

ACTUALIZACIÓN DE UNA CELDA DE MANUFACTURA FLEXIBLE FMC: CASO DE ESTUDIO UTP

UPGRADING OF AN FLEXIBLE MANUFACTURING CELL FMC: UTP CASE STUDY

Leonardo Fabio Guerrero Becerra

Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia
leonardo.guerrero@utp.edu.co

Carlos Alberto Montilla Montaña

Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia
cmontilla@utp.edu.co

Recepción: 11/noviembre/2022

Aceptación: 19/marzo/2023

Resumen

Con el presente artículo se divulga la solución dada a la necesidad de la facultad de Ingeniería Mecánica de la UTP en promover la experticia en celdas de manufactura flexible de mecanizado en entornos académicos. Partiendo del previo resultado exitoso de un proyecto de integración y puesta en marcha de una FMC, y con la adquisición de nuevos equipos como una base deslizante para el brazo robótico y una fresadora CNC didáctica, se desarrolló un nuevo proyecto de actualización de la celda. Se efectuó una nueva distribución de planta, se acondicionaron e integraron la fresadora y la base deslizante, se reprogramaron los diversos componentes, con redes de Petri se simuló la operación de la FMC, se actualizó el programa Monitor, se operó y se puso a punto la FMC, para finalmente evaluar el cumplimiento de la flexibilidad y confiabilidad propuestas.

Palabras Clave: FMC, FMS, RdP, scheduling.

Abstract

With this article, the solution given to the need of the Faculty of Mechanical Engineering of the UTP in promoting expertise in a flexible manufacturing cell of machining in academic environments is disclosed. Starting from the previous successful result of an FMC integration and commissioning project, and with the

acquisition of new equipment such as a sliding base for the robotic arm and a didactic CNC milling machine, a new cell upgrade project was developed. A new plant distribution was carried out, the milling machine and the sliding base were conditioned and integrated, the various components were reprogrammed, the operation of the FMC was simulated with Petri nets, the Monitor program was updated, it was operated and fine-tuned the FMC, to finally evaluate compliance with the proposed flexibility and reliability.

Keywords: FMC, FMS, RdP, scheduling.

1. Introducción

El concepto de Sistema de Manufactura Flexible FMS (*Flexible Manufacturing System*) nació en Gran Bretaña a principios de la década de 1960, y desde entonces dichos sistemas han dado respuesta a exigencias de nuevas variedades de producto, variación del tamaño de lote a producir, mejores capacidades de respuesta a los cambios en productos, tecnología de producción y mercados. Un FMS, consiste en un grupo de estaciones de procesamiento (usualmente máquinas-herramienta CNC) interconectadas mediante un sistema automatizado de manejo y almacenamiento de material, controladas por medio de un sistema integrado de computadoras, [Groover, 2007]. Los FMS utilizan el concepto de tecnología de grupo, y pueden producir piezas que pertenecen a un cierto código *Opitz*, es decir; con formas y tamaños acordes a una cierta familia de partes, que guardan semejanza en cuanto a dimensiones, características geométricas, y tolerancias o requisitos de procesamiento. Considerando estas similitudes entre piezas, el diseño y/o proceso de fabricación dentro de un marco de una cierta economía de escala, un FMS puede manejar cambios en programas de producción y herramientas, entre otros. Los sistemas de fabricación son flexibles según su capacidad de autoajustarse, en respuesta a los requisitos cambiantes del sistema, sin implicar cambios significativos en términos de tiempo, esfuerzo, costo o rendimiento, [CIRP, 2014]. La búsqueda de estas mejoras, son tan importantes que gran cantidad de estudios se han enfocado en el uso conjunto de las redes de Petri y de los algoritmos genéticos para modelar sistemas de manufactura flexible, generar programas de

producción que optimicen sus tareas, así como el balanceo de las cargas de trabajo, [Fúquene, 2007], [Suesca,2016].

Una celda de manufactura flexible FMC (*Flexible Manufacturing Cell*), se considera como un grupo de máquinas que realizan un proceso particular o un paso en un proceso de manufactura más largo (como el que ocurre en un FMS), y consta de al menos dos máquinas CNC. Sin embargo, es relevante considerar que algunos sistemas y celdas altamente automatizados no son flexibles (dado que están dedicados a producir masivamente un tipo de pieza). En el contexto previamente planteado, y asociándolo con el presente artículo, se toma como antecedente un proyecto de grado de la Maestría de sistemas automáticos de producción de la Universidad Tecnológica de Pereira, el cual fue culminado en el año 2005 y se tituló: “Identificación de canales, configuración de software abierto, y puesta en marcha de una celda de manufactura flexible”, [Montilla, 2005]. Dicho trabajo tuvo como objetivo general integrar y poner en marcha con operación semiautomática una FMC, partiendo de una serie de equipos y componentes preexistentes e inconexos. En dicho proyecto se llevaron a cabo la planeación, ajustes a los equipos, el desarrollo del hardware y del software; disponiéndose finalmente de una celda de manufactura flexible FMC de mecanizado, figura 1, con una distribución en planta circular, con el robot ubicado en el centro.



Figura 1 Vista general de la FMC integrada en el trabajo [Montilla, 2005].

De manera sucinta se describirá la operación de la FMC integrada en 2005. Todos los traslados de las piezas de trabajo son efectuados por el robot (salvo un traslado

último efectuado por la cinta transportadora (ítem 4). La máquina 2 (ítem 2), corresponde a una “máquina simulada”, dado que solo se disponía de una máquina CNC. En el lugar físico de esta máquina simulada, el robot traslada la pieza de trabajo, espera un tiempo determinado y luego la retira nuevamente. La mesa rotatoria (ítem 3) permite albergar piezas en bruto y en proceso. La cinta transportadora (ítem 4) permite llevar las piezas acabadas o en proceso hacia un compartimiento o almacén. El sistema de visión (ítem 5), realiza un reconocimiento de la forma de la pieza (una vez hechos los mecanizados), y comparando con un patrón de forma previamente almacenado, determina si la pieza se corresponde con dicho patrón. Para controlar la operación de la FMC fue creado un programa monitor en *LabVIEW*. Culminado satisfactoriamente este proyecto de integración, se previó en un futuro, reemplazar la “máquina simulada” por una segunda máquina CNC; con el objetivo de atender uno de los requisitos mínimos de una FMC, consistente en poseer por lo menos 2 máquinas CNC. Un tiempo después, la facultad de Ingeniería Mecánica adquirió una base deslizante o *slide base* para el brazo robótico, con lo cual sus grados de libertad pasaron de 5 a 6; realizándose el reemplazo de la cinta deslizante (ítem 4) por este nuevo elemento. Fue necesario entonces reconfigurar el *layout* de la celda, pasando de una distribución circular a una longitudinal, surgiendo así la necesidad de actualizar la planificación de la operación y la programación de la FMC. Considerando esta necesidad, fue necesario gestionar una segunda máquina CNC (una fresadora); con el fin de realizar operaciones complementarias a las del torno CNC existente. Dicha máquina debía controlarse con software abierto, y ser de carácter didáctico (en cuanto a tamaño, capacidad de trabajo, robustez), para que se adaptase a los otros componentes de la celda. Como resultado se configuró la nueva distribución longitudinal, cuya vista en planta se muestra en la figura 2.

Por otra parte, varias universidades e instituciones académicas de Colombia han desarrollado proyectos en pro de actualizar, mejorar o realizar simulaciones en las celdas de manufactura adquiridas con el fin generar espacios académicos, para que los estudiantes puedan realizar prácticas, y simular entornos de trabajo similares a los de la industria, con la respectivas dificultades y retos que estos implican (la lista

de estas universidades y los trabajos realizados se pueden consultar en el numeral 1.3 de la referencia, [Guerrero, 2021]).

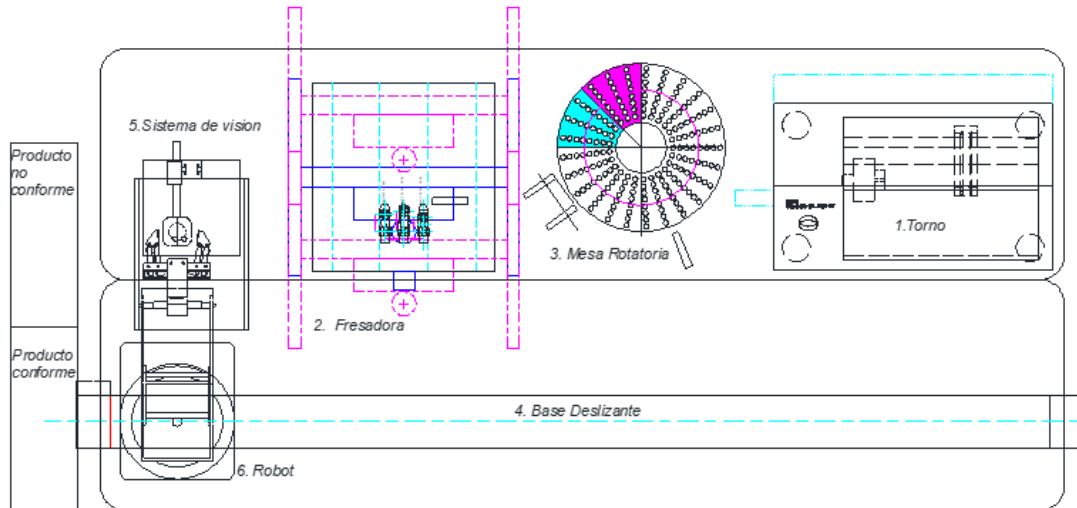


Figura 2 Layout de la FMC con la base deslizante y la fresadora [Guerrero, 2021].

Dado el anterior panorama, la implementación de sistemas de producción como las FMC y los FMS, integrados a la enseñanza; ofrecerá posibilidades de educación en diferentes disciplinas como la ing. eléctrica, mecánica, informática, mecatrónica e industrial; permitiendo la generación de profesionales con alto impacto en la formulación, mejora, innovación y desarrollo tecnológico de los procesos productivos en las pymes, [Ortega, 2016]. Por otro lado, al respecto del tema, las publicaciones más desarrolladas, son aquellas cuyo objeto está alrededor de la integración entre la formación de celdas de manufactura y los planes de producción, [Castillo, 2019]; en dichas publicaciones se descompone el problema en sub-problemas menos complejos; para poder incluir múltiples criterios de agrupación (tecnología de grupos) orientados al taller, la integración con el plan de producción y plan de capacidad a mediano plazo; logrando propuestas de configuración adecuadas al entorno donde sea aplicado. Aunque los procesos de optimización son relevantes desde el punto de vista académico, su utilidad y adaptabilidad a situaciones reales tiene limitantes dadas por las condiciones del entorno y la tecnología disponible, [Castillo, 2019]. La principal motivación para desarrollar el proyecto divulgado con el presente artículo fue la necesidad de la facultad de

Ingeniería Mecánica de la UTP, de promover la investigación y desarrollo de celdas de manufactura flexible de mecanizado. También alineados con, [Ardoli, 2015], este proyecto consideró el generar posibilidades de expansión y creación de otras FMC; a partir de máquinas de sistemas de manufactura de la pequeña y mediana industria, considerando que fue necesario integrar una maquina CNC disponible al sistema ya existente, para lograr su utilización dentro del proyecto.

2. Métodos

Una primera etapa del proyecto consistió en acondicionar los equipos adquiridos, base deslizante y la fresadora CNC didáctica. Esta última, gracias a la modalidad de trabajo de grado en la Universidad Tecnológica de Pereira, fue primero desarrollada, [Narváez, 2013]; y años después, rehabilitada y acondicionada [Cardona, 2020].

Para este nuevo proyecto, se desarrollaron los siguientes objetivos específicos:

- Caracterización de los componentes de hardware y software, señales de entrada y salida del controlador del robot, y demás elementos de la FMC.
- Análisis y definición la nueva distribución de planta de la FMC, dimensionando los recorridos y capacidades posibles de la misma.
- Análisis de los parámetros de la fresadora y la base deslizante adquiridas.
- Integración de la fresadora y la base deslizante a la FMC.
- Definición y acondicionamiento de la comunicación entre la FMC y la fresadora CNC.
- Definición de las piezas tipo a ser fabricadas en la FMC y el planteamiento de las estrategias de operación, de acuerdo con la planificación (*schedulling*) esperada.
- Reprogramación de los diversos componentes de la FMC, y actualización del programa Monitor.
- Simulación de la operación de la FMC con redes de Petri.
- Realización de pruebas operativas y verificación de la correcta operación de la FMC y actualización del manual de operación.

Una de las grandes dificultades encontradas durante el desarrollo del presente proyecto, consistió en lograr la comunicación entre los anteriores y nuevos equipos de la FMC. En primera instancia, se consideró conservar la arquitectura de señales y de comunicación iniciales, [Montilla, 2005]; no obstante, hubo muchas dificultades con la comunicación de la fresadora, lo cual finalmente se resolvió estableciendo comunicación por intermedio del puerto paralelo del PC, y construyendo un nuevo acondicionador de señales que se comunicara vía USB, utilizando un microcontrolador Arduino con comunicación por transmisor de radiofrecuencia, [Guerrero, 2021]. Por otra parte, se mantuvieron los conceptos definidos en el proyecto inicial, [Montilla, 2005] basado en tecnología de grupos; respecto a la codificación de las piezas de acuerdo con el código *Opitz*. (Ver numeral 6.1 de proyecto de este último autor). A las piezas rotacionales se les adicionó un planeado en la fresadora, tal como se puede apreciar en la figura 3. En las tablas 1 y 2 se relacionan las operaciones tecnológicas generales para producir las piezas, donde los 3 tipos pasan por las dos máquinas (torno y fresadora).

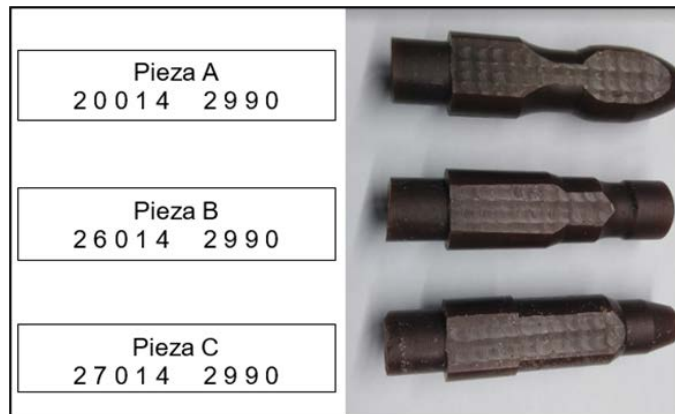


Figura 3 Piezas mecanizadas y su respectivo código *Opitz*, [Guerrero, 2021].

Tabla 1 Operaciones tecnológicas por pieza, [Guerrero, 2021].

Operación tecnológica	Abreviatura	Herramienta requerida
Refrentado	Op1	Buril 1
Cilindrado	Op2	Buril 1
Conificado	Op3	Buril 1
Torneado de forma	Op4	Buril 1
Planeado	Op5	Fresa 1 Filo

Tabla 2 Operaciones tecnológicas por pieza y máquina, [Guerrero, 2021].

2 0 0 1 4	2 9 9 0	Op1	Op2	Op3	Op4	Op5
Torno		1	1		1	
Fresadora						1
2 6 0 1 4	2 9 9 0	Op1	Op2	Op3	Op4	Op5
Torno		1	1	1	1	
Fresadora						1
2 7 0 1 4	2 9 9 0	Op1	Op2	Op3	Op4	Op5
Torno		1	1	1		
Fresadora						1

La estrategia de operación con la que se concibió el controlador de celda, y el programa de control para el actual proyecto, se describen a continuación:

- El programa de control permitirá procesar una tarea de maquinado de n piezas de trabajo (la cantidad puede ir desde 1 a 6 piezas), en cualquier combinación de código Opitz.
- Una vez lanzada la tarea, el robot llevará la primera pieza desde el almacén de MP hacia el torno, será mecanizada y posteriormente el robot la llevará al sistema de visión para realizar una inspección con visión de sus formas.
- Si la pieza corresponde a la forma esperada, será llevada a la fresadora (si está libre) o en caso contrario al almacén de espera.
- Posterior al mecanizado en la fresadora, el robot llevará la pieza al sistema de visión para ser comparada con unos patrones previamente grabados. Si el resultado de esta comparación es exitoso la pieza será llevada al depósito de producto conforme, de lo contrario al depósito de producto no conforme.
- Se itera el ciclo anterior hasta cumplir con las n piezas pedidas en la tarea.

En el proyecto de integración de la celda, [Montilla, 2005], el programa de control denominado Monitor, fue desarrollado en *LabVIEW*. Este integra y centraliza toda la operación de la celda, define la secuencia de trabajo mediante unos instrumentos virtuales VI's, que internamente invocan de manera coordinada los programas del torno (WLST), fresadora (MACH3), del robot, periféricos (ACL) y del sistema de visión (NI-MAQ). El programa monitor se basa en el concepto de *máquina de estado*, que sucintamente es una subrutina (archivo VI) que secuencialmente procesa las señales recibidas del acondicionador de señal, quien a su vez recibe

las señales físicas de los sensores y del controlador del robot. En la figura 4 se muestra una captura de pantalla del panel de programación del programa monitor, y con un recuadro rojo se resalta la máquina de estados.

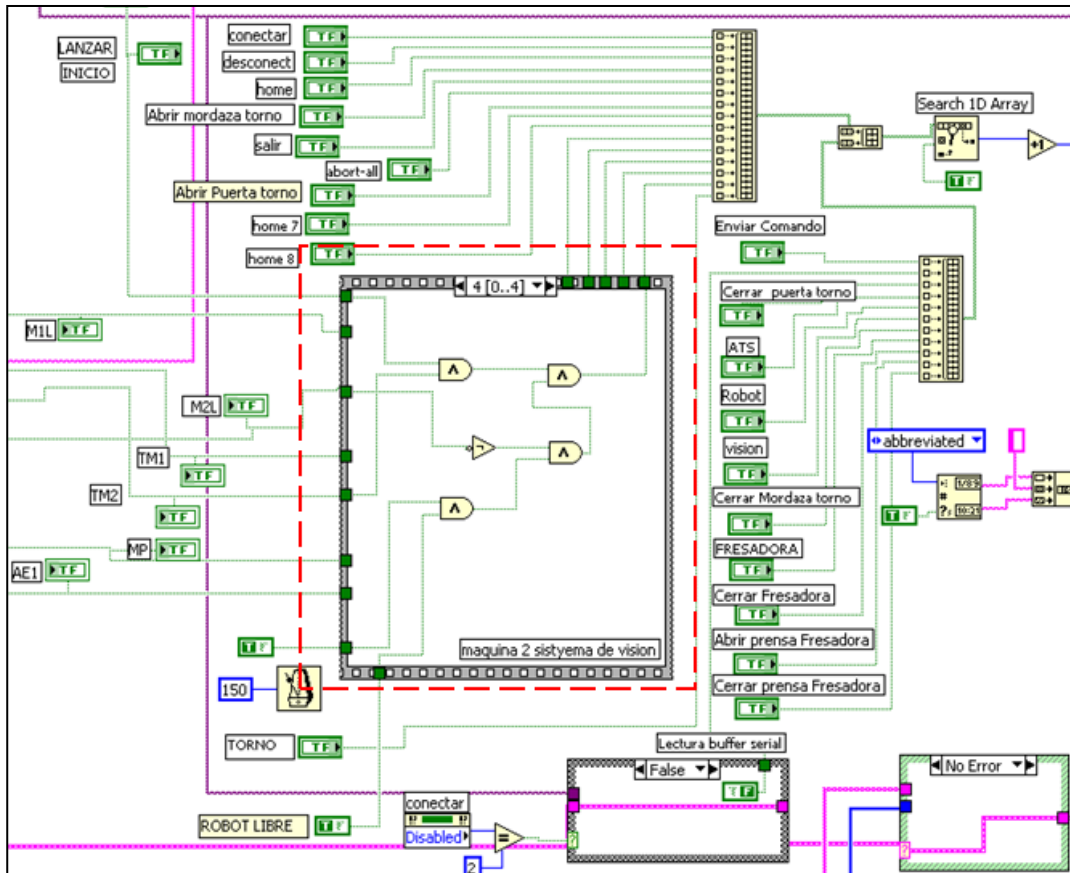


Figura 4 Captura de pantalla del panel de programación del programa monitor.

La máquina de estados utiliza diferentes señales para alimentar compuertas lógicas *and*, *or*, *xor*, etc., y aplicando lógica *booleana* a arreglos predeterminados, crea “eventos de disparo” para definir una de las 5 posibles secuencias resultantes con la que el programa monitor debe dirigir la operación de la celda. Esas 5 posibles secuencias pueden ser:

- MP a M1 (Almacén de materia prima a torno o máquina 1).
- M1 a AE1 (Torno a almacén de espera 1 del torno).
- M1 a M2 (Máquina1 a fresadora o Máquina 2).
- AE1 a M2 (Almacén de Espera 1 a Máquina 2).

- M2 a SV (Máquina 2 a Sistema de Visión).

En figura 5 se detalla el diagrama de flujo de la operación del programa monitor.

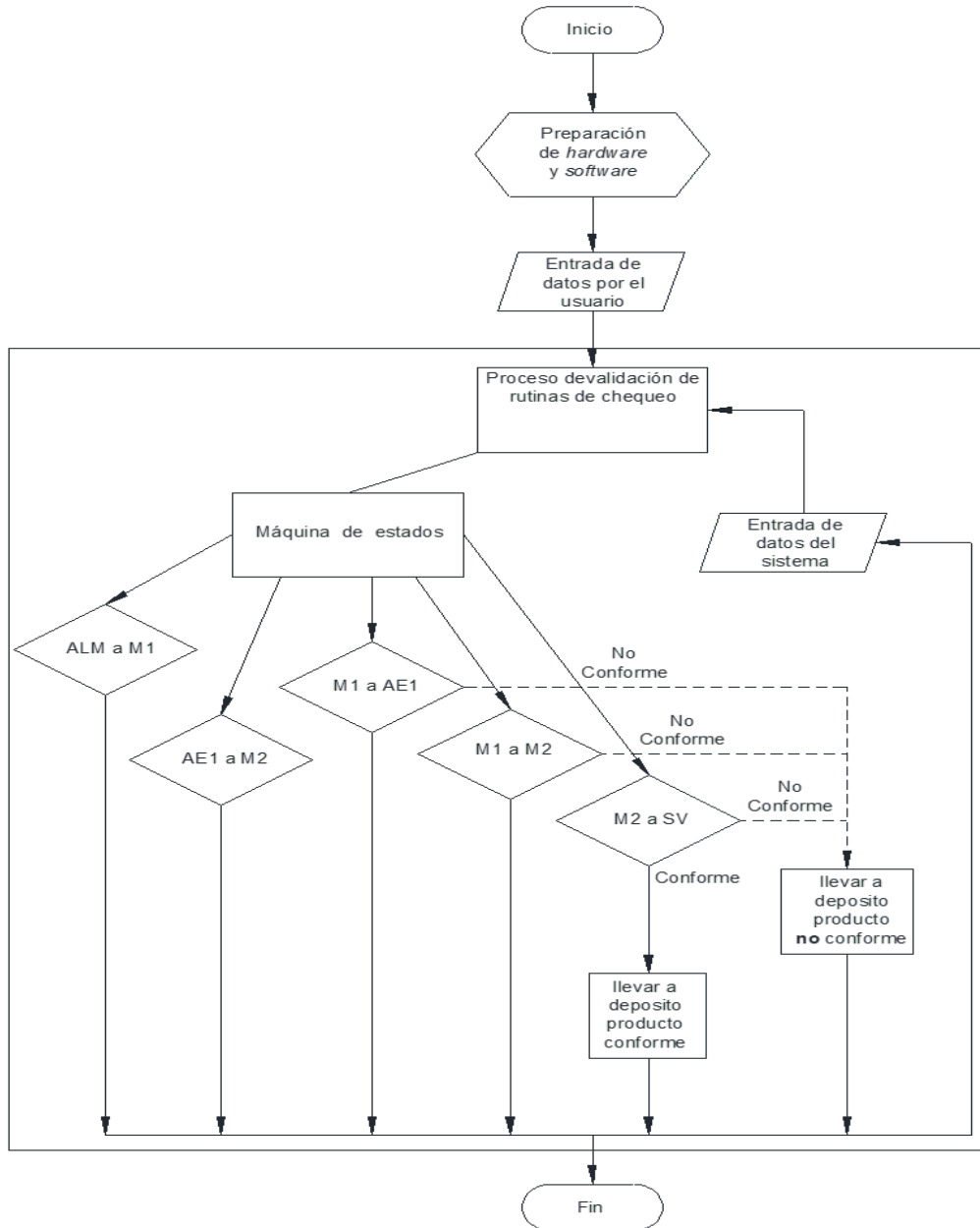


Figura 5 Diagrama de flujo del programa monitor, [Guerrero, 2021].

En figura 6 se puede observar la configuración final del software de la celda, los tipos de señales digitales y analógicas de la actualización desarrollada. Se definió

priorizar la utilización del torno, tratando de mantenerlo ocupado siempre, reduciendo así los tiempos muertos de operación.

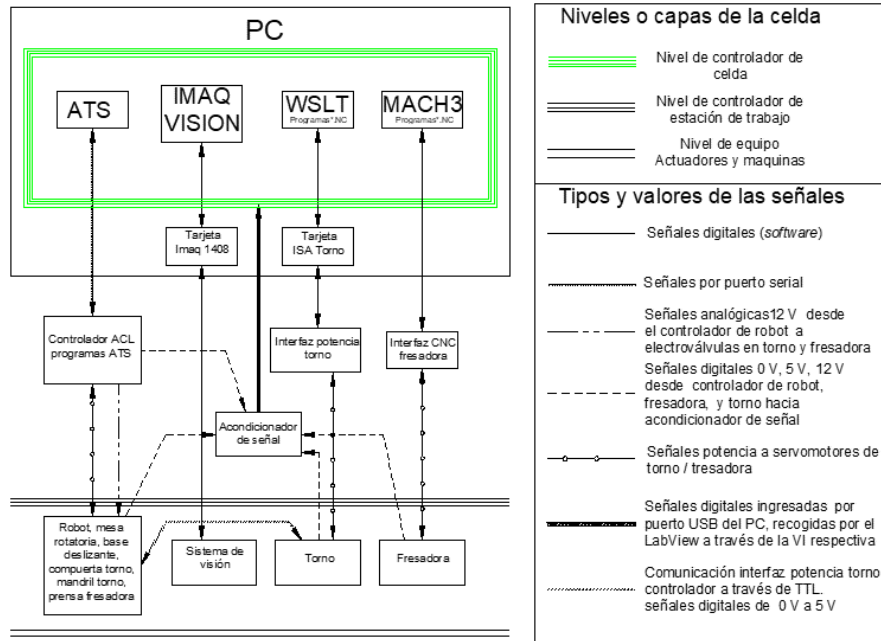


Figura 6 Jerarquía general de la información [Guerrero, 2021].

En la tabla 3, están consignados los tiempos de mecanizado de cada pieza (tanto en el torno como en la fresadora), los tiempos de movimiento del robot entre las máquinas o los otros puntos físicos de la celda.

Tabla 3 Tiempos promedio de las diferentes tareas de la celda, [Guerrero, 2021].

To M1	Llevar pieza de la mesa rotatoria a torno. Promedio 109 s
TM1	Ejecución de mecanizado en torno. Pieza A: 873 s, Pieza B:743.5 s, Pieza C: 1,062 s. Promedio 893 s
To M2	Llevar pieza del torno a fresadora. Promedio 130 s
M2	Ejecución de tarea de mecanizado en fresadora. Pieza A: 715 s, Pieza B:586.5 s, Pieza C: 606.5 s Promedio 636 s
To AE	Llevar pieza con mecanizado efectuado a Almacén de espera del
AE to M2	Llevar pieza de almacén de espera torno a la fresadora. Promedio
F- SV	Llevar pieza con mecanizados de la fresadora al sistema de visión y hacer reconocimiento de forma. Promedio 72 s
SV – PC	Llevar pieza conforme con el patrón, del sistema de visión a depósito de producto conforme. Promedio 52 s
SV- PNC	Llevar pieza no conforme con el patrón, desde el sistema de visión a sitio producto no conforme. Promedio 43 s.

3. Resultados

Cuando se realizó la planeación de tiempos (*scheduling*) considerando una tarea para mecanizar 6 piezas: 2 tipo A, 2 tipo B y 2 tipo C; y los tiempos de la tabla 3; todas las piezas pasaron por torno y fresadora sin pasar por el almacén de espera, ocurriendo una estrategia de operación FIFO (*First Input, First Output*). El tiempo total fue de 7752 s. Con el fin de realizar la simulación con redes de Petri generalizadas (RdP), se utilizó el *toolbox PetriNet*, de *MATLAB V2017a*. Fue utilizado el criterio de “temporización de los lugares” y los tiempos promedio de mecanizado de la tabla 3 para la tarea de fabricación de 6 piezas, observándose el resultado de la simulación en la figura 7 (RdP primera simulación). La simulación con RdP, [Guerrero, 2021] (Véase el hipervínculo de la bibliografía 8), y conforme con lo indicado en la figura 7, muestran que todas las piezas pasaron por ambas máquinas CNC de forma directa, prediciendo la operación de la celda bajo una estrategia de producción FIFO. Por otra parte, cuando se realizó la corrida de producción real de la celda, [Guerrero, 2021], (Véase la operación de la FMC en el hipervínculo de la bibliografía 10), mecanizando las 6 piezas, se pudo verificar que su operación estuvo conforme a lo proyectado a la planeación y a la RdP indicada en la figura 7. En la tabla 4 se comparan los resultados de los tiempos, observándose en los valores sus similitudes.

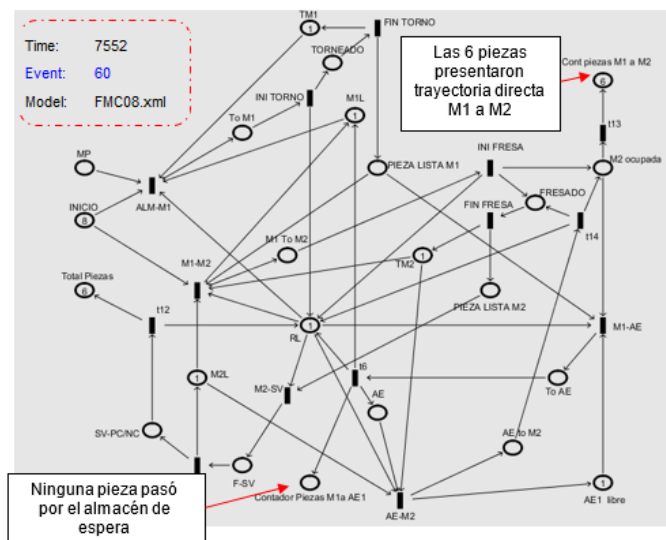


Figura 7 RdP generalizada: primera simulación, [Guerrero, 2021].

Tabla 4 Comparativo de tiempos estrategia de operación FIFO.

Resultados operación FIFO	Tiempo (s)	Tiempo (horas, minutos y segundos)
<i>schedulling</i>	7 522	2 h 3 min 23 s
Red de Petri (simulación)	7 552	2 h 5 min 52 s
Operación (real)	7 776	2 h 9 min 36 s

Posteriormente, se realizó un nuevo *schedulling*, en la que se dió un tiempo mayor al proceso de fresado respecto al torneado (tiempo estimado de 1100 s en fresado, comparar con tabla 3), obteniéndose un nuevo tiempo total de proceso de 9006 s. Realizándose la segunda simulación mediante RdP, figura 8 [Guerrero, 2021]. En la planeación se predijo el paso de 3 piezas por el almacén de espera, mientras que la RdP predice que solo 2 piezas lo harán. Esta diferencia, así como la de los tiempos que se muestran en la tabla 5, se deben a que, en el *schedulling* se usaron los tiempos reales por cada pieza, mientras que, en la RdP se utilizaron los tiempos promedio de torneado por cada pieza, tabla 3. Considerando ambos casos (*Schedulling* y RdP), la operación de la celda se comporta con una estrategia HÍBRIDA entre FIFO y ALEATORIA.

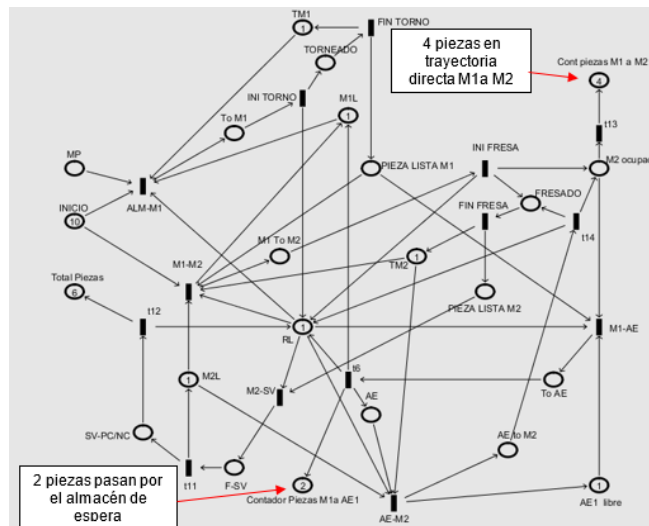


Figura 8 Red de Petri generalizada: segunda simulación, [Guerrero, 2021].

Tabla 5 Comparativo de tiempos estrategia de operación Híbrida.

Resultados operación HÍBRIDA	Tiempo (s)	Tiempo (horas, minutos y segundos)
<i>Schedulling</i>	9 006	2 h 30 min 6 s
Red de Petri (simulación)	9 508	2 h 38 min 28 s

4. Discusión

Este trabajo tuvo como resultado una FMC actualizada, operativa y funcional; con una disposición longitudinal, dada la inclusión de una base deslizante y una fresadora. En las tablas 4 y 5, se observa que los resultados de la simulación con RDP y el *schedulling* tienen ligeras diferencias, debidas a la definición de la base de tiempos de cada uno según la tabla 3. El *schedulling* se elaboró con los tiempos reales de mecanizado de cada tipo de pieza, mientras que en la RdP por restricciones del *toolbox Petrinet*, fue imperante utilizar un único valor promedio de mecanizado de las 3 piezas. Con respecto a la simulación RDP, el tiempo de operación real (tabla 4), fue mayor en 3 min 44 s, debido a que el *MACH3* tardaba más de lo esperado en cargarse, por limitantes de RAM del actual PC, así como por la poca capacidad de memoria del sistema monitor, con lo cual demoraba en refrescar la máquina de estados y ralentizaba el inicio de secuencias. Sin embargo, se puede considerar que ambas simulaciones de RdP arrojan una buena aproximación de la operación. Es posible entonces modelar otras condiciones, según se realice la programación de producción de diferentes cantidades y posibles cambios en las dimensiones u operaciones de las piezas a fabricar.

Como resultado de la actualización de la FMC se puede citar:

- Se realizó la nueva distribución del sistema de forma longitudinal, véase la figura 9.

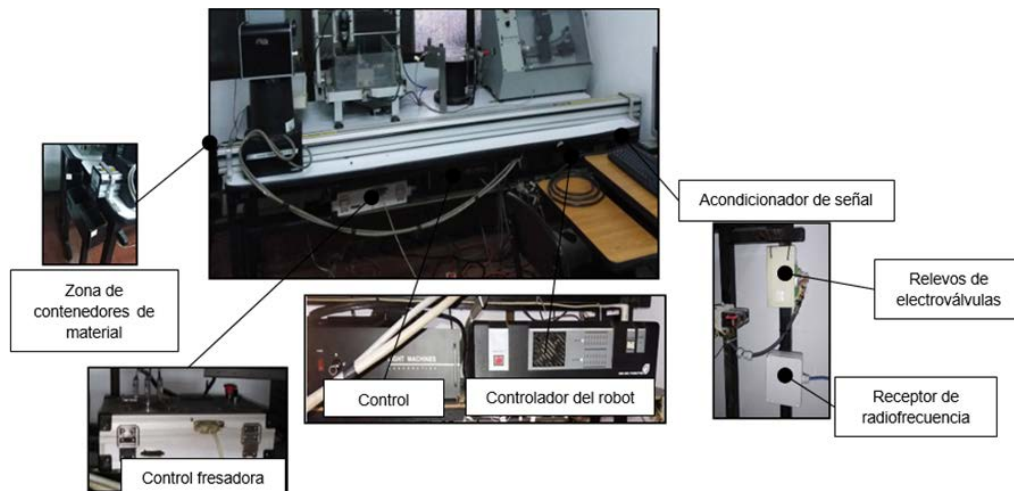


Figura 9 Mesa de trabajo de la FMC, [Guerrero, 2021].

- Se realizó un mantenimiento general del torno, y el robot.
- Se realizó una actualización de los programas de fabricación de las piezas, creación de nuevo patrones de mecanizado, redefinición de todas las posiciones del robot, actualización y creación de los programas del robot y la actualización del programa Monitor, véase el diagrama de flujo en figura 10.

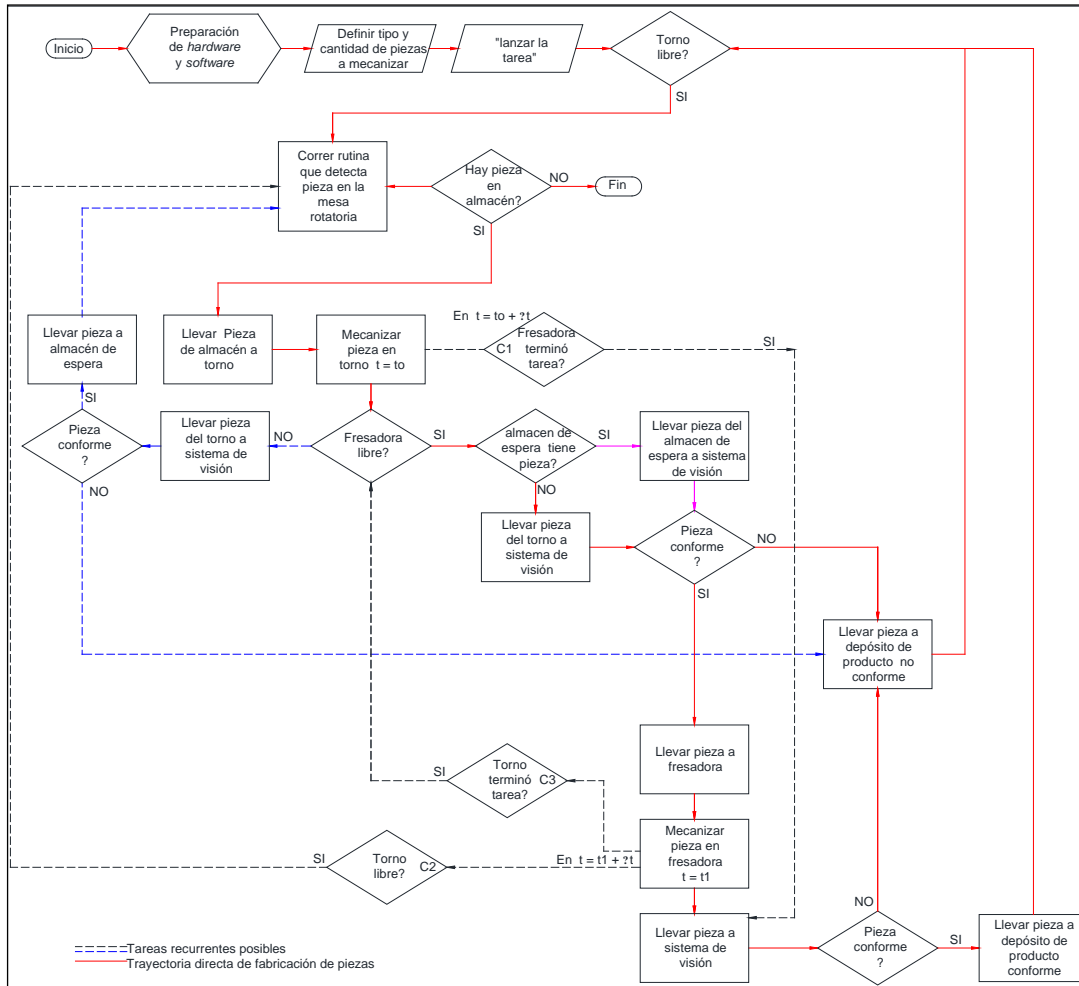


Figura 10 Diagrama de flujo actualizado de operación de la celda.

- Se realizó la integración de la Fresadora a la celda.
- Se realizó el diseño y construcción de una nueva versión de acondicionador de señal, para realizar una comunicación vía USB con el PC. Para la simulación de la celda mediante el uso de RdP, el sistema opera bajo la estrategia de operación FIFO cuando el tiempo de mecanizado del torno es

mayor que el de la fresadora, y con estrategia de operación HÍBRIDA (entre FIFO y ALEATORIA) cuando el tiempo de mecanizado de la fresadora es mayor al del torno. Este último debido al paso de algunas piezas por el almacén de espera del torno y de otras en trayectoria directa por las dos máquinas.

También, se mantienen los mismos resultados del proyecto de integración de la celda, [Montilla, 2005] respecto a formas, número de piezas a producir, imprevistos de operación y flexibilidad frente a la calidad. No se observaron bloqueos durante las prácticas realizadas ni durante la corrida real de la celda (véase la operación de la FMC en el hipervínculo de la bibliografía 10 [Guerrero, 2021]).

En el evento de que la señal de alguno de los sensores falle o el sensor que confirma la apertura de la puerta del torno no se active, el brazo de robot regresaría a su posición cero; y como medida de protección, el programa monitor se bloqueará, obligando al operador de la celda a abortar la tarea en curso, corregir físicamente la falla, y enviar una tarea nueva. Los posibles casos que podrían producir un bloqueo fueron considerados con la programación de la celda (para mayores detalles consultar numeral 7.1 de la referencia 7, [Guerrero, 2021]).

Considerando la Flexibilidad frente a la calidad por la no conformidad de la pieza mecanizada, respecto al patrón previamente establecido, ésta será retirada hacia un depósito diferente de las piezas que sí cumplieron con el patrón previsto.

Respecto al número de recurrencias y considerando los resultados del proyecto anterior [Montilla, 2005], la FMC mantiene un número máximo de una recurrencia, tanto si está operando bajo estrategia FIFO o HÍBRIDA. Las recurrencias se pueden consultar en el numeral 7.1 de la referencia 7, [Guerrero, 2021]. Por último, se realizó una actualización del manual de operación de la FMC (consúltense también anexos F, G, H, I en la referencia 7, [Guerrero, 2021]). La celda opera bajo la óptica de “tiempo total empleado” y “porcentaje de utilización de las máquinas”, la cual está en un nivel intermedio, entre una operación elemental con excesivo tiempo muerto (solo 1 pieza transita al tiempo por la celda y hay 0 recurrencias); y la operación “mínimo tiempo” la cual es una estrategia ALEATORIA e inteligente con 2

recurrencias de forma casi permanente. Una prospectiva para que la FMC pudiese operar en “mínimo tiempo”, consistiría en: introducir pieza 1 al torno y pieza 2 a la fresadora. Dependiendo de los tiempos de mecanizado en cada máquina, la pieza que primero sea mecanizada será llevada al almacén de espera de cada máquina (la fresadora debe poseer su propio almacén de espera). Tan pronto termine el mecanizado más demorado, el robot intercambiará las piezas entre las 2 máquinas. La pieza que primero sea mecanizada completamente será llevada al sistema de visión, mientras una nueva pieza será llevada a la máquina que esté libre. Se retirará la primera pieza del sistema de visión y de la celda. Se llevará la segunda pieza al sistema de visión (si ya terminó su segundo mecanizado), y así sucesivamente, buscando mantener (al máximo posible) simultáneamente ocupadas las 2 máquinas y la estación de visión. Adicionalmente, para operar bajo estrategia ALEATORIA, se requiere cambiar el diseño de las piezas a mecanizar, para que puedan ser trabajadas o en fresadora o torno (sin importar el orden), puesto que, al momento actual por su sistema de sujeción, estrictamente se deben mecanizar primero en el torno y luego en la fresadora. Se deberá entonces, utilizar nuevos sensores, actualizar el programa monitor y el sistema de visión.

5. Conclusiones

Se actualizó la distribución en planta de la FMC, incluyendo los nuevos equipos fresadora CNC y base deslizante para el robot. Se definieron las estrategias de operación de la FMC, de acuerdo con la planificación (*schedulling*). Se realizó la programación de los diversos componentes de la FMC, de acuerdo con la nueva distribución y capacidad de ésta. Se actualizó el programa monitor y se simuló la operación de la FMC mediante el uso de redes de Petri. Se logró poner a punto y operar la FMC, verificando el desempeño exitoso del programa monitor, así como el cumplimiento de la confiabilidad y flexibilidad propuestas. La FMC continuó funcionando bajo las estrategias de operación FIFO e HÍBRIDA (como fue concebida la FMC en su integración, [Montilla, 2005]). La FMC opera con 1 recurrencia entre varias etapas de la ejecución de la tarea, bajo la óptica de “tiempo total empleado” y “porcentaje de utilización de las máquinas”.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Ardoli, F &, Aresi, A. Planta industrial a escala académica para el estudio de conceptos y aplicaciones en redes de controladores (PLCs) y redes de campo industrial. Universidad Nacional de Rosario Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura Escuela de Ingeniería Electrónica. 2015.
- [2] Cardona, J.C. Rehabilitación de fresadora didáctica CNC e integración a una celda de manufactura flexible de mecanizado, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, 2020.
- [3] Castillo, A & Orejuela, C. Configuración multicriterio de células de fabricación considerando efecto sobre planes de producción. Universidad Tecnológica de Pereira. *Scientia et Technica* Año XXIV, Vol. 24, No. 01, marzo de 2019.
- [4] CIRP encyclopedia of production engineering, editors: the international academy for production, laperrière, luc, reinhart, gunther (eds.), isbn 978-3-642-20617-7. Springer, berlin, Heidelberg; 2014.
- [5] Fúquene, c. E; Aguirre, s; córdoba, n. B. Evolución de un sistema de manufactura flexible (FMS) a un sistema de manufactura integrada por computador (CIM). Ingeniería y universidad, Pontificia Universidad Javeriana. Vol. 11, núm. 1, enero-junio, 2007.
- [6] Groover, Mikell. Fundamentos de manufactura moderna 3ed, McGraw-Hill. Interamericana editores, s.a. de C. V; 2007.
- [7] Guerrero, Leonardo. Actualización de la integración de la celda de manufactura flexible FMC de la Facultad de Ingeniería Mecánica. Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira. URI_ <https://hdl.handle.net/11059/14177>, 2021.
- [8] Guerrero, Leonardo. Video de simulación de la RdP operación FIFO de la figura 7. Disponible en: <https://youtu.be/NPB-SFzndd4>, 2021.
- [9] Guerrero, Leonardo. Video de simulación de la RdP operación HÍBRIDA de la figura 8. Disponible en: <https://youtu.be/WM76Zk-uWW0>, 2021.
- [10] Guerrero, Leonardo. Video de operación de la celda. Disponible en: <https://youtu.be/eoYEy2cw8r0>, 2021.

- [11] Montilla, C & Arroyave, F. Identificación de canales, configuración de software abierto, y puesta en marcha de una celda de manufactura flexible, Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Ingeniería Mecánica. Pereira, 2005.
- [12] Narváez, C; Marín, J. Construcción de una fresadora didáctica con control numérico computarizado basado en pc. Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira; 2013.
- [13] Ortega, John Brian. Sistemas flexibles de manufactura para entornos académicos como respuesta al desarrollo tecnológico de las pymes en Colombia, Bogotá. Revista Citas vol. ii numero1, páginas 81 a 88; 2016.
- [14] Suesca, E; Bermúdez, M; Mejía, C; Cobo, L; & Rodríguez; L. Diseño de celdas de manufactura considerando el balanceo de las cargas de trabajo con algoritmos genéticos. Revista Ontare, vol. 4 núm. 1; 89–120; 2016.