapter 2 and 3 by using the actual model of the line, that is, for 68 current models. At the entrance of the simulator we use the relative frequency of models demanded by the market in the month of March 2015.

In this case it is used, production in the worst case is reduced about 40% of average value based on the order of manufacturing models. The simulator also us allow analysis for each model, showing an imbalance between stations and models and indicating possible improvement actions.

In the previous chapters and regarding the few publications where there is stress upon the importance of real-time monitoring, it can be concluded that improving the performance of production lines passes imperatively by monitoring systems and real-time control. Actual production lines are a living entity and constantly changing. In these, different models and variants of these (may be talking about thousands of variants) are manufactured, new models are added to old lines, technological improvements are introduced, breakdowns and deterioration of components are produced, etc, etc. Therefore, in Chapter 5 the basis for the development of an intelligent system of continuous improvement that allows us, on the one hand to monitor and control the production line and the other to propose improvements in line performance feel. The monitoring system has been installed on the line side as it contains all the components that may come to intervene in all cases, since the human factor to robots and automated systems. The current system is capable of detecting the bottleneck in dynamic and if the cycle time of each station is being affected by the deterioration of a mini-term.



## RESUM

Una línia de producció, fabricació o muntatge es pot definir com un grup d'operacions seqüencials establertes en una factoria i on el producte es mou a través d'elles mentre el producte final és construït. Cada màquina o operari realitza un treball concret que deu acabar-se abans que el producte es mogui a la següent posició de la línia.

Des dels temps de Henry Ford i el famós model-T, des de l'evolució del model-T fins a la data els sistemes de producció han canviat radicalment. Per tal de donar una resposta als clients, cada vegada amb major exigència per ser més competitius, les empreses s'han adaptat per permetre la individualització dels productes. No obstant això, l'àmbit científic no ha seguit el ritme de la indústria, produint un gap important entre les necessitats de la indústria i les respostes que la ciència dona als problemes industrials. Segons diversos autors, Boysen, N., Fliedner, M., Scholl, A., una de les raons d'aquest dèficit podria ser el fet que els treballs d'investigació sovint consideren models individuals o simplificats de forma aïllada. Els sistemes de muntatge reals requereixen una gran quantitat d'aquests models bàsics en moltes combinacions possibles. La present tesi tracta d'apropar el món acadèmic i universitari als processos de producció real i actuals en el sector de l'automòbil mitjançant l'ús exclusiu de línies de producció i models reals de la planta de carrosseries de Ford Almussafes (València).

En el segon capítol es proposa una millora del model matemàtic de les línies de producció existent en l'actualitat. El model actual està basat en termes a llarg termini (long terms) i termes a curt termini (Short terms), [4]. Els termes a llarg termini són principalment utilitzats per a la planificació de processos, aglutinant línies i zones de la factoria. Els termes a curt termini es processos. El model matemàtic proposat en aquesta tesi aprofundeix i redefineix els termes curt termini a través dels mini-termes i els micro-termes. Un mini-terme pot ser definit com una part de la màquina, en una política de manteniment preventiu o en una avaria, en el qual podria ser substituït d'una manera fàcil i més ràpida que una altra part sub-dividida de la màquina. També un mini-terme es podria definir com una subdivisió de la màquina que ens permet comprendre i estudiar el comportament d'aquesta d'una manera més simple. Un micro-terme es defineix com cada part del mini-terme que podria ser dividit, fins arribar al nivell de profunditat que l'usuari requereixi. Per tant, el temps de cicle probabilístic de cada màquina és una concatenació dels temps de cicle probabilístics dels mini-termes i micro-termes on cada un podria tenir un model de distribució probabilística diferent.

Una vegada que s'obté el temps de cicle modelat per a cada mini-terme i micro-terme, el modelatge de la línia de producció es completa amb una màquina d'estats finits que ens permet simular el comportament de la línia. Els resultats de la simulació ens donen la taxa de producció, generalment expressada en Jobs per hour (JPH).

Per tal de validar el model, en el capítol 2 es fa servir la línia de soldadura completa situada a la fàbrica Ford a Almussafes (València). Es va aïllar una unitat de soldadura per poder mesurar els temps de sub-cicle, mini-termes, en aquest cas el moviment del robot, el moviment de la pinça de soldadura i l'acció de soldadura, obtenint la distribució probabilística del temps de cada tasca. Els resultats de la simulació ens proporcionen la taxa de producció màxima que coincideix amb la ERR (Engineering Running Rate), que és la taxa de producció màxima establerta pels Enginyers de la planta, demostrant el per què no és possible arribar a l'ERC (Engineering Running Capacity), l'ideal definit en el moment de la instal·lació de la línia.

El capítol 3 analitza com afecta el deteriorament dels components de les màquines a la taxa de producció. Per a això se seleccionen 5 patologies típiques de la línia de soldadura de Ford Almussafes, que són, l'engarrota ment i la fatiga que es genera a la vàlvula proporcional que controla la pressió de la pinça de soldadura, el deteriorament del cilindre pneumàtic que mou la pinça, el deteriorament del transformador que transmet el corrent elèctric que produeix la soldadura, una pèrdua de pressió i una pèrdua de velocitat del braç robot. Per poder analitzar l'efecte, es van seleccionar components de la planta Ford a ús i el comportament es considerava ideal ja que no produïen cap alarma de mal funcionament. Es van mesurar els temps de cada minitèrmino amb cadascuna de les patologies i es va obtenir la distribució probabilística que es va introduir en el simulador. Els resultats mostren com afecta cadascuna de les patologies en la producció, arribant-se a reduir fins a en un 50% per al cas més desfavorable, és a dir, si la patologia 2, engarrota ment del cilindre pneumàtic, es produeix en la unitat 4 de l'estació de treball 7.

En realitat, els resultats mostrats en el capítol 3 es van obtenir mitjançant l'ús d'un model de línia de soldadura simplificat, mitjana del cas real. Aquesta la línia de soldadura és capaç de fabricar els 68 versions diferents d'un models de vehicle que fabrica FORD S.L. a la factoria d'Almussafes i on els punts de soldadura, ubicació en la carrosseria, etc varien en funció de cada un d'ells. A més, els models i l'ordre en el qual es fabriquen també és una variable a tenir en compte ja que depèn de les demandes del mercat. En el capítol 4 es millora l'anàlisi realitzada en el capítol 2 i 3 mitjançant l'ús del model real de la línia, és a

dir, per als 68 models actuals. A l'entrada del simulador s'utilitza la freqüència relativa dels models demandats pel mercat en el mes de març de 2015. En aquest cas, la producció en el cas més desfavorable es redueix sobre un 40% de valor mitjà en funció de l'ordre de fabricació dels models. El simulador també ens permet realitzar l'anàlisi particularitzada per a cada model, mostrant un des balanceig entre les estacions i models i indicant possibles accions de millora

Dels capítols anteriors i de les poques publicacions on es fa èmfasi en la rellevància del monitoratge en temps real, es pot concloure que la millora del rendiment de les línies de producció passa imperativament pels sistemes de monitorització i control en temps real. Les línies de producció reals són un ens viu i en constant canvi. En aquests, es fabriquen diferents models i variants d'aquests (podem estar parlant de milers de variants), s'afegeixen nous models a línies antigues, s'introdueixen millores tecnològiques, es produeixen avaries i deterioraments de components, etc, etc. Per això, en el capítol 5 se sentin les bases per al desenvolupament d'un sistema intel·ligent de millora contínua que ens permeti, d'una banda monitoritzar i controlar la línia de producció i de l'altra proposar millores en el seu rendiment de la línia. El sistema de monitorització s'ha instal·lat a la línia de laterals ja que conté tots els components que puguin arribar a intervenir en tots els casos, des del factor humà fins robots i sistemes automatitzats. El sistema actual és capaç de detectar el coll d'ampolla en dinàmic i si el temps de cicle de cada estació està sent afectat pel deteriorament d'algun mini-terme



---

**ÍNDICE**

Capítulo 1 .....	1-27
Introducción a los procesos de líneas de fabricación. Objetivos de la investigación.....	1-27
1.1 Introducción.....	1-27
1.2 ¿Qué pasa después de la instalación de las líneas de producción?.....	1-29
1.3 El Mantenimiento en los equipos: .....	1-33
1.4 Objetivo de la Tesis: .....	1-34
Capítulo 2 .....	2-35
Modelo Matemático para las líneas de producción automatizadas basado en sub-tiempo de ciclo probabilísticos.....	2-35
2.1 Introducción.....	2-35
2.2 Modelo Matemático: Desde micro-término al macro-término.....	2-36
2.3 Caracterización del mini-término en una estación de soldadura real.....	2-39
2.4 Test Experimental.....	2-41
2.5 Caso Real de línea de soldadura. Modelización y simulación.....	2-42
2.6 Simulación de línea de soldadura.....	2-45
2.7 Discusión y resultados futuros preliminares.....	2-46
2.8 Conclusiones .....	2-46
Capítulo 3 .....	3-49
Análisis del efecto y deterioro de los equipos y su impacto en la producción.....	3-49
3.1 Introducción.....	3-49
3.2 Patologías de la línea de soldadura.....	3-50
3.2.1 Descripción del proceso de soldadura.....	3-50
3.2.2 Patologías analizadas.....	3-52
3.3 Test experimental .....	3-56
3.4 Discusión de resultados.....	3-57
3.5 Conclusiones .....	3-58
Capítulo 4 .....	4-60
Análisis del efecto y deterioro de los equipos y su impacto en la producción para el caso multimodelo.....	4-60
4.1 Introducción.....	4-60
4.2 Calculo de Engineering Running Rate para cada modelo.....	4-61
4.3 Calculo del Engineering Running Rate en función de la producción.....	4-61
4.4 Calculo del efecto de las patologías en el caso multimodelo y en función de la producción.....	4-63
4.5 Conclusiones.....	4-63
Capítulo 5 .....	5-64

---

Hacia un sistema inteligente de mejora continua del rendimiento en la producción.....	5-64
5.1 Introducción.....	5-64
5.2 La maldición de los datos.....	5-65
5.3 Gestión y detección del cuello de botella.....	5-65
5.4 Mantenimiento preventivo.....	5-68
5.5 Elección de la línea y equipos para monitorizar.....	5-69
5.6 Sistema de toma de datos.....	5-70
5.7 Herramientas desarrolladas.....	5-71
5.7.1 Diseño de la pantalla principal para operarios de producción y mandos intermedios.....	5-71
5.7.2 Diseño de las pantallas de toma de datos y visualización de las estaciones.....	5-73
5.8 Conclusiones y trabajos futuros.....	5-74
Capítulo 6.....	6-76
Conclusiones y trabajos futuros.....	6-76
6.1 Conclusiones.....	6-76
Anexo 1.....	7-79
Estado del Arte: Descripción de las líneas de Fabricación de Carrocerías y Montaje ALB, ALBP.....	7-79
7.1 Introducción.....	7-79
7.2 Evolución del proceso de fabricación.....	7-80
7.3 ALB Problemas Básicos.....	7-80
7.4 Extensiones de la clasificación ALBP.....	7-81
7.5 Tipos Modelos ALB.....	7-83
7.5.1 Modelo Individual ALB.....	7-83
7.6 Modelo Mixto ALB.....	7-84
7.6.1 Multi-Modelo ALB.....	7-86
7.7 ALB dependiente de una Línea de Control.....	7-87
7.7.1 ALB: Línea a Ritmo.....	7-87
7.7.2 ALB: Línea Asíncrona no constante (Unpaced).....	7-88
7.7.3 ALB: Línea Síncrona no constante (Unpaced).....	7-91
7.8 ALB dependiente de la Frecuencia.....	7-91
7.8.1 ALB: Primera Instalación.....	7-91
7.8.2 ALB: Reconfiguración.....	7-93
7.9 ALB Nivel de Automatización.....	7-94
7.9.1 ALB: Líneas Manuales.....	7-94
7.10 ALB: Líneas Automáticas.....	7-96

---

7.11 Aplicación Industrial.....	7-98
7.11.1 ALB: Industria del Automóvil. ....	7-98
7.12 Resumen ALB: .....	7-99
.....	8-103
.....	9-103
Anexo 2 .....	10-103
Tabla de modelado estaciones de la línea de soldadura.....	10-103
.....	11-105
Anexo 3 .....	12-105
Tabla de resultados de simulación para cada patología. ....	12-105
.....	13-107
.....	14-107
.....	15-107
.....	16-107
Anexo 4 .....	17-107
Minitérminos de la línea de soldadura de la factoría Ford Almussafes para cada modelo fabricado.....	17-107
Anexo 5 .....	18-125
Producción de la línea de soldadura para cada modelo fabricado en la Factoría FORD Almussafes. ....	19-125
Anexo 6 .....	20-131
Tabla de resultados de simulación para cada patología en el caso multimodelo y con producción real. ....	20-131
Bibliografía.....	21-133



## **PRÓLOGO**

La siguiente Tesis nos muestra el comportamiento de líneas automáticas de producción en la planta de automóviles de Valencia.

Nos acercamos a los métodos de fabricación en la planta de carrocerías en sus diferentes procesos y análisis de sus equipos productivos. El estudio queda enfocado para una línea de soldadura donde se analizarán el impacto de varios factores y su influencia.

Este estudio y análisis está reflejado en una línea de producción real en tiempo real para la planta de carrocerías. Al realizar la tesis sobre una línea real, ha sido muy útil ya que ha sido como tener un gran laboratorio de experimentación, un gran banco de pruebas.

Esta gran ayuda, ha permitido programar un algoritmo y modelizar dicha línea en un modelo matemático para posteriormente, cualquier cambio durante la tesis nos ha permitido ver inmediatamente su impacto, obteniendo así resultados reales.

Los distintos enfoques de fabricación se han dividido en varios apartados para de una manera más simple conocer y entender los factores más importantes a considerar para que los estudios sean más eficaces en las líneas de producción.



# Capítulo 1

## Introducción a los procesos de líneas de fabricación. Objetivos de la investigación.

### 1.1 Introducción.

Una línea de producción, fabricación o montaje se puede definir como un grupo de operaciones secuenciales establecidas en una factoría y donde el producto se mueve a través de ellas mientras el producto final es construido. Cada máquina u operario realiza un trabajo concreto que debe de terminarse antes de que el producto se mueva a la siguiente posición de la línea.

A que nos referimos cuando estamos hablando de las líneas de montaje, pues bien, una línea automatizada o no dentro (estaciones manuales) de una planta de producción o sistema de producción, se basa en una configuración lineal o serial, donde la misma línea está segmentada por estaciones o celdas de trabajo donde se realizan diversas operaciones en dichas celdas o estaciones. La pieza o producto se va trasladando por las distintas estaciones donde se le van realizando las tareas de ensamble, soldadura, posicionamiento, etc. La pieza o producto se irá desplazando por unos transportadores donde los hay de muchas tecnologías, desde cintas transportadoras a mesas de transportes. Por ejemplo, en la figura 1 podemos ver una celda o estación de la línea de carrocerías de producción de Ford Valencia compuesta por dos robots y dos operarios. Cada uno de los operarios descarga las piezas desde racks a las estaciones o mesa de posicionamiento, cuando el operario ha terminado su carga y sale de la zona de seguridad, realiza la pulsación de tarea finalizada. Entonces el robot comienza su movimiento de carga de la pieza y su movimiento hacia los equipos de soldadura.



Con las altas exigencias de inversión cuando hay modelos o productos nuevos en nuevas instalaciones, una configuración previa (en cuanto a layout, equipos, diseño, etc.) teniendo en cuenta la mayor parte de los procesos es de gran relevancia para las ingenierías y proyectistas. Por ello, ha sido durante años un campo de atención para los investigadores, que intenta dar el apoyo para los diseños de las configuraciones de los sistemas de producción. Bajo las siglas, (ALB: Assembly Line Balancing), gran cantidad de modelos de optimización han sido presentados y discutidos en las literaturas científicas y técnicas donde buscan apoyar las decisiones en las configuraciones de las líneas de montaje, ver anexo 1. Aunque la cantidad de modelos y trabajos es enorme, existe una brecha entre los requerimientos de problemas de configuraciones reales y el estado de las investigaciones. Según [2], una de las razones de este déficit podría ser el hecho de que trabajos de investigación a menudo consideran extensiones individuales o sólo unos pocos de ALB en forma aislada. Los sistemas de montaje reales requieren una gran cantidad de estas extensiones en muchas combinaciones posibles. Por lo tanto, son necesarios, procedimientos flexibles de ALB que pueden integrarse con muchas de estas extensiones de manera combinada.

En la década de los 70, [3], [4] desarrollaron encuestas donde se reveló que sólo un porcentaje muy pequeño de empresas estaban usando algún algoritmo matemático para la configuración o diseño en aquel momento. La falta de estudios científicos más recientes sobre la aplicación de algoritmos ALB indica que esta brecha o distanciamiento aún existe o incluso ha aumentado.

## **1.2 ¿Qué pasa después de la instalación de las líneas de producción?**

Como hemos explicado, una línea de producción es un conjunto de operaciones secuenciales configurados en unos equipos y/o plantas donde los materiales son sometidos a un proceso de refinado, conformado, soldado, etc. para producir un producto final que será el adecuado para el cliente, así como componentes que se ensamblan para fabricar un artículo determinado. Debido a los altos costos de inversión y de funcionamiento implicados, el diseño de este tipo de líneas es de considerable importancia [1]. Hay un gran número de decisiones cruciales que se tomarán durante el diseño del producto, proceso de selección, la configuración de formato de la línea, balanceo de la línea, la selección de la máquina, la tecnología disponible, etc. Por lo general, estos problemas son considerados uno a la vez, debido a su complejidad [1]. De ahí la gran importancia del balanceo de las líneas, donde las tareas se asignan a las estaciones de trabajo y los recursos que se emplearán (esto es un problema de combinatoria compleja y la solución determina mayormente la eficiencia de la línea diseñada). Debido a la importancia de esta tarea, un gran número de investigadores han estado trabajando en este tema, ver anexo 1.

Dependiendo de los entornos industriales, hay soluciones a una serie de modelos de productos, estructura de líneas, las tareas y sus atributos, estaciones, etc.

Pero, ¿Qué pasa después?. Un equipo de expertos diseña la línea, sobre la base de todos estos parámetros y configuraciones y define la capacidad máxima de producción, principalmente en trabajos por horas (JPH). Se le conoce como “*Engineering Running Capacity*” (ERC). La tarea de los empleados de la fábrica es lograr que la línea de producción alcance este valor máximo, ver figura 2. La realidad muestra que el ERC es extremadamente difícil de lograr en la práctica por lo que la fábrica define una nueva tasa de producción máxima que es más realista y se le conoce como “*Engineering Running Rate*”(ERR).

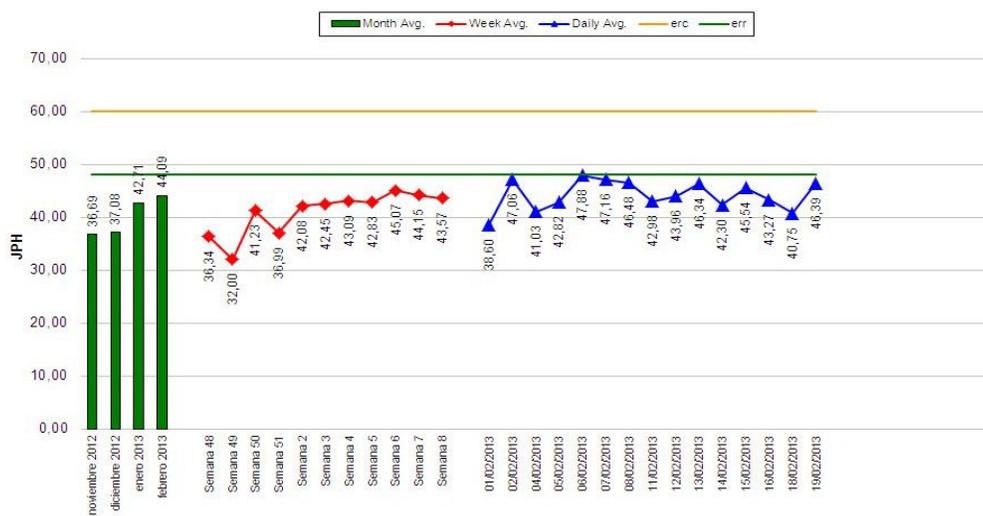


Figura 2 Piezas producidas por hora en una línea de producción VS tasa de producción ideal. Note: ECR (*Engineering Running Capacity*). ERR (*Engineering Running Rate*).

Durante la vida útil de una línea de producción, que pueden ser décadas, el rendimiento depende de una cantidad de parámetros como, mantenimiento, eventos de tiempo de paro, averías de equipos, sistemas de espera, el comportamiento dinámico de los cuellos de botella, el fenómeno Bowl, la demanda de mercado, nuevas tecnologías disponibles, etc.

Hay muchas preguntas abiertas por resolver como:

1.- Mantenimiento:

- ¿Cuándo los componentes de los equipos necesitarían ser cambiados para evitar averías durante la producción?
- ¿Cómo afecta un nuevo componente de un equipo al rendimiento productivo?
- ¿Es el componente instalado el más tecnológicamente avanzado que el anterior?

2.- Averías en los equipos:

- ¿Cómo minimizar su impacto?
- ¿Cómo predecirlos?

3.- El deterioro en los equipos:

- ¿Cómo afecta el deterioro de componentes, piezas en la productividad de las líneas de producción?
- ¿Cómo afectan a su rendimiento?

4.- El comportamiento dinámico de los cuellos de botella:

- ¿Cómo puede influir una pequeña variabilidad en una máquina en el cuello de botella?
- Si cambiamos el cuello de botella de una línea, como impactará en la pérdida de producción.
- ¿Cómo podemos detectarlo y controlarlo?

5.- Fenómeno Bowl:

- ¿Cómo afecta el rendimiento si cambio el cuello de botella de posición?
- ¿Cómo podemos detectarlo y controlarlo?

6.- La demanda de mercado:

- ¿Qué sucede cuando una línea multimodelo cambia la relación entre los diferentes modelos de fabricación?
- ¿Está la línea correctamente equilibrada?
- ¿Cómo puede volver a equilibrarse?

Por lo tanto, durante la vida útil de la línea de producción, hay un gran número de problemas que no se tratan con profundidad en la literatura que incrementa la brecha definida en los problemas ALB de diseño de las líneas.

Recientemente están apareciendo publicaciones de trabajos científicos que tratan de mejorar la línea de producción durante su vida útil. En [8], se propuso un método de detección de cuello de botella a partir de los datos medidos de esta en tiempo real. Este método utiliza los medibles de la línea de producción como son el tiempo de bloqueo y el tiempo de espera de cada celda o estación. El cuello de botella, a menudo, es debido a que las líneas posteriores se bloquean y las anteriores no sirven piezas. Este punto de inflexión es utilizado para detectar el cuello de botella en una línea en tiempo real. En [9] se propuso una mejora de producción a través del cuello de botella. En este trabajo, el control de la posición del cuello de botella en tiempo real se utilizó para la priorización de tareas de mantenimiento inicial. Recientemente, esta técnicas se han utilizado para el control de ahorro de energía en tiempo real, ver [10].

A principios de los sistema modernos de producción, así como en la mayoría de los trabajos de investigación sobre los problemas de balanceo de líneas, [4], se pensó que una

línea perfectamente equilibrada era el diseño perfecto para una línea eficiente. Sin embargo, en la práctica, la línea perfectamente equilibrada rara vez existe, debido a que un cierto grado de desequilibrio es inevitable. Estudios recientes han demostrado que las líneas no balanceadas con una forma de “U” pueden producir resultados en el rendimiento tan bueno como líneas perfectamente equilibradas. A este fenómeno se le conoce como “*Bowl Phenomenon*”. Éste fenómeno determina que si introducimos una carga superior en la estación de trabajo inicial y final, el rendimiento aumenta. Más recientemente se presentó un estudio del fenómeno bowl en una gran línea de fabricación no equilibrada con menores tiempos de proceso estocástico. Los resultados de este estudio sugieren que desequilibrar una línea de fabricación en una configuración de carga de trabajo de forma de cuerno podría proporcionar mejoras estadísticamente significativas en el rendimiento, ver [11].

Las averías están siendo también tratadas recientemente en la literatura. Estas se pueden definir como “situaciones que causan en un equipo y/o estación para entrar espontáneamente un estado de mantenimiento” es decir, en avería. Este evento puede causar tiempo de inactividad (paro de línea) en otras estaciones, entrando así en estado de retroceso. Un evento de tiempo de avería aumenta los costes de los fabricantes. Estos costes son tratados recientemente en [12],[13]. Sin embargo, para mejorar el rendimiento del sistema en tiempo real y para asignar adecuadamente los recursos limitados a diferentes estaciones, es necesario cuantificar el impacto de cada evento de tiempo de avería en los equipos de toda la línea. En [14] se estudió el impacto de los tiempos de avería en el rendimiento de una línea de transferencia de serie no homogéneas. En conclusión, el impacto de cualquier caso de tiempo de avería aislado es sólo aparente a largo plazo, cuando la duración es superior a un cierto umbral, llamada ventana de oportunidad. En las últimas décadas las operaciones de mantenimiento tienen una influencia directa en el rendimiento de la producción en los sistemas de fabricación. La priorización de tareas de mantenimiento es crucial e importante, sobre todo cuando la disponibilidad de recursos de mantenimiento es limitado. Debemos señalar que no solo se trata de la pérdida de producción no controlada, sino también los costes asociados de personal, es decir, mientras sufrimos una avería en una línea donde están operando 5 trabajadores, tendremos que sumar la pérdida de producción más el tiempo perdido de inactividad de 5 operarios.

Si resulta que en una planta de fabricación una de las líneas que ha sufrido una avería súbita es además el cuello de botella de la planta, las pérdidas serán mayores debido a que el resto de los equipos les llegará esta ventana de tiempo perdido e irán a ritmo de esta línea una vez arranque, este es uno de los motivos principales de la existencia de los buffer y/o almacenes en la líneas de fabricación de vehículos. Los buffer sirven como amortiguador de estos tiempos desperdicio.

### 1.3 El Mantenimiento en los equipos:

En general, el mantenimiento se puede clasificar en dos grupos principales: Mantenimiento Correctivo (CM), mantenimiento Preventivo/Predictivo (PM). CM se lleva a cabo cuando falla la máquina o algunos de los elementos del equipo está deteriorado y debe ser reemplazado o reparado, este elemento y/o pieza será el responsable de una avería en toda la línea si no se ejecuta la acción. Sin embargo, los PM se llevan a cabo antes de que el equipo falle. El objetivo de una orden de PM es promover la producción continua del sistema. En [15] una edad virtual para cada máquina se definió en sus órdenes de PM donde representa la edad estimada del equipo. Se aumenta a medida que las líneas van produciendo piezas y se actualiza cada hora utilizando la fórmula definida en [15], midiendo la probabilidad de fallo que aumenta con los años en los equipos. En [16] se define lo que se conoce como la ventana de oportunidad de mantenimiento (MOW). Aquí se define el tiempo máximo que una máquina estratégicamente puede detenerse para realizar tareas de mantenimiento requeridas durante la producción o reparaciones de forma rápida antes de reanudar la producción sin afectar el rendimiento global de las líneas y/o sistemas. Se define así el buffer que permite el MOW, [17]. El concepto del MOW se unió a “*Data Driven Bottleneck Detection Method*” para establecer una nueva política de priorización de las tareas de mantenimiento. Más recientemente, en [18] se introducen características estocásticas de las líneas de transferencia para conseguir un cálculo del MOW más aplicable, práctico y correctamente diseñado.

Sin embargo, el reto principal de las políticas de mantenimiento es el remanente de la estimación de la vida útil de los equipos. El pronóstico es un desafío científico importante para la aplicación industrial de las estrategias de mantenimiento en el que la vida útil es una tarea importante.

A efectos ambientales, económicos y operativos, los pronósticos sobre la vida útil (RUL) despierta un gran interés. En el marco de la gestión de pronóstico y la salud (PHM), existen muchas técnicas de pronóstico y básicamente se clasifican en tres categorías principales: enfoques basados en datos, enfoques basados en el modelo y los enfoques basados en la experiencia, pero también es posible clasificarlos en dos grupos, los métodos no probabilísticos y los métodos probabilísticos, ver [19]. En los métodos no probabilísticos el fenómeno deterioro no es el azar y como máximo las observaciones sobre el deterioro puede ser ruidoso. Por el contrario, con los métodos probabilísticos, el fenómeno de deterioro se considera que es aleatorio y con herramientas estocásticas que tratamos con su comportamiento aleatorio. En este caso el pronóstico se basa en el comportamiento futuro del proceso de deterioro estocástico y puede darnos resultados de probabilidades, ver [19].

## 1.4 Objetivo de la Tesis:

El objetivo de esta tesis es el desarrollo de técnicas que permitan la mejora del rendimiento de líneas de producción automatizadas ya en funcionamiento, es decir, durante su vida útil, tratando de reducir el GAP existente entre el mundo académico y el mundo industrial. Para reducir aún más este GAP, **la presente tesis centra su estudio en las líneas de producción reales de la planta de carrocerías de Ford Valencia, sin utilizar simplificaciones académicas.**

Uno de los primeros objetivos de la presente tesis es descubrir cuál es la razón por la que no es alcanzable el *ERC (Engineering Running Capacity)* definido en el proceso de diseño y porque necesita una redefinición a la baja en las líneas de producción reales *ERR (Engineering Running Rate)*. Esta pregunta no ha sido respondida por la literatura ni por la industria hasta el momento.

Otro de los objetivos de esta tesis es determinar cómo el volumen de producción se ve afectado por el deterioro de algunas piezas y/o elementos de la máquina y que no son detectables por el sistema de control actual de los equipos y también por los trabajadores de mantenimiento y producción. Por ejemplo: una válvula que está agarrotándose, el desgaste de un cilindro neumático, fallos de comunicación, la pérdida de aislamiento de cableado de un transformador, la pérdida de presión en un circuito neumático (por debajo del valor de alarma) o la pérdida de velocidad de un robot. No existen estudios ni cuantificaciones previas de cómo el deterioro de un componente concreto previo a su mantenimiento preventivo afecta al rendimiento de una línea de producción.

Una vez explicado y desarrollado el objetivo anterior, desarrollaremos como detectar el cuello de botella y analizar el impacto en una línea de producción, así entenderemos lo cual importante es determinar dicho cuello de botella y tenerlo correctamente identificado. Este objetivo será de gran ayuda para poder saber dónde realizar nuestras inversiones e incluso poder predecir la ganancia productiva.

El último objetivo de la presente tesis es desarrollar herramientas on-line que nos permitan detectar o prevenir averías mediante la detección del deterioro que están sufriendo los componentes de las máquinas, con el objetivo de incrementar su rendimiento.

# Capítulo 2

## Modelo Matemático para las líneas de producción automatizadas basado en sub-tiempo de ciclo probabilísticos.

### 2.1 Introducción.

En este capítulo presentaremos el modelo para las líneas de producción basados en sub-tiempos de ciclo estocásticos. En este nuevo modelo, cada máquina o equipo que compone una línea de producción automatizada se subdivide en sub-partes. Cada una de las piezas que compone la máquina tiene un tiempo de ciclo con una distribución probabilística debido a que una máquina automatizada no realiza la misma tarea exactamente igual y no gasta el mismo tiempo de ciclo para cada repetición, aunque así lo parezca cuando vemos trabajar una planta con multitud de equipos al unísono.

Por lo tanto, el tiempo de ciclo probabilístico de cada máquina es una concatenación de los tiempos de ciclo probabilísticos donde cada uno podría tener un modelo de distribución probabilística diferente.

Una vez que se obtiene el tiempo de ciclo modelado para cada parte de la máquina, una máquina de estado finito se utiliza para modelar toda la línea de producción. Los resultados de la simulación nos dan la tasa de producción, generalmente expresada en Jobs per Hour (JPH).

En este capítulo se desarrolla un modelo matemático que nos permitirá demostrar que la ERR, (*Engineering Running Rate*), está directamente relacionada con las variabilidades de los equipos. Para la Tesis, este nuevo modelo introduce dos nuevas clasificaciones de datos, el mini-termino y el micro-termino. La literatura clasifica los datos utilizados en el análisis a largo plazo y corto plazo. La diferencia entre ambos términos se ha tratado en

[4]. A largo plazo es principalmente utilizado para la planificación de procesos, mientras que a corto plazo se centra en el control de procesos. Por lo tanto, siguiendo la definición en [4], a corto plazo se refiere a un periodo de funcionamiento no lo suficientemente grande para el periodo de fallo para ser descrito por una distribución estadística.

Con el fin de probar el modelo propuesto en la Tesis, se modela una línea de soldadura real. En particular, una línea de soldadura real en la planta de FORD SL ubicada en Almussafes, Valencia. Esta línea cuenta con 35 unidades de soldadura, es decir, 35 pinzas de soldadura movidas por robots, todas ellas distribuidas en 8 estaciones de trabajo. Los resultados de la simulación proporcionan la pérdida de Job per Hour (JPH) debida a la variabilidad de la máquina.

Este capítulo está organizado con la siguiente estructura. El apartado 2.2 presenta un modelo matemático para calcular el largo plazo y corto plazo por medio de los mini-termino y micro-termino. El apartado 2.3 presenta el estudio real, realizado en la celda de soldadura, donde los mini-términos son medidos experimentalmente. En el apartado 2.4 presenta un modelo de una línea de soldadura real y el resultado de la simulación. En el apartado 2.5 presenta la discusión sobre los resultados futuros y los resultados preliminares. Por último, el apartado 2.6 concluye con el capítulo con un énfasis en los desafíos futuros.

Los resultados del presente capítulo se han publicado en [25], [26] y se ha solicitado una patente por parte de FORD S.A., [27].

## **2.2 Modelo Matemático: Desde micro-término al macro-término.**

Como decíamos anteriormente, la literatura clasifica los datos utilizados en el análisis a largo plazo y corto plazo. En este capítulo se redefine el corto plazo en dos nuevos términos, el mini-termino y el micro-termino. Un mini-término puede ser definido como una parte de la máquina, en una política de mantenimiento preventivo o en una avería, en el que podría ser sustituido de una manera fácil y más rápida que otra parte sub-dividida de la máquina. También un mini-término se podría definir como una subdivisión que nos permite comprender y estudiar el comportamiento de la máquina. De la misma manera, un micro-término se define como cada parte del mini-término que podría ser dividido en sí. En general, el tiempo de una línea o planta se puede representar como:

$$F = \sum_{1 \leq l \leq p} \sum_{1 \leq s \leq k} \sum_{1 \leq M \leq j} \sum_{1 \leq m \leq i} \tau_{l,s,M,m} \quad (1)$$

Donde  $\{\tau_{s,i,j,k}\}$  para  $1 \leq l \leq p$ ,  $1 \leq s \leq k$ ,  $1 \leq M \leq j$ ,  $1 \leq m \leq i$  son tiempos pseudoaleatorios independientes con media y varianza.

$$\mathbb{E}[\tau_{l,s,M,m}] = \mu_{l,s,M,m} \quad \text{Var}[\tau_{l,s,M,m}] = \sigma_{l,s,M,m}^2 \quad (2)$$

Y donde  $m$  corresponde al número de micro-términos,  $M$  corresponde al número de mini-términos,  $s$  corresponde al número términos a corto plazo y  $L$  corresponde al número a largo plazo. De la misma manera una estación de trabajo con  $k$  términos a corto plazo (máquinas) que trabajan en serie se define como:

$$W = \sum_{1 \leq s \leq k} \sum_{1 \leq M \leq j} \sum_{1 \leq m \leq i} \tau_{s,M,m} \quad (3)$$

Donde el tiempo de ciclo para cada corto plazo puede ser definido como:

$$T_{TC}^s = \sum_{1 \leq M \leq j} \sum_{1 \leq m \leq i} \tau_{s,M,m} \quad (4)$$

Para  $1 \leq s \leq k$ , y

$$T_{T_{M,s}}^M = \sum_{1 \leq m \leq i} \tau_{s,M,m} \quad (5)$$

Para  $1 \leq s \leq k$ , y  $1 \leq M \leq i$ . Podemos escribir entonces:

$$W = \sum_{1 \leq s \leq k} T_{TC}^s = \sum_{1 \leq s \leq k} \sum_{1 \leq M \leq j} T_{T_{M,s}}^m \quad (6)$$

Si una estación tiene  $k$  términos a corto plazo (máquinas) trabajando en paralelo, el modelo puede re-escribirse como:

$$W = \text{Max}\{T_{TC}^s\} \forall s \in [1, k] \quad (7)$$

En ambos casos, como el tiempo es  $\tau_{s,m,\mu}$  son pseudoaleatorios e independientes, esto es:

$$\mu_{TC}^s = \mathbb{E}[T_{TC}^s] = \sum_{1 \leq M \leq j} \sum_{1 \leq m \leq i} \mu_{s,M,m} \quad (8)$$

y

$$(\sigma_{TC}^s)^2 = \text{Var}[T_{TC}^s] = \sum_{1 \leq M \leq j} \sum_{1 \leq m \leq i} \sigma_{s,M,m}^2 \quad (9)$$

Para  $1 \leq s \leq k$ , y

$$\mu_{T_{M,s}}^s = \mathbb{E}[T_{T_{M,s}}^s] = \sum_{1 \leq m \leq i} \mu_{s,M,m} \quad (10)$$

y

$$(\sigma_{T_{M,s}}^s)^2 = \text{Var}[T_{T_{M,s}}^s] = \sum_{1 \leq m \leq i} \sigma_{s,M,m}^2 \quad (11)$$

Entonces tenemos que:

$$\mu_{TC}^s = \mathbb{E}[T_{TC}^s] = \sum_{1 \leq m \leq i} \mu_{T_{M,s}}^s \quad (12)$$

Para  $1 \leq s \leq k$ . Ahora, el siguiente paso es simular una de las estaciones junto con las otras de la línea. El formato común es usar una máquina de estado simplificada, ver Fig.3, [6].

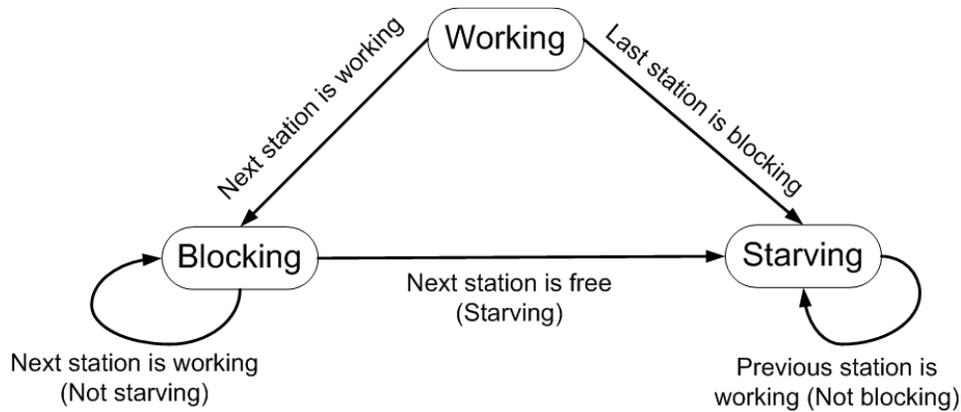


Figura 3 Máquina Simplificada de una estación de trabajo.

Hay tres posibles estados en las estaciones de trabajo, “trabajo”, “espera” y “bloqueo”. Si la estación actual está en estado de trabajo y el trabajo está terminado, comprueba la siguiente estación. Si se encuentra en espera de pieza, la pieza acabada se entrega a la misma y el estado de la estación actual pasaría a estar libre de recibir otro trabajo. Si la siguiente estación se encuentra en estado de trabajo cuando la actual termina su labor, la estación actual cambia su estado a bloqueo, es decir, el bloqueo de sí mismo hasta que la siguiente estación este libre.

Si la estación actual está libre para recibir otra pieza, comprueba la estación anterior. Si la estación anterior se encuentra en estado de “trabajo”, el actual estado cambia a “espera”, es decir, está en espera hasta que la estación anterior tiene pieza para trabajar. Si la estación anterior se encuentra en estado de bloqueo, la actual estación recibe la pieza y

cambiará su estado a trabajo. Siempre hay una pieza disponible para trabajar en la primera estación y siempre se puede extraer la pieza terminada de la última estación.

Cuando se inicia la simulación, todos los estados de la estación están establecidos en espera de pieza, pero la primera estación se establece en estado de trabajo. El bucle de simulación se ejecuta en el tiempo de paso establecido ( $\Delta t$ ). Para cada paso de tiempo, el tiempo de ciclo de cada estación de trabajo disminuye hasta que el tiempo de ciclo es cero, lo que significa que el trabajo está terminado y los acontecimientos se desencadenan.

El tiempo de ciclo de una estación de trabajo tiene una distribución probabilística  $T_{TC}^s(\mu_{TC}^s, \sigma_{TC}^s)$  que depende de los mini-términos y los micro-términos, ver ecuaciones (8) y (9). Entonces, cuando se inicia un nuevo trabajo en una estación de trabajo, se genera un nuevo tiempo de ciclo basado en la distribución probabilística, luego diferente para cada pieza. Los trabajos por hora producidos por la línea,  $JPH(\mu_{JPH}, \sigma_{JPH})$ , se calculan utilizando la simulación de largo plazo.

### **2.3 Caracterización del mini-término en una estación de soldadura real.**

Uno de los objetivos de la Tesis es analizar el efecto de algunos mini-términos en el rendimiento de la línea. Para esta propuesta, una estación de soldadura de carrocerías se toma como ejemplo para su desarrollo. La estación de soldadura propuesta es una de las estaciones más relevantes porque hay aproximadamente 4.500 puntos de soldadura en una carrocería de un coche. La línea de soldadura se compone por diferentes estaciones de trabajo donde se realizan los diferentes procesos de soldadura, donde los robots de soldadura trabajan en paralelo, ver sección 4.

Un brazo robot y una pinza de soldadura componen una estación de soldadura, ver Fig.4. Esta estación de soldadura se aisló de la línea de soldadura con el fin de analizar, comprender y medir los resultados presentados en esta sección.

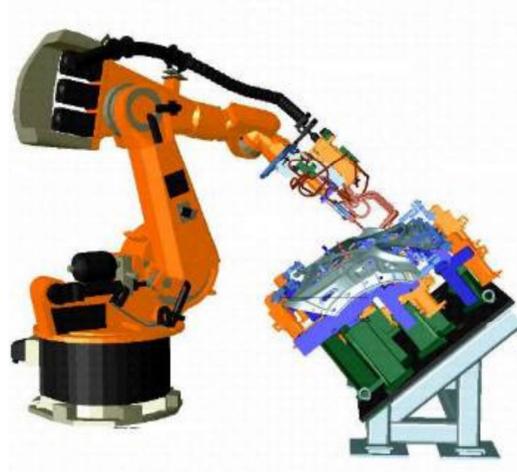


Figura 4 Estación de Soldadura.

El comportamiento de la estación de soldadura es simple. En primer lugar, el brazo de robot mueve la pinza de soldadura hasta el punto a soldar. Entonces, un cilindro neumático mueve la pinza de soldadura en dos fases: una para aproximar la pinza y la segunda para soldar. La presión aplicada por la pinza está controlada por un sistema de control. Cada uno de estos dispositivos necesitan un cierto tiempo para desarrollar su tarea y en cada uno de estos dispositivos, también hay componentes que también necesitan un cierto tiempo para desarrollar sus propias tareas. Con el fin de analizarlas, la unidad de soldadura se divide en tres mini-términos, el brazo robot, el movimiento de soldadura y la acción de soldadura.

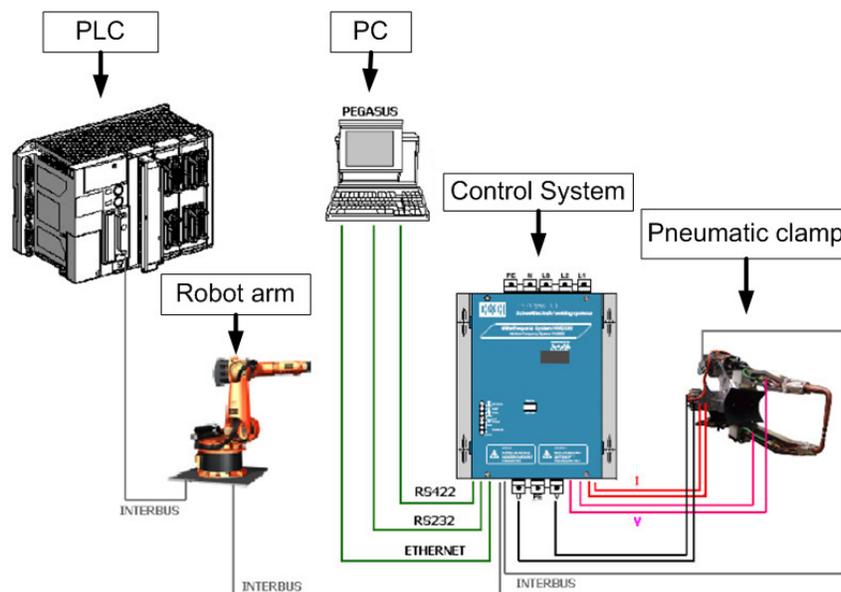


Figura 5 Configuración Experimental de la estación de trabajo.

La figura 5 se muestra la configuración experimental para medir el tiempo de ciclo de cada mini-término en la estación de soldadura, donde el PLC y el PC se utilizan para medir el tiempo.

La prueba experimental consiste en que el brazo del robot, partiendo de un punto inicial predefinido, mueve la pinza a un punto de soldadura definido en el programa del robot, la pinza se cierra y cuando alcanza la presión de trabajo comienza la tarea de soldadura. Debido a que el movimiento de soldadura y la tarea de soldadura que realizan en un corto periodo de tiempo, esta tarea se repite 6 veces, lo que define el cordón de soldadura.

## 2.4 Test Experimental.

La metodología experimental es como sigue. La tarea de soldar se repite 6 veces por cada muestra obtenida. La trayectoria del robot es la misma para todos los movimientos. Entonces, la tarea de sujeción se repite 40 veces con el fin de obtener un número suficiente de muestras para medir el valor medio y la desviación estándar para cada mini-término. La siguiente tabla muestra las mediciones de resultados experimentales para cada mini-término  $(\mu, \sigma)$ .

	Mini-término	Mini-termino	
	Brazo robot $(\mu, \sigma)$	Pinza de soldadura $(\mu, \sigma)$	
		Movimiento	Soldadura
Medida total	(35.55, 0.67)	(2.49, 1.15)	(8.62, 2.05)
Ciclo independiente	(1, 0.11)	(0.42, 0.47)	(1.44, 0.84)

*Tabla 1 Medidas del Test Experimental para cada mini-término y el ciclo total para los 6 puntos de soldadura.*

La tabla 1 muestra también un solo tiempo de ciclo computado mediante las siguientes ecuaciones;

$$\mu = \frac{\mu}{6} \sigma = \sqrt{\frac{\sigma^2}{6}} \quad (13)$$

En el caso de un brazo robot, el tiempo base del brazo robot de tiempo de ciclo es el tiempo de ciclo normal, que nos da el tiempo de ciclo por segundo, es decir;

$$\mu = \frac{\mu}{\mu_{opt}} \sigma = \sqrt{\frac{\sigma^2}{\mu_{opt}}} \quad (14)$$

Donde  $\mu_{opt}$  es el total del movimiento del robot.

## **2.5 Caso Real de línea de soldadura. Modelización y simulación.**

En el capítulo anterior muestra cómo el control de soldadura y máquinas en general, tienen un comportamiento de tiempo de ciclo probabilístico. Ahora, en este capítulo se analiza cuánta producción se pierde (JPH) en una línea real por ese comportamiento. Para este propósito, se selecciona la línea de soldadura de Ford S.L. ubicada en la fábrica de Almussafes, véase fig. 5.



*Figura 5 Línea de Soldadura analizada en este capítulo. Está instalada in Ford Factory en Almussafes (Valencia).*

En 1980 se instaló la línea de soldadura. El grupo staff que diseñó la línea define la capacidad máxima de la línea como, ECR (Engineering Running Capacity), 60 JPH. Sin embargo, los ingenieros de la planta tienen otra capacidad dependiente de la

disponibilidad, que es el ERR (Engineering Running Rate), en este caso está definido en 51 JPH. La diferencia entre el ERR y la producción diaria para llegar al GRR (Get Ready Requirement) es de (JPH 28.9). El GRR significa requisitos de mercado, es decir, los pedidos de los clientes. La siguiente figura muestra la tasa de producción de la línea de soldadura.

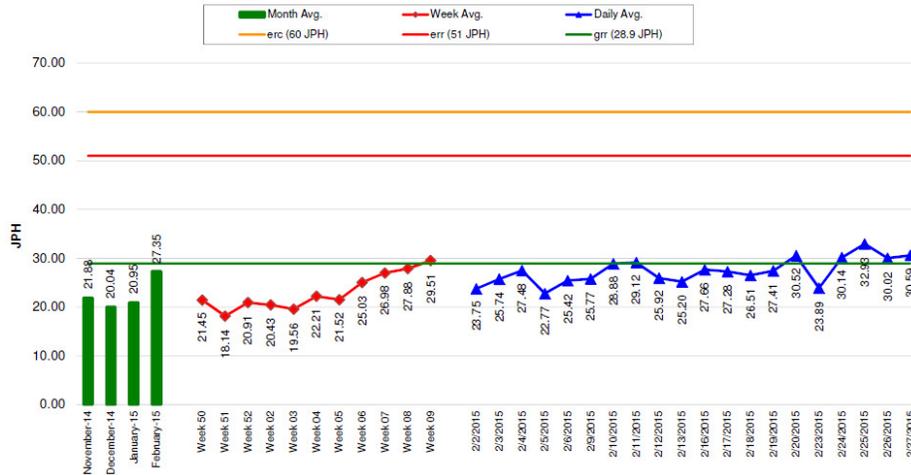


Figura 6 JPH producidos en la línea real de soldadura VS producción ideal.

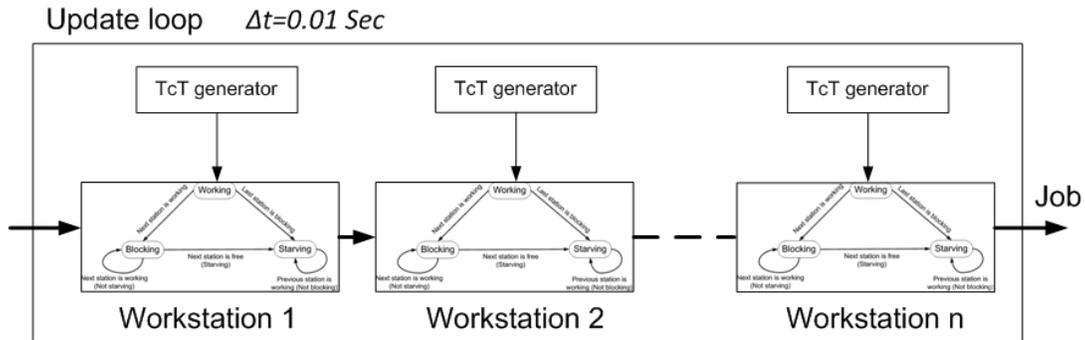
En una línea de soldadura real como esta, hay estaciones de trabajo de soldadura independientes entre sí, donde cada una tiene unidades de soldadura trabajando en paralelo y a veces en serie. Es posible encontrar 1,2,4 o 6 robots de soldadura en la misma estación de trabajo, donde cada uno hace hasta 19 puntos de soldadura, véase la tabla adjunta en el Anexo 2. En nuestro caso particular, nuestra línea de soldadura tiene 8 estaciones de trabajo donde 3 son con 6 robots de soldadura, 4 con 4 robots de soldadura y 1 para 1 robot de soldadura, ver figura 7.

El anexo 2 muestra el modelado de la línea de soldadura, donde las filas muestran los mini-términos para cada robot en cada estación, el movimiento del robot, la soldadura de movimiento y tarea de soldadura respectivamente, así como el desplazamiento. Movimiento del robot significa cuántos segundos se mueve, el movimiento de soldadura y la soldadura significa cuántos puntos de soldadura tiene que realizar. El offset significa cuántos segundos el robot de soldadura debe esperar a otra unidad para poder hacer su trabajo.



## 2.6 Simulación de línea de soldadura.

Para simular la línea de soldadura, se desarrolla una simulación basada en máquinas de estado. Hay tres Estados posibles de la estación de trabajo "Trabajo", "Espera" y "Bloqueo", ver fig. 3 y fig. 8. El bucle se actualiza con un incremental de 0,01 segundos. En la línea de soldadura simulada, siempre hay una pieza en la primera estación de trabajo, para que el estado de bloqueo no sea posible en la primera estación. Además, todas las piezas terminadas en el último puesto de trabajo se retiran, para que el estado "Espera" en la última estación de trabajo no sea posible. El circuito comienza con todas las estaciones en el estado de "Bloqueo".



*Figura 8 Estado de la simulación de las máquinas en una estación.*

Siguiendo con la Eq(7), el tiempo de ciclo para cada estación de trabajo es el tiempo de ciclo máximo de cada estación de la soldadura que trabaja en paralelo, indicando el equipo más lento y el cuello de botella para una estación de trabajo particular. El tiempo de transferencia se agrega a la duración del ciclo. Este tiempo es el tiempo necesario para transportar el coche en una estación de trabajo a la siguiente (12 segundos).

El tiempo de ciclo de cada aparato se calcula introduciendo las repeticiones en Eq(6), esto es

$$W = \sum_{1 \leq s \leq k} T_{TC}^s = \left( \sum_{1 \leq s \leq k} \left( \sum_{1 \leq M \leq j} r_M \cdot T_{T_{M,s}}^M \right) + \xi \right) + \varphi \quad (15)$$

Donde  $r_M$  son las repeticiones de cada *mini-término*  $m$ ,  $\xi$  es el offset y  $\varphi$  es el tiempo de transporte. Esta simulación se ejecuta durante 50 horas y la media y varianza de las piezas

producidas (JPH) en cada hora se computa y se reinicia de nuevo la cuenta. El resultado es, JPH (51,1.05). Como podemos observar, el valor medio es igual que el ERR definido por los ingenieros de planta, como queríamos demostrar.

## **2.7 Discusión y resultados futuros preliminares.**

El resultado de la simulación demuestra que una de las razón de la pérdida de piezas (JPH) es debido a la variabilidad de la máquina, y ERC no puede lograrse porque el tiempo de ciclo de los mini- términos y micro-términos son probabilísticos. Esto unido al Bowl Phenomenon, que propaga la probabilidad desde el cuello de botella, es la razón de la pérdida de productividad. La simulación permite también poner a prueba lo sensible que es el rendimiento de la línea debido a la variabilidad del mini término. Por ejemplo, si sustituimos la desviación de cada mini-término en -0,01 seg, obtenemos (57, 0.47) JPH, 4 piezas(JPH) por debajo de la ERC y 6 más del ERR.

## **2.8 Conclusiones**

Este capítulo presenta un nuevo modelo que nos permite determinar cómo la variabilidad de una parte de la máquina puede afectar el ritmo de producción en línea. El nuevo modelo se basa en dos nuevos términos, mini y micro-término. La subdivisión en mini-términos es seleccionada por el usuario por alguna razón, porque una parte de la máquina debe ser sustituida por los trabajadores de mantenimiento o simplemente porque permite analizar la máquina más adecuadamente. Un término micro es un elemento que compone un mini-término y puede ser tan pequeño como lo desee el usuario. El presente trabajo centra su atención en una línea de soldadura en una fábrica de Ford en Almussafes (Valencia). Esta línea de soldadura cuenta con un ERC de 60 JPH. Sin embargo, los ingenieros de producción redefinen su capacidad máxima de 51 JPH, el ERR. Esta variación, como demostramos en el presente trabajo, es debida a la variabilidad de la máquina, y esta es una de las razones por la que ERC no puede lograrse.

El modelo presentado en este estudio podría tener un impacto profundo en la industria de la producción por diversas razones. Podría ayudar a analizar patologías de deterioro y su efecto en el rendimiento como demostramos en los capítulos siguientes. También el modelo presentado puede tener un impacto importante en la industria como herramienta de simulación de un nuevo componente tecnológico. Cuando un fabricante, por ejemplo de pinzas de soldadura quiera vender algún componente a FORD, este puede ser testado offline para determinar su comportamiento a efectos de tiempo de ciclo, media y varianza y, determinar cuánto va a mejorar el rendimiento de la línea, es decir, puede ayudar a

focalizar la inversión en la mejora de la línea contrastada con el beneficio en JPH que se obtendría de ella.

Una conclusión importante del análisis realizado es que los mini-términos con una alta variabilidad son los que más pérdidas de producción provocan. Por lo tanto, esto puede provocar un cambio en la relación proveedor/FORD ya que, como ocurrió con los brazos robots donde la repetitividad fue una de las premisas de diseño, soliciten a los proveedores nuevos componentes donde la repetitividad sea un parámetro a tener en cuenta.



## Capítulo 3

# Análisis del efecto y deterioro de los equipos y su impacto en la producción.

### 3.1 Introducción.

Como hemos comentado en los capítulos anteriores los datos o términos a largo plazo son usados para planear los procesos, mientras con los datos usados a corto plazo se centran en los procesos de control primarios. Hemos elaborado la siguiente pirámide para explicar correctamente el uso y ubicación de cada uno de los términos, así como los miniterminos y microtérminos propuestos en esta tesis.

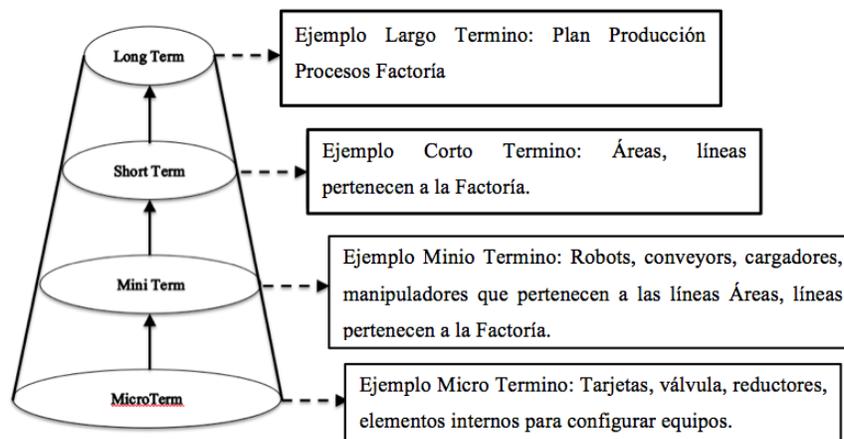


Figura 9 Pirámide de Términos.

Cada termino es modelado estadísticamente por el valor medio  $\mu$  y su desviación estándar  $\sigma$  del término. En el capítulo anterior vimos como el valor medio y sobre todo, la desviación estándar tenía un efecto importante en el rendimiento de la línea de soldadura. En este capítulo vamos a analizar cómo varia el valor medio y desviación estándar cuando los componentes de las máquinas se deterioran. Es importante remarcar que las patologías analizadas no han llegado al umbral en el que son detectables por las alarmas de la planta, es decir, no son lo suficientemente importantes para los sistemas de detección de averías de la planta o para los operarios de mantenimiento.

### 3.2 Patologías de la línea de soldadura

#### 3.2.1 Descripción del proceso de soldadura

Antes de entrar de pleno en el análisis de patologías, explicaremos brevemente cómo funciona la soldadura por resistencia, así podremos entender fácilmente donde aplican los mini-términos.

El objetivo del proceso de soldadura es la unión de dos piezas de metal. Las dos piezas de metal que van a unirse son presionadas juntas por los electrodos de la máquina de soldadora de manera que hagan un buen contacto eléctrico. Entonces se pasa la corriente eléctrica a través de ellas, lo que provoca un calentamiento en estas hasta que empiezan a derretir en el punto de contacto (se le denomina lenteja). El metal fundido de las dos piezas fluye y las piezas unen; entonces la corriente se apaga y el metal fundido se solidifica, formando una conexión metálica sólida entre piezas. La siguiente figura muestra un esquema descriptivo del proceso.

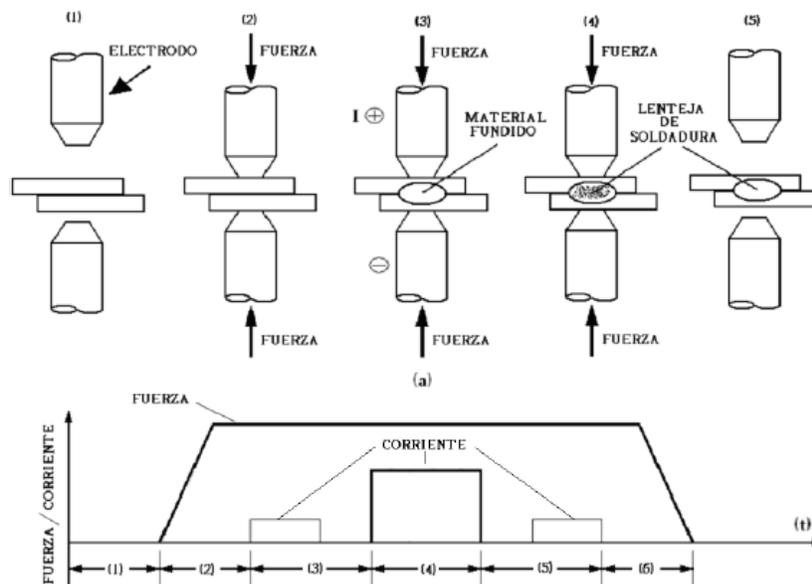
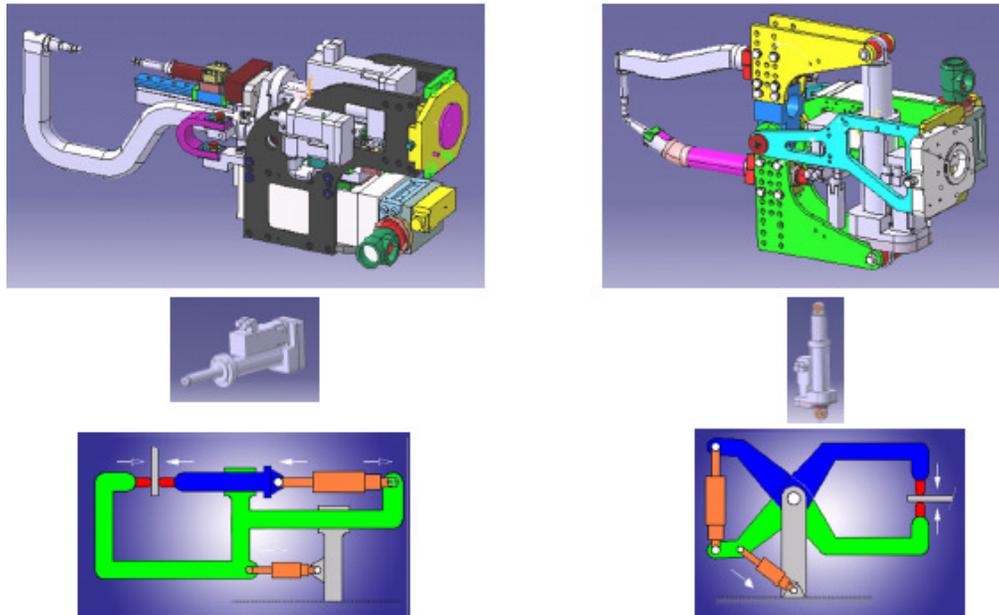


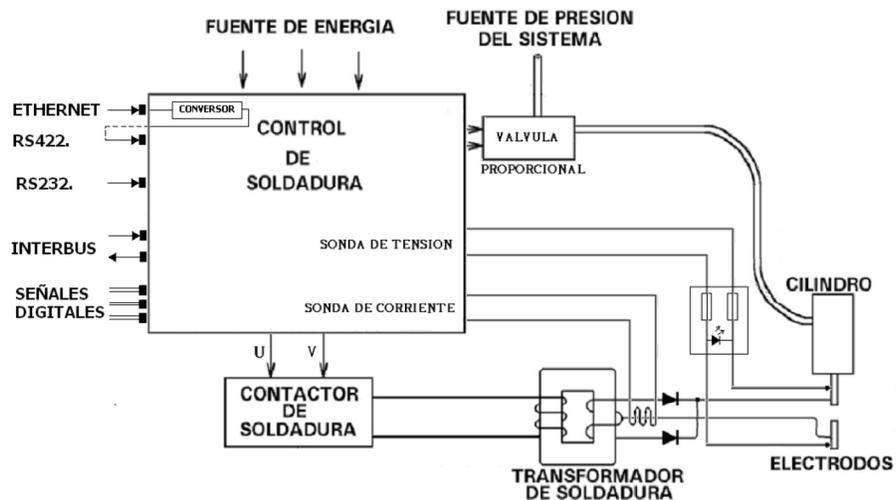
Figura 10 Esquema soldadura por resistencia

Existen diferentes tipos de pinzas de soldadura, ver *Figura11* , donde la principal diferencia radica en el sistema mecánico que aplica la fuerza de presión.



*Figura11* Tipos de pinza de soldadura

La pinza y el proceso de soldadura están controlados por un sistema de control, ver *Figura 12*;



*Figura 12* Sistema de control de la pinza de soldadura

El sistema de control tiene dos lazos diferenciados, el primero de movimiento y mantenimiento de presión de la pinza y la segunda, de aplicación de la corriente eléctrica

para la realización de la soldadura. En la primera fase, la pinza, a través de los cilindros neumáticos realiza un movimiento de aproximación a el punto de soldadura. Seguidamente, el cilindro presiona el punto de soldadura. Este movimiento y control de la presión se realiza a través de una válvula proporcional.

Una vez se esta ejerciendo la presión sobre el punto de soldadura, se le aplica la cantidad de corriente necesaria a través de un transformador de soldadura. Aquí se incorpora un sensor de corriente y una lectura de la tensión a lo largo de todo el proceso de soldadura. Esto supone un cálculo de la resistencia  $R$  del material a soldar, magnitud responsable de la intensidad necesaria para realizar correctamente la soldadura. El cálculo de la resistencia es determinante en la calidad de la soldadura. Para ello se utilizan más periodos de regulación por segundo, un tiempo de reacción más corto, el tamaño de transformador más pequeño y la desaparición de corrientes inducidas.

La pinza de soldadura va montada en un brazo robot antropomorfo de 6 ejes. Los movimientos sincronizados de los 6 ejes del robot están programados de forma que sean relativos a la trayectoria, donde dentro de la lógica de programa debemos diferenciar tres tipos de puntos:

**PTP** (Point-to-point): La herramienta se mueve a lo largo de la trayectoria más rápida al punto final.

**LIN** (Linear): La herramienta es guiada a una velocidad definida a lo largo de la línea recta.

**CIRC** (Circular): La herramienta es guiada a una velocidad definida a lo largo de la trayectoria circular.

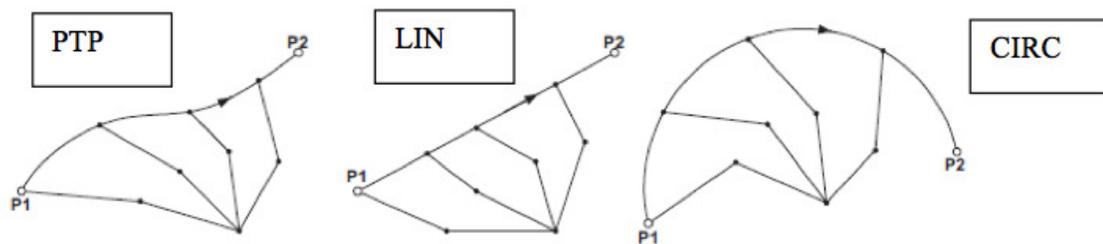


Figura 13 Trayectorias de un brazo robot

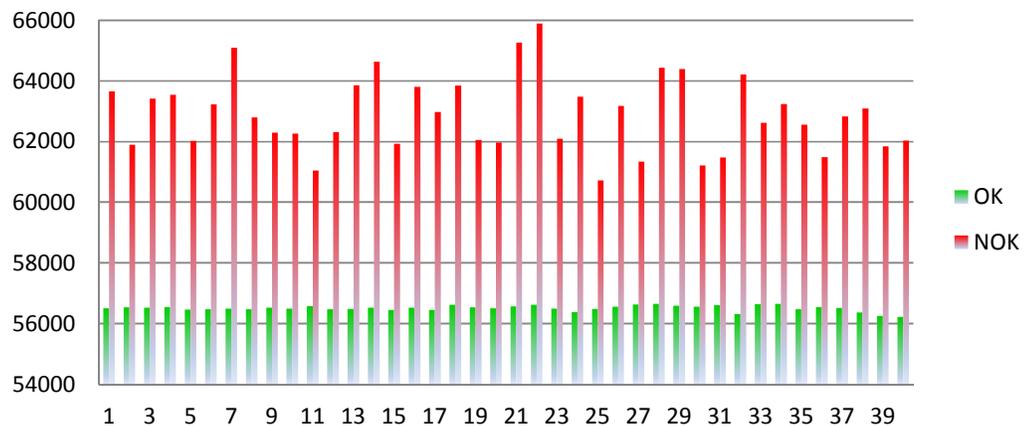
### 3.2.2 Patologías analizadas

Basándonos en la experiencia de los operadores, se han seleccionado las siguientes patologías que suelen suceder en este tipo de procesos. Este tipo de patologías producen una modificación del tiempo de ciclo pero no producen la ruptura del componente, siendo

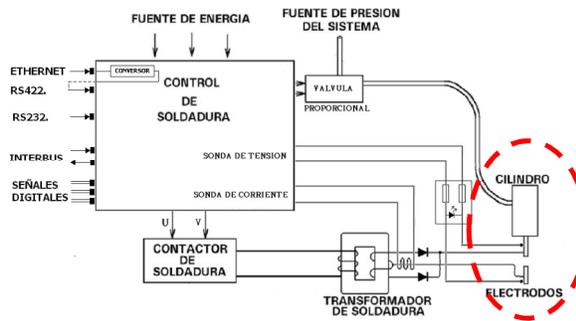
imperceptibles para los operarios de mantenimiento y por las alarmas instaladas en la línea. Estas patologías son el fallo de la válvula proporcional, el agarrotamiento del cilindro, pérdida de aislamiento en el transformador de soldadura, pérdida de presión neumática y pérdida de velocidad del robot. Vamos a realizar una breve descripción de cada una de ellas:

- **Patología 1 (Válvula proporcional):** la válvula proporcional transmite la presión al cilindro. Es la responsable de mantener la presión adecuada en el cilindro. Durante su tiempo de vida, este componente sufre fatigas que produce el agarrotamiento de algunos de ellos. Cuando el deterioro es lo suficientemente grande, la válvula no puede transmitir suficiente presión, haciendo que la tarea de soldadura no sea posible. Pero antes de que se produzca un fallo total de la válvula, ésta puede producir puntos de soldadura defectuosos debido a la falta de presión.

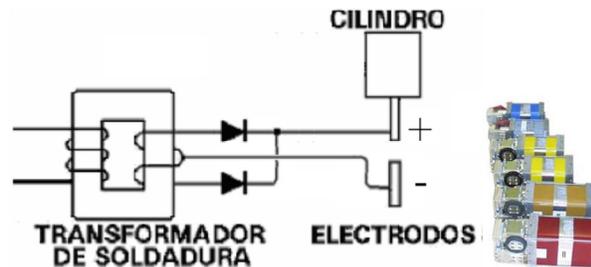
**Comparativa Válvula proporcional en tiempo total**



- **Patología 2 (Agarrotamiento del cilindro neumático):** Un término crítico en la soldadura es la presión ejercida entre los dos metales. Esta fuerza es necesaria para garantizar el contacto eléctrico entre los materiales a soldar, y para mantenerlos juntos hasta que hayan solidificado. Los elementos encargados de transmitir esta presión son los cilindros. En este caso, uno de los cilindros puede sufrir desgaste, donde las partes del cilindro se hayan comunicado o el cilindro se agarrote.

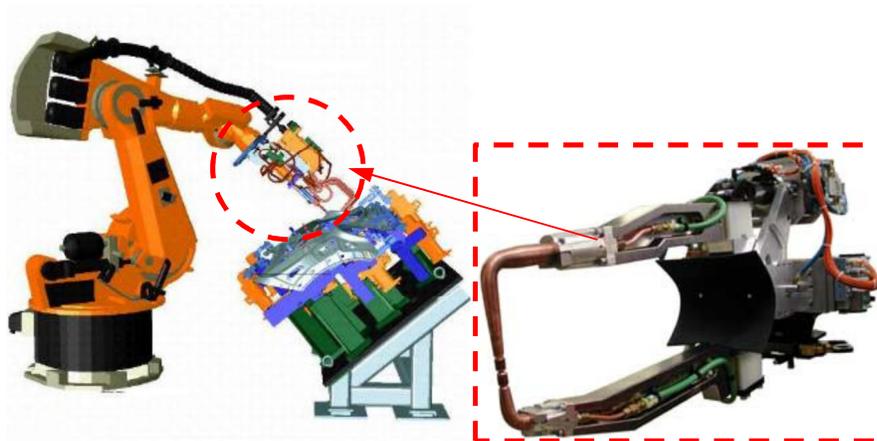


- **Patología 3 (Fallo de la soldadura):** El proceso de soldadura consiste en que una corriente eléctrica pasa a través de los materiales a soldar. El dispositivo utilizado para hacer llegar esta corriente es el transformador. La corriente pasa a través del transformador en el cual, la tensión se reduce mientras que la corriente aumenta proporcionalmente. La fatiga de este componente viene determinada sustancialmente por una pérdida de aislamiento de los cables que forman el bobinado. Esto produce una modificación en el valor de la resistencia y produce una reducción del valor de la corriente que afecta al tiempo de soldadura. Este tipo de avería se detecta cuando el fallo de aislamiento es lo suficientemente grande para que la tarea de soldadura no sea posible o incluso tengamos una derivación en el transformador produciendo una parada de línea instantánea.



- **Patología 4 (Pérdida de presión):** Una de las patologías más comunes en este tipo de aplicaciones es la pérdida de presión en el circuito neumático. Esta pérdida de presión causa un retraso o un mal funcionamiento del sistema. Esta patología puede ser producida simplemente por un poro en la tubería. Los operarios de mantenimiento detectan este tipo de fallos cuando la alarma de pérdida de presión se dispara.
- **Patología 5 (Pérdida de velocidad del robot):** Los robots industriales más comunes son los robots antropomórficos de 6 ejes. Estos ejes se sincronizan para mover la pinza de soldadura de un punto a otro. Si tenemos un deterioro o

fallo en alguno de ellos, esto puede causar la reducción de la velocidad de movimiento del robot. Existen multitud de razones por las que se puede dar esta patología pero la principal es que, debido a su alta velocidad y la repetitividad del movimiento producen un desgaste siempre sobre los mismos ejes. El producido por transportar la pinza produce vibraciones. El deterioro de los componentes eléctricos, fallo del aislamiento de los motores de cada eje también puede afectar a la velocidad del robot. Esta patología es muy difícil de detectar ya que los robots se mueven siempre a su máxima velocidad, por encima de los 4 m/s.



### 3.3 Test experimental

Para la realización de la medición de tiempos se ha utilizado la instalación experimental descrita en el apartado 2.4 del anterior capítulo, así como la misma metodología para obtener la precisión necesaria en el cálculo del valor del mini-termino. Se van a medir los mismos *mini-términos* que en el apartado 2.4 pero incluyendo piezas deterioradas de cada patología seleccionadas de la planta FORD Almussafes. La siguiente tabla muestra el resultado de cada una de las medidas para cada una de las patologías.

	Mini-termino	Mini-termino	
	Brazo robot( $\mu, \sigma$ )	Pinza( $\mu, \sigma$ )	
		Movimiento	Soldadura
Patología 1	(35.55, 1.05)	(2.58, 1.24)	(24.31, 29.69)
Patología 2	(35.55, 0.80)	(8.45, 8.39)	(6.83, 14.67)
Patología 3	(35.54, 1.13)	(2.78, 1.32)	(10.57, 2.24)
Patología 4	(35.54, 0.94)	(9.35, 9.15)	(7.76, 12.46)
Patología 5	(46.33, 0.98)	(2.51, 1.12)	(8.69, 2.07)
Sin patología	(35.55, 0.67)	(2.49, 1.15)	(8.62, 2.05)

Tabla 2 Medidas del test experimental para cada mini-término y para cada patología.

La siguiente tabla muestra los valores de tiempo para cada tarea de manera individual, aplicando las ecuaciones (13), (14).

	Mini-término	Mini-término	
	Brazo robot ( $\mu^*, \sigma^*$ )	Pinza ( $\mu^*, \sigma^*$ )	
		Movimiento	Soldadura
Patología 1	(1, 0.18)	(0.43, 0.51)	(4.05, 10.9)
Patología 2	(1, 0.13)	(1.41, 3.42)	(1.14, 5.99)
Patología 3	(1, 0.19)	(0.46, 0.54)	(1.76, 0.91)
Patología 4	(1, 0.16)	(1.56, 3.74)	(1.29, 5.08)
Patología 5	(1.30, 0.16)	(0.41, 0.46)	(1.45, 0.85)
Sin patología	(1, 0.11)	(0.42, 0.47)	(1.44, 0.84)

Tabla 3 Tiempos individuales para cada mini-término.

### 3.4 Discusión de resultados

Los tiempos obtenidos anteriormente se han introducido en la simulación de la línea de soldadura completa donde cada patología individual es colocada en cada unidad de soldadura de la línea completa. Con esta simulación se obtiene la tabla del Anexo 3, mostrando la producción que se obtendría si esa patología particular apareciera en esa unidad de soldadura concreta. A la vista de los resultados, podemos observar como de sensible es la línea con las pequeñas variaciones de cada mini-termino particular. La siguiente tabla nos muestra el valor máximo y mínimo de JPH producidos en cada patología. Si los comparamos con el ERR (51,1.05) JPH, se están perdiendo una gran cantidad de trabajos que dependen de la fisionomía de las patologías.

Las patologías con menor impacto son las patologías 3 y 5. Por contra, las patologías con mayor impacto son las patologías 1 y 2, donde se puede llegar a perder un alto porcentaje de la producción. Es importante remarcar la gran dispersión de los resultados en estos casos. En el peor caso, la patología 2, tenemos una dispersión de 9,5. Estos resultados se deben principalmente a la aparición del “Bowl Phenomenon” que propaga la variabilidad a lo largo de la línea desde el cuello de botella y producen un efecto multiplicador, [11].

	Producción JPH	Localización	
		Ws	Wu
Patología 1	Max: (35, 3.39)	1	4
	Min: (26, 6.28)	8	6
Patología 2	Max: (39,0.98)	1	1
	Min: (24, 9.53)	7	5
Patología 3	Max: (51, 1.06)	1	1
	Min: (50, 1.44)	1	5
Patología 4	Max: (40, 3.25)	1	4
	Min: (34, 7.01)	7	5
Patología 5	Max: (51, 1.11)	1	4
	Min: (50, 1.17)	8	4

Tabla 4 Valores máximo y mínimo y su localización dentro de la línea de soldadura.

### **3.5 Conclusiones**

En el presente capítulo se ha demostrado como pueden llegar a afectar a la producción, diferentes patologías aparecidas en los mini términos o micro-términos de las máquinas. En el caso particular analizado en el presente capítulo y en la presente tesis, la línea de soldadura, las patologías aparecidas pueden llegar a hacer perder un alto porcentaje de la producción máxima, si la peor patología aparece en la unidad que hace de cuello de botella.

La importancia de este comportamiento y sobretodo de su posible detección previa antes de una súbita parada, son las consecuencias que conlleva, es decir, cuando ocurre una parada súbita en alguno de estos equipos, no solo perdemos la producción durante el tiempo que dure la avería, también tendremos una pérdida de mano de obra de producción que estarán parados hasta que la línea vuelva a arrancar completamente en automático.

También se demuestra en el presente capítulo cuales son las patologías más graves, que no son otras que aquellas que producen una variabilidad alta. Esto es debido al “Bowl Phenomenon” que hace de efecto multiplicador y produce la gran pérdida de JPH.



# **Capítulo 4**

## **Análisis del efecto y deterioro de los equipos y su impacto en la producción para el caso multimodelo.**

### **4.1 Introducción.**

En los dos capítulos anteriores se han analizado cómo influye la variabilidad de los minutos en la producción donde se ha particularizado su estudio en la línea de soldadura de la planta FORD Almussafes. En realidad, los datos mostrados en la tabla del Anexo 2 es un valor promedio del caso real, este es, el caso multimodelo. En el caso multimodelo, la línea de soldadura es capaz de fabricar los 68 modelos diferentes que fabrica FORD S.A. en la factoría de Almussafes y donde los puntos de soldadura, ubicación en la carrocería, etc. varían en función de cada modelo. Además, los modelos y el orden de fabricación también es una variable a tener en cuenta ya que depende de las demandas del mercado. En el presente capítulo se realizará el análisis de patologías para el caso multimodelo.

## **4.2 Cálculo de Engineering Running Rate para cada modelo.**

El anexo 4 muestra una tabla con los valores de cada mini término y del offset de la línea de soldadura para cada uno de los modelos fabricados en la factoría de Almussafes. Como podemos observar, los puntos de soldadura, tiempos de movimiento del robot, offset, etc., varían en función del modelo fabricado. El primer análisis a realizar es determinar el ERR (Engineering Running Rate) para cada modelo en particular. Para ello, se va a utilizar la misma metodología de simulación desarrollada en el Capítulo 2 pero utilizando los datos particulares de cada modelo en la simulación expuestos en el Anexo 4.

En el Anexo 5 podemos ver cuál es el ERR para cada modelo en particular, así como los tiempos de espera y bloqueo que sufre cada estación en particular. Como podemos observar, todas las medias están por debajo de los 60 JPH, en general entre los 40 y 50 JPH. Esta bajada de rendimiento puede ser debido a que la línea no está bien balanceada para cada modelo particular. Un ejemplo claro está en el modelo 65 que tiene un rendimiento de 17 JPH. Si observamos el reparto de tareas para ese modelo vemos que la Estación de trabajo 5 realiza 40 puntos de soldadura en su unidad 4 mientras que la Estación de trabajo 3 realiza solo 3 puntos de soldadura en la unidad 3. Claramente, esta estación de trabajo es el cuello de botella de este modelo.

## **4.3 Cálculo del Engineering Running Rate en función de la producción.**

En este apartado vamos a obtener el cálculo del ERR en función de la producción, es decir, vamos a tener en cuenta la producción de cada modelo en particular realizada en la planta FORD Almussafes. Para ello vamos a tomar como ejemplo la producción de la planta FORD en Marzo 2015. La tabla 6 nos muestra los vehículos producidos de cada modelo en el mes de Marzo de 2015. Como podemos observar, no se han fabricado unidades de todos los modelos, solo de 25 de ellos.

Para la simulación y cálculo del ERR, se incluye un generador de modelo nuevo en base a la probabilidad de fabricación del modelo. Así, cuando la estación de trabajo 1 termina de procesar el modelo asignado, se genera un nuevo modelo aleatorio pero cumpliendo con la probabilidad de fabricación expuesta en la *Tabla 6*. Esta simulación se repite 40 veces. Con esto, el ERR obtenido es de (33, 1.9) JPH. La *Tabla 5* muestra los tiempos de espera, bloqueo y tiempo de ciclo técnico de cada estación de trabajo. Como podemos observar, y como era de esperar, la estación de trabajo 5 tiene el TcT mas alto y en los tiempos de espera y bloqueo se produce el punto de inflexión definido en [8], lo que nos indica que es el cuello de botella.

	We1	We2	We3	We4	We5	We6	We7	We8
Espera	0	6,47	322	9,5	<b>27,5</b>	767,8	833,2	684,4
Bloqueo	2011,6	768,9	2174	1104,9	<b>266,2</b>	274,1	448	0
TcT	46,56	77,6	21,16	64,37	<b>88,24</b>	64,6	58,1	71

Tabla 5 Tiempos de la simulación multimodelo con la producción Marzo 2015.

MODELO	CANTIDAD
FOE LWB KOMBI RHD DSLD NORMROOF RCD LESS 3RD ROW FRW	90
FOE LWB KOMBI LHD DSLD NORMROOF TG LESS 3RD ROW FRW	215
FOE LWB KOMBI RHD DSLD NORMROOF TG LESS 3RD ROW FRW	227
FOE LWB DCiV LHD DSLD NORMROOF RCD LESS 3RD ROW FRW	18
FOE LWB KOMBI LHD DSLD PANROOF TG LESS 3RD ROW FRW	47
FOE SWB VAN LHD RHSLD NORMROOF RCD LRW	61
FOE SWB VAN LHD RHSLD NORMROOF TG FRW	62
FOE SWB KOMBI RHD DSLD PANROOF LG GLAZED FRW	59
FOE SWB KOMBI LHD DSLD NORMROOF LG GLAZED FRW	204
FOE SWB KOMBI LHD DSLD PANROOF TG GLAZED FRW	329
FOE SWB KOMBI RHD DSLD NORMROOF LG GLAZED FRW	311
FNA SWB VAN LHD RHSLD NORMROOF TG FRW	422
FNA SWB VAN LHD RHSLD NORMROOF RCD FRW	32
FNA SWB KOMBI LHD DSLD NORMROOF TG FRW	131
FNA SWB KOMBI DSLD PANROOF TG FRW	168
FOE LWB VAN LHD NSLD NORMROOF RCD LRW	257
FOE LWB VAN RHD NSLD NORMROOF RCD LRW	442
FOE LWB VAN LHD NSLD NORMROOF TG FRW	222
FOE LWB VAN RHD NSLD NORMROOF TG FRW	60
FOE SWB VAN RHD LHSLD NORMROOF RCD LRW	29
FOE SWB VAN RHD LHSLD NORMROOF TG LRW	20
FOE LWB VAN LHD RHSLD NORMROOF RCD UNGLAZED LRW	46
FOE LWB VAN LHD RHSLD NORMROOF TG UNGLAZED LRW	34
FOE LWB VAN RHD LHSLD NORMROOF RCD UNGLAZED LRW	43
FOE LWB VAN RHD LHSLD NORMROOF TG UNGLAZED LRW	59

Tabla6 Producción Marzo 2015

#### **4.4 Cálculo del efecto de las patologías en el caso multimodelo y en función de la producción.**

En este apartado vamos a analizar el efecto de las patologías en el caso más real posible, este es, en el caso multimodelo y teniendo en cuenta la producción real de Marzo 2015. En el Anexo 6 podemos ver el efecto que tiene cada una de las patologías en la producción, si esta apareciera en cada una de las unidades de soldadura.

#### **4.5 Conclusiones.**

En el presente capítulo se ha ampliado el uso del modelo matemático y el análisis de patologías propuesto en capítulo 2 y 3 a una casuística más cercana a la realidad, esta es, el caso multimodelo y con producción real. Esto hace que se tengan en cuenta los 68 modelos fabricados por la factoría FORD en Almussafes y una muestra de producción de un mes, Marzo 2015. Aunque supone un acercamiento importante a la casuística que nos podemos encontrar en planta y que tanto carece la literatura, todavía no hemos llegado al nivel de complejidad que nos podemos encontrar en la planta ya que, cada modelo en particular tiene variantes, es decir, variantes del mismo modelo. Por ejemplo, la furgoneta modelo *transit* fabricada en esta factoría, tiene 284 diferentes versiones de fabricación y cada una de ellas tiene diferentes puntos de soldadura.

Como se ha podido constatar en los resultados y análisis realizados en este capítulo, un análisis como el presentado aquí puede mostrar cuales son los cuellos de botella por modelo y puede mostrar el camino para mejorar la eficiencia de la línea rebalanceando, en la medida de lo posible, cada uno de los modelos. Por lo tanto, una futura línea de trabajo es ampliar este estudio a todas las variantes fabricadas en FORD y trazar un plan de mejora de la producción a través de la mejora del balanceo de las líneas por modelo. También cabe destacar la influencia que puede llegar a tener el orden de fabricación de los modelos/variantes en el rendimiento global de la cadena. Dado que la producción se conoce con cierta antelación, una optimización previa de cual debería de ser el orden óptimo podría mejorar el rendimiento de la línea.

Por otro lado, queda demostrada la fragilidad de la línea de producción frente a patologías que, a simple vista no son relevantes. La vigilancia del rendimiento de la línea a través de herramientas on-line que vigilen el ciclo de trabajo técnico nos puede permitir detectar este tipo de patologías produciendo dos efectos positivos, la detección prematura de averías y la mejora del rendimiento de la línea de producción.

# Capítulo 5

## Hacia un sistema inteligente de mejora continua del rendimiento en la producción.

### 5.1 Introducción.

De los capítulos anteriores y de las pocas publicaciones donde se hace hincapié en la relevancia de la monitorización en tiempo real, se puede concluir que la mejora del rendimiento de las líneas de producción pasa imperativamente por los sistemas de monitorización y control en tiempo real. Las líneas de producción reales son un ente vivo y en constante cambio. En estos, se fabrican distintos modelos y variantes de estos (podemos estar hablando de miles de variantes), se añaden nuevos modelos a líneas antiguas, se introducen mejoras tecnológicas, se producen averías y deterioros de componentes, etc., etc. Por ello, recientemente han aparecido ciertos trabajos que van en esta línea, utilizar sistemas de monitorización y control para la mejora de la eficiencia.

El objetivo del presente capítulo es sentar las bases para desarrollar un sistema inteligente de mejora continua que nos permita, por un lado monitorizar y controlar la línea de producción y por otro proponer mejoras en su rendimiento de la línea. Este sistema debería de vigilar todos los aspectos que afectaran al rendimiento de la línea desde todos los puntos de vista.

## 5.2 La maldición de los datos.

Como se ha hablado en capítulos anteriores, la literatura clasifica los datos utilizados en los análisis a largo plazo y corto plazo. La diferencia entre ambos términos se ha tratado en [8]. A largo plazo es principalmente utilizado para la planificación de procesos, mientras que a corto plazo se centra en el control de procesos. Por lo tanto, siguiendo la definición en [8], a corto plazo se refiere a un periodo de funcionamiento no lo suficientemente grande para el periodo de fallo para ser descrito por una distribución estadística. En la presente tesis se han redefinido los datos a corto plazo en dos nuevos términos, el mini-termino y el micro-termino. Un mini-término puede ser definido como una parte de la máquina, en una política de mantenimiento preventivo o en una avería, en el que podría ser sustituido de una manera fácil y más rápida que otra parte sub-dividida de la máquina. También un mini-término se podría definir como una subdivisión que nos permite comprender y estudiar el comportamiento de la máquina. De la misma manera, un micro-término se define como cada parte del mini-término que podría ser dividido en sí. En la *Figura 9* se muestra la pirámide de datos, desde el micro término hasta los términos a largo plazo.

La maldición de los datos se refiere a la paradoja de ponderar la inversión y la exigencia de un sistema inteligente como el que se pretende proponer en este capítulo. Obviamente, el sistema ideal sería aquel que es capaz de medir todos los micro-términos de la planta de producción y construir a través de ellos los mini-términos, términos a corto y términos a largo plazo. De ser así, tendríamos el sistema ideal ya que tendríamos constancia de un deterioro, avería o cualquier eventualidad al instante. Sin embargo, supondría una inversión en sensorización exponencialmente creciente en función de la segmentación que apliquemos en la creación de los micro-términos. El estado actual de la técnica tanto en el ámbito científico como en el ámbito industrial utiliza los datos a corto plazo para sus análisis. El equilibrio podría llegar en sensorizar los términos a corto plazo, calcular a partir de ellos los términos a largo plazo y estimar, a través de los datos a corto plazo los mini-términos y micro-términos.

## 5.3 Gestión y detección del cuello de botella.

Uno de los aspectos fundamentales en el rendimiento de las líneas de producción es la ubicación del cuello de botella (CDB) y su mejora continua. Este concepto de mejora continua de detección del CDB a través de los datos medidos, utilizando los datos a corto plazo como, las esperas y bloqueos de cada eslabón se definió en [8], [9], ver *Figura 14*.

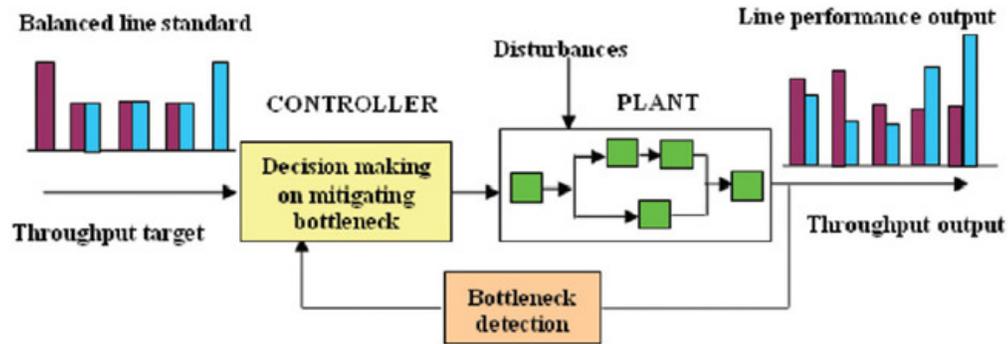


Figura 14 Bucle de mejora continua a través de la detección del CDB

En estos trabajos, la detección del cuello de botella se realiza buscando cuál es el eslabón en el que se produce en el que el tiempo de bloqueo pasa a ser mayor que el de espera. Se sabe que, aguas arriba del CDB, los eslabones tienen más tiempo de bloqueo que de espera mientras que aguas abajo del CDB, los eslabones tienen más esperas que bloqueo. Así pues, el eslabón CDB es aquel en el que se produce ese cambio.

El método actual de detección y gestión de los CDB (Cuellos de Botella) en la planta de producción de FORD S.L. se basa también en este concepto ya que pasa por un análisis off-line de los datos de producción (JPH), bloqueos y paradas por falta de piezas producidos durante un periodo de tiempo (datos a corto plazo). La búsqueda del CDB de este análisis pasa primero por identificar donde está situado en CDB teniendo en cuenta los bloqueos y parada por falta de piezas. Para ello se hace primero un análisis con los datos a largo plazo, lo que permite localizar en qué línea está situado el cuello de botella. Posteriormente se analiza los TOP 10 de los datos de incidencias de éstas líneas, averías, calidad, etc. En la fase 3 se realiza un plan de trabajo con las acciones tomadas para cada uno de los problemas y en la última fase se mide el JPH, es decir, el resultado final.

Sin embargo, el CDB no es algo estático que pueda ser analizado mediante un snapshot de datos. Como hemos visto en el capítulo anterior, una línea de producción produce gran cantidad de modelos donde cada modelo en particular puede tener su CDB en un lugar diferente. Si a esto le añadimos que la producción depende de las demandas de mercado, tenemos lo que podemos llamar un **CDB en dinámico**, es decir un CDB que cambie de lugar. Así pues, nuestro sistema inteligente de mejora continua debe de ser capaz de detectar el CDB en dinámico, ser capaz de determinar la razón y proponer mejoras.

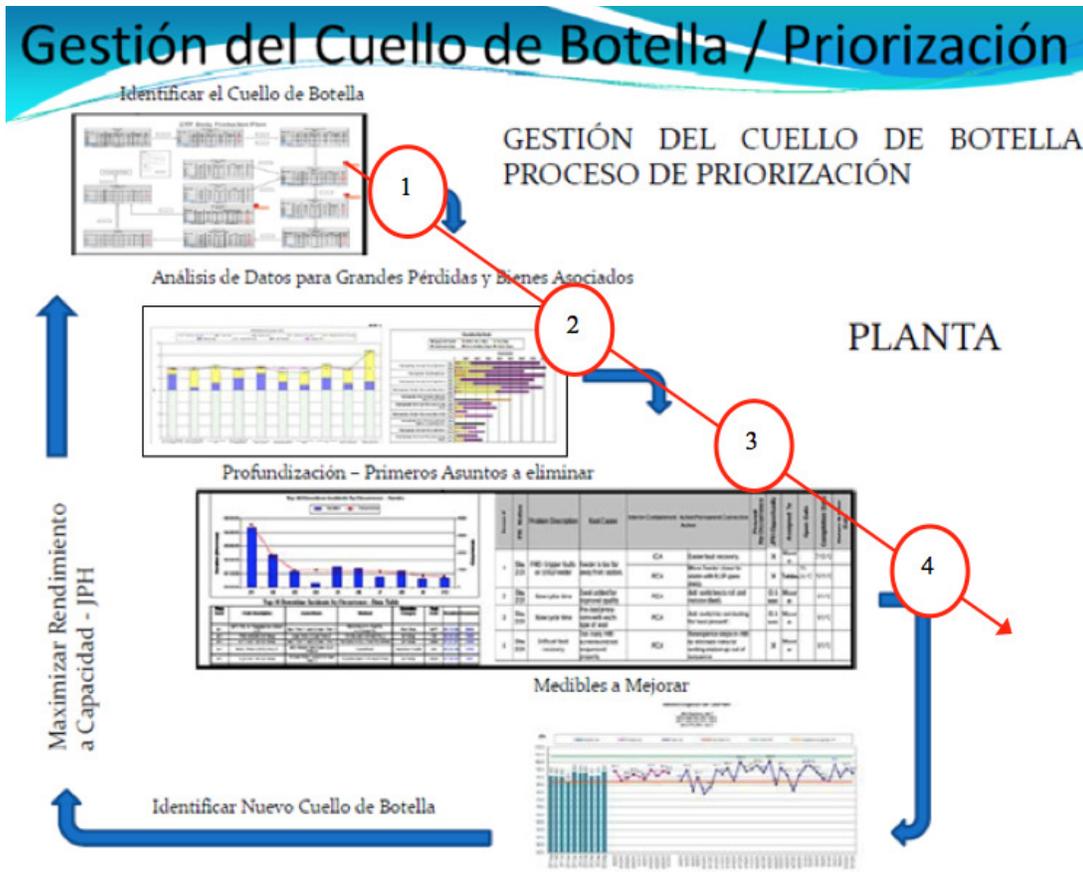


Figura 15 Gestión de los Cuellos de botella en FORD S.A.

Además, el CDB puede producirse por otros factores, más allá de los tiempos de procesado de piezas. En general, dentro de los múltiples factores, podemos definir tres grandes grupos donde se engloban todos ellos que son, la disponibilidad, el rendimiento y la calidad, ver Figura 16.

1.- Disponibilidad: En este bloque intervienen todas las paradas, sean grandes o pequeñas paradas intermitentes provocadas por averías de los equipos que componen la línea. También pertenece a este grupo las paradas por preparación de la línea y/o ajuste de útiles, manipuladores, etc.

2.- Rendimiento: En este grupo se tienen en cuenta las pérdidas de ciclo, los tiempos de ciclo, las estaciones desocupadas, las esperas de piezas y los bloqueos por líneas posteriores. El aumento del tiempo de ciclo es complejo de detectar y repercute directamente a la pérdida de producción.

3.- Calidad: En toda línea de fabricación debemos mantener la calidad de fabricación al nivel más alto, esto supone en muchas ocasiones el tener que parar la producción para corregir y ajustar los defectos.

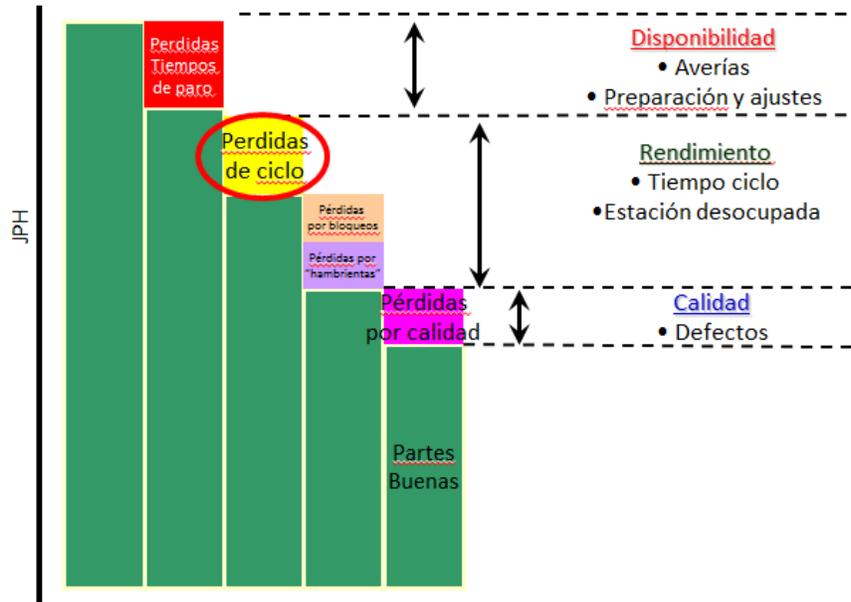


Figura 16 Clasificación de pérdidas de JPH.

## 5.4 Mantenimiento preventivo.

Otro de los aspectos fundamentales en el rendimiento de las líneas de producción es el mantenimiento de la línea. En general, el mantenimiento se puede clasificar en dos grupos principales: Mantenimiento Correctivo (CM), mantenimiento Preventivo/Predictivo (PM). CM se lleva a cabo cuando falla la máquina o algunos de los elementos del equipo está deteriorado y debe ser reemplazado o reparado, este elemento y/o pieza será el responsable de una avería en toda la línea si no se ejecuta la acción. Sin embargo, los PM se llevan a cabo antes de que el equipo falle. El objetivo de una orden de PM es promover la producción continua del sistema. La literatura ha trabajado en el Mantenimiento preventivo enfocado sobre la vida útil de las máquinas,[15] y definir así las órdenes de PM donde representa la edad estimada del equipo. En [16] se define lo que se conoce como la ventana de oportunidad de mantenimiento (MOW). Aquí se define el tiempo máximo que una máquina estratégicamente puede detenerse para realizar tareas de mantenimiento requeridas durante la producción o reparaciones de forma rápida antes de reanudar la producción sin afectar el rendimiento global de las líneas y/o sistemas. Esto es posible mediante buffers que permiten el MOW, [17]. El concepto del MOW se unió a “*Data Driven Bottleneck Detection Method*” para establecer una nueva política de priorización de las tareas de mantenimiento. Más recientemente, en [18] se introducen características estocásticas de las líneas de transferencia para conseguir un cálculo del MOW más aplicable, práctico y correctamente diseñado.

Sin embargo, el reto principal de las políticas de mantenimiento es el remanente de la estimación de la vida útil de los equipos. El pronóstico es un desafío científico importante para la aplicación industrial de las estrategias de mantenimiento en el que la vida útil es una tarea importante. Sin embargo, como se ha podido demostrar en los capítulos precedentes, los elementos que componen una máquina sufren un deterioro que afecta directamente al rendimiento de la máquina. Así pues, una monitorización adecuada nos puede determinar la priorización del PM.

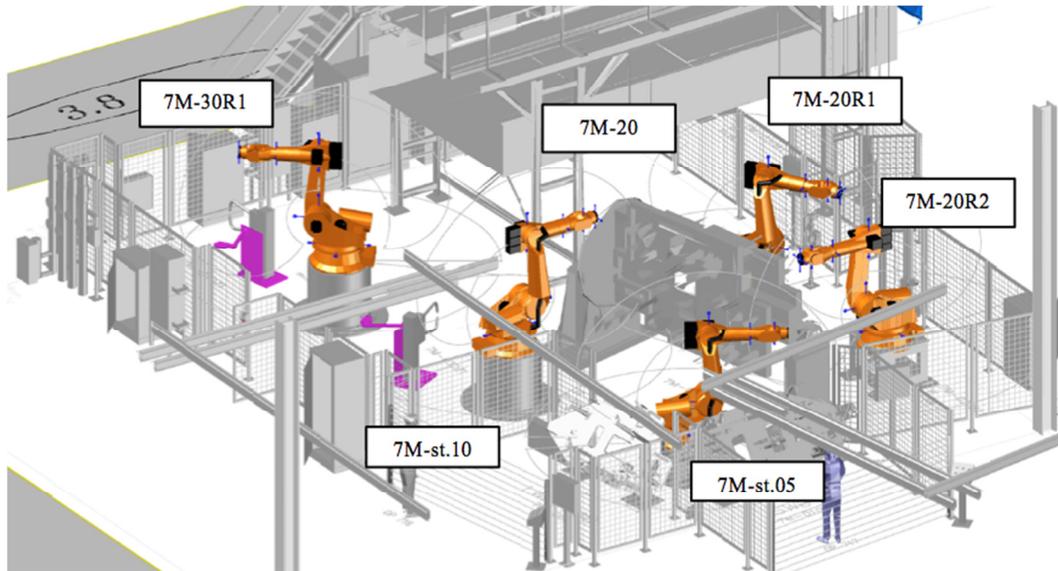
### **5.5 Elección de la línea y equipos para monitorizar.**

Con el objetivo de disponer de una instalación que nos permita alcanzar en un futuro una herramienta completa, se ha elegido una línea dentro de un grupo de ingenierías donde todos los modelos y versiones pasen por ella. Se trata de la línea denominada 7 MLH de laterales. Además, en ella dispondremos de distintos equipos, tanto robots, estaciones, mesas, operarios de carga, etc.

Las instalaciones están destinadas exclusivamente a soldadura automática y manipulación de los componentes, es decir las piezas para su fabricación posterior. La línea está compuesta por las siguientes estaciones:



*a) Línea 7 MLH de laterales*



b) Distribución de los equipos y líneas

Figura 17 Línea 7MLH de la Factoría FORD de Almussafes.

## 5.6 Sistema de toma de datos.

Lo primero que debemos realizar es un mapeado de todos los tiempos de ciclo desde los equipos hasta una base de datos. En esta primera versión, se van a monitorizar solo los tiempos de ciclo técnico de cada eslabón, es decir, los tiempos que le cuesta a cada eslabón producir la pieza, obviando los tiempos de espera y los tiempos de bloqueo. Para ello, se ha programado una variable para cada uno de los equipos en los diferentes PC\_Line distribuidos por los grupos de ingeniería.

A medida que van entrando los diferentes modelos de producción, en cada uno de los tiempos de ciclo de cada uno de los equipos que componen la línea se irán almacenando en el registro de memoria del PLC y ubicándose en su propio modelo.

El tiempo de ciclo será aquel que se mide desde el momento 0 desde que el equipo (robots, cinta, operario, estación, mesa giratoria, etc.) comienza su movimiento de la tarea asignada hasta que vuelva a pararse en el mismo sitio físico de su tarea. Es decir, hasta que la tarea que tenga asignada quede completada al 100%. Lo dificultoso de esta medición es que se debe tener en cuenta las paradas por colisión o espera con otros equipos que todavía no han terminado su trabajo. Por lo que muy importante saber indicar el punto de comienzo y final para no errar en las mediciones.

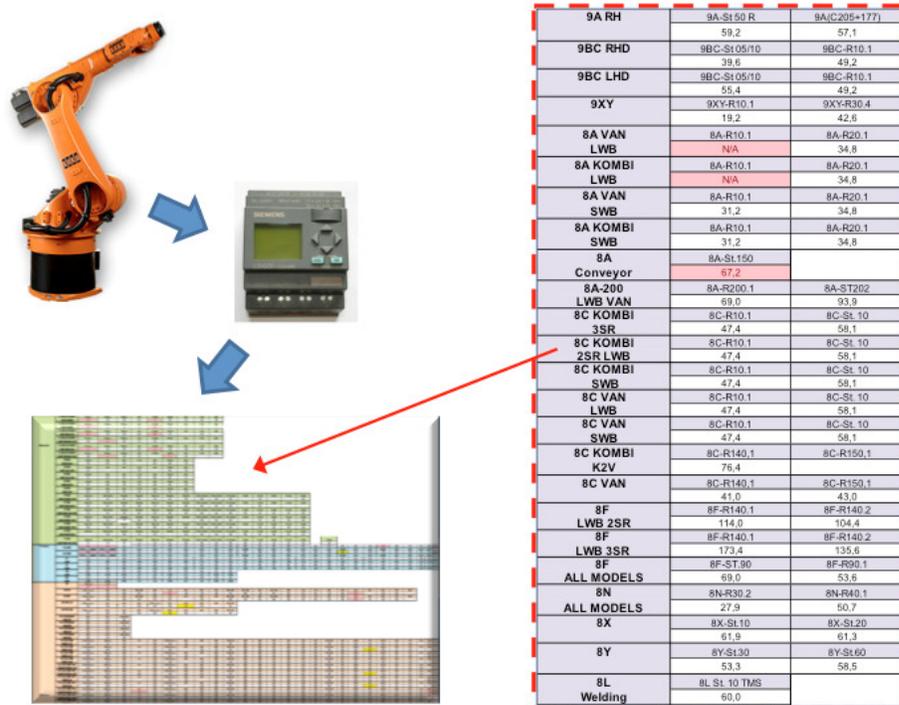


Figura18 Sistema de toma de datos en línea.

## 5.7 Herramientas desarrolladas

### 5.7.1 Diseño de la pantalla principal para operarios de producción y mandos intermedios

El objetivo de esta primera pantalla es la de dar a los operarios un método para que simplemente y de un “vistazo” sepan qué equipo es el cuello de botella o qué equipo está empezando a empeorar durante la producción en modo automático. Podremos así adelantarnos a futuras averías en los equipos y realizar una orden urgente de correctivo para que éste sea revisado y/o reparado, ver Figura 19. Para ello estableceremos un offset donde parametrizamos en qué momento se genera una alarma. Hemos querido mostrarlo de manera que el operarios expertos o no, pueda avisar de que un equipo está rodando por encima de su tiempo de ciclo de trabajo donde si no se realiza ninguna acción inmediata y planificada, será posiblemente un futuro cuello de botella con la consiguiente pérdida de producción

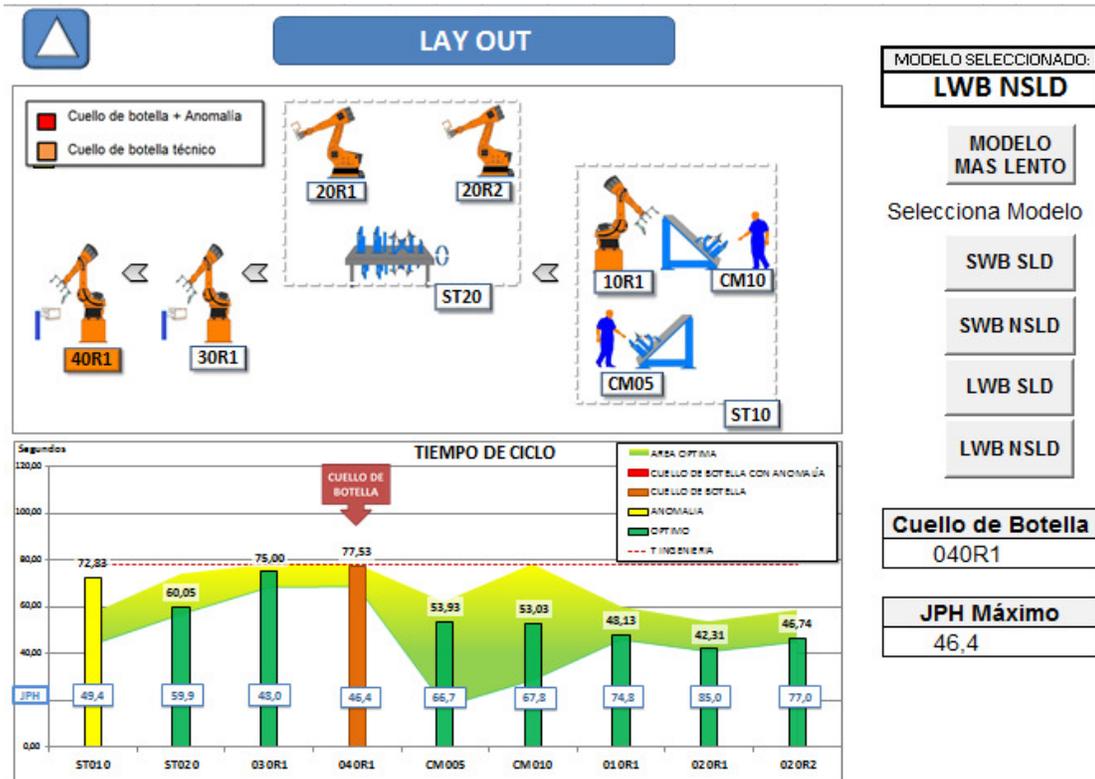


Figura 19 Pantalla principal del sistema de monitorización on-line.

Esta pantalla podemos ver inicialmente un layout con los equipos que componen la línea y que necesitan un tiempo de ciclo para realizar su tarea. Esta configuración está totalmente abierta independientemente del equipo, es decir, el sistema trata variables para dar un resultado y poder identificar el cuello de botella en dinámico sin diferenciar si es un robot, estación, cinta, cargador, mesa, etc.

En la parte superior derecha, tendremos la selección del modelo, en cuanto sea seleccionado, nos irá dando la información directamente desde producción. Sabremos desde el primer ciclo, cuál es el cuello de botella para ese modelo concreto.

En la parte inferior disponemos en modo gráfico las barras en base de tiempo (seg), donde veremos el comportamiento del equipo. La nube de fondo nos indica el área óptima de funcionamiento del equipo dentro de los diferentes modelos.

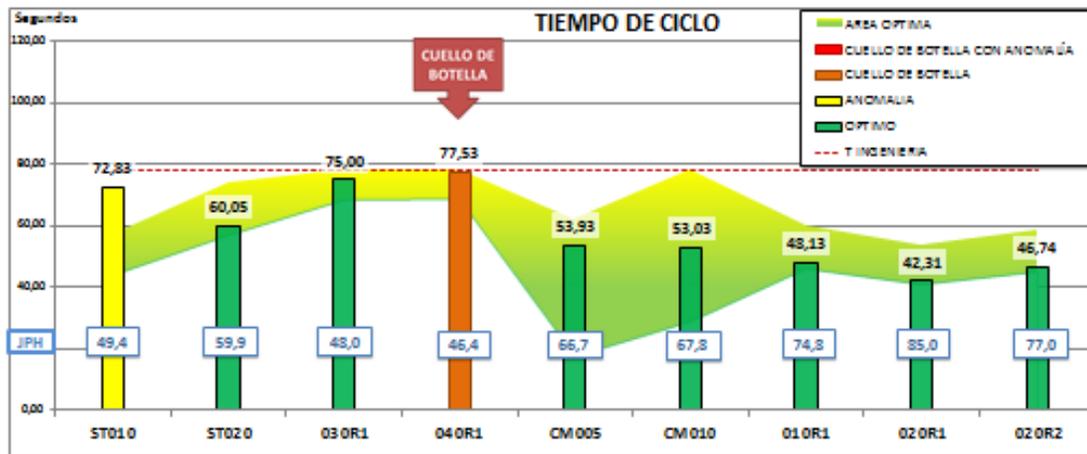


Figura 20 Detalle del gráfico de los Tiempos de ciclo

Como podemos ver en este caso particular, el cuello de botella es el de la estación 4. También se ha detectado una anomalía en la estación 1, donde el deterioro de algún componente está afectando a su rendimiento particular. Por el momento no es crítico ya que no ha producido un retraso lo suficientemente grande como para producir un salto del CDB. Sin embargo la herramienta ya ha comunicado al equipo de mantenimiento la anomalía, anticipándose así a una futura avería.

Cada barra se moverá dentro de los valores de la nube que hay detrás de las barras, donde se tomarán los límites para cada uno de los tiempos que necesita ese modelo para su equipo. Es decir, un robot necesita y gasta tiempos diferentes para cada modelo, si la barra se aproximara a la zona más amarilla, querrá decir que alguno de los mini-términos empieza a necesitar más tiempo por algún tipo de anomalía (rodamientos gripándose, cilindro, retrasos electrónicos, velocidades, etc.)

### 5.7.2 Diseño de las pantallas de toma de datos y visualización de las estaciones

Desde la pantalla principal podemos seleccionar cada una de las estaciones para saber qué equipo dentro de la estación está siendo el cuello de botella. En estas pantallas de estaciones seguimos separando por equipo. En cada equipo tendremos dos casillas, una veremos el tiempo de ciclo real en cada tarea y el valor mínimo del equipo. El valor mínimo significa el mejor tiempo que es capaz de alcanzar el equipo, con el valor mínimo podremos monitorizar si el equipo está incrementando su tiempo por lo cual significa que algo está ocurriendo en la funcionalidad del mismo. Otro parámetro que medimos es el tanto por ciento que el equipo va empeorando. Este porcentaje nos marcará un límite en el comportamiento del equipo, ver *Figura 21*.

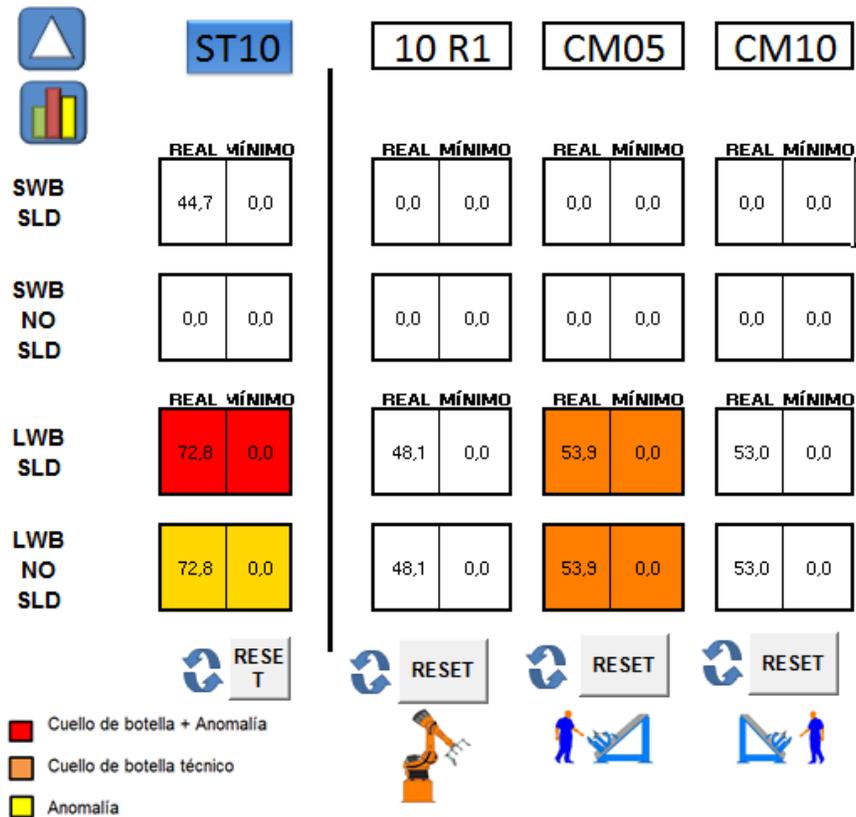


Figura 21 Pantalla de monitorización de una estación.

## 5.8 Conclusiones y trabajos futuros

En el presente capítulo se han intentado sentar las bases de lo que debería de ser un sistema inteligente de monitorización y control de la línea de producción para la mejora del rendimiento. Se ha seleccionado una línea donde existen todos los tipos de componentes posibles, desde maquinas automatizadas hasta operarios y se ha desarrollado he instalado el sistema de toma de datos y se ha desarrollado el software de monitorización. En este software, se ha incluido la detección del cuello de botella en dinámico a través de los tiempos de ciclo técnico y unas alarmas de detección de anomalías derivadas del deterioro de los componentes, siguiendo la línea de los capítulos 4 y 5. Este sistema nos permite detectar cuál es el cuello de botella y buscar y proponer mejoras para reducir su tiempo de ciclo técnico. Además, también nos permite detectar cuales de las otras unidades se están empezando a deteriorar y podrían o están generando una pérdida en la producción. Esto nos permite priorizar el mantenimiento preventivo para reducir la pérdida de producción por la patología.

La herramienta propuesta en el presente capítulo es una herramienta en constante evolución. El siguiente paso debería de ser incluir la mejora de la eficiencia energética,

siguiendo la línea propuesta recientemente en la literatura, ver por ejemplo [24]. En este sentido, el objetivo sería reducir la velocidad de las máquinas que no son cuello de botella ya que, no tiene sentido que se muevan a la velocidad máxima para luego estar un tiempo de espera a que el eslabón siguiente termine su tarea.

# Capítulo 6

## Conclusiones y trabajos futuros.

### 6.1 Conclusiones y trabajos futuros

En esta tesis se analiza y propone una ampliación del modelo matemático que se realiza de las líneas de producción mediante la inclusión de dos términos nuevos: mini términos y micro términos.

Las primeras etapas de la tesis consistieron en la modelización de los datos para poder simular el comportamiento de líneas de fabricación automáticas y sobre todo con datos reales de producción. Así pudiendo relacionar y vincular los indicadores de producción y así su comportamiento. Resultando de gran ayuda a todas las investigaciones relacionadas localizadas en el “estado del arte”.

Hemos estrechado los estudios teóricos a la realidad industrial, consiguiendo un vínculo más real entre el mundo académico y universitario al mundo real de producción diaria y directa.

En este trabajo, hemos intentado demostrar el uso de unas herramientas y técnicas, así como los nuevos términos, para ayudar notablemente a determinar las causas de fallos y entender y comprender con más detalle el proceso industrial.

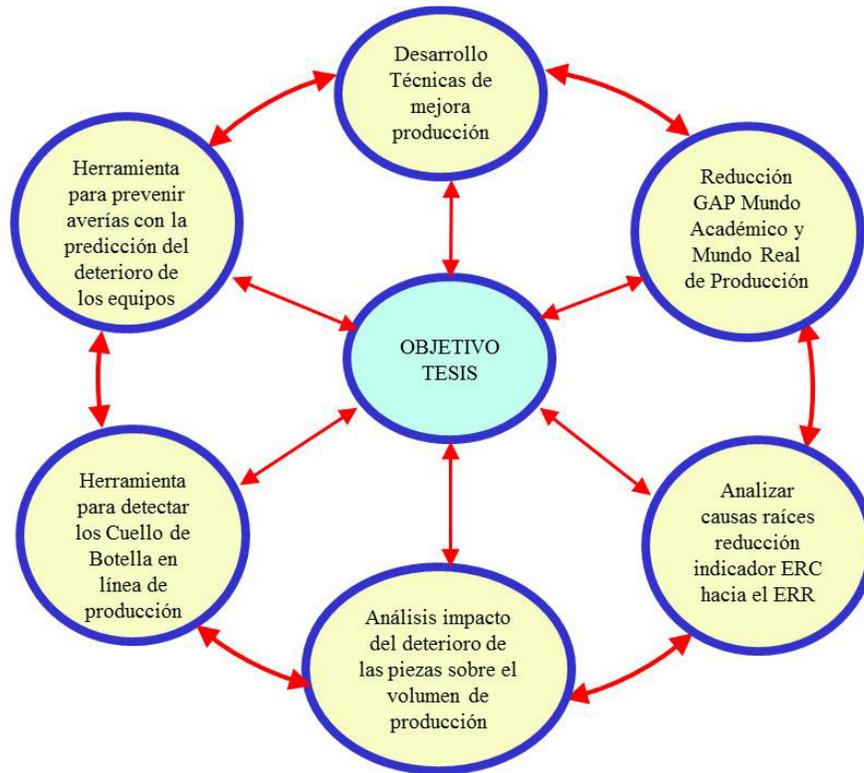
Para ello, los estudios y la simulación realizados han pretendido:

- El uso y localización de las variables de mayor impacto en un proceso industrial.
- El resultado de las líneas de automatización ante las variaciones del tiempo de ciclo.
- Anticiparnos, mediante el uso y aplicación de estas herramientas, a gran parte de las causas iniciales de averías y/o fallos de las líneas.

Tras la toma de datos de la línea de producción, se desarrolló un simulador de la línea automática. Esta herramienta presenta posibilidades para la predicción de averías, detección de problemas, valoración de las pérdidas ocasionadas y previsión de mejora en función de la inversión realizada en la línea.

También se ha creado, para el simulador, el algoritmo donde podremos complementar los programas de los PLC de las líneas para el control, planificación y generación de alarmas de producción.

Retornando a las preguntas iniciadas en los objetivos de la tesis:



- 1.- Hemos desarrollado técnicas de mejoras de producción con el simulador que podría ser aplicado para balancear los modelos en una planta.
- 2.- Reducido el GAP entre el mundo académico y el industrial, basando toda la investigación en la implantación, medición y comportamiento de los equipos en líneas reales de una planta de automatización.
- 3.- Se ha demostrado que una de las importantes causas de la diferencia entre el ERC y el ERR es el comportamiento de los equipos industriales.
- 4.- Se ha demostrado el impacto de los pequeños equipos y/o componentes al volumen diario de producción.
- 5.- Se diseña y muestra la primera herramienta online para detectar los cuellos de botella.
- 6.- Se diseña y muestra como poder anticiparnos y predecir unas futuras averías.

***Trabajos Futuros:***

Los trabajos futuros se centrarán en dos líneas. La primera, en el sistema de monitorización y control en tiempo real donde se abre un abanico de posibles mejoras que tendrían un impacto inmediato en la producción. Al disponer de esta monitorización en dinámico de una línea productiva, podremos identificar donde tenemos nuestro cuello de botella siendo este equipo el que generará que el resto vayan a su ritmo. El potencial de mejora será inmediato ya que el conseguir bajar el tiempo de ciclo técnico de este equipo lo traduciremos en ganancia de producción directa. Esta selección puede ser de aplicación total planta o la selección parcial de una línea automática.

En este sentido, además, una de las actuaciones más inmediatas será regular la velocidad del resto de elementos que no son cuello de botella al equipos más lento. Esta acción se traducirá directamente en un ahorro energético, debemos pensar que una planta tipo de carrocerías solamente consta de unos 700 robots. Es una evidencia que no tiene sentido que todos y cada uno de ellos vayan a una velocidad del 100% en todos su motores para que luego estén esperando a su liberación para la realización de su trabajo. Además de los robots, hay multitud de equipos.

La segunda línea de trabajo futuro será en el estudio de las patologías, su ampliación, catalogación, así como el estudio de la curva de deterioro de tiempos durante la vida útil de los componentes. Este trabajo nos permitirá realizar un mantenimiento preventivo más acorde al objetivo real de este, que no es otro que evitar que los fallos de los componentes afecten a la producción. En estos momentos, el mantenimiento preventivo tiene como objetivo evitar la avería que detenga la línea sin tener en cuenta que el deterioro de la pieza puede ser lo suficientemente significativo como para perder productividad, como se demuestra en esta tesis.

# **Anexo 1**

## **Estado del Arte: Descripción de las líneas de Fabricación de Carrocerías y Montaje ALB, ALBP.**

### **7.1 Introducción.**

Estructuraremos este apartado con las siguientes indicaciones. Inicialmente, realizaremos un resumen de la investigación de ALB, para poder describir una línea de una forma muy básica. A continuación, clasificaremos las extensiones separando la estructura de las líneas de carrocerías y montaje para que sean así fácilmente entendidas.

Para finalizar, utilizaremos la clasificación de las líneas de carrocerías y montaje para que sirva como base para la asignación de estas extensiones a los sistemas de montajes típicos. De esta manera, procedimientos y modelos ya existentes de ALB se identificarán y serán valiosos para los diferentes tipos de sistemas de montaje reales y los retos de la investigación futura se reconocen.

## 7.2 Evolución del proceso de fabricación.

Una línea de carrocerías y montaje consiste en la configuración de estaciones de trabajo  $k=1, \dots, n$  generalmente instaladas en línea o en serie a lo largo de una cinta transportadora o un transportador mecánico. Las piezas fabricadas se van soldando y acoplando consecutivamente de estación a estación.

En cada una de las estaciones puede haber diferentes factores que intervienen en las tareas. Podemos tener una estación configurada para que trabajen operarios o robots o incluso mixta.

Cada celda está sometida a un tiempo de trabajo de las tareas, de forma que le llamaremos el tiempo de ciclo. Es decir, es el tiempo que tarda un equipo o elemento en realizar una tarea.

Cada vez más se están sustituyendo los puestos de carga de operarios por robots o manipuladores.

En los próximos capítulos veremos distintas configuraciones para acometer las líneas de montaje ALB y sus extensiones. Es importante entender cómo están establecidas en el mundo académico, teórico y de investigaciones previas, las distintas configuraciones de las actuales líneas de fabricación y sus conceptos básicos, para poder proseguir con esta investigación una vez estén claros dichos conceptos.

## 7.3 ALB Problemas Básicos

En cada estación, las operaciones se realizan en varias ocasiones (por ejemplo puntos de soldadura en una carrocería) y tendrán que conseguir su tiempo de ciclo (promedio o máximo tiempo disponible para cada ciclo de trabajo). La fabricación de un producto en una línea de montaje requiere repartir la cantidad total de tareas o trabajo de un conjunto  $V=\{1, \dots, n\}$  en operaciones elementales llamado tareas, intentando que sean los más sencillas posibles. Una tarea  $j$  toma un tiempo  $t_j$  y requiere cierto equipo de máquinas o habilidades de los trabajadores. La carga total de trabajo necesario para el montaje de una pieza de trabajo se mide por la suma de tarea  $t_{sum}$ . Debido a las condiciones tecnológicas y organizativas, las restricciones entre las tareas deben de ser observadas para no incurrir en un tiempo de ciclo elevado. Estos elementos pueden ser resumidos y visualizados por un gráfico de precedencia. Estos contienen un nodo para cada tarea, pesos de nodo para los tiempos de tarea (tiempos de ciclo).

Cualquier tipo de problema en una línea de fabricación para el equilibrio de las tareas (ALBP) consiste en encontrar una línea factible, es decir, que cada tarea tenga

perfectamente definida su estación de tal que se cumplan las restricciones de precedencia (Fig. 1) y otras restricciones.

El conjunto  $S_k$  de tareas asignadas a una estación  $k=1, \dots, n$  constituye su contenido de trabajo (es decir las tareas que tiene dentro de esta estación), el tiempo de la tarea  $t(S_k) = \sum_{j \in S_k} t_j$ , donde  $t_j$  es el tiempo de la estación. Cuando hay un tiempo de ciclo común fijo “ $c$ ”, un equilibrio de la línea es factible sólo si el tiempo de la estación de ninguna es superior a  $c$ .

En el caso de que  $t(S_k) < c$ , la estación  $k$  tiene un tiempo de inactividad (tiempo de paro) de las unidades de tiempo  $c - t(S_k)$  en cada ciclo.

Debido al efecto de las decisiones de largo plazo, los objetivos usados (las decisión de identificar las tareas, etc) debe escogerse cuidadosamente teniendo en cuenta los objetivos estratégicos de la empresa. Desde el punto de vista económico los costes y los beneficios deben estar relacionados con objetivos de las empresas.

Sin embargo, medir y predecir el costo de una línea durante meses o años y las ganancias mediante la venta de los productos ensamblados es bastante complicado y propenso a errores, es muy complejo predecir las averías y los factores de perturbación en un sistema de producción. Un método utilizado habitualmente consiste en maximizar la utilización de la línea que se mide por la eficiencia de la línea  $E$  como la fracción del total de la línea y depende directamente del tiempo de ciclo y del número de estaciones  $m$ . En el caso más simple, la eficacia de la línea se define como sigue:  $E = \frac{t_{sum}}{(m \cdot c)}$ . El problema básico descrito hasta el momento se llama cadena simple de fabricación equilibrada (SALBP) en la literatura (cf. Baybars, 1986). Cuatro versiones se definen mediante el uso de objetivos diferentes (cf. Scholl, 1999, capítulo 2.2) [1]:

- 1.- SALBP-E Maximiza la eficiencia de la línea ( $E$ ).
- 2.- SALBP-1 Minimiza el número ( $m$ ) de estaciones dado el ciclo de tiempo ( $c$ ).
- 3.- SALBP-2 Minimiza ( $c$ ) dado ( $m$ ).
- 4.- SALBP-F Busca una solución flexibles dado ( $m$ ) y ( $c$ ).

Hay una investigación reciente de los procedimientos de solución de estos problemas básicos es dada por Scholl y Becker (2006) [28]

## 7.4 Extensiones de la clasificación ALBP.

SALBP se basa en un conjunto de suposiciones que reducen el complejo problema de configuración de línea de carrocerías y montaje a la hora de asignar tareas a las estaciones. El balanceo de líneas de carrocerías y montaje del mundo real requerirá, sin embargo, la observación de una gran variedad de aspectos técnicos u organizacionales adicionales, que afectará fuertemente a la estructura del problema de planificación.

Entre las variantes consideradas en la literatura académica son las estaciones de trabajo paralelo y tareas, costó sinergias, alternativas de procesamiento, restricciones y dependencia de la secuencia de tiempos de procesamiento, así como las líneas de montaje *Ushaped*. Un intento reciente en la estructuración del campo de ALB es el esquema de clasificación proporcionado por Boysen et al (2006a) [2], donde introducen una anotación que es una adopción de la clasificación de famosos  $[\alpha/\beta/\gamma]$  para la programación del esquema de Graham et al (1979) [29] a ALB. Ahora un sistema de montaje específico con todas sus extensiones relevantes puede describirse brevemente.

En la figura 3 se presenta un resumen de este esquema de clasificación.

<b>Product specific precedence graphs:</b> $\alpha_1 \in \{\text{mix, mult, } \circ\}$		<b>Movement of workpieces:</b> $\beta_1 \in \{\circ, \lambda u, \text{unpac}^\lambda\}$	
$\alpha_1 = \text{mix}$	Mixed-model production	$\beta_1 = \circ \lambda u$	Paced line; with $\lambda \in \{\circ, \text{each, prob}\}$ and $u \in \{\circ, \text{div}\}$
$\alpha_1 = \text{mult}$	Multi-model production		$\lambda = \circ$ : (Average) work content restricted by cycle time
$\alpha_1 = \circ$	Single-model production		$\lambda = \text{each}$ : Each model must fulfill the cycle time
<b>Structure of the precedence graph:</b> $\alpha_2 \in \{\text{spec, } \circ\}$		$\beta_1 = \text{unpac}^\lambda$	$\lambda = \text{prob}$ : Cycle time is obeyed with a given probability
$\alpha_2 = \text{spec}$	Restriction to a special precedence graph structure		$u = \circ$ : Single global cycle time
$\alpha_2 = \circ$	Precedence graph can have any acyclic structure		$u = \text{div}$ : Local cycle times
<b>Processing times:</b> $\alpha_3 \in \{\text{st}^{\text{st}}, \text{td}^{\text{td}}, \circ\}^*$		<b>Line layout:</b> $\beta_2 \in \{\circ, u^\lambda\}$	
$\alpha_3 = \text{st}^{\text{st}}$	Stochastic processing times	$\beta_2 = \circ$	Serial line
$\alpha_3 = \text{td}^{\text{td}}$	Dynamic processing times (e.g. learning effects)	$\beta_2 = u^\lambda$	U-shaped line; with $\lambda \in \{\circ, n\}$
$\alpha_3 = \circ$	Processing times are static and deterministic		$\lambda = \circ$ : The line forms a single U
<b>Sequence-dependent task time increments:</b> $\alpha_4 \in \{\Delta t_{\text{dir}}, \Delta t_{\text{task}}, \circ\}^*$			$\lambda = n$ : Multiple Us forming an n-U line
$\alpha_4 = \Delta t_{\text{dir}}$	Caused by direct succession of tasks (e.g. tool change)	<b>Parallelization:</b> $\beta_3 \in \{\text{pline}^\lambda, \text{pstat}^\lambda, \text{ptask}^\lambda, \text{pwork}^\lambda, \circ\}^*$	
$\alpha_4 = \Delta t_{\text{task}}$	Caused by succession of tasks (tasks hinder each other)	$\beta_3 = \text{pline}^\lambda$	Parallel lines
$\alpha_4 = \circ$	Sequence-dependent time increments are not considered	$\beta_3 = \text{pstat}^\lambda$	Parallel stations
<b>Assignment restrictions:</b> $\alpha_5 \in \{\text{link, inc, cum, fix, excl, type, min, max, } \circ\}^*$		$\beta_3 = \text{ptask}^\lambda$	Parallel tasks
$\alpha_5 = \text{link}$	Linked tasks have to be assigned to the same station	$\beta_3 = \text{pwork}^\lambda$	Parallel working places within a station
$\alpha_5 = \text{inc}$	Incompatible tasks cannot be combined at a station	$\beta_3 = \circ$	Neither type of parallelization is considered
$\alpha_5 = \text{cum}$	Cumulative restriction of task-station-assignment	$\lambda \in \{\circ, 2, 3, \dots\}$ : Maximum level of parallelization; $\circ = \text{unrestricted}$	
$\alpha_5 = \text{fix}$	Fixed tasks can only be assigned to a particular station	<b>Resource assignment:</b> $\beta_4 \in \{\text{equip, res}^\lambda, \circ\}^*$	
$\alpha_5 = \text{excl}$	Tasks may not be assigned to a particular station	$\beta_4 = \text{equip}$	Equipment selection problem
$\alpha_5 = \text{type}$	Tasks have to be assigned to a certain type of station	$\beta_4 = \text{res}^\lambda$	Equipment design problem; with $\lambda \in \{\circ, 0.1, \text{max}\}^*$
$\alpha_5 = \text{min}$	Minimum distances between tasks have to be observed		$\lambda = \emptyset$ : If two task share a resource, investment costs are reduced at a station
$\alpha_5 = \text{max}$	Maximum distances between tasks have to be observed		$\lambda = \text{max}$ : Most challenging task defines the needed qualification level of a resource
$\alpha_5 = \circ$	No assignment restrictions are considered	$\lambda = \circ$ : Other type of synergy and/or dependency	
<b>Processing alternatives:</b> $\alpha_6 \in \{\text{pa}^\lambda, \circ\}$		$\alpha_6 = \circ$	Processing alternatives are not considered
$\alpha_6 = \text{pa}^\lambda$	Processing alternatives; with $\lambda \in \{\circ, \text{prec, subgraph}\}$	<b>Station-dependent time increments:</b> $\beta_5 \in \{\Delta t_{\text{st}}, \circ\}$	
		$\beta_5 = \Delta t_{\text{st}}$	Unproductive activities at a station are considered
		$\beta_5 = \circ$	Station-dependent time increments are not regarded
<b>Objectives</b>		<b>Additional configuration aspects:</b> $\beta_6 \in \{\text{buffer, feeder, mat, change, } \circ\}^*$	
<b>Objectives:</b> $\gamma \in \{\text{m, c, E, Co, Pr, SSL}^\lambda, \text{score, } \circ\}^*$		$\beta_6 = \text{buffer}$	Buffers have to be allocated and dimensioned
$\gamma = \text{m}$	Minimize the number of stations m	$\beta_6 = \text{feeder}$	Feeder lines are to be balanced simultaneously
$\gamma = \text{c}$	Minimize cycle time c	$\beta_6 = \text{mat}$	Material boxes need to be positioned and dimensioned
$\gamma = \text{E}$	Maximize line efficiency E	$\beta_6 = \text{change}$	Machines for position changes of workpieces required
$\gamma = \text{Co}$	Cost minimization	$\beta_6 = \circ$	No additional aspects of line configuration are regarded
$\gamma = \text{Pr}$	Profit maximization		
$\gamma = \text{SSL}^\lambda$	Station times are to be smoothed; with $\lambda \in \{\text{stat, line}\}$		
	$\lambda = \text{stat}$ : Within a station (horizontal balancing)		
	$\lambda = \text{line}$ : Between stations (vertical balancing)		
$\gamma = \text{score}$	Minimize or maximize some composite score		
$\gamma = \circ$	Only feasible solutions are searched for		

Figura 3. Esquema de clasificación para ALB of Boysen et al.(2006a) [2]

En el siguiente esquema se utiliza para asignar atributos típicos a diferentes aspectos de los sistemas reales ALB. De esta manera, pueden ser identificadas extensiones conjuntas de SALBP que caracterizan especialmente para ciertos grupos de sistemas de montaje en el mundo real. Además, una comparación con la literatura académica existente puede aclarar si ya existen los procedimientos de solución para estos casos típicos o si su desarrollo sigue siendo para futuras investigaciones.

## 7.5 Tipos Modelos ALB.

Muchos fabricantes de cualquier sector industrial han adoptado el Just-in-time (JIT) para mejorar su productividad, beneficios y aumentar la calidad. JIT es beneficioso para las compañías que disponen de un sistema de fabricación repetitivo. Uno de los importantes cambios del uso de JIT fue la implementación de línea *U-lines*, lo cual mejora desde la visibilidad y permitiendo la construcción de estaciones de trabajo con ambas caras o lados para ello. Sin embargo, este tipo de líneas tiene más complejidad que el mover estaciones de un lado a otro, entramos pues a los modelos singulares o individuales, los mixtos y los multi-modelos.

### 7.5.1 Modelo Individual ALB.

En su formato tradicional, las líneas de carrocerías y montaje fueron utilizadas para la producción de un alto volumen de una sola materia y/o producto ( $\alpha_1=0$ ). En la actualidad, los productos sin ninguna variación no son atractivos para los clientes y la marca puede dejar de ser competitiva. Tecnologías avanzadas de producción permiten operaciones de configuración automatizada en costos y tiempos de montaje insignificante.

Si más de un producto está implantado sobre la misma línea, pero no hay variaciones significativas en tiempos de funcionamiento, el sistema de montaje puede ser tratado como línea de un modelo único, como es por ejemplo el caso de la producción de discos compactos (Lebefromm, 1999, p. 3) [30] o latas de bebida (Grabau y Maurer, 1998) [31]. Modelo Individual o Único de producción es el modelo estándar de SALB y muchos problemas generalizados de ALB han sido considerados por un gran número de publicaciones. Un resumen de la literatura reciente es proporcionado por Scholl y Becker (2006) [28].

## 7.6 Modelo Mixto ALB.

En la producción del modelo mixto, los tiempos de cada tarea entre modelos podrían reducirse suficientemente para ser ignorados, así que se las secuencias de ambos modelos pueden ser montadas en la misma línea ( $\alpha_{l=mix}$ ).

A pesar de los tremendos esfuerzos para hacer los sistemas de producción más versátiles, esto generalmente requiere procesos de producción que sean muy homogéneos. Como consecuencia, generalmente se asume que todos los modelos son variaciones del mismo producto base y sólo se diferencian en atributos específicos de producto personalizable, también conocidos como opciones (aplicar este concepto al sector del automóvil, donde dos modelos diferenciados entre sí comparten en gran medida piezas unitarias y dimensiones).

La instalación de diferentes opciones normalmente conduce a variaciones en los tiempos de proceso. En la producción de automóviles, por ejemplo, la instalación de un techo corredizo eléctrico requiere una cantidad diferente de tiempo que el de uno manual. Por lo tanto, los tiempos de estación dependerán en gran medida el modelo específico a ser montado. Si varios modelos de trabajo intensivo suceden en la misma estación, podría ser superado el tiempo de ciclo y se produciría una sobrecarga, lo que debe ser compensado por algún tipo de reacción (línea de paro, los trabajadores de utilidad formados en tareas de mantenimiento y producción, reparación off-line, alternativas manuales, etc.; Wild, 1975, p. 164) [32]. Estas sobrecargas o exceso de tiempo de ciclo pueden evitarse si se encuentra una secuencia de modelos donde aquellos modelos que causan tiempos elevados en la estación se equilibre con aquellos de menor tiempo en cada estación. En este término es donde se centrará la investigación basándose en obtener un método para localizar en tiempo real donde se ubica el cuello de botella en una planta donde fabrica multi-modelos, cada uno de estos modelos es una variante del vehículo por lo que consecuentemente cada modelo necesitará un tiempo de ciclo propio para su tarea. Debemos de tener en cuenta que una planta compuesta por multitud de diferentes líneas de producción o los llamados grupos de ingeniería, no se produce al mismo tiempo un modelo especificado, lo que quiere decir que tendremos un alta complejidad para la interpretación de los tiempos para cada uno de los modelos y saber dónde tenemos el cuello de botella y el porqué.

Esto conduce a un problema de secuenciación de corto plazo (cf. Yano y Bolat, 1989 [33]; Sumichrast y Russell, 1990 [34]; Sumichrast et al., 1992 [35]; Bard et al., 1992 [36]; Tsai, 1995 [37]; Merengo et al., 1999 [38]).

El equilibrio y el problema de secuenciación son fuertemente interdependientes. Mientras que el equilibrio de línea decide sobre la asignación de tareas a las estaciones y así determina el contenido de trabajo por estación y modelo, la secuencia de producción de un determinado modelo *mix* se arregla sobre esta base con respecto a las sobrecargas mínimas.

La cantidad de sobrecarga por sí mismo es una medida de eficiencia para que la línea alcance el equilibrio. Es por ello que algunos autores han propuesto una consideración simultánea de ambos problemas de planificación (McMullen y Frazier, 1998<sup>a</sup> [39]; Kim et al., 2000b, c, 2006 [40]; Miltenburg, 2002 [41]; Sawik, 2002 [42]; Bock et al., 2006 [43]). Un acercamiento simultáneo es sólo viable si se reúnen condiciones muy especiales. La decisión de equilibrio es un problema a medio plazo con un horizonte de planificación típico de varios meses. Pronósticos detallados de ventas en el futuro a menudo están obligados a imprecisiones que afectan directamente al *mix* de producción. La planificación de las órdenes de producción depende fuertemente de los pedidos de los clientes. Un mal equilibrio o planificación deja una planta funcionando muy por debajo de su capacidad instalada. Por lo tanto, parece más significativo generalmente anticipar la decisión de la secuencia en el equilibrio de alto nivel dentro de un enfoque de planificación jerárquico (Scholl, 1999, capítulo 3.4 [1]; Boysen et al. 2006b) [2]. Con el fin de reducir las dificultades en la planificación de la secuencia, el balanceo de línea puede, por ejemplo, minimizar las variaciones en los tiempos de la estación sobre todos los modelos, conocidos como equilibrio horizontal ( $\gamma = SSL^{\text{stat}}$ ; Merengo et al., 1999 [38]). Se han propuesto varios objetivos diferentes que abordan este tema en alguna forma en la literatura académica (Thomopoulos, 1970 [44] ; Domschke et al., 1996 [45]; Bukchin, 1997 [46]; Scholl, 1999, capítulos 3.3 y 3.4 [1]; Matanachai y Yano, 2001 [47]; Boysen, 2005, capítulo B.2 [1]).

Alternativamente, el balanceo de línea puede exigir que todos los modelos el observan el tiempo de ciclo en cada estación ( $\beta_1 =$  cada una; Merengo et al., 1999 [38]). Este enfoque asegura que las sobrecargas nunca pueden ocurrir y así hacer la secuencia planificación trivial. Sin embargo, conduce a mayores tiempos de ciclo y así bajar la salida del sistema de montaje a cambio. Por lo tanto, sería mejor aplicar sólo una observación del tiempo de ciclo para un determinado porcentaje de modelos, ponderados por su ocurrencia estimada en mezclas modelo típico.

En ALB de modelos mixtos generalmente se transforma en el modelo único caso por el uso de un grafo de precedencia conjunta (Thomopoulos, 1970 [44]; MacAskill, 1972 [48]). Aquí, el proceso de tiempos de tareas, puede variar para algunos modelos como promedio con respecto a la ocurrencia de los respectivos modelos y son entonces compuestos para formar una gráfica única prioridad.

Si las relaciones de precedencia difieren según los modelos, este procedimiento podría conducir a conflictos que pueden resolverse duplicando los nodos (Ahmadi y Wurgaft, 1994 [49]). En algunos campos de negocio, la variedad del producto es demasiado amplio para permitir estimaciones fiables.

En consecuencia, la determinación de grafos de precedencia conjunta debe basarse en estos pronósticos, que requiere una asignación de tareas a atributos del producto (véase Boysen

et al., 2006c [2]). El uso de un grafo de precedencia conjunta implica que esas tareas similares que se realizan en diferentes modelos siempre se asignan a la misma estación. Sin embargo, este enfoque no es necesariamente eficiente. En cambio, los costos del aumento de la inversión ( $\beta_4 = res^{01}$ ), que resultan de una asignación de tareas similares o idénticas a las diferentes estaciones ( $\beta_3 = ptask$ ; Pinto et al., 1975 [50]), puede ser considerado explícitamente para permitir una mejora del equilibrio, por ejemplo en forma de un menor tiempo de ciclo.

Así, las ventajas y desventajas entre mayores costos de inversión y potencialmente mayores ingresos debido al aumento de la producción deben ser considerada en ALB del modelo mixto (Bukchin y Rabinowitch, 2005 [51]). Aunque la producción de una modelo mixto implica tiempos de preparación la permutas de herramientas entre modelos (cambios automáticos de manipuladores) pueden ser necesario que consumen sólo una fracción del tiempo del ciclo ( $\alpha_4 = \Delta t_{dir}$ ). Estos cambios de herramienta o swaps consumen una parte del tiempo de funcionamiento de una estación en automático, no obstante son de gran relevancia en la práctica.

La tabla 1: Muestra una selección de trabajos de investigación para los problemas de ALB que se presentan en líneas de carrocería y montaje del modelo mixto.

Table 1  
ALB for mixed-model assembly lines

Source	Notation	Source	Notation
Merengo et al. (1999)	[mix each m, SSL <sup>line</sup> , SSL <sup>stat</sup> ]	Domschke et al. (1996)	[mix   E, SSL <sup>stat</sup> ]
Bukchin et al. (2002)	[mix ptask score]	Askin and Zhou (1997)	[mix pstat Co]
Visich et al. (2002)	[mix u SSL <sup>stat</sup> ]	Erel and Gökçen (1999); Gökçen and Erel (1998)	[mix div m]
Bukchin and Rabinowitch (2006)	[mix div, ptask, res <sup>01</sup>  Co]	Vilarinho and Simaria (2002)	[mix, link, inc prob, pstat m, SSL <sup>line</sup> , SSL <sup>stat</sup> ]
Thomopoulos (1970)	[mix   m, SSL <sup>stat</sup> ]	Roberts and Villa (1970)	[mix, link each, ptask m]
Matanachai and Yano (2001)	[mix   SSL <sup>line</sup> , SSL <sup>stat</sup> ]	McMullen and Frazier (1997, 1998b), McMullen and Tarasewich (2003)	[mix, t <sup>sto</sup>  pstat Co, SSL <sup>line</sup> , score]
Macaskill (1972)	[mix   E]		

### 7.6.1 Multi-Modelo ALB.

En la producción de varios modelos, la homogeneidad de productos ensamblados y sus procesos de producción no es suficiente para permitir las secuencias de producción. Con el fin de evitar los tiempos de montaje y/o los costos del montaje, la producción se organiza en lotes ( $\alpha_1 = mult$ ).

Esto conduce a un problema de tamaño de la porción de los lotes a corto plazo que agrupa los modelos a los lotes y decide sobre su secuencia de montaje (cf., por ejemplo, Daganzo, 1994 [52]; Dobson y Yano, 1994 [53]). Especialmente si el tamaño de los lotes es grande,

la línea puede llegar a bloquearse debido al equilibrio entre modelos. Sin embargo, también en una producción multi-modelo un cierto grado de similitud en los procesos de producción debe ser inherente. Por lo general, los diferentes modelos se fabrican por el uso de los mismos recursos, por ejemplo, las máquinas o los operadores. Si la producción de línea se determina por separado, aquellos recursos que son compartidos por los modelos ( $\beta_4 = \text{res}^{01}$ ) deben ser trasladados a otras estaciones cada vez que el sistema de producción prepara un nuevo lote. Esto incrementa el tiempo de preparación y/o costos.

Si esta interdependencia es considerada en el equilibrio de la línea, el tiempo de preparación puede reducirse considerablemente y que a su vez permite una formación de lotes más pequeños con ventajas asociadas ( $\gamma = \text{Co}$ ). La misma compensación puede observarse cuando se considera el trabajo manual. Si los recursos de línea se determinan por separado, el contenido del trabajo de un operador puede cambiar considerablemente con cualquier modelo.

Esto conduce a una menor especialización del trabajo y puede resultar en mayor costo de entrenamiento y desperdicios de tiempo adicionales cada vez que los operadores necesitan adaptarse a sus nuevas tareas.

Si todos los modelos en una línea multi-modelo se equilibran simultáneamente, los objetivos de producción para cada modelo deben tenerse en cuenta.

En consecuencia los tiempos de ciclo varían con cada modelo considerado ( $\beta_1 = \text{div}$ ; Gökçen y Ereli, 1998 [54]). Como investigación del caso [ $\text{mult|div, res}^{01}|\text{Co}$ ] parece ser el más conveniente para el montaje de varios modelos. Hasta ahora, sólo hay unas pocas con líneas multi-modelos (véase tabla 2).

Table 2  
ALB for multi-model lines

Source	Notation	Source	Notation
Chakravarty and Shtub (1985)	[ $\text{mult div Co}$ ]	Pastor et al. (2002)	[ $\text{mult, cum, fix c, SSL}^{\text{line}}, \text{SSL}^{\text{stat}}$ ]
Chakravarty and Shtub (1986)	[ $\text{mult, } r^{\text{sto}} \text{div Co}$ ]	Kimms (2000)	[ $\text{mult, spec unpac, equip Co}$ ]
Dar-El and Rabinovitch (1988)	[ $\text{mult, } r^{\text{dy}} \text{Co}$ ]	Cohen and Dar-El (1998)	[ $\text{mult, } r^{\text{dy}} \text{unpac Pr}$ ]

## 7.7 ALB dependiente de una Línea de Control.

### 7.7.1 ALB: Línea a Ritmo.

En un sistema de producción que va a ritmo de la fabricación y/o el montaje, hay un tiempo de ciclo común dado que restringe los tiempos de proceso en todas las estaciones ( $\beta_1 = 0$ ). El ritmo se mantiene por un dispositivo de manipulación de materiales que avanza continuamente, por ejemplo una cinta transportadora, unas balancinas, etc, que obliga a los

operadores a terminar sus operaciones antes de que la pieza ha llegado al final de la estación respectiva, o por un llamado transporte intermitente, donde la pieza de trabajo llega a un punto en cada estación, pero se transfiere automáticamente tan pronto como es transcurrido un período de tiempo determinado.

Si el transporte de las piezas de trabajo es continuo, la longitud de la estación deberá definirse según el equilibrio de la línea. La longitud de una estación podría ser objeto de restricciones técnicas, por ejemplo, por necesidades de espacio de maquinaria asignada, pero debería ser considerada desde un punto de vista previo en la planificación. Si la longitud de una estación (multiplicada por el movimiento de la línea) excede el tiempo de ciclo, el tiempo adicional resultante puede utilizarse para compensar las desviaciones en tarea o compensar la producción de un modelo mixto ( $\alpha_3 = \text{mix}$ ) o causada por variaciones estocásticas ( $\alpha_3 = t^{\text{st0}}$ ). En consecuencia, el tiempo de ciclo no siempre debe observarse estrictamente en una estación. En el caso de tareas estocásticas es suficiente cumplir con la restricción de tiempo de ciclo con una cierta probabilidad ( $\beta_1 = \text{prob}$ ).

La selección de una probabilidad apropiada es altamente dependiente de la cantidad de tiempo extra disponible y los costos que surgen cuando no se pueden completar operaciones (por ejemplo, los costos del paro de línea, uso de trabajadores o terminación externa de piezas; Wild, 1975, [32]).

Una consideración explícita de estos factores de costo se encuentran en Carter y Silverman (1984) [55], Henig (1986) [56], Kottas y Lau (1981) [57], Lau y Shtub (1987) [58], Lyu (1997) [59], Sarín y Erel (1990) [60], Sarin et al (1999) [61], Shtub (1984) [62], así como Silverman y Carter (1986) [63].

En lugar de asignar un tiempo de ciclo global, los tiempos de ciclo localmente divergentes son útiles ( $\beta_1 = \text{div}$ ) para permitir, por ejemplo, una instalación de estaciones de prueba que examinan la calidad de las piezas de trabajo. Si tal prueba central identifica un defecto, la pieza correspondiente es sacada de la línea, reparada y luego reexaminada, antes de que se pueda reemplazar otra pieza de defecto en la estación sucesiva (Lapierre y Ruiz, 2004) [64]. También requiere una consideración de las cantidades de producción diferentes en la producción de varios modelos divergentes (Gökçen y Erel, 1998) [54].

### 7.7.2 ALB: Línea Asíncrona no constante (*Unpaced*).

En líneas asíncronas las piezas se transfieren cada vez que se hayan completado las operaciones necesarias, en lugar de estar vinculado a un momento dado del tiempo para realizar la tarea en la estación ( $\beta_1 = \text{unpac}$ ). Buzacott y Shanthikumar (1993) [65] distinguen si todas las estaciones pasan sus piezas al mismo tiempo (sincrónico) o si cada estación lo decide individualmente (asincrónico).

En una estación asincrónica, una pieza de trabajo se mueve siempre tan pronto como se hayan completado todas las operaciones necesarias en una estación y la estación de sucesiva no esté bloqueada ya por otra pieza de trabajo. Después de la transferencia, la estación continúa trabajando en una nueva pieza de trabajo, a menos que la anterior estación sea incapaz de proporcionar el suministro (Starving).

Con el fin de minimizar los tiempos de espera, son instaladas estaciones intermedias, que pueden almacenar temporalmente piezas ( $\beta_6 = \text{buffer}$ ). Cuando se decide instalar un buffer uno tiene que considerar las ventajas y desventajas entre los costes de instalación y el rendimiento alcanzable, porque éste tiende a aumentar mediante la instalación de más y mayores buffers. Almacenadores intermediarios sólo pueden utilizarse para compensar las desviaciones temporales en tiempos de la tarea. Si una estación es generalmente más rápida que la otra, el almacenamiento se llenará pronto y perderá su función.

Por consiguiente, el uso de líneas unpaced asincrónicas con buffers sólo es significativo cuando la estación está sujeta a variaciones. Éstas podrían provenir a veces de tareas estocásticas ( $\alpha_3 = t^{\text{sto}}$ ) o incluso de las averías de la máquina. No obstante, en sistemas ALB, sólo parece lógico considerar los tiempos estocásticos de las tareas que sean causados por (i) las variaciones en la velocidad de trabajo manual o (ii) el modelo mix ( $\alpha_1 = \text{mix}$ ), los cuales NO pueden ser anticipados o predichos anteriormente, (Tempelmeier, 2003) [66].

En líneas *unpaced*, el volumen de producción no es dado por un tiempo de ciclo fijo, pero es muy dependiente de los tiempos de la tarea realizada en cada una de las estaciones.

Estos pueden ser estimados por las funciones de distribución de las tareas que son conocidas, sin embargo, muy influenciadas por la asignación de los buffer. Así pues, la planificación de la configuración de un sistema de *unpaced* de una línea Asincrónica debe:

- 1.- Determinar un Equilibrio de la línea.
- 2.- Asignación de los buffers.
- 3.- Estimación del rendimiento (u otras medidas de eficiencia).

Debido a las fuertes interdependencias entre los tres problemas de planificación, ciertamente sería deseable una solución simultánea. Hasta ahora, los enfoques en la literatura académica evitan la complejidad e investiga las partes aisladas.

La mayoría de las publicaciones se ocupa de problemas 2 y 3, y busca a una relación óptima entre el costo y la producción (cf. Buzacott, 1968 [67]; Suhail, 1983 [68]; Baker et al., 1990 [69]; Hillier y así, 1991 [70]; Hillier et al., 1993 [71]; Malakooti, 1994 [72]; Powell, 1994 [73]; Dolgui et al., 2002 [74]).

Las asignaciones para optimizar podrán determinarse para los diversos equilibrios de la línea con un enfoque de optimización simulación. La adecuada integración de los tres problemas es sin duda un campo desafiante para futuras investigaciones.

En cualquier caso, también en sistemas *unpaced* asincrónicos, el equilibrio de la línea es esencial para garantizar cargas en las estaciones.

Así pues, parece adecuado restringir la estación a un tiempo de ciclo, como en líneas de ritmo constante. Sin embargo, queda por investigar qué extensiones de SALBP son la más adecuadas para considerar las necesidades especiales de líneas *unpaced* asincrónicas.

No se requiere necesariamente que la naturaleza estocástica de tiempos de ciclo de funcionamiento sea siempre representada en un modelo estocástico de ALB. Estaría justificado el uso de un modelo determinista como ALB buscando principalmente un equilibrio a largo plazo de las cargas de la estación (ver Sphicas y Silverman, 1976)[75]. Esto a su vez permite una mayor integración de extensiones u opciones adicionales, tales como selección de estaciones paralelas o equipos, que hasta ahora no se han relacionado con modelos estocásticos de ALB.

El análisis de las líneas asíncronas reveló un atributo interesante, comúnmente conocido como "*BowlPhenomenon*" (cf. Hillier y Boling, 1966, 1979 [76]; Hillier y así, 1993 [71]), según el cual el rendimiento de una línea puede mejorarse mediante la asignación de pequeñas cargas a las estaciones centrales y una mayor carga a las estaciones situada al principio o al final de la línea.

El mismo concepto se aplica a la asignación de los buffer, si los almacenajes de búfer están situados en el centro (o en las estaciones de cuello de botella) se aumentan de volumen. En este contexto, el uso de un tiempo de ciclo global parece inadecuado y por lo tanto debe ser sustituido por estaciones específicas de ciclos locales para dar cuenta de este fenómeno ( $\beta_1 = \text{div}$ ; Johnson, 1983 [77]), que asignan un menor trabajo contenido para estaciones centrales o alternatively exige una mayor probabilidad con respecto a la duración del ciclo en caso de un modelo estocástico.

*La determinación adecuada de estos tiempos de ciclo local depende todavía de futuras investigaciones.* ALB para líneas de montaje asincrónicas se deberían investigar más el caso:  $[t^{\text{sto}} \mid \text{div, prob, buffer} \mid m]$ .

Los pocos acercamientos a la literatura que tratan partes de las extensiones mencionadas desde punto de vista del ALB se resume en la tabla 3.

Table 3  
ALB for unpaced asynchronous assembly lines

Source	Notation	Source	Notation
Johnson (1983)	$[type div, ptask m]$	Nakade et al. (1997)	$[r^{\text{sto}} unpac, u, \Delta t_{\text{sup}} c]$

### 7.7.3 ALB: Línea Síncrona no constante (*Unpaced*).

Tenemos una línea donde los movimientos de las piezas son síncronos, las estaciones esperan a la estación más lenta para terminar todas las operaciones antes de que las piezas se transfieren en el mismo punto en el tiempo ( $\beta_1 = \text{unpac}^{\text{syn}}$ ).

En contraste con el caso asincrónico, los buffer intermedios no son por lo tanto necesarios. Si a veces las tareas son deterministas, la línea sincrónica *unpaced* puede tratarse como un ritmo de la línea con transporte intermitente, el tiempo de ciclo es determinado por la estación más lenta.

En el caso estocástico ( $\alpha_3 = t^{\text{sto}}$ ), existen fuertes similitudes con una línea al ritmo, que se detiene cuando se excede el tiempo de ciclo. Una línea *unpaced* puede, sin embargo, avanzar si las operaciones se realizaron antes, es decir, fueron rápidas y no tendrán que esperar por un periodo de tiempo fijo.

Es por ello que una línea sincrónica *unpaced* promete una salida más alta que su homólogo al ritmo. La variable de salida, sin embargo, complica considerablemente el equilibrio de la línea.

Estas aproximaciones permiten una selección de alternativas en la línea de un conjunto de opciones predeterminadas. Sin embargo, la optimización sofisticada de modelos necesita integrar la determinación del rendimiento y del equilibrio de la línea. Hasta ahora sólo Karabati y Sayin (2003) [78] propone modelos combinados y los procedimientos de solución (ver tabla 4). Por lo tanto, todavía hay una gran distancia para futuras investigaciones sobre estos sistemas de fabricación.

Table 4  
ALB for unpaced synchronous assembly lines

Source	Notation	Source	Notation
Karabati and Sayin (2003)	$[\text{mix}(\text{unpac}^{\text{sync}})_{\text{score}}]$	Urban and Chiang (2006)	$[\text{r}^{\text{sto}} \text{unpac}^{\text{sync}} m]$

## 7.8 ALB dependiente de la Frecuencia.

### 7.8.1 ALB: Primera Instalación.

Siempre que un sistema de producción de fabricación se instala por primera vez y los recursos no se han comprado aún, las estaciones pueden ser tratadas como entidades abstractas, a las que puede asignar un cierto número de tareas.

Por lo general, sólo el producto deseado con todos sus atributos y variantes ya está determinado. El proceso de producción todavía no está fijado o no está aun completamente justificado. Esto puede tenerse en cuenta de dos formas diferentes: el enfoque clásico consiste en seleccionar y arreglar todas las tareas y sus modos de procesamiento respectivo

antes de la decisión de equilibrio para formar una única prioridad antes de que se resuelva el problema de ALB.

Por otra parte, esta planificación puede reemplazarse seleccionando las alternativas de procesamiento simultáneamente con la decisión de equilibrio. Este último enfoque requiere el estudio de todas las alternativas de procesos que conducen al producto deseado, que por lo tanto, pasan al problema de equilibrio. La asignación de tareas a las estaciones entonces está influenciada por la selección de alternativas del proceso. Este enfoque promete una mejor solución global y es especialmente adecuado para una primera instalación ( $\alpha_6 = pa$ ; Pinto et al., 1983 [79]; Pinnoi y Wilhelm, 1998 [80]; Bukchin y Tzur, 2000 [81]).

Alternativas de fabricación pueden influir en la determinación de las preferencias de diferentes maneras.

A menudo, maquinaria u operadores diferentemente calificados pueden realizar la misma tarea en diferentes maneras y costos. Por lo general, existe un compromiso de tiempo de costo, tal que el recurso más caro obtendrá menores tiempos de trabajo. Además, las alternativas de fabricación podrían influir directamente las relaciones de precedencia ( $\alpha_6 = pa^{prec}$ ), como la transformación llevada a cabo por una tarea en particular puede impedir la aplicación de un procedimiento automatizado mientras que una operación manual está todavía disponible produciendo retrasos.

Finalmente, sub-gráficos enteros podrían ser sustituibles ( $\alpha_6 = pa^{subgraph}$ ). Este es el caso cuando el conjunto de opciones solo puede reemplazarse por un módulo comprado o subconjunto con los mismos atributos.

Todo lo mencionado anteriormente es especialmente relevante para una primera instalación y por lo tanto se deben de considerar en los respectivos problemas ALB. Como las alternativas de fabricación suelen generar costos de implementación diferente, estos costes deben ser considerados explícitamente en la función objetivo ( $\gamma = Co$ ).

En este momento, los pronósticos de ventas son sometidos a considerables imprecisiones, por lo que puede ser razonable modelar el equilibrio entre los costos de inversión y los ingresos esperados planteados por una variada producción ( $\gamma = Pr$ ; Zäpfel, 1975 [82]; Klenke, 1977 [83]; Rosenblatt y Carlson, 1985 [84]; Martin, 1994 [85]; Boysen y Flidner, 2006 [86]) en lugar de una minimización de costos para un ciclo determinado tiempo.

Con respecto al largo del tiempo de vida de una línea de carrocería y montaje, los efectos esperados de aprendizaje ( $\alpha_6 = t^{dy}$ ), que incluso son favorecidas por la alta especialización del trabajo, pueden tener un impacto considerable en la determinación de la eficacia a largo plazo del sistema de producción. Si los efectos de aprendizaje se descuidan, las capacidades puede ser sobrestimadas, donde las excesivas capacidades en fases posteriores del ciclo vital del producto podrían obligar a la empresa a otorgar descuentos importantes, como ocurre en la industria automotriz alemana actual.

La cuantificación de los efectos de aprendizaje es de difícil pronóstico. Sin embargo, algunos enfoques pueden ser encontrados en la literatura (Boucher, 1987 [87]; Chakravarty, 1988 [88]). Para explicar las particularidades de una primera instalación, modelos y algoritmos para los siguientes casos parecen ser más prometedores:  $[t^{dy}; pa^{subgraph} \mid \mid Pr]$  o  $[t^{dy}; pa^{subgraph} \mid \mid Co]$ .

La investigación existente tratar por lo menos algunas de las SALBP-extensiones.

Table 5  
ALB for the first-time installation of an assembly line

Source	Notation	Source	Notation
Capacho and Pastor (2004)	$[pa^{subgraph} \mid m]$	Zäpfel (1975)	$[\text{link, inc} \mid Pr]$
Chakravarty (1988)	$[t^{dy} \mid E]$	Rosenblatt and Carlson (1985)	$[ \mid Pr]$

### 7.8.2 ALB: Reconfiguración.

La mayoría de los problemas de equilibrio en las líneas reales provienen de una reconfiguración en lugar de una primera instalación (Falkenauer, 2005 [89]). Una reconfiguración se hace necesaria cada vez que hay un cambio sustancial en la estructura del programa de producción, por ejemplo, un cambio permanente en la demanda de modelos.

En una reconfiguración, las estaciones tienen identidades en la forma de los recursos asignados y un lugar físico en la planta. Como ya existen las estaciones, la minimización del número de estaciones como objetivo es menos importante. Además, el tiempo del ciclo se determina a menudo basado en pronósticos de ventas. Como consecuencia, la obtención de una solución viable que observa el número de estaciones y el tiempo de ciclo es suficiente. Como un objetivo complementario a menudo se propone distribuir el contenido de trabajo lo más uniformemente posible entre las estaciones ( $\gamma = SSL^{line}$ ; Agnetis et al., 1995 [90]; Pinnoi y Wilhelm, 1997a/b [91]; Merengo et al., 1999 [38]; Rekiek et al., 2001, 2002 [92]). Esto promete una mayor calidad del producto, que de lo contrario podría estar en peligro en estaciones con cargas de trabajo extraordinariamente altas. Una vez que los recursos se asignan a las estaciones, maquinaria pesada no puede ser reasignada y/o movida. En este caso, todas las tareas que requieren este recurso necesitan permanecer en su estación anterior, que puede ser aplicada por las restricciones de asignación ( $\alpha_5 = \text{fix}$ ).

A menudo, el movimiento de una máquina, sin embargo, no es técnicamente imposible, sino más bien asociada a los costos del movimiento, y donde la mayoría de los casos, la inversión a realizar no justifica el beneficio. En este caso, los costos del movimiento debe considerarse explícitamente ( $\gamma = Co$ ; Gamberini et al., 2004, 2006 [93]). Además, es necesario observar limitaciones de espacio cuando se mueve una máquina ( $\alpha_5 = \text{cum}$ ; Bautista y Pereira, 2006 [94]).

Pero no sólo la maquinaria, sino también los operadores de la línea de montaje que se han asignado a una cierta estación. Ellos han sido especialmente entrenados para llevar a cabo el contenido del trabajo respectivo, así un cambio además estará asociado con los costes de formación. Por lo tanto sería deseable, que la nueva línea de equilibrio siga siendo lo más cercana posible a la anterior, con el fin de ahorrar costes de formación y movimiento.

Este aspecto hasta el momento no se ha tenido en cuenta en la literatura. Si en el anterior balance, una estación o una sección completa de la línea fue paralela ( $\beta_3 = \text{pstat}$ ; Pinto et al., 1981 [95]), esto puede ser considerado por ciclos locales ( $\beta_1 = \text{div}$ ), que son múltiplos de la global, de modo que las estaciones paralelas pueden tomar un mayor contenido de trabajo.

La mayoría de la documentación trata el caso de la primera instalación de un sistema de montaje. Este podría ser el caso más importante, ya que se ocupa de la inversión en maquinaria, así como la selección de alternativas de fabricación y por lo tanto si no se realiza correctamente incurrirá en costes altísimos que influyen en la empresa durante un largo periodo de tiempo.

Sin embargo, debido a la mayor frecuencia de las reconfiguraciones, este campo tiene una gran importancia en la práctica. Por lo tanto no hay necesidad de modelos y algoritmos para el siguiente caso:  $[\text{fix}; \text{Inc}; \text{cum} \mid \text{div} \mid \text{Co}; \text{SSL}^{\text{line}}]$ . Documentos con respecto a algunas extensiones que son especialmente valiosas para la reconfiguración de los sistemas de montaje se resumen en la tabla 6.

Table 6  
ALB for assembly line reconfiguration

Source	Notation	Source	Notation
Raouf and Tsui (1982)	$[r^{\text{max}}, \text{fix}, \text{excl}   \text{prob}   m, \text{SSL}^{\text{max}}]$	Pastor et al. (2002)	$[\text{mult}, \text{cum}, \text{fix}   c, \text{SSL}^{\text{line}}, \text{SSL}^{\text{max}}]$
Buxey (1974)	$[\Delta t_{i2}, \text{link}, \text{inc}, \text{max}   \text{pstat}   \text{score}]$	Arcus (1966)	$[\text{mix}, \Delta t_{i2}, \text{cum}, \text{fix}   \text{res}^{\text{max}}, \Delta t_{i2}, \text{pwork}   E]$
Rekiek et al. (2001)	$[\Delta t_{i2}, \text{link}, \text{inc}, \text{fix}, \text{type}, \text{pa}   \text{Co}, \text{SSL}^{\text{line}}]$	Pastor and Corominas (2000)	$[\text{link}, \text{inc}, \text{type}, \text{max}   \text{SSL}^{\text{line}}]$
Agnietis et al. (1995)	$[\text{spec}, \text{inc}, \text{fix}   \text{SSL}^{\text{line}}]$	Johnson (1983)	$[\text{type}   \text{div}, \text{ptask}   m]$
Rekiek et al. (2002)	$[\text{link}, \text{fix}, \text{pa}   \text{Co}, \text{SSL}^{\text{line}}]$	Deckro (1989)	$[\text{link}, \text{inc}, \text{max}   m, c]$
Park et al. (1997)	$[\text{spec}, \text{inc}, \text{pa}^{\text{max}}   c]$	Gamberini et al. (2004, 2006)	$[r^{\text{max}}   m   \text{Co}, \text{score}]$

## 7.9 ALB Nivel de Automatización.

### 7.9.1 ALB: Líneas Manuales.

A pesar de los importantes avances en la automatización de procesos de fabricación y montaje, todavía hay muchos sistemas que dependen total o principalmente del trabajo manual.

Las líneas manuales son especialmente comunes en los casos, donde las piezas son frágiles o si las piezas necesitan ser agarradas con frecuencia, donde los robots industriales podrían carecer de la precisión necesaria.

En países donde los salarios son bajos, el trabajo manual también puede ser una alternativa de costo eficiente a la costosa inversión en maquinaria automatizada. En ocasiones las tareas bajo la mano de obra a menudo están sujeta a las desviaciones estocásticas ( $\alpha_3 = t^{\text{sto}}$ ), debido a que el rendimiento de los trabajadores humanos depende de una variedad de factores, como la motivación, ambiente de trabajo o el estrés mental y físico (Tempelmeier, 2003 [66]). La falta de motivación y el bajo nivel de satisfacción, que generalmente es causado por la alta repetitividad de las operaciones elementales, se han considerado como una desventaja importante de producción (Shtub y Dar-El, 1989 [96]).

Hasta ahora, el nivel de cohesión de un conjunto de tareas ha sido más o menos medido por el número de relaciones de precedencia directa entre tareas incluidas (Agrawal, 1985 [97]; Lee et al., 2001 [98]). Este enfoque parece ser algo impreciso o por lo menos requiere una validación empírica. Una consideración explícita de cohesión de las tareas con respecto a los módulos y subconjuntos es proporcionada por Shtub y Dar-El (1990) [99].

El estado físico (por ejemplo fuerza de agarre) y psicológico (por ejemplo fatiga) estresan a los operarios. Este factor tiene que modelarse como nodos adicionales en el gráfico de precedencia.

A cada tarea se asigna un cierto indicador de estrés, que no puede exceder o disminuir por debajo de cierto nivel de todas las tareas asignadas a un trabajador ( $\alpha_5 = \text{cum}$ ; Carnahan et al., 2001 [100]).

Otro de los principales factores que influyen en el trabajo manual es la experiencia individual de un trabajador, es decir, por qué efectos de aprendizaje obtienen una importancia especial en los trabajos manuales ( $\alpha_5 = t^{\text{dy}}$ ). Debido a su complejidad y los problemas de cuantificación es cuestionable si una detallada consideración de todos los aspectos mencionados conduce a modelos ALB significativos.

Otro aspecto característico del trabajo manual puede ser utilizado más fácilmente: el nivel de flexibilidad.

Los operadores de estaciones adyacentes por ejemplo podrían apoyarse mutuamente en caso de una sobrecarga en momentos puntuales. Esto puede ser diseñado directamente por ciertos layout de la línea, como el *Uline* ( $\beta_2 = u$ ; Miltenburg y Wijngaard, 1994 [101]; Aase et al., 2004 [102]) o *n-U-line* ( $\beta_2 = u^n$ ; Miltenburg, 1998 [103]; Sparling, 1998 [104]), que proviene del famoso-sistema de producción Toyota-(Monden, 1998). En tal línea hay dos ramales que se colocan cerca de cada uno otra para formar una U con anchura, para que los trabajadores puedan realizar tareas en ambos ramales en el mismo ciclo de producción. Este aumenta los grados de libertad del equilibrio de la decisión considerablemente (Scholl y Klein, 1999 [105]).

El tiempo que tarda un trabajador para moverse de un lado a otro puede ser que necesite ser considerado ( $\beta_5 = \Delta t_{unp}$ ; Sparling, 1998 [104]).

Normalmente, los costes salariales constituyen uno de los factores más altos si el trabajo manual se utiliza de manera extensa ( $\gamma = Co$ ). Tiene que ser investigado, sin embargo, si el coste total de la línea tiene una influencia directa sobre coste de los salarios.

Si todos los operarios ya están empleados, como ocurre típicamente en una reconfiguración y tareas alternativas para los trabajadores fuera de la línea no están disponibles, el coste de la línea no tendrá ningún impacto en los costes salariales.

A veces el coste salarial podría ser influenciado debido a diferentes niveles de calificación necesario por la tarea más exigente que un trabajador debe de realizar ( $\beta_4 = res^{max}$ ; Steffen, 1977 [106]; Rosenberg y Ziegler, 1992 [107]; Amén, 2000a, b, 2001, 2006 [108]; Scholl y Becker, 2005 [109]).

En este caso, la asignación de tareas a los trabajadores puede alterar los costes salariales considerablemente por agregación de las tareas más difíciles. La calidad de las piezas de trabajo también es de especial importancia si las operaciones se llevan a cabo manualmente.

Con trabajos manuales, la calidad sufre a menudo si los operadores están sobrecargados con trabajo y por lo tanto necesitan trabajar más rápido, generando así mayor índice de fallos. Por consiguiente, es deseable para asegurar que la carga total se distribuye tan uniformemente como sea posible entre las estaciones ( $\gamma = SSL^{line}$ ).

Se deduce que las líneas de montaje manuales requiere modelos y algoritmos para el siguiente caso:  $[t^{sto}; t^{dy}; cum \mid u, res^{max}; \Delta t^{unp} \mid Co; SSL^{line}]$ .

Los enfoques Alba que tratan (algunos) de los mencionados son proporcionados en la tabla 7.

Table 7  
ALB for manual lines

Source	Notation	Source	Notation
Amen (1997, 2000a, b, 2001, 2006)	$[res^{max} \mid Co]$	Ajenblit and Wainwright (1998)	$[u \mid m, SSL^{line}]$
Arcus (1966)	$[mix, \Delta t_{dir}, cum, fix \mid res^{max}, \Delta t_{unp}, pwork \mid E]$	Sparling and Miltenburg (1998)	$[mix \mid u, \Delta t_{unp} \mid m, SSL^{stat}]$
Sparling (1998)	$[u^a, pline, \Delta t_{unp} \mid m]$	Camahan et al. (2001)	$[cum \mid c, score]$
Wilson (1986)	$[t^{sto}, pa \mid Co]$	Miltenburg (1998)	$[fix \mid u^a, \Delta t_{unp} \mid m, score]$
Bukchin et al. (1997); Bukchin and Masin (2004)	$[pwork \mid m, score]$	Miltenburg and Wijngaard (1994)	$[u \mid m]$
Rosenberg and Ziegler (1992)	$[res^{max} \mid Co]$	Shtub and Dar-El (1990)	$[m, c, score]$
Boysen and Flidner (2006)	$[t^{sto}, link, inc, cum, pa \mid u, pstat, ptask, res^{01}, res^{max} \mid Pr]$		

### 7.10 ALB: Líneas Automáticas.

Líneas completamente automatizadas se aplican principalmente donde el ambiente de trabajo es, en cierta forma, hostil a los seres humanos, como por ejemplo en las tiendas y/o

almacenes químicos y de pintura de la industria del automóvil, o donde los robots industriales son capaces de realizar las tareas más económicamente y con una precisión más alta (por ejemplo las tareas de procesamiento de metal).

La precisión más alta de las máquinas típicamente justifica la asunción de tareas deterministas ( $\alpha_3 = 0$ ). Si sólo la maquinaria especializada (cada tarea requiere su propia máquina o herramienta) es empleada, muy pocas particularidades (por ejemplo, restricciones de espacio;  $\alpha_5 = \text{inc, cum}$ ) surgen simplemente por el hecho de que las máquinas realicen tareas.

Sin embargo, la creciente diferenciación de productos, que comparten la misma línea ( $\alpha_1 = \text{mix}$ ) da lugar a la flexibilidad incluso en sistemas de montaje automatizado.

Esto conduce a líneas de transferencia flexible donde máquinas multiusos intercambian herramientas automatizadas que puede realizar muchas tareas diferentes a velocidad variable. Debido a los altos costos de inversión de los equipos industriales, el objetivo de minimización de costos gana en importancia ( $\gamma = \text{Co}$ ).

Si una máquina multiusos puede llevar a cabo una tarea con diferentes prestaciones, de tenerse en cuenta ( $\alpha_7 = \text{pa}$ ).

Como consecuencia, la asignación de tareas a las estaciones es aumentada por un problema de selección de los equipos en cada estación ( $\beta_4 = \text{equipo}$ ; Pinnoi y Wilhelm, 1998 [110]; Bukchin y Tzur, 2000 [111]). Esta selección, por lo tanto, determina los tiempos de trabajo en la estación correspondiente, así como los costos de inversión. Además, las restricciones de asignación a menudo necesitan ser considerados, ya que, algunas tareas sólo pueden ser realizadas por un subconjunto de máquinas disponibles ( $\alpha_5 = \text{tipo}$ ) o no puede realizarse en los mismos equipos ( $\alpha_5 = \text{inc}$ ). El cambio de herramienta automatizada podría llevar un determinado período de tiempo que podría ser más dependiente de la secuencia de las piezas de trabajo y sus herramientas necesarias ( $\alpha_4 = \Delta t^{\text{dir}}$ ).

Asimismo, las piezas de trabajo a menudo necesitan ser cargadas en las estaciones, antes de que cualquier operación pueda realizarse ( $\beta_5 = \Delta t^{\text{ump}}$ ; Bard, 1989 [112]).

Una máquina puede emplear por ejemplo varios cabezales, que son capaces de realizar operaciones en la misma pieza simultáneamente ( $\beta_3 = p^{\text{work}}$ ; Dolgui et al. 1999, 2001a–c, 2003, 2006 [113]). En una línea automatizada, las averías de maquinaria se han convertido en un tema relevante de planificación no sólo en la planificación de corto plazo y control, sino también en la planificación de la configuración de líneas nuevas de fabricación. No obstante, parece cuestionable si ALB es el lugar adecuado para tener en cuenta estos quiebres. *La actual falta de investigación sobre ALB teniendo en cuenta las averías de la maquinaria es un indicador más que ALB echa de menos los instrumentos adecuados para atenuar los efectos de las averías así como poder predecirlas.*

Tabla 8 resume investigaciones tratando con diferentes aspectos de los sistemas de montaje automatizado.

Table 8  
ALB for automated lines

Source	Notation	Source	Notation
Dolgui and Ihnatsenka (2004), Dolgui et al. (1999, 2001a-c, 2003, 2006)	[link, inc pwork Co]	Rubinovitz and Bukchin (1993)	[pa equip  <i>m</i> ]
Pinnoi and Wilhelm (1997a)	[mult, link, inc, cum, type, pa div, equip, pstat, pwork Co]	Nicosia et al. (2002)	[pa equip Co]
Pinnoi and Wilhelm (1998) Bukchin and Rubinovitz (2003) Bukchin and Tzur (2000)	[pa equip Co] [pa pstat, equip Co] [pa equip Co]	Levitin et al. (2006) Wilhelm (1999)	[pa equip  <i>c</i> ] [ $\Delta t_{dir}$ , pa equip Co]

## 7.11 Aplicación Industrial.

### 7.11.1 ALB: Industria del Automóvil.

Por lo general las líneas de producción de coches se fabrican con modelos mezclados ( $\alpha_1 = \text{mix}$ ) con una alta proporción de mano de obra (Meyr, 2004 [114]).

Especialmente, en la trabajos de la industria automovilística a veces están sujetos a acuerdos mutuos entre la parte social (empleados y sindicatos), que suele ocasionar detallados procedimientos y reglamentos basados en métodos de medición de tiempo estandarizado sobre la cantidad exacta de tiempo de un trabajador realizando cualquier tarea.

El equilibrio de las líneas de fabricación del automóvil debe interrelacionarse con una serie de particularidades, la mayoría de las cuales está relacionada con el hecho de que las piezas son comparativamente grandes. Como consecuencia, una estación a menudo puede ser subdividida en varias áreas de trabajo paralelas, donde los operarios trabajan simultáneamente con la misma pieza de trabajo ( $\beta_3 = p^{\text{work}}$ ; Akagi et al., 1983 [115]).

Este fenómeno ocurre también en las industrias relacionadas, como en la producción de camiones, autobuses y vehículos de construcción (Bartholdi, 1993 [116]; Lee et al., 2001 [98]). Típicas áreas de trabajo en conjunto de un coche son el frente y la parte trasera, izquierda y derecha, el interior, el techo así como la parte de abajo del coche. Los trabajadores pueden trabajar en paralelo en varios lugares de trabajo o incluso cambiar su lugar de trabajo durante un ciclo de producción. Esto requiere la observación de las limitaciones de precedencia entre las tareas dentro de una estación, como espera tiempos por ejemplo donde pueden surgir cuando un trabajador necesita esperar a la finalización de otra tarea en otro lugar de trabajo en la misma estación, antes de que él pueda continuar.

En cambio un problema de programación debe resolverse en cada estación (Falkenauer, 2005 [91]; Scholl et al., 2006 [28]). Además de eso, hay que considerar tiempos extras, cuando un trabajador cambia su lugar de trabajo ( $\beta_5 = \Delta t^{\text{unp}}$ ). Esto constituye un obstáculo

para las operaciones en los diferentes lugares entre sí o sí dos trabajadores están obligados a realizar una tarea conjunta.

Además, la pieza de trabajo o el componente a montar si podría necesitar una posición en particular con el fin de realizar una tarea (por ejemplo levantada, para trabajar debajo del coche).

Como consecuencia, algunas de las tareas pueden ser incompatibles con un determinado tipo de estación. ( $\alpha_5 = \text{tipo}$ ; Johnson, 1983, 1991 [77]; Kim et al., 2000<sup>a</sup> [40]). Como los cambios de posición sólo pueden ser realizados por maquinaria tipo transportadores, robots, manipuladores, la asignación de tales dispositivos se convierte en parte del proceso de equilibrado ( $\beta_6 = \text{cambio}$ ). Finalmente, en la producción del automóvil algunas de las tareas se llevan a cabo a través de más de una estación.

Todavía no se ha realizado una investigación a fondo de los requisitos antes mencionados del montaje de automóviles. En particular se necesitan modelos que comprenden las siguientes extensiones: [mix; type | p<sup>work</sup>; pstat;  $\Delta t^{\text{unp}}$ ; change | SSL<sup>stat</sup>].

Tabla 9 proporciona una visión general sobre los trabajos de investigación que se ocupan de las aplicaciones en la industria del automóvil (o afines).

Table 9  
ALB in automobile production and related industries

Source	Line of business	Notation
Pastor and Corominas (2000)	Motor cycle production	[link, inc, type, max]   SSL <sup>line</sup>
Arcus (1966)	Automobile production	[mix, $\Delta t_{\text{dir}}$ , cum, fix res <sup>max</sup> , $\Delta t_{\text{unp}}$ , pwork E]
Bartholdi (1993)	Small utility vehicles	[fix, type pwork <sup>2</sup>  m]
Kim et al. (2000a)	Automobile production	[fix, type pwork <sup>2</sup>  m]

## 7.12 Resumen ALB:

En este apartado vamos a resumir todas las combinaciones de estudio referente a las líneas de fabricación y montaje:

**ALB: Problemas básicos:** La tareas se realizan en varias ocasiones y tendrán que estar dentro del objetivo de su tiempo de ciclo. La carga total de trabajo se mide por la suma de tareas.

**Extensiones de la clasificación ALBP:** Se basa en suposiciones que reducen el complejo problema de configuración de línea de carrocerías y montaje de asignar tareas a las estaciones. Se habla por primero vez del balanceo de líneas de carrocerías y montaje donde se requerirá, la observación de una gran variedad de recursos adicionales.

**Tipos de Modelos ALB:** Entra en juego el *Just-in-time (JIT)* para mejora de la eficiencia, donde se implementan las líneas *U-lines*, que son estaciones que trabajan a ambas caras. Sin embargo aumenta la complejidad y entramos así en modelos singulares o individuales, los mixtos y los multi-modelos.

**Modelo individual ALB:** Inicialmente las líneas de fabricación fueron utilizadas para la producción de un alto volumen de un solo modelo. Se aumentan las tecnologías avanzadas de producción con configuraciones automatizadas. Puede ser tratado como una línea de un modelo único.

**Modelo Mixto ALB:** Los tiempos de cada tarea entre modelos podrían reducirse suficientemente para ser ignorados, para que las secuencias de ambos modelos puedan ser montadas en la misma línea.

Esto requiere procesos de producción que sean muy homogéneos, intentando diferenciar en atributos específicos como opciones. La instalación de diferentes opciones normalmente conduce a variaciones en los tiempos de ciclo. En la producción de automóviles, por ejemplo, la instalación de un techo corredizo eléctrico requiere una cantidad diferente de tiempo que el de uno manual. Por lo tanto, los tiempos de cada estación dependerán en gran medida del modelo específico a ser montado. Si se superan los tiempos de ciclo, entonces se producirá una sobrecarga. Estas sobrecargas o exceso de tiempo de ciclo pueden evitarse si se encuentra una secuencia de modelos donde aquellos modelos que causan tiempos elevados en la estación se equilibre con aquellos de menor tiempo en cada estación.

**Multi Modelo ALB:** En la producción de varios modelos, cuando la homogeneidad de las piezas no es posible la producción se organiza en lotes. Esto conduce a un problema de mix de la porción de los lotes y su secuenciación. Especialmente si el tamaño de los lotes es grande, la línea puede llegar a bloquearse debido al equilibrio entre modelos. Si todos los modelos en una línea del multi-modelo se equilibran a la vez, los objetivos de producción para cada modelo deben tenerse en cuenta.

En consecuencia, los tiempos de ciclo varían con cada modelo considerado.

**ALB dependiente línea de control, Línea a ritmo:** Es un sistema de producción que va a ritmo de la fabricación y/o el montaje, un tiempo de ciclo común donde se va regulando con el resto de estaciones. El ritmo se mantiene a través de un dispositivo de manipulación de materiales que avanza continuamente, por ejemplo una cinta transportadora, unas balancinas, etc, que obliga a los operadores a terminar sus operaciones antes de que la pieza haya llegado al final de la estación respectiva.

**ALB línea asíncrona no constante (Unpaced):** En líneas asíncronas las piezas se transfieren cada vez que se hayan completado las operaciones necesarias, en lugar de estar vinculado a un momento dado del tiempo para realizar la tarea en la estación, de hecho todas sus piezas pasan al mismo tiempo (sincrónico). En una estación asíncrona, una pieza de trabajo se mueve siempre tan pronto como se hayan completado todas las operaciones necesarias en una estación y la estación sucesiva no esté bloqueada ya por otra pieza de trabajo. Después de la transferencia, la estación continúa trabajando en una nueva

pieza de trabajo, a menos que la anterior estación sea incapaz de proporcionar el suministro (Starving).

**ALB línea síncrona no constante (Unpaced):** Se trata de líneas donde los movimientos de las piezas son síncronos, las estaciones esperan a la estación más lenta para terminar todas las operaciones antes de que las piezas se transfiera en el mismo punto en el tiempo. Por lo tanto, los buffer intermedios no son necesarios. Si a veces las tareas son deterministas, la línea sincrónica unpaced puede tratarse como un ritmo de la línea con transporte intermitente, el tiempo de ciclo es determinado por la estación más lenta.

**ALB Dependiente de la frecuencia, Primera instalación:** Cuando una línea de producción se instala por primera vez y los recursos no se han comprado aún, las estaciones pueden ser tratadas como entidades abstractas, a las que puede asignar un cierto número de tareas.

Sólo las piezas con todas sus características y variantes ya están determinadas. El proceso de producción todavía no está fijado o no está aun completamente justificado.

**ALB Dependiente de la frecuencia, Reconfiguración:** En la mayoría de los problemas de equilibrio la en la vida real provienen de una reconfiguración en lugar de una primera instalación. Una reconfiguración se hace necesaria cada vez que hay un cambio sustancial en las órdenes de producción.

El tiempo del ciclo se determina a menudo basado en pronósticos de ventas. Como consecuencia, la obtención de una solución viable que observa el número de estaciones y el tiempo de ciclo es suficiente. A menudo, el movimiento de una máquina, no viene limitado por que sea técnicamente imposible, sino más bien asociado a los costos del movimiento, ya que la inversión a realizar puede no justificar el beneficio.

**ALB Nivel de Automatización, Líneas Manuales:** Todavía hay muchos sistemas que dependen total o principalmente del trabajo manual. Líneas manuales son especialmente comunes, donde las piezas son frágiles o si las piezas necesitan ser agarradas con frecuencia. En países donde los salarios son bajos, el trabajo manual también puede ser una alternativa de costo eficiente a la costosa inversión maquinaria automatizada. debido a que el rendimiento de los trabajadores humanos depende de una variedad de factores, como la motivación, ambiente de trabajo o el estrés mental y físico.

**ALB Nivel de Automatización, Líneas Automáticas:** Líneas completamente automatizadas se aplican principalmente donde el ambiente de trabajo es, en cierta forma, hostil a los seres humanos, como por ejemplo en las tiendas y/o almacenes químicos y de pintura de la industria del automóvil, o donde los robots industriales son capaces de realizar las tareas más económicamente y con una precisión más alta (por ejemplo las tareas de procesamiento de metal). La precisión más alta de máquinas típicamente justifica la asunción de tareas deterministas.

***ALB Aplicación Industrial, Industria del Automóvil:*** Por lo general en las líneas de producción de los coches se fabrican con modelos mezclados con una alta proporción de mano de obra.

Especialmente, los trabajos de la industria automovilística a veces están sujetos a acuerdos mutuos entre la parte social (empleados y sindicatos), que suele ocasionar detallados procedimientos y reglamentos basados en métodos de medición de tiempo estandarizado sobre la cantidad exacta de tiempo de un trabajador realizando cualquier tarea. Algunas de las tareas pueden ser incompatibles con un determinado tipo de estación. Como los cambios de posición sólo pueden ser realizados por maquinaria tipo transportadores, robots, manipuladores, la asignación de tales dispositivos se convierte en parte del proceso de equilibrado. Finalmente, en la producción del automóvil algunas de las tareas se llevan a cabo a través de más de una estación.

## **Anexo 2**

**Tabla de modelado estaciones de la  
línea de soldadura.**

		Wu1	Wu2	Wu3	Wu4	Wu5	Wu6
Work station1	Robot motion (Sec)	14	13.26	20.84	22.84	16.52	13.72
	Welding motion (Units)	9	9	6	6	18	18
	Welding task (Units)	9	9	6	6	18	18
	Offset(Sec)	0	11	11	0	0	0
Work station2	Robot motion (Sec)	24.76	21.26	---	---	9.52	11.52
	Welding motion (Units)	9	9	---	---	18	18
	Welding task (Units)	9	9	---	---	18	18
	Offset (Sec)	0	4	---	---	0	0
Work station3	Robot motion (Sec)	---	---	19.56	---	---	---
	Welding motion (Units)	---	---	9	---	---	---
	Welding task (Units)	---	---	9	---	---	---
	Offset (Sec)	---	---	0	---	---	---
Work Station4	Robot motion (Sec)	13.96	16.54	16.54	17.4	---	---
	Welding motion (Units)	14	11	11	10	---	---
	Welding task (Units)	14	11	11	10	---	---
	Offset (Sec)	0	0	0	6	---	---
Work station5	Robot motion (Sec)	16.26	15.12	20.68	21.4	---	---
	Welding motion (Units)	9	8	12	10	---	---
	Welding task (Units)	9	8	12	10	---	---
	Offset (Sec)	0	2	0	0	---	---
Work station 6	Robot motion (Sec)	20.26	11.02	14.12	11.34	---	---
	Welding motion (Units)	9	18	8	6	---	---
	Welding task (Units)	9	18	8	6	---	---
	Offset (Sec)	0	0	0	0	---	---
Work station7	Robot motion (Sec)	11.66	10.10	12.38	8.52	7.52	19.26
	Welding motion (Units)	19	15	17	18	18	9
	Welding task (Units)	19	15	17	18	18	9
	Offset (Sec)	0	0	0	0	0	0
Work station8	Robot motion (Sec)	12.24	13.10	12.38	14.10	13.96	15.68
	Welding motion (Units)	16	15	17	15	14	12
	Welding task (Units)	16	15	17	15	14	12
	Offset (Sec)	0	0	0	0	0	0

## **Anexo 3**

**Tabla de resultados de simulación para  
cada patología.**

	Pathology	Wu 1	Wu 2	Wu 3	Wu 4	Wu 5	Wu 6
Work station 1	1	(33, 1.29)	(32, 1.66)	(33, 2.5)	<b>(35, 3.39)</b>	(33,6.33)	(32,7.07)
	2	<b>(39, 0.98)</b>	(37, 1.93)	(39, 2.37)	(39, 3.24)	(39,6.28)	(39, 7.62)
	3	<b>(51, 1.06)</b>	(51, 1.15)	(51, 1.13)	(50, 1.11)	<b>(50, 1.44)</b>	(50, 1.42)
	4	(39.5, 1.03)	(38, 1.99)	(39, 2.45)	<b>(40, 3.25)</b>	(39, 6.77)	(38, 7.58)
	5	(51, 1.15)	(51, 1.21)	(51, 1.12)	<b>(51, 1.11)</b>	(51, 1.22)	(51, 1.20)
Work station 2	1	(31,6.56)	(31, 6.15)	---	---	(31,6.51)	(30, 6.70)
	2	(36, 7.06)	(35, 6.62)	---	---	(35, 6.98)	(34, 7.16)
	3	(50, 1.39)	(50, 1.35)	---	---	(50, 1.34)	(50, 1.36)
	4	(37, 7.03)	(36, 6.59)	---	---	(36, 6.94)	(35, 7.11)
	5	(50, 1.23)	(50, 1.23)	---	---	(50, 1.21)	(50, 1.19)
Work station 3	1	---	---	(30,6.44)	---	---	---
	2	---	---	(35, 6.89)	---	---	---
	3	---	---	(50, 1.35)	---	---	---
	4	---	---	(36, 6.85)	---	---	---
	5	---	---	<b>(50, 1.17)</b>	---	---	---
Work station 4	1	(30, 6.31)	(29, 6.07)	(29, 5.86)	(29, 5.67)	---	---
	2	(34, 6.75)	(34, 6.49)	(33, 6.29)	(33, 6.05)	---	---
	3	(50, 1.34)	(50, 1.34)	(50, 1.34)	(50, 1.33)	---	---
	4	(35, 6.70)	(35, 6.44)	(35, 6.22)	(34, 6.01)	---	---
	5	(50, 1.17)	(50.5, 1.17)	(51, 1.18)	(51, 1.19)		
Work station 5	1	(29, 5.56)	(30, 5.55)	(29, 5.46)	(29, 5.32)	---	---
	2	(33.5, 5.97)	(34, 5.99)	(33.5, 5.88)	(33, 5.73)	---	---
	3	(50, 1.33)	(50, 1.32)	(51, 1.31)	(51, 1.30)	---	---
	4	(35, 5.93)	(35, 5.96)	(35, 5.86)	(35, 5.71)	---	---
	5	(51, 1.18)	(51, 1.17)	(51, 1.17)	(51, 1.16)		
Work station 6	1	(29, 5.21)	(29,5.46)	(29, 5.50)	(29, 6.07)	---	---
	2	(34, 5.61)	(33, 5.85)	(34, 5.95)	(34, 6.55)	---	---
	3	(51, 1.29)	(51, 1.29)	(51, 1.29)	(51, 1.28)	---	---
	4	(35, 5.60)	(35, 5.86)	(35, 5.97)	(35, 6.55)	---	---
	5	(51, 1.16)	(51, 1.15)	(51, 1.16)	(51, 1.16)		
Work station 7	1	(29, 6.30)	(29, 6.29)	(29, 6.38)	(28,6.46)	(28,6.53)	(28, 6.44)
	2	(34, 12.74)	(27, 11.09)	(25, 10.23)	<b>(24, 9.53)</b>	(24, 8.92)	(25, 8.71)
	3	(51, 1.31)	(51, 1.29)	(51, 1.29)	(51, 1.27)	(51, 1.27)	(51, 1.26)
	4	(35, 6.81)	(35, 6.78)	(34, 6.86)	(34, 6.95)	<b>(34, 7.01)</b>	(34, 6.93)
	5	(51, 1.16)	(51, 1.17)	(51, 1.17)	(51, 1.16)	(51, 1.15)	(51, 1.15)
Work station 8	1	(28,6.45)	(28,6.43)	(27,6.45)	(27, 6.43)	(26, 6.37)	<b>(26, 6.28)</b>
	2	(33, 6.93)	(32, 6.89)	(32, 6.91)	(31, 6.87)	(31, 6.80)	(30.5, 6.70)
	3	(51, 1.26)	(51, 1.25)	(51, 1.25)	(51, 1.24)	(51, 1.23)	(51, 1.23)
	4	(34, 6.93)	(33, 6.89)	(33, 6.92)	(32, 6.88)	(32, 6.80)	(32, 6.71)
	5	(51, 1.15)	(51, 1.15)	(51, 1.14)	<b>(51, 1.15)</b>	(51, 1.14)	(51, 1.14)

## **Anexo 4**

**Minitérminos de la línea de soldadura de la factoría Ford  
Almussafes para cada modelo fabricado.**

		Workstation 1				Workstation 2				Workstation 3				Workstation 4				Workstation 5				Workstation 6				Workstation 7				Workstation 8			
		m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset
Model 1	Wu 1	24,7 6	10	9	0	14	9	9	0	0	0	0	13,9 6	14	14	0	16,2 6	9	9	0	20,2 6	9	9	0	11,6 6	19	19	0	12,2 4	16	16	0	
	Wu 2	21,2 6	10	9	4	13,2 6	9	9	11	0	0	0	16,5 4	11	11	0	15,1 2	8	8	2	11,0 2	18	18	0	10,1	15	15	0	13,1	15	15	0	
	Wu 3	0	0	0	0	20,8 4	6	6	11	19,5 6	9	9	0	16,5 4	11	11	0	20,6 8	12	12	0	14,1 2	8	8	0	12,3 8	17	17	0	12,3 8	17	17	0
	Wu 4	0	0	0	0	22,8 4	6	6	0	0	0	0	0	17,4	10	10	6	21,4	10	10	0	11,3 4	6	6	0	8,52	18	18	0	14,1	15	15	0
	Wu 5	9,52	10	18	0	16,5 2	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7,52	18	18	0	13,9 6	14	14	0	
	Wu 6	11,5 2	10	18	0	13,7 2	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19,2 6	9	9	0	15,6 8	12	12	0	
Model 2	Wu 1	21,3 4	12	12	0	18,7 5	9	9	0	0	0	0	15,7 8	14	14	0	15,9 9	9	9	0	17,8 6	9	9	0	23,7 6	19	19	0	18,8 8	16	16	0	
	Wu 2	18,1 2	12	12	4	17,8 8	9	9	0	0	0	0	14,2 1	11	11	8	15,6 7	8	8	2	25,7 8	18	18	0	15,8 7	15	15	0	16,7 9	15	15	0	
	Wu 3	0	0	0	0	15,4 3	6	6	0	21,4 5	3	3	0	14,4 8	11	11	0	10,6 8	12	12	0	16,9 9	8	8	0	16,0 8	17	17	0	24,3 2	17	17	0
	Wu 4	0	0	0	0	14,8 8	6	6	7	0	0	0	13,2 7	10	10	0	12,6 6	10	10	2	15,5 2	6	6	0	19,8 7	18	18	0	20,8 7	15	15	0	
	Wu 5	22,0 4	12	12	0	24,3 2	18	18	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22,3 2	18	18	0	16,7 9	14	14	0	
	Wu 6	22,5 6	12	12	0	25,6 7	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16,7 6	9	9	0	17,3 2	12	12	0	
Model 3	Wu 1	0	10	10	0	0	9	9	0	0	0	0	0	19	19	0	0	11	11	0	0	17	17	0	0	16	16	0	0	18	18	0	
	Wu 2	0	10	10	0	0	9	9	0	0	0	0	0	19	19	0	0	11	11	0	0	17	17	0	0	13	13	0	0	18	18	0	
	Wu 3	0	0	0	0	0	6	6	0	0	3	3	0	0	9	9	0	0	17	17	0	0	8	8	0	0	16	16	0	0	6	6	0
	Wu 4	0	0	0	0	0	6	6	0	0	0	0	0	0	9	9	0	0	17	17	0	0	6	6	0	0	16	16	0	0	6	6	0
	Wu 5	0	14	14	0	0	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	15	0	0	15	15	0	
	Wu 6	0	15	15	0	0	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	15	0	0	15	15	0	
Model 4	Wu 1	17,7 8	16	16	0	16,4 3	9	9	0	0	0	0	25,3 2	19	19	0	16,8 8	11	11	0	23,8 7	17	17	0	17,9 8	15	15	0	26,8 7	18	18	0	
	Wu 2	19,9 9	17	17	0	17,2 4	9	9	1	0	0	0	26,8 8	19	19	0	19,5 4	11	11	0	22,9 9	17	17	0	15,3 3	15	15	0	25,3 2	18	18	0	
	Wu 3	0	0	0	0	16,4 4	6	6	0	18,5 2	3	3	0	21,0 9	9	9	0	24,7 6	17	17	0	15,9 9	6	6	0	19,9 9	16	16	0	18,9	6	6	0
	Wu 4	0	0	0	0	17,3 2	6	6	2	0	0	0	19,5 4	9	9	2	28,3 2	17	17	3	13,3 2	4	4	4	21,3 2	16	16	0	17,1 1	6	6	0	
	Wu 5	17,4 4	16	16	0	21,7 7	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19,2 1	15	15	0	24,4 3	15	15	0	
	Wu 6	13,8 8	17	17	0	24,9 9	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18,9 2	15	15	0	25,4 4	15	15	0	

		Workstation 1				Workstation 2				Workstation 3				Workstation 4				Workstation 5				Workstation 6				Workstation 7				Workstation 8										
		m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset							
Model 5	Wu 1	23,8	11	11	0	16,8	9	9	0	0	0	0	27,5	19	19	0	17,3	11	11	0	27,8	17	17	0	26,7	16	16	0	27,8	18	18	0								
	Wu 2	26,7	11	11	4	17,9	9	9	2	0	0	0	28,6	19	19	0	17,9	11	11	0	26,5	17	17	0	21	13	13	0	29,0	18	18	0								
	Wu 3	0	0	0	0	14,3	6	6	0	16,8	8	3	3	0	17,8	9	9	0	26,8	17	17	0	17,9	8	6	6	0	23,3	16	16	0	23,7	6	6	0					
	Wu 4	0	0	0	0	19,9	10	10	1	0	0	0	0	18,9	9	9	1	26,2	17	17	0	15,3	2	4	4	3	21,6	16	16	0	21,9	8	6	6	0					
	Wu 5	25	11	11	0	23,8	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24,5	15	15	0	26,5	4	15	15	0							
	Wu 6	24,2	11	11	0	28,5	4	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23,0	15	15	0	26,8	9	15	15	0							
Model 6	Wu 1	23,9	13	13	0	18,9	9	9	0	0	0	0	27,8	19	19	0	17,8	11	11	0	28,2	3	18	18	0	26,7	15	15	0	27,5	4	18	18	0						
	Wu 2	21,7	13	13	1	22,8	7	9	9	0	0	0	0	26,7	6	19	19	0	16,9	8	11	11	0	23,9	8	16	16	0	25,7	6	15	15	0	26,5	5	18	18	0		
	Wu 3	0	0	0	0	14,5	4	6	6	4	17,0	3	3	0	17,6	5	10	10	0	31,6	5	24	24	0	15,4	5	6	6	0	22,3	2	16	16	0	14,8	7	6	6	0	
	Wu 4	0	0	0	0	21,7	10	10	0	0	0	0	0	18,9	9	10	10	2	24,8	7	17	17	2	13,7	7	4	4	1	21,9	8	15	15	0	17,5	4	10	10	0		
	Wu 5	23,3	13	13	0	27,9	8	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20,0	9	16	16	0	18,8	8	15	15	0						
	Wu 6	22,8	13	13	0	26,7	6	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18,8	7	14	14	0	18,8	7	15	15	0						
Model 7	Wu 1	16,7	11	11	0	12,3	3	9	9	0	0	0	28,3	8	19	19	0	20,3	2	11	11	0	27,7	4	18	18	0	26,2	4	15	15	0	27,7	9	18	18	0			
	Wu 2	15,6	11	11	0	13,4	3	9	9	11	0	0	0	30,0	3	19	19	0	21,1	8	11	11	2	26,1	8	16	16	0	26,3	4	15	15	0	27,8	9	18	18	0		
	Wu 3	0	0	0	0	11,6	5	6	6	11	17,4	1	3	3	0	20,0	8	10	10	0	35,0	1	24	24	0	17,0	5	8	8	0	26,8	5	16	16	0	15,1	2	6	6	0
	Wu 4	0	0	0	0	10,7	6	6	6	0	0	0	0	21,4	9	10	10	6	28,6	4	17	17	0	14,4	8	6	6	0	26,5	4	15	15	0	20,3	3	10	10	0		
	Wu 5	15,8	11	11	0	24,3	2	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26,8	9	16	16	0	27,0	4	15	15	0						
	Wu 6	15,3	11	11	0	23,6	7	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26,7	7	16	16	0	27,1	4	15	15	0						
Model 8	Wu 1	15,8	13	13	0	12,5	4	9	9	0	0	0	28,0	4	19	19	0	21,3	8	11	11	0	29,2	9	17	17	0	26,5	4	15	15	0	28,7	9	18	18	0			
	Wu 2	16,7	13	13	0	14,3	3	9	9	8	0	0	0	27,3	5	19	19	0	20,0	9	11	11	0	29,1	7	17	17	0	26,7	4	15	15	0	28,4	9	18	18	0		
	Wu 3	0	0	0	0	11,2	3	6	6	0	16,7	3	3	0	16,7	9	9	9	0	27,7	7	17	17	6	17,2	5	8	8	6	28,3	1	16	16	0	20,4	3	10	10	0	
	Wu 4	0	0	0	0	12,6	5	6	6	7	0	0	0	19,0	7	9	9	0	28,8	6	17	17	0	14,6	5	6	6	0	28,5	1	16	16	0	18,4	5	9	9	0		
	Wu 5	17,8	13	13	2	26,5	4	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25,9	8	15	15	0	26,3	4	15	15	0						
	Wu 6	18,9	13	13	0	27,4	3	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26,1	7	15	15	0	26,4	4	15	15	0						

		Workstation 1				Workstation 2				Workstation 3				Workstation 4				Workstation 5				Workstation 6				Workstation 7				Workstation 8			
		m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset
Model 9	Wu 1	14,6 7	11	11	0	13,2 1	9	9	0	0	0	0	30,1 5	19	19	0	21,3 3	11	11	0	28,2 5	17	17	0	28,3 2	16	16	0	28,7 1	18	18	0	
	Wu 2	13,5 5	11	11	7	12,4 3	9	9	8	0	0	0	31,1 1	19	19	0	20,4 6	11	11	0	28,3 5	17	17	0	24,9 5	13	13	0	28,6 9	18	18	0	
	Wu 3	0	0	0	0	11,6 5	6	6	0	15,9 9	3	3	0	17,2 2	9	9	0	28,3 9	17	17	0	16,8 3	8	8	0	27,1 1	16	16	0	20,4 4	10	10	0
	Wu 4	0	0	0	0	10,7 6	6	6	7	0	0	0	18,7 7	9	9	6	27,6 2	17	17	6	15,7 9	6	6	6	27,1 3	16	16	0	19,1 9	9	9	0	
	Wu 5	14,1 1	11	11	0	23,6 7	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26,9 3	15	15	0	26,3 4	15	15	0	
	Wu 6	15,7 8	11	11	0	25,4 3	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26,8 1	15	15	0	26,8 4	15	15	0	
Model 10	Wu 1	16,8 7	13	13	0	16,2	9	9	0	0	0	0	31,1 4	19	19	0	19,8	11	11	0	27,6 6	17	17	0	26,7 4	15	15	0	28,8 2	18	18	0	
	Wu 2	16,9 9	13	13	0	18,3 3	9	9	8	0	0	0	31,0 2	19	19	0	21,3 3	11	11	0	28,1 6	17	17	0	26,3 5	15	15	0	28,6 3	18	18	0	
	Wu 3	0	0	0	0	11,1	6	6	0	14,0 6	3	3	0	17,2 8	9	9	0	28,3 9	17	17	0	13,1 3	6	6	0	27,3 1	16	16	0	20,5 1	10	10	0
	Wu 4	0	0	0	0	12,8 4	6	6	7	0	0	0	20,8 8	9	9	6	30,0 7	17	17	6	11,1 2	4	4	6	27,1 8	16	16	0	19,3 1	9	9	0	
	Wu 5	19,0 9	17	17	0	27,5 1	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26,8 7	15	15	0	26,1 4	15	15	0	
	Wu 6	20,2 1	17	17	0	28,6 3	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26,4 7	15	15	0	26,2 4	15	15	0	
Model 11	Wu 1	16,8 9	15	15	0	17,3 2	9	9	0	0	0	0	31,0 6	19	19	0	20,4 5	11	11	0	28,0 5	17	17	0	27,8 8	16	16	0	28,3 4	18	18	0	
	Wu 2	15,9 9	15	15	0	18,1 1	9	9	8	0	0	0	28,7 7	19	19	0	19,8 3	11	11	0	28,7 5	17	17	0	23,2 3	13	13	0	28,6 4	18	18	0	
	Wu 3	0	0	0	0	15,6 6	6	6	0	15,7 9	3	3	0	16,1 4	9	9	0	28,9 1	17	17	0	15,0 9	6	6	0	27,9 8	16	16	0	20,6 3	10	10	0
	Wu 4	0	0	0	0	14,7 2	6	6	7	0	0	0	18,3 4	9	9	6	28,3 3	17	17	6	11,8 5	4	4	6	27,7 6	16	16	0	18,9 6	9	9	0	
	Wu 5	18,9 7	15	15	4	28,3 2	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26,0 1	15	15	0	26,8 1	15	15	0	
	Wu 6	18,9	15	15	0	27,9 3	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26,1 2	15	15	0	26,7 1	15	15	0	
Model 12	Wu 1	16,3 8	17	17	0	19,2 2	9	9	0	0	0	0	28,0 3	19	19	0	22,3 9	11	11	0	28,4 4	17	17	0	26,3 4	15	15	0	29,3 9	18	18	0	
	Wu 2	18,8 8	17	17	6	18,8 8	9	9	11	0	0	0	28,8 4	19	19	0	19,7 2	11	11	2	28,9 4	17	17	0	26,8 4	15	15	0	29,1 9	18	18	0	
	Wu 3	0	0	0	0	14,8 2	6	6	11	12,8 4	3	3	0	18,2 3	9	9	0	28,6 8	17	17	0	19,1 8	8	8	0	28,6 6	16	16	0	20,9 3	10	10	0
	Wu 4	0	0	0	0	16,0 3	6	6	0	0	0	0	21,1 2	9	9	6	27,3 5	17	17	0	15,2 3	6	6	0	28,4 6	16	16	0	18,8 8	9	9	0	
	Wu 5	21,9 9	17	17	0	28,2 5	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26,2 8	15	15	0	26,1 7	15	15	0	
	Wu 6	20,4 4	17	17	0	29,1 2	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,1 4	15	15	0	26,3 7	15	15	0	

		Workstation 1				Workstation 2				Workstation 3				Workstation 4				Workstation 5				Workstation 6				Workstation 7				Workstation 8			
		m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset
Model 13	Wu 1	15,7 7	15	15	0	19,5 5	9	9	0	0	0	0	27,2 6	19	19	0	20,2 5	11	11	0	28,6 8	17	17	0	27,1 6	15	15	0	28,7 6	18	18	0	
	Wu 2	14,9 9	15	15	8	18,7 7	9	9	8	0	0	0	28,1 1	19	19	0	18,7 9	11	11	0	28,6 4	17	17	0	26,1 9	15	15	0	28,6 7	18	18	0	
	Wu 3	0	0	0	0	14,6 8	6	6	0	14,2 4	3	3	0	19,3 8	9	9	0	28,2 8	17	17	0	15,6 3	6	6	0	27,8 9	16	16	0	20,1 4	10	10	0
	Wu 4	0	0	0	0	15,2 2	6	6	7	0	0	0	0	20,5 5	9	9	6	28,1 6	17	17	6	11,2 5	4	4	6	27,8 4	16	16	0	20,6 3	9	9	0
	Wu 5	17,3 3	15	15	0	27,2 1	16	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26,9 3	15	15	0	26,9 4	15	15	0	
	Wu 6	16,7 7	15	15	0	26,4 1	16	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26,3 9	15	15	0	26,8 7	15	15	0	
Model 14	Wu 1	16,8 8	17	17	0	18,5 5	9	9	0	0	0	0	29,7 1	19	19	0	20,6 1	11	11	0	28,8 4	17	17	0	26,2 6	15	15	0	29,2 8	18	18	0	
	Wu 2	17,9 8	17	17	2	17,9 8	9	9	8	0	0	0	30,7 6	19	19	0	21,8 3	11	11	1	28,8 17	17	17	0	26,0 7	15	15	0	29,1 3	18	18	0	
	Wu 3	0	0	0	0	14,2 2	6	6	0	13,6 7	3	3	0	19,3 9	9	9	0	27,6 4	17	17	0	18,3 4	8	8	0	28,2 4	16	16	0	20,1 6	10	10	0
	Wu 4	0	0	0	0	15,6 7	6	6	7	0	0	0	0	20,2 1	9	9	6	29,1 9	17	17	6	14,4 4	6	6	6	26,8 5	16	16	0	19,8 4	9	9	0
	Wu 5	18,8 7	17	17	0	27,1 1	16	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,1 6	15	15	0	26,8 8	15	15	0	
	Wu 6	20,2 3	17	17	0	26,4 7	16	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,1 1	15	15	0	26,6 8	15	15	0	
Model 15	Wu 1	14,3 4	15	15	0	18,3 3	9	9	0	0	0	0	28,6 6	19	19	0	23,5 5	11	11	0	28,1 4	17	17	0	26,1 2	15	15	0	28,4 4	18	18	0	
	Wu 2	14,8 7	15	15	2	19,6 1	9	9	8	0	0	0	27,9 6	19	19	0	24,0 2	11	11	0	28,8 4	17	17	0	26,2 9	15	15	0	28,8 8	18	18	0	
	Wu 3	0	0	0	0	17,7 2	9	9	0	16,2 3	3	3	0	19,1 8	9	9	0	28,0 3	17	17	0	15,4 4	6	6	0	26,3 1	16	16	0	20,1 5	10	10	0
	Wu 4	0	0	0	0	20,2 2	10	10	7	0	0	0	0	18,6 6	9	9	6	29,2 8	17	17	6	12,1 6	4	4	6	26,3 8	16	16	0	19,1 1	9	9	0
	Wu 5	14,3 4	11	11	0	28,3 3	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26,5 9	15	15	0	26,2 6	15	15	0	
	Wu 6	13,3 3	11	11	0	27,8 4	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26,6 9	15	15	0	26,1 6	15	15	0	
Model 16	Wu 1	14,7 7	13	13	0	19,3 7	9	9	0	0	0	0	28,3 2	18	18	0	21,1 4	11	11	0	28,4 5	17	17	0	27,0 8	15	15	0	28,1 4	18	18	0	
	Wu 2	13,9 8	13	13	7	19,4 8	9	9	8	0	0	0	29,8 9	19	19	0	22,2 1	11	11	0	28,6 5	17	17	0	27,1 3	15	15	0	28,1 8	18	18	0	
	Wu 3	0	0	0	0	18,7 4	9	9	0	14,3 9	3	3	0	20,1 5	10	10	0	33,8 1	24	24	0	18,2 8	8	8	0	26,9 1	15	15	0	20,5 3	10	10	0
	Wu 4	0	0	0	0	20,5 9	10	10	7	0	0	0	0	20,6 2	10	10	6	28,0 1	17	17	6	15,0 3	6	6	6	26,0 4	15	15	0	20,2 6	10	10	0
	Wu 5	17,5 4	13	13	0	28,0 6	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,9 3	16	16	0	26,2 2	15	15	0	
	Wu 6	16,8 9	13	13	0	28,6 6	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,8 3	16	16	0	26,3 2	15	15	0	

		Workstation 1				Workstation 2				Workstation 3				Workstation 4				Workstation 5				Workstation 6				Workstation 7				Workstation 8											
		m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset								
Model 17	Wu 1	14,8	7	11	11	0	17,6	8	9	9	0	0	0	0	0	0	29,6	2	18	18	0	21,0	9	11	11	0	28,5	9	17	17	0	28,0	3	16	16	0	29,5	1	18	18	0
	Wu 2	16,4	4	11	11	6	17,4	8	9	9	11	0	0	0	0	0	30,1	2	19	19	0	22,4	1	11	11	2	28,7	9	17	17	0	24,9	2	13	13	0	29,4	1	18	18	0
	Wu 3	0	0	0	0	0	16,8	8	9	9	11	16,7	5	3	3	0	20,5	3	10	10	0	35,1	6	24	24	0	18,4	4	8	8	0	26,0	3	15	15	0	20,3	3	10	10	0
	Wu 4	0	0	0	0	0	20,4	2	10	10	0	0	0	0	0	0	19,5	8	10	10	6	28,7	9	17	17	0	15,2	2	6	6	0	26,8	9	15	15	0	20,4	3	10	10	0
	Wu 5	15,3	3	11	11	5	27,9	7	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,8	4	16	16	0	26,8	9	15	15	0
	Wu 6	14,8	9	11	11	0	28,5	5	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,7	1	16	16	0	26,7	4	15	15	0	
Model 18	Wu 1	16,6	6	13	13	0	19,6	3	9	9	0	0	0	0	0	0	28,2	4	18	18	0	21,7	8	11	11	0	28,2	3	17	17	0	26,2	6	15	15	0	28,8	4	18	18	0
	Wu 2	15,7	8	13	13	9	17,3	4	9	9	8	0	0	0	0	0	29,8	8	19	19	0	19,8	3	11	11	0	28,4	3	17	17	0	26,2	9	15	15	0	28,7	4	18	18	0
	Wu 3	0	0	0	0	0	18,1	1	9	9	0	17,1	1	3	3	0	20,2	6	10	10	0	35,0	2	24	24	0	16,9	5	6	6	0	26,3	4	15	15	0	20,1	2	10	10	0
	Wu 4	0	0	0	0	0	20,1	5	10	10	7	0	0	0	0	0	21,4	4	10	10	6	28,3	9	17	17	6	13,4	6	4	4	6	26,9	7	15	15	0	20,6	8	10	10	0
	Wu 5	14,9	8	12	12	0	27,9	2	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,3	2	16	16	0	26,8	2	15	15	0	
	Wu 6	15,9	8	13	13	0	28,1	4	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25,0	9	14	14	0	26,4	7	15	15	0		
Model 19	Wu 1	12,9	8	10	10	0	19,6	6	9	9	0	0	0	0	0	0	28,3	1	18	18	0	21,3	4	11	11	0	28,0	1	17	17	0	26,9	6	16	16	0	28,6	1	18	18	0
	Wu 2	13,3	2	11	11	5	18,7	4	9	9	8	0	0	0	0	0	28,7	5	19	19	0	22,8	9	11	11	0	28,1	3	17	17	0	24,6	6	13	13	0	28,5	1	18	18	0
	Wu 3	0	0	0	0	0	16,3	8	9	9	0	15,7	4	3	3	0	20,8	7	10	10	0	34,6	1	24	24	0	14,2	4	6	6	0	26,2	1	15	15	0	20,5	3	10	10	0
	Wu 4	0	0	0	0	0	20,7	3	10	10	7	0	0	0	0	0	19,6	4	10	10	6	29,1	8	17	17	6	11,8	9	4	4	6	26,2	3	15	15	0	20,5	5	10	10	0
	Wu 5	13,9	9	15	15	0	28,7	7	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,8	1	16	16	0	26,9	6	15	15	0		
	Wu 6	14,0	9	15	15	0	27,3	5	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25,0	7	14	14	0	26,4	1	15	15	0			
Model 20	Wu 1	18,7	7	17	17	0	17,2	8	9	9	0	0	0	0	0	0	28,3	9	18	18	0	22,6	3	11	11	0	28,3	1	17	17	0	26,1	8	15	15	0	28,4	6	18	18	0
	Wu 2	19,5	4	17	17	2	18,3	8	9	9	8	0	0	0	0	0	29,6	8	19	19	0	22,7	8	11	11	0	28,2	1	17	17	0	26,2	8	15	15	0	28,2	7	18	18	0
	Wu 3	0	0	0	0	0	19,5	2	9	9	0	16,2	3	3	3	0	20,3	5	10	10	0	33,0	8	24	24	0	15,6	3	6	6	0	26,3	8	15	15	0	20,2	6	10	10	0
	Wu 4	0	0	0	0	0	20,6	5	10	10	7	0	0	0	0	0	21,4	2	10	10	6	28,2	3	17	17	6	13,0	1	4	4	6	26,4	8	15	15	0	19,9	5	10	10	0
	Wu 5	21,5	4	17	17	0	29,2	2	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,9	1	16	16	0	26,0	9	15	15	0		
	Wu 6	22,5	4	17	17	0	28,0	6	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24,4	2	14	14	0	26,1	9	15	15	0			

		Workstation 1				Workstation 2				Workstation 3				Workstation 4				Workstation 5				Workstation 6				Workstation 7				Workstation 8			
		m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset
Model 21	Wu 1	16,5 4	15	15	0	16,4 4	9	9	0	0	0	0	29,0 6	18	18	0	23,4 5	11	11	0	28,1 3	17	17	0	26,7 3	15	15	0	28,2 3	18	18	0	
	Wu 2	15,6 5	15	15	2	17,6 1	9	9	8	0	0	0	29,8 9	19	19	0	23,1 8	11	11	0	28,0 7	17	17	0	26,7 5	15	15	0	28,3 3	18	18	0	
	Wu 3	0	0	0	0	18,9 9	9	9	0	18,3 9	3	3	0	21,8 6	10	10	0	34,7 7	24	24	0	18,2 5	8	8	0	26,8 5	15	15	0	20,1 8	10	10	0
	Wu 4	0	0	0	0	20,3 2	10	10	7	0	0	0	19,4 6	10	10	6	28,4 1	17	17	6	16,8 9	6	6	6	27,1 7	15	15	0	21,1 3	10	10	0	
	Wu 5	15,4 3	15	15	0	29,1 1	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28,4 2	16	16	0	26,0 7	15	15	0	
	Wu 6	14,8 9	15	15	0	28,7 6	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28,4 7	16	16	0	26,5 6	15	15	0	
Model 22	Wu 1	23,2 1	17	17	0	19,8 8	9	9	0	0	0	0	27,3 9	18	18	0	19,5 5	11	11	0	28,4 8	17	17	0	26,1 2	15	15	0	28,4 4	18	18	0	
	Wu 2	16,9 9	17	17	2	18,1 9	9	9	11	0	0	0	30,1 4	19	19	0	22,8 7	11	11	2	28,4 3	17	17	0	26,1 5	15	15	0	28,4 1	18	18	0	
	Wu 3	0	0	0	0	20,3 1	9	9	11	16,2 5	3	3	0	20,7 6	10	10	0	34,8 9	24	24	0	18,1 8	8	8	0	26,1 7	15	15	0	19,7 5	10	10	0
	Wu 4	0	0	0	0	21,3 5	10	10	0	0	0	0	21,2 2	10	10	6	27,7 9	17	17	0	16,1 6	6	6	0	26,2 8	15	15	0	19,8 5	10	10	0	
	Wu 5	20,9 8	17	17	0	29,5 4	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,9 7	16	16	0	26,2 8	15	15	0	
	Wu 6	21,5 6	17	17	0	28,3 4	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,7 6	16	16	0	26,3 8	15	15	0	
Model 23	Wu 1	14,9 9	15	15	0	21,2 8	9	9	0	0	0	0	29,3 18	18	18	0	20,0 2	11	11	0	28,5 9	17	17	0	26,9 1	15	15	0	29,0 7	18	18	0	
	Wu 2	14,9 8	15	15	8	18,9 8	9	9	8	0	0	0	29,6 9	19	19	0	21,3 9	11	11	0	28,6 9	17	17	0	26,9 2	15	15	0	29,1 7	18	18	0	
	Wu 3	0	0	0	0	15,8 9	6	6	0	15,8 9	3	3	0	20,1 5	10	10	0	34,7 7	24	24	0	15,4 2	6	6	0	25,9 7	15	15	0	20,7 9	10	10	0
	Wu 4	0	0	0	0	14,1 6	6	6	7	0	0	0	21,1 8	10	10	6	28,1 2	17	17	6	12,8 1	4	4	6	26,0 7	15	15	0	20,9 7	10	10	0	
	Wu 5	15,5 4	15	15	0	27,3 1	16	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28,0 9	16	16	0	26,2 7	15	15	0	
	Wu 6	15,8 7	15	15	0	26,1 4	16	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24,9 1	14	14	0	26,3 9	15	15	0	
Model 24	Wu 1	16,3 8	17	17	0	20,8 7	9	9	0	0	0	0	31,1 7	19	19	0	20,6 7	11	11	0	28,1 3	17	17	0	25,9 9	15	15	0	28,1 8	18	18	0	
	Wu 2	17,8 9	17	17	2	21,5 5	9	9	8	0	0	0	28,3 6	18	18	0	20,9 7	11	11	0	28,3 9	17	17	0	26,1	15	15	0	28,1 2	18	18	0	
	Wu 3	0	0	0	0	15,3 1	6	6	0	14,3 2	3	3	0	24,8 5	13	13	0	28,1 6	17	17	0	17,3 5	8	8	0	26,2 2	15	15	0	26,2 1	15	15	0
	Wu 4	0	0	0	0	14,8 3	6	6	7	0	0	0	24,7 7	13	13	6	29,3 2	17	17	6	15,9 8	6	6	6	26,3 3	15	15	0	26,8 4	15	15	0	
	Wu 5	21,8 9	17	17	2	27,8 8	16	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,4 4	16	16	0	26,3 3	15	15	0	
	Wu 6	21,3 4	17	17	0	26,1 8	16	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,5 9	16	16	0	26,1 4	15	15	0	

		Workstation 1				Workstation 2				Workstation 3				Workstation 4				Workstation 5				Workstation 6				Workstation 7				Workstation 8			
		m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset
Model 25	Wu 1	16,7 6	15	15	0	19,5 4	9	9	0	0	0	0	28,7 9	19	19	0	19,7 8	11	11	0	27,7 7	17	17	0	27,8 6	16	16	0	28,1 5	18	18	0	
	Wu 2	17,8 7	15	15	6	19,3 1	9	9	8	0	0	0	27,7 5	18	18	0	20,0 9	11	11	0	27,9 7	17	17	0	24,9 1	13	13	0	28,1 7	18	18	0	
	Wu 3	0	0	0	0	15,7 8	6	6	0	17,6 1	3	3	0	24,1 5	13	13	0	28,5 4	17	17	0	18,2 6	8	8	0	27,1 3	15	15	0	26,9 8	15	15	0
	Wu 4	0	0	0	0	15,6 9	6	6	7	0	0	0	0	24,8 5	13	13	6	28,9 4	17	17	6	15,1 1	6	6	6	27,0 8	15	15	0	26,9 1	15	15	0
	Wu 5	16,7 6	15	15	0	27,6 2	16	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28,2 4	16	16	0	26,1 4	15	15	0	
	Wu 6	17,8 7	15	15	0	26,8 7	16	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28,1 8	16	16	0	26,1 8	15	15	0	
Model 26	Wu 1	21,3 2	17	17	0	19,3 8	9	9	0	0	0	0	29,5 9	19	19	0	20,6 3	11	11	0	28,3 6	17	17	0	26,2 6	15	15	0	28,1 2	18	18	0	
	Wu 2	23,3 3	17	17	2	18,7 9	9	9	8	0	0	0	31,1 2	19	19	0	20,0 4	11	11	0	28,4 9	17	17	0	27,0 5	15	15	0	28,4 3	18	18	0	
	Wu 3	0	0	0	0	15,7 7	6	6	0	16,2 1	3	3	0	18,4 6	9	9	0	28,9 4	17	17	0	19,0 9	8	8	0	27,2 2	15	15	0	20,2 1	10	10	0
	Wu 4	0	0	0	0	15,4 6	6	6	7	0	0	0	0	18,3 7	9	9	6	29,4 4	17	17	6	16,8 9	6	6	6	26,9 8	15	15	0	19,5 5	9	9	0
	Wu 5	22,3 2	17	17	0	26,1 1	16	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,5 6	16	16	0	26,9 7	15	15	0	
	Wu 6	21,9 8	17	17	0	28,8 9	16	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28,1 1	14	14	0	26,8 7	15	15	0	
Model 27	Wu 1	14,5 4	15	15	0	19,7 7	9	9	0	0	0	0	29,8 6	19	19	0	21,2 6	11	11	0	28,1 4	17	17	0	27,6 6	16	16	0	28,8 8	18	18	0	
	Wu 2	16,5 4	15	15	8	18,6 3	9	9	11	0	0	0	28,8 5	19	19	0	21,8 6	11	11	2	28,2 9	17	17	0	24,2 4	13	13	0	28,9 8	18	18	0	
	Wu 3	0	0	0	0	15,7 3	6	6	11	17,2 2	3	3	0	19,0 6	9	9	0	28,0 5	17	17	0	18,2 6	8	8	0	26,2 4	15	15	0	20,3 7	10	10	0
	Wu 4	0	0	0	0	13,9 8	6	6	0	0	0	0	20,5 1	9	9	6	29,0 6	17	17	0	14,1 4	6	6	0	26,3 1	15	15	0	18,4 9	9	9	0	
	Wu 5	17,6 5	15	15	0	28,6 5	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,9 1	16	16	0	26,1 6	15	15	0	
	Wu 6	17,8 9	15	15	0	27,3 9	16	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24,9 1	14	14	0	26,6 4	15	15	0	
Model 28	Wu 1	21,3 2	17	17	0	18,1 2	9	9	0	0	0	0	29,0 7	19	19	0	23,1 5	11	11	0	26,1 4	18	18	0	26,6 1	15	15	0	28,3 1	18	18	0	
	Wu 2	22,9 8	17	17	8	19,7 4	9	9	8	0	0	0	28,0 9	18	18	0	22,8 5	11	11	0	26,2 4	16	16	0	26,5 1	15	15	0	28,7 1	18	18	0	
	Wu 3	0	0	0	0	15,7 7	6	6	0	15,3 9	3	3	0	24,1 4	13	13	0	28,9 8	17	17	0	18,1 8	8	8	0	26,3 1	15	15	0	26,5 5	15	15	0
	Wu 4	0	0	0	0	13,8 2	6	6	7	0	0	0	0	24,1 6	13	13	6	28,8 9	17	17	6	14,6 4	6	6	6	26,2 8	15	15	0	26,5 7	15	15	0
	Wu 5	17,9 8	17	17	0	28,3 3	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,3 4	16	16	0	26,5 9	15	15	0	
	Wu 6	18,9 9	17	17	0	28,4 6	16	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25,1 4	14	14	0	26,6 1	15	15	0	

		Workstation 1				Workstation 2				Workstation 3				Workstation 4				Workstation 5				Workstation 6				Workstation 7				Workstation 8			
		m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset
Model 29	Wu 1	15,8 8	15	15	0	15,9 1	9	9	0	0	0	0	0	28,6 4	19	19	0	20,8 0	11	11	0	28,5 8	18	18	0	26,1 9	15	15	0	28,0 8	18	18	0
	Wu 2	14,8 8	15	15	8	16,4 8	9	9	8	0	0	0	0	27,6 4	18	18	0	20,6 8	11	11	0	26,1 6	16	16	0	26,2 9	15	15	0	28,7 8	18	18	0
	Wu 3	0	0	0	0	20,1 3	10	10	0	14,6 6	3	3	0	24,7 7	13	13	0	28,3 5	17	17	0	13,1 3	6	6	0	26,3 8	15	15	0	26,7 4	15	15	0
	Wu 4	0	0	0	0	21,2 5	10	10	7	0	0	0	0	24,8 8	13	13	6	28,5 3	17	17	6	12,0 5	4	4	6	26,9 8	15	15	0	26,3 8	15	15	0
	Wu 5	27,9 8	26	26	0	29,1 1	19	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28,0 9	16	16	0	26,1 4	15	15	0
	Wu 6	29,7 6	26	26	0	28,8 3	19	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28,8 8	16	16	0	26,7 3	15	15	0
Model 30	Wu 1	32,7 6	33	33	0	20,8 4	9	9	0	0	0	0	0	27,1 3	16	16	0	29,8 9	11	11	0	28,0 1	17	17	0	27,2 2	15	15	0	28,6 4	18	18	0
	Wu 2	34,3 2	33	33	8	19,3 8	9	9	8	0	0	0	0	26,9 3	16	16	0	20,3 4	11	11	0	28,5 2	17	17	0	26,9 2	15	15	0	28,5 4	18	18	0
	Wu 3	0	0	0	0	20,9 8	10	10	0	16,8 9	3	3	0	25,1 1	14	14	0	34,6 1	24	24	0	18,9 5	8	8	0	26,3 8	15	15	0	26,1 4	15	15	0
	Wu 4	0	0	0	0	20,6 6	10	10	7	0	0	0	0	25,2 5	14	14	6	28,2 8	17	17	6	15,2 9	6	6	6	26,6 8	15	15	0	26,7 1	15	15	0
	Wu 5	33,8 7	33	33	0	32,0 7	19	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26,9 9	16	16	0	26,6 8	15	15	0
	Wu 6	34,8 7	33	33	0	31,0 9	19	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,1 5	16	16	0	26,2 6	15	15	0
Model 31	Wu 1	16,6 5	15	15	0	19,7 6	10	10	0	0	0	0	0	27,0 3	16	16	0	20,6 6	11	11	0	28,7 4	17	17	0	26,5 1	15	15	0	29,5 5	18	18	0
	Wu 2	14,4 4	15	15	8	20,3 3	10	10	8	0	0	0	0	26,9 3	16	16	0	20,8 6	11	11	0	28,7 9	17	17	0	26,3 9	15	15	0	29,5 4	18	18	0
	Wu 3	0	0	0	0	21,0 7	10	10	0	17,0 2	3	3	0	24,1 3	14	14	0	34,7 1	24	24	0	18,7 2	8	8	0	26,4 4	15	15	0	26,6 7	15	15	0
	Wu 4	0	0	0	0	29,8 4	10	10	7	0	0	0	0	24,3 1	14	14	6	28,1 4	17	17	6	14,2 9	6	6	6	26,4 8	15	15	0	26,6 3	15	15	0
	Wu 5	16,7 6	15	15	0	30,6 5	19	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28,5 1	16	16	0	26,6 1	15	15	0
	Wu 6	17,6 5	15	15	0	28,7 2	19	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24,2 2	14	14	0	26,5 9	15	15	0
Model 32	Wu 1	17,8 8	17	17	0	21,9 2	9	9	0	0	0	0	0	27,8 6	17	17	0	20,2 2	11	11	0	28,3 4	17	17	0	26,8 4	16	16	0	28,3 3	18	18	0
	Wu 2	15,9 9	17	17	3	20,7 9	9	9	11	0	0	0	0	27,6 8	17	17	0	20,2 5	11	11	2	28,6 6	17	17	0	26,4 1	16	16	0	28,3 8	18	18	0
	Wu 3	0	0	0	0	20,8 2	10	10	11	16,7 7	3	3	0	25,7 1	14	14	0	34,7 9	24	24	0	22,9 5	13	13	0	26,7 9	16	16	0	26,1 5	15	15	0
	Wu 4	0	0	0	0	21,4 4	10	10	0	0	0	0	0	25,1 7	14	14	6	28,2 9	17	17	0	18,2 8	10	10	0	26,1 3	16	16	0	26,1 8	15	15	0
	Wu 5	14,9 8	12	12	0	30,8 5	19	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26,7 3	15	15	0	26,9 1	15	15	0
	Wu 6	14,4 4	14	14	0	28,5 5	19	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26,8 1	15	15	0	26,1 2	15	15	0

		Workstation 1				Workstation 2				Workstation 3				Workstation 4				Workstation 5				Workstation 6				Workstation 7				Workstation 8			
		m-lem 1	m-lem 2	m-lem 3	Offset	m-lem 1	m-lem 2	m-lem 3	Offset	m-lem 1	m-lem 2	m-lem 3	Offset	m-lem 1	m-lem 2	m-lem 1	Offset	m-lem 1	m-lem 2	m-lem 3	Offset	m-lem 1	m-lem 2	m-lem 3	Offset	m-lem 1	m-lem 2	m-lem 3	Offset	m-lem 1	m-lem 2	m-lem 3	Offset
Model 33	Wu 1	9,87	10	10	0	19,83	10	10	0	0	0	0	27,09	16	16	0	21,19	11	11	0	27,35	17	17	0	28,67	17	17	0	28,64	18	18	0	
	Wu 2	12,11	11	11	2	20,04	10	10	8	0	0	0	27,19	16	16	0	21,39	11	11	0	27,45	17	17	0	24,83	14	14	0	28,12	18	18	0	
	Wu 3	0	0	0	0	21,16	10	10	0	15,07	3	3	0	26,42	14	14	0	34,88	24	24	0	15,08	6	6	0	26,54	16	16	0	26,59	15	15	0
	Wu 4	0	0	0	0	19,88	10	10	7	0	0	0	26,82	14	14	6	27,66	17	17	6	11,23	4	4	6	26,31	16	16	0	26,34	15	15	0	
	Wu 5	14,55	11	11	3	25,8	19	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26,08	15	15	0	26,81	15	15	0	
	Wu 6	13,21	11	11	0	28,88	19	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26,01	15	15	0	26,74	15	15	0	
Model 34	Wu 1	13,43	13	13	0	18,15	9	9	0	0	0	0	29,03	17	17	0	21,34	11	11	0	28,99	17	17	0	26,22	15	15	0	28,98	18	18	0	
	Wu 2	13,77	13	13	8	17,53	9	9	8	0	0	0	29,55	17	17	0	31,26	11	11	0	28,97	17	17	0	27,09	15	15	0	28,95	18	18	0	
	Wu 3	0	0	0	0	20,19	10	10	0	14,14	3	3	0	25,4	14	14	0	34,66	24	24	0	24,95	13	13	0	27,61	16	16	0	26,13	15	15	0
	Wu 4	0	0	0	0	21,51	10	10	7	0	0	0	24,4	14	14	6	28,33	17	17	6	20,95	10	10	6	27,82	16	16	0	26,29	15	15	0	
	Wu 5	14,98	13	13	0	28,74	19	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26,38	15	15	0	26,24	15	15	0	
	Wu 6	15,98	13	13	0	28,64	19	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26,25	15	15	0	26,23	15	15	0	
Model 35	Wu 1	13,22	11	11	0	19,44	9	9	0	0	0	0	27,28	16	16	0	20,92	11	11	0	28,65	17	17	0	27,12	16	16	0	28,64	18	18	0	
	Wu 2	12,76	11	11	8	18,89	9	9	8	0	0	0	27,92	16	16	0	20,62	11	11	0	28,35	17	17	0	24,14	13	13	0	28,39	18	18	0	
	Wu 3	0	0	0	0	21,33	10	10	0	17,66	3	3	0	24,68	14	14	0	34,77	24	24	0	14,75	6	6	0	28,98	16	16	0	26,01	15	15	0
	Wu 4	0	0	0	0	20,84	10	10	7	0	0	0	24,86	14	14	6	28,28	17	17	6	12,68	4	4	6	28,74	16	16	0	26,81	15	15	0	
	Wu 5	11,99	11	11	0	28,64	19	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26,34	15	15	0	26,71	15	15	0	
	Wu 6	12,76	11	11	0	27,36	19	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26,18	15	15	0	26,81	15	15	0	
Model 36	Wu 1	14,87	13	13	0	18,86	9	9	0	0	0	0	26,12	16	16	0	22,16	11	11	0	28,23	17	17	0	26,11	15	15	0	28,84	18	18	0	
	Wu 2	13,88	13	13	8	19,48	9	9	8	0	0	0	26,15	16	16	0	22,36	11	11	0	28,33	17	17	0	27,81	16	16	0	28,76	18	18	0	
	Wu 3	0	0	0	0	20,71	10	10	0	15,06	3	3	0	23,81	14	14	0	34,05	24	24	0	16,12	6	6	0	27,96	16	16	0	26,37	15	15	0
	Wu 4	0	0	0	0	20,84	10	10	7	0	0	0	23,91	14	14	6	28,66	17	17	6	13,31	4	4	6	28,12	16	16	0	26,14	15	15	0	
	Wu 5	12,88	13	13	0	27,33	19	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26,23	15	15	0	26,09	15	15	0	
	Wu 6	12,88	14	14	0	29,12	19	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26,13	15	15	0	26,88	15	15	0	

		Workstation 1				Workstation 2				Workstation 3				Workstation 4				Workstation 5				Workstation 6				Workstation 7				Workstation 8			
		m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset
Model 37	Wu 1	9,99	10	10	0	20,9	10	10	0	0	0	0	26,8	16	16	0	20,7	11	11	0	28,2	17	17	0	26,0	15	15	0	28,6	18	18	0	
	Wu 2	10,8	11	11	8	19,3	10	10	11	0	0	0	27,0	16	16	0	20,1	10	10	2	28,1	17	17	0	28,1	16	16	0	28,3	18	18	0	
	Wu 3	0	0	0	0	19,8	10	10	11	14,4	3	3	0	26,0	14	14	0	34,7	24	24	0	16,8	6	6	0	28,3	16	16	0	26,3	15	15	0
	Wu 4	0	0	0	0	21,5	10	10	0	0	0	0	26,1	14	14	6	28,1	17	17	0	11,4	4	4	0	28,7	16	16	0	26,2	15	15	0	
	Wu 5	11,9	11	11	0	30,4	19	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,0	15	15	0	26,2	15	15	0	
	Wu 6	12,6	11	11	0	31,8	19	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26,9	15	15	0	26,9	15	15	0	
Model 38	Wu 1	12,4	13	13	0	19,7	9	9	0	0	0	0	29,3	17	17	0	20,6	11	11	0	28,8	17	17	0	28,1	16	16	0	29,3	18	18	0	
	Wu 2	11,9	13	13	4	18,3	9	9	8	0	0	0	29,4	17	17	0	20,2	10	10	0	28,4	17	17	0	29,1	16	16	0	28,7	18	18	0	
	Wu 3	0	0	0	0	19,6	10	10	0	15,6	3	3	0	24,8	14	14	0	33,7	24	24	0	24,2	13	13	0	28,7	16	16	0	26,5	15	15	0
	Wu 4	0	0	0	0	19,8	10	10	7	0	0	0	24,9	14	14	6	28,8	17	17	6	20,5	10	10	6	28,9	16	16	0	24,6	15	15	0	
	Wu 5	13,6	13	13	0	32,0	19	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28,0	16	16	0	26,7	15	15	0	
	Wu 6	12,8	13	13	0	30,2	19	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28,6	16	16	0	26,9	15	15	0	
Model 39	Wu 1	12,8	11	11	0	19,7	9	9	0	0	0	0	28,1	16	16	0	21,4	11	11	0	27,7	17	17	0	28,3	17	17	0	29,3	18	18	0	
	Wu 2	11,7	11	11	8	17,8	9	9	8	0	0	0	28,3	16	16	0	20,4	10	10	0	27,9	17	17	0	24,9	14	14	0	29,1	18	18	0	
	Wu 3	0	0	0	0	20,1	10	10	0	16,0	3	3	0	26,6	14	14	0	37,2	24	24	0	18,3	8	8	0	26,8	16	16	0	26,4	15	15	0
	Wu 4	0	0	0	0	21,2	10	10	7	0	0	0	26,8	14	14	6	28,6	17	17	6	16,2	6	6	6	26,7	16	16	0	26,3	15	15	0	
	Wu 5	15,7	14	14	0	29,8	19	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26,1	16	16	0	26,9	15	15	0	
	Wu 6	16,4	14	14	0	31,7	19	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,5	16	16	0	25,9	15	15	0	
Model 40	Wu 1	17,8	16	16	0	18,7	9	9	0	0	0	0	26,2	16	16	0	22,2	11	11	0	28,8	17	17	0	26,0	15	15	0	28,8	18	18	0	
	Wu 2	18,9	16	16	8	16,8	9	9	8	0	0	0	26,3	16	16	0	20,2	10	10	0	28,4	17	17	0	26,1	15	15	0	28,9	18	18	0	
	Wu 3	0	0	0	0	19,0	10	10	0	16,7	3	3	0	26,1	14	14	0	36,6	24	24	0	18,6	8	8	0	26,2	15	15	0	26,3	15	15	0
	Wu 4	0	0	0	0	19,2	10	10	7	0	0	0	26,8	14	14	6	29,5	17	17	6	14,7	7	6	6	26,3	15	15	0	26,3	15	15	0	
	Wu 5	14,9	16	16	0	29,3	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24,2	14	14	0	26,4	15	15	0	
	Wu 6	15,9	16	16	0	28,8	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26,3	15	15	0	26,5	15	15	0	

		Workstation 1				Workstation 2				Workstation 3				Workstation 4				Workstation 5				Workstation 6				Workstation 7				Workstation 8			
		m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset
Model 41	Wu 1	15,8 7	14	14	0	19,2 8	9	9	0	0	0	0	28,3 3	16	16	0	19,6 5	11	11	0	28,1 7	17	17	0	27,1 1	16	16	0	28,5 1	18	18	0	
	Wu 2	16,8 7	14	14	8	18,9 4	9	9	8	0	0	0	28,2 3	16	16	0	19,3 3	11	11	0	28,1 5	17	17	0	28,1 5	16	16	0	28,5 7	18	18	0	
	Wu 3	0	0	0	0	21,0 3	10	10	0	15,2 9	3	3	0	23,9 6	14	14	0	36,3 6	24	24	0	17,9 6	8	8	0	28,9 6	16	16	0	26,3 9	15	15	0
	Wu 4	0	0	0	0	20,6 7	10	10	7	0	0	0	0	23,4 6	14	14	6	28,2 8	17	17	6	14,3 6	6	6	6	28,1 4	16	16	0	26,3 4	15	15	0
	Wu 5	16,9 9	14	14	0	28,3 2	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28,8 3	16	16	0	26,8 3	15	15	0	
	Wu 6	17,8 8	14	14	0	29,0 5	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24,8 9	14	14	0	26,9 9	15	15	0	
Model 42	Wu 1	19,8 7	16	16	0	20,2 6	9	9	0	0	0	0	26,1 6	16	16	0	20,3 6	11	11	0	28,2 8	17	17	0	28,7 9	16	16	0	28,7 4	18	18	0	
	Wu 2	20,9 8	16	16	8	19,8 3	9	9	11	0	0	0	26,3 6	16	16	0	20,4 8	11	11	2	28,6 7	17	17	0	22,1 2	13	13	0	28,7 3	18	18	0	
	Wu 3	0	0	0	0	21,3 4	10	10	11	14,9 8	3	3	0	25,6 5	14	14	0	36,0 9	24	24	0	16,2 1	8	8	0	26,1 8	15	15	0	26,2 4	15	15	0
	Wu 4	0	0	0	0	20,8 1	10	10	0	0	0	0	25,8 8	14	14	6	28,0 7	17	17	0	14,3 4	6	6	0	26,2 8	15	15	0	26,5 4	15	15	0	
	Wu 5	15,9 9	13	13	0	29,4 4	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24,8 4	14	14	0	26,8 9	15	15	0	
	Wu 6	14,9 8	12	12	0	28,2 4	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,0 1	15	15	0	26,9 1	15	15	0	
Model 43	Wu 1	13,8 6	11	11	0	19,7 8	9	9	0	0	0	0	26,3 2	16	16	0	21,6 1	11	11	0	27,8 7	17	17	0	29,0 4	17	17	0	28,6 5	18	18	0	
	Wu 2	11,8	10	10	8	20,5 3	9	9	8	0	0	0	26,4 2	16	16	0	21,9 1	11	11	0	27,8 9	17	17	0	25,8 2	14	14	0	28,6 9	18	18	0	
	Wu 3	0	0	0	0	20,6 4	10	10	0	16,7 5	3	3	0	25,2 1	14	14	0	36,7 6	24	24	0	16,0 6	6	6	0	26,7 4	16	16	0	26,3 9	15	15	0
	Wu 4	0	0	0	0	20,4 8	10	10	7	0	0	0	25,3 1	14	14	6	28,3 3	17	17	6	11,1 2	4	4	6	26,8 4	16	16	0	26,4 9	15	15	0	
	Wu 5	18,9 8	14	14	0	27,8 9	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26,9 1	16	16	0	26,5 9	15	15	0	
	Wu 6	15,8 7	15	15	0	28,6 2	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24,1 2	14	14	0	26,6 9	15	15	0	
Model 44	Wu 1	15,9 8	16	16	0	16,2 6	9	9	0	0	0	0	28,7 5	16	16	0	21,0 8	11	11	0	28,4 9	17	17	0	28,1 7	17	17	0	28,1 1	18	18	0	
	Wu 2	18,9 9	17	17	8	17,1 1	9	9	8	0	0	0	28,6 5	16	16	0	19,3 9	11	11	0	28,1 9	17	17	0	26,1 7	14	14	0	28,7 1	18	18	0	
	Wu 3	0	0	0	0	16,2 9	7	7	0	14,9 3	3	3	0	23,3 3	14	14	0	36,5 5	24	24	0	14,1 9	6	6	0	28,1 7	16	16	0	26,8 4	15	15	0
	Wu 4	0	0	0	0	21,4 3	10	10	7	0	0	0	23,1 5	14	14	6	28,3 4	17	17	6	11,5 8	4	4	6	28,3 9	16	16	0	26,7 3	15	15	0	
	Wu 5	17,8 7	16	16	0	46,2 1	36	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28,7 1	16	16	0	26,3 3	15	15	0	
	Wu 6	15,1 1	17	17	0	47,0 8	36	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25,9 9	14	14	0	26,8 4	15	15	0	

		Workstation 1				Workstation 2				Workstation 3				Workstation 4				Workstation 5				Workstation 6				Workstation 7				Workstation 8			
		m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset
Model 45	Wu 1	15,6 5	15	15	0	19,0 5	9	9	0	0	0	0	29,0 7	18	18	0	28,2 4	16	16	0	31,2 8	21	21	0	26,3 3	16	16	0	52,1 2	36	36	0	
	Wu 2	17,8 7	14	14	8	18,0 6	9	9	8	0	0	0	29,9 1	19	19	0	27,7 7	16	16	0	30,8 4	21	21	0	26,7 7	16	16	0	50,8 4	36	36	0	
	Wu 3	0	0	0	0	16,8 3	7	7	0	15,5 6	3	3	0	30,9 6	20	20	0	68,4 2	47	47	0	25,1 4	14	14	0	26,8 5	16	16	0	26,8 1	16	16	0
	Wu 4	0	0	0	0	20,5 6	10	10	7	0	0	0	31,2 2	20	20	6	48,2 1	33	33	6	20,1 2	10	10	6	28,7 5	17	17	0	27,8 3	16	16	0	
	Wu 5	15,9 9	15	15	0	45,8 9	36	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26,1 9	16	16	0	28,1 2	17	17	0	
	Wu 6	18,4 3	14	14	0	45,3 2	36	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24,8 9	14	14	0	28,6 8	17	17	0	
Model 46	Wu 1	15,3 5	14	14	0	18,1 5	9	9	0	0	0	0	28,7 8	18	18	0	28,5 4	16	16	0	31,1 7	20	20	0	26,3 4	16	16	0	51	35	35	0	
	Wu 2	17,1 7	14	14	8	17,9 6	10	10	8	0	0	0	29,9 9	19	19	0	28,2 1	16	16	0	31,8 8	29	20	0	26,8 7	16	16	0	51,1 2	35	35	0	
	Wu 3	0	0	0	0	17,0 2	7	7	0	15,2 7	3	3	0	31,6 7	21	21	0	68,0 3	46	46	0	25	14	14	0	25,6 5	16	16	0	27,0 9	16	16	0
	Wu 4	0	0	0	0	20,2 3	10	10	7	0	0	0	31,3 3	21	21	6	48,2 2	32	32	6	19,6 5	11	11	6	27,8 6	17	17	0	27,6 2	16	16	0	
	Wu 5	15,2 6	15	15	0	46,8 9	36	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26,2 3	16	16	0	28,1 4	17	17	0	
	Wu 6	18,2 7	14	14	0	45,3 3	36	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	14	14	0	29,0 9	17	17	0	
Model 47	Wu 1	15,2 3	14	14	0	19,0 2	9	9	0	0	0	0	28,7 8	18	18	0	29,0 3	16	16	0	32,1 2	20	20	0	26,1 4	16	16	0	51,2 1	36	36	0	
	Wu 2	18,0 9	14	14	8	17,8 8	10	10	8	0	0	0	31,7 8	19	19	0	28,5 6	16	16	0	32,0 8	29	20	0	26,3 3	16	16	0	50,9 8	36	36	0	
	Wu 3	0	0	0	0	17	7	7	0	14,8 8	3	3	0	31,7 8	21	21	0	69,2 1	46	46	0	25,0 3	14	14	0	26,0 9	17	17	0	27,3 4	16	16	0
	Wu 4	0	0	0	0	21,2 2	10	10	7	0	0	0	32,0 3	21	21	6	48,5 5	32	32	6	19,6 6	11	11	6	27,9 6	17	17	0	27,8 2	16	16	0	
	Wu 5	14,9 9	15	15	0	47,0 9	35	35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,3 2	16	16	0	28,3 4	16	16	0	
	Wu 6	18,2 1	14	14	0	46,3 5	35	35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25,1 2	14	14	0	30,2 1	17	17	0	
Model 48	Wu 1	15,3 4	14	14	0	18,6 5	9	9	0	0	0	0	28,3 4	18	18	0	29,5 4	16	16	0	31,1 2	20	20	0	26,5 6	16	16	0	51,3 1	36	36	0	
	Wu 2	18,2 3	14	14	8	17,4 5	10	10	8	0	0	0	31,7 6	19	19	0	28,1 2	16	16	0	32,1 1	28	28	0	25,4 4	17	17	0	50,3 4	35	35	0	
	Wu 3	0	0	0	0	17,2 3	7	7	0	14,0 2	3	3	0	31,8 8	20	20	0	69,1 1	45	45	0	24,8 7	14	14	0	26,6 5	17	17	0	27,6 7	16	16	0
	Wu 4	0	0	0	0	21,1 2	10	10	7	0	0	0	32,1 2	21	21	6	48,6 5	31	31	6	18,7 7	11	11	6	28,0 4	17	17	0	27,8 7	17	17	0	
	Wu 5	15,0 7	15	15	0	48,0 9	34	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,5 6	16	16	0	28,1 1	16	16	0	
	Wu 6	18,4 2	14	14	0	46,3 4	35	35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25,5 5	14	14	0	30,9 9	17	17	0	

		Workstation 1				Workstation 2				Workstation 3				Workstation 4				Workstation 5				Workstation 6				Workstation 7				Workstation 8			
		m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset
Model 49	Wu 1	15,4 5	14	14	0	18,4 3	9	9	0	0	0	0	28,4 5	18	18	0	29,2 3	16	16	0	31,3 1	20	20	0	26,2 3	16	16	0	50,9 8	36	36	0	
	Wu 2	18,1 2	14	14	8	17,1 2	10	10	8	0	0	0	31,9 9	19	19	0	28,4 5	16	16	0	32,4 5	28	28	0	25,7 6	17	17	0	50,4 4	35	35	0	
	Wu 3	0	0	0	0	17,4 5	7	7	0	13,9 9	3	3	0	32,1 3	20	20	0	69,2 2	44	44	0	24,5 4	14	14	0	26,6 6	17	17	0	27,9 8	16	16	0
	Wu 4	0	0	0	0	20,9 8	10	10	7	0	0	0	0	33,2 3	20	20	6	48,6 5	31	31	6	18,3 3	12	12	6	28,9 1	17	17	0	27,1 2	17	17	0
	Wu 5	14,8 8	15	15	0	48,5 6	34	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,3 4	16	16	0	28,4 4	16	16	0	
	Wu 6	18,7 8	14	14	0	46,3 7	34	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25,1 2	14	14	0	31,2 1	16	16	0	
Model 50	Wu 1	15,1 2	13	13	0	18,4 4	10	10	0	0	0	0	28,2 2	19	19	0	30,3 2	16	16	0	31,4 4	20	20	0	26,5 4	16	16	0	51,2 3	36	36	0	
	Wu 2	18,3 2	13	13	8	17,1 4	10	10	7	0	0	0	31,7 6	19	19	0	29,3 2	16	16	0	32,6 5	29	29	0	25,8 7	17	17	0	50,4 5	35	35	0	
	Wu 3	0	0	0	0	16,6 7	7	7	0	14,2 3	3	3	0	32,6 7	20	20	0	69,7 7	43	43	0	24,8 8	14	14	0	26,4 9	16	16	0	28,3 2	16	16	0
	Wu 4	0	0	0	0	21,6 7	10	10	9	0	0	0	0	33,8 9	20	20	6	48,8 6	31	31	6	18,5 4	13	13	6	29,3 2	17	17	0	27,5 5	17	17	0
	Wu 5	14,4 5	15	15	0	48,8 8	34	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,5 6	16	16	0	28,6 7	17	17	0	
	Wu 6	18,8 7	14	14	0	46,3 3	34	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25,5 6	14	14	0	31,6 6	16	16	0	
Model 51	Wu 1	15,6 7	13	13	0	18,3 3	10	10	0	0	0	0	28,6 5	19	19	0	30,7 7	16	16	0	31,8 2	20	20	0	26,4 4	16	16	0	51,7 6	36	36	0	
	Wu 2	17,8 8	14	14	8	17,7 6	10	10	7	0	0	0	31,8 8	19	19	0	29,9 1	16	16	0	32,9 2	29	29	0	25,8 6	17	17	0	50,5 5	35	35	0	
	Wu 3	0	0	0	0	17,0 1	7	7	0	14,6 6	3	3	0	31,8 7	21	21	0	69,9 3	43	43	0	24,8 1	14	14	0	26,9	16	16	0	28,5 4	16	16	0
	Wu 4	0	0	0	0	21,7 8	10	10	9	0	0	0	0	32,8 7	20	20	6	48,9 6	31	31	6	18,6 4	14	14	6	29,3 2	17	17	0	26,7 8	17	17	0
	Wu 5	14,8 7	15	15	0	48,1 2	33	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,3 4	16	16	0	28,5 4	17	17	0	
	Wu 6	19,3 4	14	14	0	45,8 8	34	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25,7 5	14	14	0	32,5 5	16	16	0	
Model 52	Wu 1	15,3 2	13	13	0	18,6 7	10	10	0	0	0	0	28,2 3	19	19	0	30,3 4	16	16	0	31,4 3	20	20	0	26,2 2	16	16	0	51,6 5	36	36	0	
	Wu 2	17,6 6	14	14	8	17,6 6	10	10	7	0	0	0	30,9 8	19	19	0	30,0 9	17	17	0	32,5 3	29	29	0	25,7 6	17	17	0	50,8 9	35	35	0	
	Wu 3	0	0	0	0	17,9 9	7	7	0	14,9 3	3	3	0	30,8 7	20	20	0	70,3 2	42	42	0	24,6 5	14	14	0	26,8 6	16	16	0	28,8 3	16	16	0
	Wu 4	0	0	0	0	22,5 3	10	10	9	0	0	0	0	32,3 4	20	20	6	49,8 7	33	33	6	17,9 9	14	14	6	29,9 3	17	17	0	26,1 1	17	17	0
	Wu 5	14,7 7	15	15	0	48,3 3	33	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,7 5	16	16	0	28,1 4	17	17	0	
	Wu 6	19,2 2	14	14	0	45,2 3	34	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25,1 6	14	14	0	32,7 6	16	16	0	

		Workstation 1				Workstation 2				Workstation 3				Workstation 4				Workstation 5				Workstation 6				Workstation 7				Workstation 8			
		m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset
Model 53	Wu 1	15,5 6	13	13	0	18,6 5	10	10	0	0	0	0	28,5 4	19	19	0	30,4 5	16	16	0	31,1 1	20	20	0	26,1 2	16	16	0	51,4 3	36	36	0	
	Wu 2	17,8 7	14	14	8	17,3 4	11	11	7	0	0	0	29,9 8	19	19	0	30,6 5	17	17	0	32,7 6	29	29	0	25,5 4	17	17	0	50,7 6	35	35	0	
	Wu 3	0	0	0	0	18,3 4	7	7	0	14,0 2	3	3	0	31,2 3	20	20	0	70,1 1	42	42	0	24,9 9	14	14	0	26,6 5	16	16	0	28,7 7	16	16	0
	Wu 4	0	0	0	0	23,4 5	10	10	9	0	0	0	0	0	0	0	0	49,7 6	33	33	6	17,3 3	14	14	6	29,1 2	17	17	0	26,1 3	17	17	0
	Wu 5	14,8 3	15	15	0	49,3 2	33	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,6 5	16	16	0	28,7 6	17	17	0	
	Wu 6	19,7 7	14	14	0	45,3 2	34	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25,3 4	14	14	0	32,6 6	16	16	0	
Model 54	Wu 1	15,5 4	13	13	0	18,7 6	10	10	0	0	0	0	28,9 7	19	19	0	30,8 5	16	16	0	31,3 2	20	20	0	26,4 5	16	16	0	51,7 6	36	36	0	
	Wu 2	17,6 6	14	14	8	17,4 5	11	11	7	0	0	0	29,8 6	19	19	0	30,6 1	17	17	0	32,7 5	29	29	0	25,8 6	17	17	0	50,3 4	35	35	0	
	Wu 3	0	0	0	0	18,9 1	7	7	0	14,8 8	3	3	0	31,8 1	20	20	0	70,7 4	42	42	0	24,9 3	14	14	0	26,4 6	16	16	0	28,8 7	16	16	0
	Wu 4	0	0	0	0	23,5 6	10	10	9	0	0	0	0	0	0	0	0	49,8 4	33	33	6	17,8 6	14	14	6	29,7 5	17	17	0	26,9 4	17	17	0
	Wu 5	14,1 3	15	15	0	49,1 4	33	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,5 1	16	16	0	28,7 2	17	17	0	
	Wu 6	19,7 6	14	14	0	45,8 7	34	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25,6 7	14	14	0	32,4 1	16	16	0	
Model 55	Wu 1	15,4 5	13	13	0	18,4 2	10	10	0	0	0	0	28,6 4	19	19	0	30,4 3	16	16	0	31,4 5	20	20	0	26,2 3	16	16	0	51,3 4	36	36	0	
	Wu 2	17,5 2	14	14	8	17,6 7	11	11	7	0	0	0	29,6 2	19	19	0	30,1 4	17	17	0	32,7 6	29	29	0	25,7 6	17	17	0	50,7 6	35	35	0	
	Wu 3	0	0	0	0	18,8 4	7	7	0	14,1 2	3	3	0	31,8 2	20	20	0	70,6 5	42	42	0	24,7 3	14	14	0	26,5 8	16	16	0	28,9 9	16	16	0
	Wu 4	0	0	0	0	23,1 4	10	10	9	0	0	0	0	0	0	0	0	49,7 8	33	33	6	17,5 4	14	14	6	29,4 5	17	17	0	26,1 4	17	17	0
	Wu 5	14,6 9	15	15	0	49,7 6	33	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,8 7	16	16	0	28,6 5	17	17	0	
	Wu 6	19,8 3	14	14	0	45,9 2	34	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25,3 1	14	14	0	32,1 5	16	16	0	
Model 56	Wu 1	0	13	13	0	0	10	10	0	0	0	0	0	19	19	0	0	16	16	0	0	20	20	0	0	16	16	0	0	36	36	0	
	Wu 2	0	14	14	0	0	12	12	0	0	0	0	0	19	19	0	0	17	17	0	0	29	29	0	0	17	17	0	0	35	35	0	
	Wu 3	0	0	0	0	0	7	7	0	0	3	3	0	0	21	21	0	0	42	42	0	0	14	14	0	0	16	16	0	0	16	16	0
	Wu 4	0	0	0	0	0	10	10	0	0	0	0	0	0	20	20	0	0	33	33	0	0	14	14	0	0	17	17	0	0	17	17	0
	Wu 5	0	15	15	0	0	33	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16	16	0	0	17	17	0
	Wu 6	0	14	14	0	0	34	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	14	0	0	16	16	0	

		Workstation 1				Workstation 2				Workstation 3				Workstation 4				Workstation 5				Workstation 6				Workstation 7				Workstation 8			
		m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 1	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset
Model 57	Wu 1	14,8 7	13	13	0	18,6 5	10	10	0	0	0	0	28,5 4	19	19	0	30,2 3	16	16	0	31,3 4	20	20	0	27,6 5	17	17	0	51,4 3	36	36	0	
	Wu 2	16,7 8	13	13	7	17,8 7	11	11	7	0	0	0	29,8 7	19	19	0	30,6 6	17	17	0	32,6 6	29	29	0	25,6 5	16	16	0	50,6 6	35	35	0	
	Wu 3	0	0	0	0	18,2 3	7	7	0	14,1 9	3	3	0	31,3 3	21	21	0	70,1 5	42	42	0	24,8 8	14	14	0	26,1 9	16	16	0	28,2 8	16	16	0
	Wu 4	0	0	0	0	23,5 6	10	10	8	0	0	0	0	32,9 9	21	21	7	50,3 4	33	33	6	17,1 8	14	14	6	29,9 7	17	17	0	26,8 7	17	17	0
	Wu 5	15,4 5	15	15	0	49,1 1	34	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28,9 8	16	16	0	28,9 8	17	17	0
	Wu 6	19,3 4	14	14	0	45,0 5	34	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26,5 4	14	14	0	32,0 4	16	16	0	
Model 58	Wu 1	15,4 3	13	13	0	18,3 4	10	10	0	0	0	0	28,6 5	19	19	0	30,4 5	16	16	0	31,5 5	20	20	0	27,2 3	17	17	0	52,2 3	36	36	0	
	Wu 2	16,4 3	13	13	7	17,7 6	11	11	7	0	0	0	29,8 8	19	19	0	30,7 6	17	17	0	32,6 7	29	29	0	25,7 6	16	16	0	50,3 4	35	35	0	
	Wu 3	0	0	0	0	18,2 4	8	8	0	14,7 7	3	3	0	31,5 6	21	21	0	70,2 5	42	42	0	24,1 3	14	14	0	26,8 8	16	16	0	29,0 3	16	16	0
	Wu 4	0	0	0	0	23,2 2	10	10	8	0	0	0	0	32,8 7	21	21	7	50,8 7	33	33	6	17,8 7	14	14	6	29,2 4	17	17	0	27,4 3	17	17	0
	Wu 5	15,2 2	15	15	0	49,8 7	33	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30,0 4	16	16	0	28,4 5	17	17	0	
	Wu 6	19,8 7	14	14	0	45,4 5	34	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,1 4	14	14	0	32,4 4	16	16	0	
Model 59	Wu 1	15,2 2	13	13	0	18,5 6	10	10	0	0	0	0	28,6 6	19	19	0	30,7 6	16	16	0	31,5 5	20	20	0	27,4 5	17	17	0	52,5 4	36	36	0	
	Wu 2	16,6 5	13	13	7	17,8 8	11	11	7	0	0	0	29,3 2	19	19	0	30,3 3	17	17	0	32,6 9	29	29	0	25,7 7	16	16	0	50,7 7	35	35	0	
	Wu 3	0	0	0	0	18,2 2	8	8	0	15,0 2	3	3	0	31,2 1	21	21	0	69,8 7	41	41	0	24,9 7	14	14	0	26,8 6	16	16	0	29,3 7	16	16	0
	Wu 4	0	0	0	0	23,8 7	10	10	8	0	0	0	0	32,6 2	22	22	8	51,3 2	33	33	7	17,2 3	14	14	6	29,1 5	17	17	0	27,9 7	17	17	0
	Wu 5	15,8 7	15	15	0	49,4 5	33	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30,6 5	16	16	0	28,2 2	17	17	0	
	Wu 6	19,2 2	14	14	0	45,9 9	34	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,8 8	14	14	0	32,7 9	16	16	0	
Model 60	Wu 1	15,1 7	13	13	0	18,4 3	10	10	0	0	0	0	28,2 3	19	19	0	30,7 6	16	16	0	31,2 5	20	20	0	27,5 4	17	17	0	52,6 5	36	36	0	
	Wu 2	16,7 6	13	13	7	18,9 2	11	11	7	0	0	0	29,7 6	19	19	0	30,9 8	17	17	0	32,7 6	29	29	0	25,8 7	16	16	0	50,2 3	35	35	0	
	Wu 3	0	0	0	0	18,0 2	8	8	0	15,3 4	3	3	0	31,8 8	21	21	0	69,2 7	41	41	0	24,2 3	14	14	0	26,4 5	16	16	0	30,0 9	16	16	0
	Wu 4	0	0	0	0	23,1 2	10	10	8	0	0	0	0	32,2 3	22	22	8	51,6 4	33	33	7	17,8 7	14	14	6	29,2 1	17	17	0	28,3 4	17	17	0
	Wu 5	15,8 7	15	15	0	49,5 5	33	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30,8 7	16	16	0	28,3 3	17	17	0	
	Wu 6	19,2 5	14	14	0	44,8 9	34	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,2 7	14	14	0	32,0 2	16	16	0	

		Workstation 1				Workstation 2				Workstation 3				Workstation 4				Workstation 5				Workstation 6				Workstation 7				Workstation 8			
		m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset
Model 61	Wu 1	15,2 3	13	13	0	18,2 3	10	10	0	0	0	0	28,4 5	19	19	0	30,7 3	16	16	0	31,1 5	20	20	0	27,1 4	17	17	0	52,5 4	36	36	0	
	Wu 2	16,8 8	13	13	7	18,6 5	11	11	7	0	0	0	29,2 3	19	19	0	30,2 3	17	17	0	32,5 4	29	29	0	25,2 2	16	16	0	50,7 7	35	35	0	
	Wu 3	0	0	0	0	18,3 4	8	8	0	14,5 6	3	3	0	31,7 2	21	21	0	69,7 6	41	41	0	24,3 3	14	14	0	26,5 4	16	16	0	30,6 5	16	16	0
	Wu 4	0	0	0	0	23,6 4	10	10	8	0	0	0	32,1 3	22	22	8	51,9 2	33	33	7	17,6 3	14	14	6	29,6 8	17	17	0	28,4 5	17	17	0	
	Wu 5	15,1 2	15	15	0	49,7 6	33	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30,8 3	16	16	0	28,6 5	17	17	0	
	Wu 6	19,8 7	14	14	0	44,1 3	34	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,3 4	14	14	0	32,4 4	16	16	0	
Model 62	Wu 1	15,3 5	13	13	0	18,4 5	10	10	0	0	0	0	28,6 5	19	19	0	30,5 6	16	16	0	31,4 5	20	20	0	27,5 4	17	17	0	52,5 4	36	36	0	
	Wu 2	16,8 4	13	13	8	18,6 6	11	11	7	0	0	0	29,2 5	19	19	0	30,7 6	17	17	0	32,7 6	29	29	0	25,6 7	16	16	0	50,2 3	35	35	0	
	Wu 3	0	0	0	0	18,8 7	8	8	0	14,4 5	3	3	0	31,7 6	21	21	0	69,2 6	41	41	0	24,6 6	14	14	0	26,2 2	16	16	0	30,6 3	16	16	0
	Wu 4	0	0	0	0	23,1 4	11	11	8	0	0	0	32,8 7	22	22	8	51,7 6	33	33	7	17,8 7	14	14	6	29,8 7	17	17	0	28,3 3	17	17	0	
	Wu 5	15,4 5	15	15	0	50,0 2	33	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30,8 9	16	16	0	28,7 8	17	17	0	
	Wu 6	19,7 6	15	15	0	45,1 3	34	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,6 5	14	14	0	32,6 5	16	16	0	
Model 63	Wu 1	15,3 4	13	13	0	18,3 4	10	10	0	0	0	0	28,5 6	19	19	0	30,4 5	16	16	0	31,4 2	20	20	0	27,3 2	17	17	0	52,7 6	36	36	0	
	Wu 2	16,2 1	13	13	8	18,8 7	11	11	7	0	0	0	29,7 6	20	20	0	30,8 5	17	17	0	32,6 5	29	29	0	26,5 4	17	17	0	50,8 8	35	35	0	
	Wu 3	0	0	0	0	18,1 3	8	8	0	14,3 8	3	3	0	31,2 7	21	21	0	69,3 4	40	40	0	24,2 7	14	14	0	27,3 4	16	16	0	30,2 5	16	16	0
	Wu 4	0	0	0	0	23,3 6	11	11	8	0	0	0	32,8 7	21	21	8	51,6 5	33	33	7	17,6 5	14	14	6	30,2 5	17	17	0	28,7 6	17	17	0	
	Wu 5	15,6 7	15	15	0	50,8 7	34	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	31,2 3	16	16	0	28,2 7	17	17	0	
	Wu 6	19,3 4	15	15	0	45,5 6	34	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,3 4	14	14	0	32,8 7	16	16	0	
Model 64	Wu 1	15,3 7	13	13	0	18,4 3	10	10	0	0	0	0	28,7 6	19	19	0	30,3 2	16	16	0	31,7 6	20	20	0	27,7 6	17	17	0	52,7 6	36	36	0	
	Wu 2	16,8 7	13	13	8	18,6 7	11	11	7	0	0	0	29,5 4	20	20	0	30,7 6	17	17	0	32,2 4	29	29	0	26,4 4	17	17	0	50,2 4	35	35	0	
	Wu 3	0	0	0	0	18,8 7	8	8	0	14,4 5	3	3	0	31,4 5	21	21	0	69,3 5	40	40	0	24,7 6	14	14	0	27,8 7	16	16	0	30,5 4	16	16	0
	Wu 4	0	0	0	0	23,1 2	11	11	8	0	0	0	32,7 7	21	21	8	51,7 6	33	33	7	17,1 6	14	14	6	30,4 5	17	17	0	28,5 4	17	17	0	
	Wu 5	15,5 5	15	15	0	50,1 4	34	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	31,8 7	16	16	0	28,6 6	17	17	0	
	Wu 6	19,8 7	15	15	0	45,4 3	34	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,8 8	14	14	0	32,6 5	16	16	0	

		Workstation 1				Workstation 2				Workstation 3				Workstation 4				Workstation 5				Workstation 6				Workstation 7				Workstation 8			
		m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset	m-term 1	m-term 2	m-term 3	Offset
Model 65	Wu 1	15,3 4	13	13	0	18,2 7	10	10	0	0	0	0	28,2 7	19	19	0	30,5 4	16	16	0	31,8 7	20	20	0	27,5 8	17	17	0	52,4 8	36	36	0	
	Wu 2	16,5 6	13	13	8	18,7 6	11	11	7	0	0	0	29,8 6	20	20	0	30,2 5	17	17	0	32,6 5	29	29	0	26,5 4	17	17	0	50,5 3	35	35	0	
	Wu 3	0	0	0	0	18,3 1	8	8	0	14,1 4	3	3	0	31,6 4	21	21	0	69,5 5	40	40	0	24,3 4	14	14	0	27,2 9	16	16	0	30,5 4	16	16	0
	Wu 4	0	0	0	0	23,8 5	11	11	8	0	0	0	32,1 4	21	21	8	51,5 3	33	33	7	17,4 8	14	14	6	30,4 9	17	17	0	28,5 5	17	17	0	
	Wu 5	15,5 1	15	15	0	50,6 4	34	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	31,4 8	16	16	0	28,8 7	17	17	0	
	Wu 6	19,3 7	15	15	0	45,6 7	34	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,4 4	14	14	0	32,6 8	16	16	0	
Model 66	Wu 1	15,6 5	13	13	0	18,4 5	10	10	0	0	0	0	28,6 5	19	19	0	30,7 6	16	16	0	31,6 5	20	20	0	27,2 5	17	17	0	52,4 5	36	36	0	
	Wu 2	16,5 7	13	13	8	18,7 6	11	11	7	0	0	0	29,2 5	20	20	0	30,3 4	17	17	0	32,7 5	29	29	0	26,3 4	17	17	0	50,6 5	35	35	0	
	Wu 3	0	0	0	0	18,1 8	8	8	0	14,1 6	3	3	0	31,7 5	21	21	0	69,1 7	40	40	0	24,5 5	14	14	0	27,4 2	16	16	0	30,3 3	16	16	0
	Wu 4	0	0	0	0	23,2 5	11	11	8	0	0	0	32,4 4	21	21	8	51,4 2	33	33	7	17,1 8	14	14	6	30,1 7	17	17	0	28,1 2	17	17	0	
	Wu 5	15,1 7	15	15	0	50,6 2	34	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	31,2 2	16	16	0	28,8 2	17	17	0	
	Wu 6	19,8 7	15	15	0	45,1 5	34	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,1 2	14	14	0	32,1 6	16	16	0	
Model 67	Wu 1	15,4 5	13	13	0	18,6 5	10	10	0	0	0	0	28,6 5	19	19	0	30,4 4	16	16	0	32,2 1	20	20	0	27,6 7	17	17	0	52,2 2	36	36	0	
	Wu 2	16,6 5	13	13	8	18,3 4	11	11	7	0	0	0	29,2 5	20	20	0	30,8 7	17	17	0	33,4 3	29	29	0	26,5 5	17	17	0	50,6 3	35	35	0	
	Wu 3	0	0	0	0	18,4 3	8	8	0	14,1 6	3	3	0	31,7 5	21	21	0	69,2 1	40	40	0	25,2 1	14	14	0	27,1 9	16	16	0	30,8 7	16	16	0
	Wu 4	0	0	0	0	23,2 7	11	11	8	0	0	0	32,4 4	21	21	8	51,6 3	33	33	7	17,2 8	14	14	6	30,5 4	17	17	0	28,9 9	17	17	0	
	Wu 5	15,8 6	15	15	0	50,3 2	34	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	31,4 4	16	16	0	28,8 9	17	17	0	
	Wu 6	19,2 5	15	15	0	45,1 6	34	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,8 7	14	14	0	32,4 5	16	16	0	
Model 68	Wu 1	15,6 9	13	13	0	18,7 6	10	10	0	0	0	0	28,6 8	19	19	0	30,2 2	16	16	0	31,3 5	20	20	0	27,1 9	17	17	0	52,9 9	36	36	0	
	Wu 2	16,4 3	13	13	8	18,2 6	11	11	7	0	0	0	29,5 4	20	20	0	30,4 4	17	17	0	32,8 1	29	29	0	26,7 7	17	17	0	50,9 4	35	35	0	
	Wu 3	0	0	0	0	18,1 9	8	8	0	14,6 7	3	3	0	31,1 7	21	21	0	69,6 5	40	40	0	24,2 9	14	14	0	27,2 9	16	16	0	30,6 5	16	16	0
	Wu 4	0	0	0	0	23,5 4	11	11	8	0	0	0	32,6 5	21	21	8	51,3 2	33	33	7	17,1 2	14	14	6	30,6 5	17	17	0	28,2 6	17	17	0	
	Wu 5	15,1 7	15	15	0	50,3 3	34	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	31,1 5	16	16	0	28,5 4	17	17	0	
	Wu 6	19,7 4	15	15	0	45,5 5	34	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,7 7	14	14	0	32,8 2	16	16	0	

## **Anexo 5**

**Producción de la línea de soldadura para cada modelo  
fabricado en la Factoría FORD Almussafes.**



Mod.	Mean	Desv	We1		We2		We3		We4		We5		We6		We7		We8	
			Esp.	Bloq.	Esp.	Bloq.	Esp.	Bloq.	Esp.	Bloq.	Esp.	Bloq.	Esp.	Bloq.	Esp.	Bloq.	Esp.	Bloq.
1	50,2	0,77	0	386,14	10,96	1099,70	0,75	348,33	24,658	788,32	43,39	217,03	298,12	195,16	148,64	0	285,00	0
2	40,7	2,38	0	1067,41	0,28	728,25	32,49	2595,58	0	1112,54	13,71	1028,50	3,24	27,83	497,67	0	520,79	0
3	44,3	0,89	0	649,15	48,63	176,99	1333,34	200,65	603,54	243,27	884,49	410,85	267,90	785,42	24,92	6,56	176,71	0
4	40,1	0,40	0	543,76	23,72	1430,90	0,00	1742,24	0	201,71	265,78	142,63	402,86	78,22	287,99	12,75	373,64	0
5	43,2	0,96	0	633,81	12,16	166,14	139,87	2752,21	0	90,53	535,10	103,25	91,00	17,67	430,91	96,84	119,23	0
6	44,9	0,72	0	371,38	61,64	157,46	1079,02	473,48	6,04	1088,71	0,26	75,88	1058,80	101,44	153,97	39,84	78,44	0
7	38,2	6,15	0	660,65	0,48	1227,61	0,00	1710,59	0	209,57	225,00	145,15	215,90	79,45	248,27	16,50	218,11	0
8	43,7	0,66	0	781,37	14,59	96,49	87,56	2689,77	0	70,11	195,84	43,14	11,85	12,38	109,76	22,06	177,02	0
9	38,0	0,16	0	809,22	0,00	261,38	3,21	2110,22	0	1422,43	0	0	1135,76	79,77	510,95	0	1045,23	0
10	35,2	0,36	0	1379,48	0,00	1354,19	0,00	1794,53	0	602,62	48,72	49,19	596,13	22,05	541,58	11,57	347,69	0
11	38,7	8,78	0	887,99	3,00	347,16	52,57	2653,47	0	199,76	41,57	137,69	87,27	70,79	90,53	15,56	90,85	0
12	45,0	1,07	0	689,08	18,03	70,98	1241,62	464,04	338,82	672,76	19,00	5,22	960,88	134,91	22,47	0	163,15	0
13	38,0	0,00	0	968,95	0,00	1476,23	0,00	2127,09	0	216,66	133,11	150,90	301,31	80,65	543,11	8,33	78,91	0
14	40,0	0,00	0	1374,85	0,00	433,73	17,78	2877,04	0	213,64	891,22	166,64	20,90	81,31	177,82	11,66	250,15	0
15	43,8	1,22	0	250,56	35,15	87,43	1171,25	663,68	93,02	790,34	3,05	36,92	824,96	729,29	48,71	0	161,58	0
16	37,6	0,50	0	393,19	25,49	1732,80	0,00	1752,57	0	216,73	260,23	150,10	484,13	80,25	206,81	8,34	529,72	0
17	39,8	6,33	0	853,96	3,49	302,63	34,14	2686,91	0	208,13	185,87	174,53	34,34	72,56	128,12	19,84	224,92	0
18	44,0	0,60	0	324,51	27,37	68,57	1384,87	582,99	181,48	742,48	35,38	2,46	942,05	96,87	45,38	0	102,94	0
19	33,0	13,64	0	522,01	0,00	1223,12	0,00	1543,90	0	184,89	186,31	126,39	196,48	67,86	285,43	8,88	247,02	0
20	40,1	0,55	0	918,25	9,00	494,70	37,83	2820,20	0	214,83	399,92	165,86	25,43	80,28	214,88	11,23	207,71	0
21	42,6	0,93	0	357,50	30,57	408,74	188,59	1706,26	0	1240,24	0,00	57,74	930,83	33,78	134,44	0	393,42	0
22	39,7	1,00	0	615,35	2,35	1268,78	0,00	1554,52	0	212,03	141,42	145,16	231,46	77,29	284,76	12,49	231,22	0
23	40,7	0,69	0	1393,55	7,50	241,96	117,40	2812,48	0	135,19	653,82	137,52	36,87	38,05	182,73	40,42	251,92	0
24	37,0	0,00	0	1384,44	0,00	77,30	0,00	2287,11	0	1457,53	0	0	1326,83	69,66	210,11	0	832,19	0
25	35,0	0,36	0	1316,23	11,26	1150,22	0,00	1865,15	0	655,68	45,78	60,62	705,93	19,26	579,08	7,59	334,24	0
26	39,9	1,08	0	1340,44	3,00	297,79	39,85	2847,01	0	180,56	769,91	155,65	32,66	60,87	163,19	21,24	280,24	0
27	36,9	0,27	0	1320,91	0,00	142,30	26,79	2062,91	0	1416,12	0	0	1415,19	79,60	301,49	0	851,53	0

Mod.	Mean	Desv	We1		We2		We3		We4		We5		We6		We7		We8	
			Esp.	Bloq.	Esp.	Bloq.	Esp.	Bloq.	Esp.	Bloq.	Esp.	Bloq.	Esp.	Bloq.	Esp.	Bloq.	Esp.	Bloq.
28	35,2	0,43	0	1451,33	0,00	1075,04	0,52	1942,09	0	581,32	44,58	59,05	761,13	19,26	606,00	7,35	296,73	0
29	41,2	0,85	0	820,40	18,87	239,12	62,23	2743,40	0	147,56	207,12	142,87	42,33	43,82	88,65	33,61	200,42	0
30	36,8	0,44	0	441,25	0,16	618,58	28,77	1822,39	0	1396,16	0	0	1428,71	85,74	657,85	0	782,22	0
31	35,4	0,64	0	781,26	38,38	1278,41	0,00	1897,02	0	359,77	88,39	59,95	628,13	19,32	425,51	9,98	690,62	0
32	41,2	0,83	0	676,29	24,51	198,52	65,40	2821,96	0	107,80	191,10	131,03	44,11	23,78	58,35	40,68	172,79	0
33	35,9	0,36	0	1128,39	0,00	99,98	0,73	2278,53	0	1703,95	0	0	1142,43	73,23	201,76	0	925,17	0
34	36,0	0,68	0	988,74	12,53	1151,82	0,00	2067,78	0	330,31	64,01	60,64	606,09	18,72	562,56	9,86	383,64	0
35	40,0	0,58	0	930,47	2,40	532,14	18,24	2799,02	0	212,27	515,99	167,47	38,38	78,27	167,64	8,53	219,48	0
36	43,9	1,19	0	201,34	66,05	155,53	746,73	1037,81	8,08	446,79	21,82	28,68	1200,62	70,68	133,63	0	121,96	0
37	39,4	0,83	0	491,28	24,33	1472,76	0,00	1459,95	0	211,73	191,94	146,08	353,20	76,78	208,55	8,87	307,09	0
38	39,9	0,33	0	756,46	7,52	516,36	13,39	2832,88	0	216,93	471,54	169,85	37,08	80,32	120,93	8,18	182,14	0
39	43,4	1,17	0	159,68	102,86	163,33	393,33	1380,31	0	911,79	0,78	1,61	1158,15	84,22	235,18	0	125,38	0
40	38,4	0,84	0	513,49	13,93	1526,43	0,00	1659,36	0	216,15	199,77	148,84	379,52	80,93	251,73	10,75	365,10	0
41	41,0	0,92	0	714,29	15,49	246,31	52,27	2841,66	0	158,31	174,88	144,86	38,03	49,36	57,58	29,36	187,39	0
42	44,8	0,59	0	467,40	8,93	68,88	1553,77	286,94	268,55	173,94	17,85	3,40	898,36	300,14	13,44	0	154,74	0
43	39,6	1,10	0	438,66	16,81	1305,17	0,35	1633,74	0	147,58	237,08	123,75	230,18	44,05	288,90	46,28	281,25	0
44	30,0	0,00	0	144,87	616,25	164,21	2148,55	279,16	1301,95	136,96	1128,96	118,24	1186,69	37,23	1144,03	6,55	1048,79	0
45	33,6	0,75	0	41,12	615,29	64,87	1911,99	230,92	1073,11	183,87	119,23	0	1170,62	69,04	802,55	0	1061,62	0
46	35,0	0,00	0	534,81	9,49	1283,51	0,00	1809,31	0	689,86	0	141,96	611,97	93,85	500,59	24,39	670,09	0
47	40,0	0,66	0	915,87	5,51	275,09	628,07	2206,32	11,23	240,76	232,09	222,05	140,28	85,01	291,66	32,35	281,59	0
48	35,0	0,00	0	1546,36	0,00	123,47	0,00	2105,56	0	1145,66	0	0	1062,03	19,03	419,37	0	938,71	0
49	34,1	0,30	0	1593,29	0,00	1102,91	0,00	2019,14	0	955,14	0	146,60	692,45	94,41	571,49	19,31	290,97	0
50	41,1	1,30	0	1303,64	6,30	279,56	1734,29	953,92	5,52	221,24	208,67	301,12	36,01	98,17	288,34	139,18	129,99	0
51	35,0	0,00	0	1652,75	0,00	112,89	0,00	2295,36	0	998,40	0	0	1095,00	15,18	357,50	0	823,91	0
52	34,3	0,54	0	1527,52	0,00	1124,52	4,31	1914,39	0	942,51	2,99	145,29	628,52	93,24	504,62	20,46	256,70	0
53	40,6	0,74	0	1314,53	2,10	271,52	1014,81	1837,86	23,13	240,75	58,62	347,91	166,70	85,28	254,88	38,79	169,27	0
54	36,5	0,51	0	1471,27	0,00	174,25	276,47	1710,14	0	679,37	0,41	0	1855,15	86,43	550,07	0	778,05	0

Mod.	Mean	Desv	We1		We2		We3		We4		We5		We6		We7		We8	
			Esp.	Bloq.	Esp.	Bloq.	Esp.	Bloq.	Esp.	Bloq.	Esp.	Bloq.	Esp.	Bloq.	Esp.	Bloq.	Esp.	Bloq.
55	34,4	0,67	0	1594,39	0,03	1109,17	49,50	1964,34	0,42	895,08	1,57	144,86	657,45	93,66	575,95	20,64	219,49	0
56	39,8	0,52	0	1410,94	0,90	268,64	1218,68	1552,53	41,18	221,39	367,52	191,24	255,00	103,30	159,60	27,99	289,75	0
57	35,0	0,00	0	1605,77	0,00	92,37	0,17	2205,28	0	1021,20	0	0	1134,69	34,22	355,09	0	811,70	0
58	33,9	0,36	0	1617,79	0,00	1234,01	156,50	1776,38	0,85	858,10	7,18	147,05	725,44	97,23	383,57	21,95	178,05	0
59	38,4	0,63	0	922,24	26,18	271,39	2456,59	388,90	218,86	354,16	178,03	1030,34	33,61	86,95	310,81	32,08	144,47	0
60	35,7	0,45	0	1333,67	0,00	148,04	232,46	1906,65	0,22	1026,40	1,21	31,66	1255,88	54,48	476,43	5,50	973,87	0
61	33,1	0,30	0	1192,10	0,00	1285,93	0,00	1988,60	0	960,24	0	144,98	685,18	95,23	668,94	22,26	526,96	0
62	24,2	20,22	0	420,97	17,49	166,48	711,78	944,81	24,56	172,43	66,05	327,54	19,67	53,97	86,39	19,74	122,58	0
63	36,0	0,45	0	1581,43	0,00	147,83	375,84	1868,58	0,07	787,42	0,96	31,84	1564,65	54,46	598,87	5,21	865,11	0
64	34,0	0,23	0	1607,85	0,00	1119,08	1,52	1972,07	0	992,09	1,66	147,05	650,92	96,16	527,07	20,98	307,95	0
65	17,9	19,92	0	365,83	1,20	138,32	207,25	1012,66	0,65	139,35	29,45	194,73	12,02	39,61	58,34	18,82	108,14	0
66	28,2	0,46	0	1644,48	0,00	38,07	1550,10	220,76	1384,57	128,73	966,82	32,80	2062,46	86,59	1087,56	0	1279,77	0
67	18,0	0,00	0	2403,39	0,00	2329,02	0,00	2319,76	0	1698,16	0	203,51	1727,37	216,68	1113,23	95,77	538,85	0
68	29,0	0,16	0	1903,90	0,00	176,17	2407,67	277,25	2594,08	401,68	2348,23	604,12	2223,91	563,43	1086,86	115,80	557,95	0



## **Anexo 6**

**Tabla de resultados de simulación para  
cada patología en el caso multimodelo y  
con producción real.**

	Pathology	Wu 1	Wu 2	Wu 3	Wu 4	Wu 5	Wu 6
Work station 1	1	<b>(13.1, 0.8)</b>	(22.8, 9.9)	(26.2, 9.4)	(27.7, 8.6)	(28.7,8.01)	(29.3,7.4)
	2	<b>(15.5, 1.3)</b>	(23.9, 8.6)	(27, 8.3)	(28.4, 7.6)	(29.2, 7.1)	(29.8, 6.7)
	3	<b>(31, 1.3)</b>	(31.7, 1.8)	(32.2, 2.06)	(32.3, 1.9)	(32.4, 1.9)	(32.6, 2.1)
	4	<b>(16, 1.1)</b>	(24.7, 8.4)	(27.3, 7.89)	(28.6, 7.25)	(29.4, 6.75)	(30, 6.35)
	5	<b>(31.2, 1.67)</b>	(32, 1.87)	(32.2, 1.93)	(32.3, 2.04)	(32.4, 2.03)	(32.6, 2.11)
Work station 2	1	(29.8,7.05)	(30.2, 6.7)	---	---	(30.4,6.4)	(30.6, 6.1)
	2	(30.3, 6.33)	(30.6 6.04)	---	---	(30.9, 5.7)	(30.9, 5.5)
	3	(32.5, 2.03)	(32.5, 2)	---	---	(32.6, 2)	(32.6, 1.97)
	4	(30.4, 6)	(30.7, 5.7)	---	---	(30.9, 5.4)	(31.08, 5.25)
	5	(32.5, 2.09)	(32.5, 2.03)	---	---	(32.5, 2.03)	(32.6, 2)
Work station 3	1	---	---	(30.5.8)	---	---	---
	2	---	---	(31.2, 5.3)	---	---	---
	3	---	---	(32.6, 1.95)	---	---	---
	4	---	---	(31.3, 5.09)	---	---	---
	5	---	---	(32.6, 2.01)	---	---	---
Work station 4	1	(30.8, 5.6)	(30.9, 5.4)	(31, 5.2)	(31, 5.1)	---	---
	2	(31.3, 5.1)	(31.35, 4.9)	(31.4, 4.8)	(31.5, 4.69)	---	---
	3	(32.6, 1.96)	(32.7, 1.95)	(32.6, 1.94)	(32.6, 1.92)	---	---
	4	(31.35, 4.9)	(31.4, 4.7)	(31.5, 4.6)	(31.6, 4.4)	---	---
	5	(32.6, 2)	(32.7, 1.99)	(32.7, 1.98)	(32.7, 1.97)		
Work station 5	1	(31.1, 5.01)	(31, 4.89)	(31.2, 4.7)	(31.2, 4.68)	---	---
	2	(31.5, 4.57)	(31.6, 4.47)	(31.6, 4.37)	(31.6, 4.28)	---	---
	3	(32.7, 1.9)	(32.7, 1.9)	(32.7, 1.91)	(32.7, 1.91)	---	---
	4	(31.6, 4.38)	(31.7, 4.27)	(31.7, 4.19)	(31.75, 4.1)	---	---
	5	(32.7, 1.94)	(32.7, 1.95)	(32.7, 1.94)	(32.7, 1.94)		
Work station 6	1	(31.3, 4.5)	(31.3,4.4)	(31.3, 4.4)	(31.4, 4.3)	---	---
	2	(31.6, 4.2)	(31.6, 4.1)	(31.7, 4.04)	(31.7, 4.98)	---	---
	3	(32.7, 1.93)	(32.7, 1.92)	(32.7, 1.94)	(32.7, 1.94)	---	---
	4	(31.7, 4.02)	(31.7, 3.9)	(31.7, 3.88)	(31.8, 3.82)	---	---
	5	(32.7, 1.93)	(32.7, 1.91)	(32.7, 1.9)	(32.7, 1.91)		
Work station 7	1	(31.4, 4.2)	(31.5, 4.2)	(31.5, 4.15)	(31.5, 4.1)	(31.5, 4.1)	(31.6, 3.9)
	2	(31.81, 3.92)	(31.82, 3.85)	(31.82, 3.8)	(31.8, 3.76)	(31.8, 3.71)	(31.86, 3.66)
	3	(32.7, 1.94)	(32.7, 1.95)	(32.7, 1.94)	(32.7, 1.94)	(32.7, 1.94)	(32.7, 1.94)
	4	(31.8, 3.76)	(31.8, 3.7)	(31.9, 3.6)	(31.9, 3.6)	(31.9, 3.5)	(31.9, 3.5)
	5	(32.7, 1.92)	(32.7, 1.92)	(32.7, 1.92)	(32.7, 1.91)	(32.7, 1.91)	(32.7, 1.91)
Work station 8	1	(31.5,3.9)	(31.5, 3.8)	(31.6,3.8)	(31.6, 3.8)	(31.6, 3.7)	(31.6, 3.7)
	2	(31.85, 3.62)	(31.86, 3.57)	(31.88, 3.53)	(31.9, 3.5)	(31.9, 3.47)	(31.9, 3.43)
	3	(32.7, 1.95)	(32.7, 1.95)	(32.7, 1.94)	(32.7, 1.94)	(32.7, 1.95)	(32.7, 1.95)
	4	(32, 3.5)	(32, 3.46)	(32, 3.42)	(32, 3.39)	(32, 3.36)	(32, 3.33)
	5	(32.7, 1.91)	(32.7, 1.91)	(32.7, 1.90)	(32.7, 1.90)	(32.69, 1.9)	(32.71, 1.91)

# Bibliografía

- [1] Scholl, A. *Balancing and sequencing assembly lines*, 2nd ed. Physica, Heidelberg. 1999
- Shtub, A., Dar-El, E.M., *A methodology for the selection of assembly systems*. International Journal of Production Research 27., 1989.
- [2] Boysen, N., Fliedner, M., Scholl, A., *A classification of assembly line balancing problems*. Jenaer Schriften zur Wirtschaftswissenschaft 12/06, University of Jena. 2006a.
- [3] Chase, R.B., *Survey of paced assembly lines*, Industrial Engineering 6 (2). 1974.
- [4] Schöniger, J., Spingler, J., *Planung der Montageanlage*. Technica 14, 1989.
- [5] Battaïa, A. Dolgui., *A taxonomy of line balancing problems and their solution approaches*. International Journal of Production Economics; 142, pp. 259-277 (2013).
- [6] E.Gurevsky, O.Battaïa, A.Dolgui. *Balancing of a simple assembly line under variations of task processing times*. Annals of operations research. Vol 201, Is 1 pp 265-286 (2012).
- [7] A Janiak, T.Krysiak, R.Trela. *Scheduling problems with learning and ageing effects: A survey*. Decision making in manufacturing and services. Vol 5 pp 19-36 (2011).
- [8] L.Li, Q.Chang, J.Ni. *Data driven bottleneck detection of manufacturing systems*. International Journal of production research ;47:18, pp 5019-5036 (2009).
- [9] L.Li, Q.Chang, J.Ni. *Real time production improvement through bottleneck control*. International Journal of production research ;47:21, pp 6145-6158 (2009).
- [10] Z.Sun, L.Li *Opportunity estimation for real-time energy control of sustainable manufacturing system*. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. Vol 10 Is 1, Pp 38-44 2013.
- [11] PhD C.E.Lopez *Unbalanced workload allocation in large assembly lines*. 2014
- [12] J.Liu, Q.Chang, G.Xiao, S.Biller. *The costs of downtime incidents in serial multistage manufacturing system*. Journal of Manufacturing Science and Engineering. Vol 134(2) 2012.
- [13] PhD A.R.Lincoln. *Development of a dynamic Costing model for assessing downtime and unused capacity costs in manufacturing*. 2013.
- [14] Q.Chang, S.Biller, G Xiao. *Transient analysis of downtimes and bottleneck dynamics in serial manufacturing systems*. Journal of Manufacturing science and Engineering. Vol 132, Is 5 2010.

- [15] O. Basile, P. Dehombreux, F. Riane. *Evaluation of the uncertainty affecting reliability models*. Journal of quality maintenance engineering Vol13, is 2. Pp 137-151. 2007.
- [16] L. Li, D. Djurdjanovic, J. Ni. *Maintenance task prioritization using data driven bottleneck detection and maintenance opportunity windows*. ASME 2007. Int. Conference on Manufacturing Science and Engineering.
- [17] L. Li, J. Ni. *Short-term decision support system for maintenance task prioritization*. International Journal of Production Economics. Vol 121 pp 195-202 (2009).
- [18] S. Lee, X. Gu, J. Ni. *Stochastic maintenance opportunity windows for unreliable two-machine one-buffer system*. Expert systems with applications Vol 40, pp 5385-5394. (2013).
- [19] K. L. Son, M. Fouladirad, A. Barros, E. Levrat, B. Lung. *Remaining useful life estimation based on stochastic deterioration models: A comparative study*. Reliability Engineering and System Safety. Vol 112, pp 165-175. 2013.
- [20] Phd Q. Chang. *Supervisory factory control based on real-time production feedback*. 2005
- [21] F. Leal, R. F. S. Costa, J. A. B. Montevechi, D. A. Almeida, F. A. S. Marins. *A practical guide for operational validation of discrete simulation models*. Pesquisa Operacional Vol 31(1) pp 57-77 (2011)
- [22] C. Roser, M. Nakano, and M. Tanaka, *Comparison of bottleneck detection methods for AGV systems*, Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference, 2003, pp. 1192-1198.
- [23] J. M. Alden, L. D. Burns, T. Costy, R. D. Hutton, C. A. Jackson, D. S. Kim, K. A. Kohls, J. H. Owen, M. A. Turnquist, and D. J. Vander Veen, *General Motors Increases Its Production Throughput*, Interfaces, 2006, Vol. 36, No. 1, pp. 6-25
- [24] N. Frigerio, A. Matta. *Machine control policies for energy saving in manufacturing*. IEEE Int. Conference on Automationscience and Engineering. 2013.
- [25] E. Garcia, N. Montés. *A new mathematical model for automated production lines based on probabilistic sub-cycle times*. Modelling for engineering and human behaviour. 2015.
- [26] E. Garcia, N. Montés. *A tensor model for automated production lines based on probabilistic sub-cycle times*. Chapter book. Modeling Human behaviour: Individuals and organizations. 2016 (To appear).
- [27] E. Garcia, N. Montés. *A tensor model for automated production lines based on probabilistic sub-cycle times*. Solicitud de patente por parte de FORD. ID : 83627274.
- [28] Scholl & Becker, *A Simple Assembly Line Balancing SALB* 2006.

- [29]Graham et a “Optimization and approximation in deterministic secuencing and scheduling”.
- [30]Lebefromm, U., 1999. Dirección de Producción. Introducción con ejemplos SAP R/3, 4th ed. Oldenbourg. München.
- [31]Grabau, M.R., Maurer, R.A., 1998. Assembly line balancing when scarp impacts the bottom line. *Production and Inventory Management Journal* 39, 16–21.
- [32]Wild R., 1975, On the Selection of Mass Production System, *International Journal of Production Research*, vol.13, n.5, pp.443- 461.
- [33]Yano, C.A., Bolat, A., 1989. Survey, development, and application of algorithms for sequencing paced assem-bly lines. *Journal of Manufacturing and Operations Management* 2, 172–198
- [34]Sumichrast, R.T., Russell, R.S., 1990. Evaluating mixed-model assembly line sequencing heuristics for just-in-time production systems. *Journal of Operations Management* 9, 371–390.
- [35]Sumichrast, R.T., Russell, R.S., Taylor, B.W., 1992. A comparative analysis of sequencing procedures for mixed-model assembly lines in a just-in-time production system. *International Journal of Production Re-search* 30, 199–214.
- [36]Bard, J.F., Dar-El, E., Shtub, A., 1992. An analytic framework for sequencing mixed model assembly lines. *International Journal of Production Research* 30, 35–48.
- [37]Tsai L.H., 1995. Mixed-model sequencing to minimize utility work and the risk of conveyor stoppage. *Management Science* 4, 485-495.
- [38]Merengo, C., Nava, F., Pozetti, A., 1999. Balancing and sequencing manual mixed-model assembly lines. *International Journal of Production Research* 37, 2835–2860.
- [39]McMullen, P.R., Frazier, G.V., 1998. Using simulated annealing to solve a multiobjective assembly line balanc-ing problem with parallel workstations. *International Journal of Production Research* 36, 2717–2741.
- [40]Kim Y.K. et al., 2000. A coevolutionary algorithm for balancing and sequencing in mixed model assembly lines. *Applied intelligence* 13, 247-258.
- [41]Miltenburg, J., 2002. Balancing and scheduling mixed-model U-shaped production lines. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems* 14, 119–151.
- [42]Sawik, T., 2002. Monolithic vs. hierarchical balancing and scheduling of a flexible assembly line. *European Journal of Operational Research* 143, 115–124.
- [43]Bock S., Rosenberg O., Bracket T., 2006. Controlling mixed model assembly lines in real time by using distributed systems. *Europeans Journal of Operations Research*, 168 (3), 880-904.
- [44]Thomopoulos, N.T., 1970. Mixed model line balancing with smoothed station assignments. *Management Sci-ence* 16, 593– 603.

- [45] Domschke, W., Klein, R., Scholl, A., 1996. Antizipative Leistungsabstimmung bei moderner Variantenfließfertigung. *Zeitschrift für Betriebswirtschaft* 66, 1465–1490.
- [46] Bukchin, J., Dar-El, E.M., Rubinovitz, J., 1997. Team oriented assembly system design: A new approach. *International Journal of Production Economics* 51, 47–57.
- [47] Matanachai, S., Yano, C.A., 2001. Balancing mixed-model assembly lines to reduce work overload. *IIE Transactions* 33, 29–42.
- [48] Macaskill J. L. C., 1972, Production Line Balances for Mixed-Model Lines, *Management Science*, Vol. 19, No 4, Application Series, Part 1, 423-434.
- [49] Ahmadi, R.H., Wurgaft, H., 1994. Design for synchronized flow manufacturing. *Management Science* 40, 1469–1483.
- [50] Pinto, P.A., Dannenbring, D.G., Khumawala, B.M., 1975. A branch and bound algorithm for assembly line balancing with paralleling. *International Journal of Production Research* 13, 183–196.
- [51] Bukchin, Y., Rabinowitch, I., 2005. A branch-and-bound based solution approach for the mixed-model assembly line-balancing problem for minimizing stations and task duplication costs. To appear: *European Journal of Operational Research*.
- [52] Daganzo, C.F., Blumenfeld, D.E., 1994. Assembly system design principles and tradeoffs. *International Journal of Production Research* 32, 669–681.
- [53] Dobson, G., Yano, C.A., 1994. Cyclic scheduling to minimize inventory in a batch flow line. *European Journal of Operational Research* 75, 441–461.
- [54] Gökçen, H., Erel, E., 1998. Binary integer formulation for mixed-model assembly line balancing problem. *Computers and Industrial Engineering* 34, 451–461.
- [55] Carter, J.C., Silverman, F.N., 1984. A cost-effective approach to stochastic line balancing with off-line repairs. *Journal of Operations Management* 4, 145–157.
- [56] Henig, M.I., 1986. Extensions of the dynamic programming method in the deterministic and stochastic assembly-line balancing problems. *Computers and Operations Research* 13, 443–449.
- [57] Kottas, J.F., Lau, H.-S., 1981. A stochastic line balancing procedure. *International Journal of Production Research* 19, 177–193.
- [58] Lau, H.-S., Shtub, A., 1987. An exploratory study on stopping a paced line when incompletions occur. *IIE Transactions* 19, 463–467.
- [59] Lyu, J., 1997. A single-run optimization algorithm for stochastic assembly line balancing problems. *Journal of Manufacturing Systems* 16, 204–210.
- [60] Sarin, S.C., Erel, E., 1990. Development of cost model for the single-model stochastic assembly line balancing problem. *International Journal of Production Research* 28, 1305–1316.

- [61] Sarin, S.C., Erel, E., Dar-El, E.M., 1999. A methodology for solving single-model, stochastic assembly line balancing problem. *Omega* 27, 525–535.
- [62] Shtub, A., 1984. The effect of incompleteness cost on line balancing with multiple manning of work stations. *International Journal of Production Research* 22, 235–245.
- [63] Silverman, F.N., Carter, J.C., 1986. A cost-based methodology for stochastic line balancing with intermittent line stoppages. *Management Science* 32, 455–463.
- [64] Lapierre, S.D., Ruiz, A.B., 2004. Balancing assembly lines: An industrial case study. *Journal of the Operational Research Society* 55, 589–597.
- [65] Buzacott, J.A., Shanthikumar, J.G., 1993. *Stochastic models of manufacturing systems*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- [66] Tempelmeier, H., 2003. Practical considerations in the optimization of flow production systems. *International Journal of Production Research* 41, 149–170.
- [67] Buzacott, J.A., 1990. Abandoning the moving assembly line: Models of human operators and job sequencing. *International Journal of Production Research* 28, 821–839.
- [68] Suhail, A., 1983. Reliability and optimization considerations in a conveyor-paced assembly line system. *International Journal of Production Research* 21, 627–640.
- [69] Baker, K.R., Powell, S.G., Pyke, D.F., 1990. Buffered and unbuffered assembly systems with variable processing times. *Journal of Manufacturing and Operations Management* 3, 200–223.
- [70] Hillier, F.S., So, K.C., 1991. The effect of machine breakdowns and interstage storage on the performance of production line systems. *International Journal of Production Research* 29, 2043–2055.
- [71] Hillier, F.S., So, K.C., 1993. Some data for applying the bowl phenomenon to large production line systems. *International Journal of Production Research* 31, 811–822.
- [72] Malakooti, B., 1994. Assembly line balancing with buffers by multiple criteria optimization. *International Journal of Production Research* 32, 2159–2178.
- [73] Powell, S.G., 1994. Buffer allocation in unbalanced three-station serial lines. *International Journal of Production Research* 32, 2201–2217.
- [74] Dolgui, A., Ereemev, A., Kolokolov, A., Sigaev, V., 2002. A genetic algorithm for allocation of buffer storage capacities in production line with unreliable machines. *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms* 1, 89–104.
- [75] Sphicas, G.P., Silverman, F.N., 1976. Deterministic equivalents for stochastic assembly line balancing. *AIIE Transactions* 8, 280–282.
- [76] Hillier, F.S., So, K.C., Boling, R.W., 1993. Toward characterizing the optimal allocation of storage space in production line systems with variable processing times. *Management Science* 39, 126–133.

- [77]Johnson, R.V., 1983. A branch and bound algorithm for assembly line balancing problems with formulation irregularities. *Management Science* 29, 1309–1324.
- [78]Karabati, S., Sayin, S., 2003. Assembly line balancing in a mixed-model sequencing environment with synchronous transfers. *European Journal of Operational Research* 149, 417–429.
- [79]Pinto, P.A., Dannenbring, D.G., Khumawala, B.M., 1983. Assembly line balancing with processing alternatives: An application. *Management Science* 29, 817–830.
- [80]Pinnoi, A., Wilhelm, W.E., 1998. Assembly system design: A branch and cut approach. *Management Science* 44, 103–118.
- [81]Bukchin, J., Tzur, M., 2000. Design of flexible assembly line to minimize equipment cost. *IIE Transactions* 32, 585–598.
- [82]Zäpfel G., 1975. Ausgewählte fertigungswirtschaftliche Optimierungsprobleme von Fließfertigungssystemen. Beuth, Berlin.
- [83]Klenke, H., 1977. Ablaufplanung bei Fließfertigung. Gabler, Wiesbaden.
- [84]Rosenblatt, M.J., Carlson, R.C., 1985. Designing a production line to maximize profit. *IIE Transactions* 17, 117–121.
- [85]Martin, G.E., 1994. Optimal design of production lines. *International Journal of Production Research* 32, 989–1000.
- [86]Boysen, N., Fliedner, M., 2006. A versatile algorithm for assembly line balancing. Working paper, University of Hamburg, Germany.
- [87]Boucher, T.O., 1987. Choice of assembly line design under task learning. *International Journal of Production Research* 25, 513– 524.
- [88]Chakravarty, A.K., 1988. Line balancing with task learning effects. *IIE Transactions* 20, 186–193.
- [89]Falkenauer, E., 2005. Line balancing in the real world. In: *Proceedings of the International Conference on Prod-uct Lifecycle Management PLM 05*, Lumiere University of Lyon, France, 2005, (on cd-rom).
- [90]Agnētis, A., Ciancimino, A., Lucertini, M., Pizzichella, M., 1995. Balancing flexible lines for car components assembly. *International Journal of Production Research* 33, 333–350.
- [91]Pinnoi, A., Wilhelm, W.E., 1997a. A family of hierarchical models for assembly system design. *International Journal of Production Research* 35, 253–280. Pinnoi, A., Wilhelm, W.E., 1997b. A branch and cut approach for workload smoothing on assembly lines. *IN-FORMS Journal on Computing* 9, 335–350.
- [92]Rekiek, B., de Lit, P., Pellichero, F., L'Eglise, T., Fouda, P., Falkenauer, E., Delchambre, A., 2001. A multiple objective grouping genetic algorithm for assembly line design. *Journal of Intelligent Manufacturing* 12, 467–485.

- [93] Gamberini, R., Grassi, A., Gamberi, M., Manzini, R., Regattieri, A., 2004. U-shaped assembly lines with stochastic tasks execution times: heuristic procedures for balancing and re-balancing problems.
- [94] Bautista, J., Pereira, J., 2006. Ant algorithms for a time and space constrained assembly line balancing problem. *European Journal of Operational Research*, to appear.
- [95] Pinto, P.A., Dannenbring, D.G., Khumawala, B.M., 1981. Branch and bound and heuristic procedures for assembly line balancing with paralleling of stations. *International Journal of Production Research* 19, 565–576.
- [96] Shtub, A., Dar-El, E.M., 1989. A methodology for the selection of assembly systems. *International Journal of Production Research* 27, 175–186
- [97] Agrawal, P.K., 1985. The related activity concept in assembly line balancing. *International Journal of Production Research* 23, 403–421.
- [98] Lee, T.O., Kim, Y., Kim, Y.K., 2001. Two-sided assembly line balancing to maximize work relatedness and slackness. *Computers and Industrial Engineering* 40, 273–292.
- [99] Shtub, A., Dar-El, E.M., 1990. An assembly chart oriented assembly line balancing approach. *International Journal of Production Research* 6, 1137–1151.
- [100] Carnahan, B.J., Norman, B.A., Redfern, M.S., 2001. Incorporating physical demand criteria into assembly line balancing. *IIE Transactions* 33, 875–887.
- [101] Miltenburg, J., Wijngaard, J., 1994. The U-line line balancing problem. *Management Science* 40, 1378–1388.
- [102] Aase, G.R., Olson, J.R., Schniederjans, M.J., 2004. U-shaped assembly line layouts and their impact on labor productivity: An experimental study. *European Journal of Operational Research* 156, 698–711
- [103] Miltenburg, J., 1998. Balancing U-lines in a multiple U-line facility. *European Journal of Operational Research* 109, 1–23.
- [104] Sparling, D., 1998. Balancing JIT production units: The N U-line balancing problem. *Information Systems and Operational Research* 36, 215–237. 32
- [105] Scholl, A., Klein, R., 1999. ULINO: Optimally balancing U-shaped JIT assembly lines. *International Journal of Production Research* 37, 721–736.
- [106] Steffen, R., 1977. *Produktionsplanung bei Fließbandfertigung*. Gabler, Wiesbaden.
- [107] Rosenberg, O., Ziegler, H., 1992. A comparison of heuristic algorithms for cost-oriented assembly line balancing. *Zeitschrift für Operations Research* 36, 477–495.

- [108] Amen, M., 1997. Ein exaktes Verfahren zur kostenorientierten Fließbandabstimmung. In: Zimmermann, U., et al. (Eds.), *Operations Research Proceedings 1996*. Springer, Berlin, pp. 224–229.
- [109] Scholl, A., Becker, C., 2005. A note on an exact method for cost-oriented assembly line balancing. *International Journal of Production Economics* 97, 343–352.
- [110] Pinnoi, A., Wilhelm, W.E., 1998. Assembly system design: A branch and cut approach. *Management Science* 44, 103–118.
- [111] Bukchin, J., Tzur, M., 2000. Design of flexible assembly line to minimize equipment cost. *IIE Transactions* 32, 585–598.
- [112] Bard, J.F., 1989. Assembly line balancing with parallel workstations and dead time. *International Journal of Production Research* 27, 1005–1018.
- [113] Dolgui, A., Guschinski, N., Levin, G., 1999. On problem of optimal design of transfer lines with parallel and sequential operations. In: Fuertes, J.M. (Ed.), *Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, Barcelona, Spain, vol. 1, 1999*, pp. 329–334.
- [114] Meyr, H., 2004. Supply chain planning in the German automotive industry. *OR Spectrum* 26, 447–470.
- [115] Akagi, F., Osaki, H., Kikuchi, S., 1983. A method for assembly line balancing with more than one worker in each station. *International Journal of Production Research* 21, 755–770
- [116] Bartholdi, J.J., 1993. Balancing two-sided assembly lines: A case study. *International Journal of Production Research* 31, 2447–2461.