

OPTIMIZACIÓN DE MECANIZADO CNC MEDIANTE TÉCNICAS DE PROGRAMACIÓN ENTERA

Sebastián Guala*, Andrés Mazzola, Gonzalo Del Cauce
Univ. Nacional de Gral. Sarmiento, Argentina.

ABSTRACT

Planing the sequence and operations in machining processes in Flexible Manufacturing Systems environments implies the challenge of finding the best machining strategy. To do that, there is a number of CAD/CAM tools to ease the hand-made heuristical evaluation of alternatives strategies. Besides, several mathematical optimization models have been introduced that define the best operation sequence on a part, but limited by already defined operations and times. In this work we propose a Integer Programming Model that includes possible variations of operations subject to the planned sequence, based on alternative strategies. This model was applied to the development of experimental blade holders of urban wind-power generators. This model returned two results: machining-time reduction of 7% and the sequence-time definition was reduced in 62%.

KEYWORDS: numerical control, manufactures, process planning

MSC: 94C10

RESUMEN

La planificación de la secuencia y tipo de operaciones de los procesos de mecanizado en entornos de sistemas de manufactura flexible acarrear el desafío de encontrar la mejor estrategia de mecanizado. Para esto, existen las simulaciones de las herramientas CAD/CAM que facilitan la tarea de evaluación heurística manual de estrategias alternativas. Por otro lado, se han presentado modelos de optimización matemática que definen la mejor secuencia de operaciones sobre una pieza, pero con el limitante de que las operaciones y sus tiempos ya están definidos. En el presente trabajo proponemos un modelo de programación entera que incluye las variaciones posibles de operaciones sujetas a la secuencia planificada, a partir de estrategias alternativas. El modelo es aplicado al desarrollo de los soportes de álabes de generadores eólicos experimentales urbanos. El modelo permitió un doble resultado: reducir un 7% el tiempo de mecanizado y un 62% el tiempo dedicado a definir la secuencia.

PALABRAS CLAVE: control numérico, manufacturas, planificación de procesos

*sguala@campus.ungs.edu.ar

1. INTRODUCCIÓN

En los centros de mecanizado con sistemas de control numerico computarizado (CNC) y demás sistemas de manufactura automatizada, debe definirse un plan o estrategia que determina la secuencia de procesos a seguir para cada pieza en cada cara de ésta. Cada estrategia de procesos depende de los requerimientos especificados, tales como herramientas, operaciones, accesorios, etc.

La selección del mejor plan de procesos dependerá, entonces, de los factores que determinen el costo y las características de fabricación en el entorno específico: terminaciones superficiales, tolerancias, etc. Varios son los autores que han desarrollado modelos de optimización del plan de procesos para las características de las operaciones de mecanizado. El sentido de la optimización generalmente está vinculado con la minimización del tiempo o del costo, o con la maximización de la ganancia. Kusiak y Finke [7] desarrollan un modelo de programación lineal entera mixta (MILP) que minimiza los costos, mientras que Chang [3] incluye la secuenciación de mecanizado de la pieza dentro de la misma función objetivo que Kusiak y Finke. Iakocou et al. [4] incluye aspectos operativos en la elección del plan de mecanizado como la selección de piezas y la asignación de herramientas, desarrolla un modelo MILP que maximiza la ganancia total determinando la óptima combinación pieza-herramienta, aunque la selección está limitada a que cada pieza podía estar mecanizada solo por una herramienta entre las disponibles. En este sentido, Mendes et al. [8] desarrollan un modelo MILP que salva esta limitación pre-estableciendo secuencias alternativas de mecanizado entre las que el modelo debe seleccionar. Por su parte, Kongchuenjai y Prombanpong [5, 6], desarrollan modelos MILP donde la herramienta para cada operación no está preestablecida ni la secuencia de operaciones. Sin embargo, en todos los trabajos mencionados, las operaciones sí están totalmente establecidas, lo que en la actualidad no se corresponde con las posibilidades de ensayos alternativos que dan los sistemas CAD/CAM para definir distintas secuencias de mecanizado que permiten evaluar aquella secuencia que se ejecuta en el menor tiempo. En otras palabras, los cambios en la secuencia de mecanizado pueden implicar también cambios en el tipo de operaciones que se deben realizar y/o en los tiempos en que se realizan y en las herramientas que se deben utilizar. En este sentido, la planificación del proceso de mecanizado mediante las simulaciones con CAD/CAM es siempre heurística, mediante prueba y error: el planificador propone escenarios sobre los que desarrolla la simulación del mecanizado y luego evalúa cuál de los escenarios dio los mejores resultados en términos de eficiencia de tiempo. Dicha búsqueda del mejor plan de mecanizado sobre escenarios propuestos no solo deja muchos escenarios posibles sin explorar sino que también consume mucho tiempo.

El objetivo de este artículo es el de presentar un modelo MILP que proponga una secuencia de mecanizado que minimice el tiempo total de ejecución del proceso donde cada pieza puede ser mecanizada de varias maneras y donde varían las operaciones, las herramientas y la secuencia de ejecución. En particular, al acelerar el proceso de definición de la secuencia, el modelo también permite incorporar más alternativas de mecanizado a las opciones que pueden ser consideradas en la práctica cuando la búsqueda es manual. Para ello, se evalúan los procesos con dos máquinas distintas: una fresa con CNC y un centro de mecanizado.

El presente trabajo se organiza de la siguiente manera: en la Sección 2. definimos el problema así como las clases de operaciones, herramientas y tiempos; hacemos una descripción general de las restricciones

que deben ser tenidas en cuenta y presentamos el modelo de programación entera. En la Sección 3. realizamos la implementación del modelo y reportamos los resultados obtenidos tanto para el mecanizado con la fresa como para el centro de mecanizado. Finalmente, en la Sección 4. presentamos las conclusiones y consideraciones para futuros desarrollos.

2. MODELADO Y MÉTODOS

La propuesta consiste en determinar, mediante un modelo de programación entera, la secuencia de operaciones y las herramientas necesarias para mecanizar una pieza bajo un sistema flexible de manufactura con dos equipamientos posibles: un centro de mecanizado con cambio automático de herramienta y una fresa con cambio de herramienta manual, ambos con control numérico computarizado, evaluando diferentes estrategias. La pieza a mecanizar forma parte del desarrollo de un prototipo de generador eólico de uso urbano.

Asumamos que una pieza está en el sistema y sus caras laterales y superior requieren operaciones de mecanizado. Por lo tanto, la planificación del proceso debe determinar cuál es la secuencia de operaciones de mecanizado, qué estrategia conviene usar en cada operación y qué herramientas usar en cada caso para completar las operaciones requeridas bajo las especificaciones dadas en el menor tiempo posible. Debido a la complejidad de la planificación de las tareas, implementamos un modelo matemático de programación entera de variables binarias descrito como sigue:

2.1. Índices:

- E : conjunto de estrategias de mecanizado. Usamos el índice $e \in E$ para denotar estrategias.
- C : conjunto de caras de la pieza a mecanizar. Usamos el índice $c \in C$ para denotar las caras de la pieza.
- P : conjunto de operaciones de mecanizado a realizar. Usamos el índice $p \in P$ para denotar las operaciones.
- H : conjunto de herramientas disponibles para el mecanizado. Usamos el índice $h \in H$ para denotar las herramientas.
- $s \in 1 \dots S$: índice de la secuencia con que se realizarán las operaciones de mecanizado seleccionadas del conjunto P .

2.2. Parámetros:

- TM_{ph} tiempo de mecanizado de la operación p por la herramienta h .
- TH tiempo de cambio de herramienta.
- TT tiempo de traslado entre operaciones sucesivas sin cambio de herramienta.
- TC tiempo de traslado entre operaciones en distintas caras.

2.3. Variables de decisión:

- $w_{cs} = 1$ cuando la cara c es mecanizada en la secuencia de operaciones consecutivas s y $s + 1$. $w_{cs} = 0$ en caso contrario.
- $x_{ecphs} = 1$ cuando la estrategia e se aplica sobre la cara c para realizar la operación p con la herramienta h en el orden de secuencia s . $x_{ecphs} = 0$ en caso contrario.
- $y_e = 1$ cuando la pieza es mecanizada según la estrategia e . $y_e = 0$ en caso contrario.
- $z_{hs} = 1$ cuando la herramienta h se utiliza para la secuencia de operaciones consecutivas s y $s + 1$. $z_{hs} = 0$ en caso contrario.

2.4. Formulación del modelo.

1. La función objetivo del modelo fue formulada para minimizar el tiempo total de producción de las piezas dado por la suma de los tiempos de mecanizado, los tiempos de cambio de herramientas y los tiempos de movimiento de herramientas:

$$\min \sum_{e \in E} \sum_{c \in C} \sum_{p \in P} \sum_{h \in H} \sum_{s=1}^S TM_{ph} x_{ecphs} + TH \sum_{s=1}^{S-1} \left(1 - \sum_{h \in H} z_{hs} \right) + TT \sum_{s=1}^{S-1} \sum_{h \in H} z_{hs} + TC \sum_{s=1}^{S-1} \left(1 - \sum_{c \in C} w_{cs} \right)$$

El primer término de la suma representa el tiempo de cada operación. El segundo y tercer término refieren al tiempo de cambio de herramienta y de operación, respectivamente. Finalmente, el último término define el tiempo de movimiento entre operaciones de distintas caras. La minimización está sujeta a las siguientes condiciones.

2. Cada operación de mecanizado debe completarse sin repetirse y sin cambio de herramienta:

$$\sum_{e \in E} \sum_{c \in C} \sum_{h \in H} \sum_{s=1}^S x_{ecphs} = 1, \quad \forall p \in P$$

3. Solo se generará un único plan de secuencia de operaciones:

$$\sum_{e \in E} \sum_{c \in C} \sum_{h \in H} \sum_{p \in P} x_{ecphs} = 1, \quad \forall s \leq S$$

4. La secuencia debe respetar las reglas de precedencia de operaciones preestablecidas. Para eso definimos el índice $pre_{e,p,q} = 1$ si la operación p debe preceder a la operación q en el plan de la estrategia e y $pre_{e,p,q} = 0$ si no se exige ninguna precedencia entre p y q en e :

$$\sum_{c \in C} \sum_{h \in H} x_{ecphs} - \sum_{c \in C} \sum_{h \in H} x_{ecqht} \geq 0, \quad \forall p, q \in P \text{ con } p \leq q, e \in E, s \leq t \text{ con } pre_{e,p,q} = 1$$

5. Los cambios de herramienta consumen tiempo de proceso. Se activa la bandera z_{hs} :

$$\begin{aligned} \sum_{e \in E} \sum_{c \in C} \sum_{p \in P} x_{ecphs} + \sum_{e \in E} \sum_{c \in C} \sum_{p \in P} x_{ecph(s+1)} - 2 * z_{hs} &\geq 0, & \forall h \in H, s \leq S. \\ \sum_{e \in E} \sum_{c \in C} \sum_{p \in P} x_{ecphs} + \sum_{e \in E} \sum_{c \in C} \sum_{p \in P} x_{ecph(s+1)} - 2 * z_{hs} &\leq 1, & \forall h \in H, s \leq S. \end{aligned}$$

6. Solo puede haber una estrategia aplicada en el proceso:

$$\begin{aligned} \sum_{e \in E} y_e &= 1 \\ y_e - \sum_{p \in P} \sum_{h \in H} x_{ecphs} &\geq 0, & \forall e \in E, c \in C, s \geq 0. \end{aligned}$$

7. Al cambiar la cara a mecanizar se consume tiempo. Se activa la bandera w_{cs} :

$$\begin{aligned} \sum_{e \in E} \sum_{p \in P} \sum_{h \in H} x_{ecphs} + \sum_{e \in E} \sum_{p \in P} \sum_{h \in H} x_{ecph(s+1)} - 2 * w_{cs} &\geq 0, & \forall c \in C, s \leq S \\ \sum_{e \in E} \sum_{p \in P} \sum_{h \in H} x_{ecphs} + \sum_{e \in E} \sum_{p \in P} \sum_{h \in H} x_{ecph(s+1)} - 2 * w_{cs} &\leq 1, & \forall h \in H, s \leq S \end{aligned}$$

2.5. Caso de estudio: Soporte de álabes de aerogeneradores.

Aplicamos el modelo matemático desarrollado a la producción de soportes de acero para álabes de aerogeneradores de eje horizontal para generación urbana a pequeña escala, actualmente en etapa experimental Fig. 1 y Fig. 2. Para la evaluación práctica bajo distintas condiciones, se utilizaron dos máquinas herramienta automáticas: un centro de mecanizado CNC de 5 ejes con cambio automático de hasta 30 herramientas marca ROMI D1000 Fig. 3 y una pequeña fresadora CNC genérica con cambio de herramienta manual Fig. 4.

La lista de herramientas disponibles en la torreta se muestra en la Tabla 1. Asumimos que hay 10 herramientas disponibles y que pueden ser usadas para completar todas la operaciones de las piezas mencionadas.

A diferencia de otros trabajos [5, 6], no fijamos las operaciones que deben ser necesarias para el mecanizado sino que establecemos distintas estrategias posibles de operaciones para realizar una tarea de mecanizado específica, asignándole a cada una su tiempo correspondiente. Las operaciones dentro de cada estrategia están numeradas arbitrariamente y, en los casos que sea necesario, se especifica el orden de precedencia de operaciones en la Tabla 2 para el caso del mecanizado con la fresadora y con el centro de mecanizado. Para cada operación dentro de cada estrategia hay una lista de herramientas disponibles ubicadas en la torreta asociado con el tiempo estimado que requiere cada operación con cada herramienta. Asimismo, asumimos que los tiempos específicos de mecanizado de cada operación son los mismos con ambas máquinas. Los tiempos de las operaciones fueron estimados mediante el



Figura 1: Pieza con trabajos laterales y agujeros ya realizados

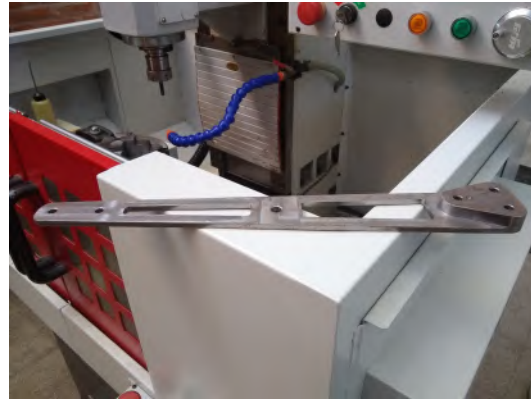


Figura 2: Pieza terminada

Imágenes de la pieza



Figura 3: Centro de mecanizado



Figura 4: Pequeña fresadora CNC

Imágenes de las máquinas utilizadas

uso del software libre de diseño paramétrico FREECAD 0.18 [2], mediante su módulo de simulación Path.

Para los otros tiempos especificados fijamos el tiempo TH , que en el caso de la fresadora implica cambio y ajuste manual de herramienta y del programa, en 5 minutos y 0.2 minutos para el centro de mecanizado, que realiza el proceso en forma automática. El tiempo de traslado entre operaciones con la misma herramienta TT es 0.1 minutos con ambos equipos y el tiempo de traslado de operaciones entre distintas caras TC en 0.1 minutos en ambos equipos.

Todos los datos necesarios serán usados para formular el modelo matemático y ejecutarlo usando SCIP Optimization Suite [1]. Para este ejemplo planteado se genera un total de 123 variables y el tiempo total necesario para una PC Intel(R) Core(TM) i5-7400 CPU @ 3 GHzx4 y 15.6 GB de RAM fue de 12 segundos.

Herramienta (h)	Descripción
1	fresa plana 50mm
2	fresa plana 40mm
3	fresa plana 30mm
4	fresa plana 10mm
5	fresa plana 8mm
6	fresa plana 6mm
7	fresa plana 5mm
8	broca de centro
9	broca 7.5mm
10	macho 8mm

Tabla 1: Lista de herramientas disponibles.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al aplicar el modelo matemático para la fabricación de los soportes de álabes de un generador eólico de eje horizontal se genera el plan de operaciones resumido en las Tablas 3 y 4 para los casos de mecanizado con fresadora y con centro de mecanizado, respectivamente. Para el caso de la fresadora, la secuencia de mecanizado generada en el ejemplo requiere de 8 operaciones y 6 herramientas. El mecanizado total lleva 68.2 minutos, los cuales se componen de 42.5 minutos de mecanizado, 25 minutos de cambios de herramienta y 0.7 minutos de movimiento de herramientas entre operaciones. Para el caso del centro de mecanizado, la secuencia de mecanizado requiere de 8 operaciones y 6 herramientas. El mecanizado total lleva 58.2 minutos, los cuales se componen de 42.5 minutos de mecanizado, 1 minuto de cambios de herramienta y 0.7 minutos de movimiento de herramientas entre operaciones.

En ambos casos, la estrategia elegida es la 2. La secuencia de operaciones comienza con el proceso de perforado y roscado de los agujeros correspondientes (operaciones 2, 3 y 4) y fresado grueso del interior (operación 6). Luego, la secuencia con la fresa sigue con el fresado lateral y el plano superior (operaciones 8 y 7) y la terminación del interior (operaciones 1 y 5). Por el lado del centro de mecanizado tenemos las operaciones de fresado superior y lateral (operaciones 1 y 5) y las de terminación del interior (operaciones 7 y 8). Los similares resultados en ambos equipos los atribuimos a que la diferencia de tiempos de mecanizado entre las diferentes opciones de herramientas con las que contamos para este mecanizado es significativa en comparación con la diferencia en otros tiempos críticos como el tiempo de cambio de herramienta TH .

De todas maneras, puede verse que los resultados son practicables. Las operaciones 7 y 8 y las 1 y 5, están agrupadas para utilizar la misma herramienta y reducir el tiempo de cambio de herramienta. Como está especificado, la precedencia lógica de operaciones marca que las operaciones de agujereado se inician con el marcado del centrador para guiar la broca, el agujereado y finalmente la rosca en los agujeros que corresponda.

En resumen, las 8 operaciones requeridas se llevan a cabo utilizando un total de 6 herramientas. Hay 5

Estrategia (<i>e</i>)	Cara <i>c</i>	Operación <i>p</i>	Herramienta (<i>h</i>)	Tiempo (min)	Precedencia	
1	superior	1 Desbastar de plano	1	10		
	superior	1 Desbastar de plano	2	12		
	superior	1 Desbastar de plano	3	15		
	superior	2 Marcar centros para agujeros	8	0.5	1	
	superior	3 Agujerear	9	5	2	
	superior	4 Roscar	10	4	3	
	lateral	5 Desbastar lateral	1	15		
	lateral	5 Desbasar lateral	2	18		
	lateral	5 Desbastar lateral	3	20		
	superior	6 Desbastar de profundidad	3	10	1	
	superior	6 Desbastar de profundidad	4	20	1	
	superior	7 Terminar de profundidad	4	5	6	
	superior	7 Terminar de profundidad	5	6	6	
	superior	8 Ranurar pasante	5	4	6	
	superior	8 Ranurar pasante	6	5	6	
	superior	8 Ranurar pasante	7	6	6	
	2	superior	2 Marcar centros para agujeros	8	0.5	
		superior	3 Agujerear	9	6	2
		superior	6 Desbastar de profundidad	3	15	
		superior	6 Desbastar de profundidad	4	25	
superior		7 Terminar de profundidad	4	5	6	
superior		7 Terminar de profundidad	5	6	6	
superior		8 Ranurar pasante	5	4	6	
superior		8 Ranurar pasante	6	5	6	
superior		8 Ranurar pasante	7	6	6	
superior		1 Desbastar de plano	1	1	3 y 6	
superior		1 Desbastar de plano	2	1.5	3 y 6	
superior		1 Desbastar de plano	3	3	3 y 6	
lateral		5 Desbastar lateral	1	7	6	
lateral		5 Desbastar lateral	2	9	6	
lateral		5 Desbastar lateral	3	12	6	
superior		4 Roscar	10	4	3	

Tabla 2: Lista de estrategias para operaciones de mecanizado alternativas con sus herramientas correspondientes para el caso de la fresadora).

Estrategia	Cara	Operación	Herramienta	T. Oper.	T. cambio Herr.	T. cambio Oper.
2	superior	2	8	0.5	0	0
	superior	3	9	6	5	0.1
	superior	4	10	4	5	0.1
	superior	6	3	15	5	0.1
	lateral	8	5	4	5	0.1
	superior	7	5	5	0	0.1
	superior	1	1	1	5	0.1
	superior	5	1	7	0	0.1
		Subtotales			42.5	25
	Total		68.2			

Tabla 3: Solución encontrada planteando el modelo de programación entera aplicado a la fresadora.

Estrategia	Cara	Operación	Herramienta	T. Oper.	T. cambio Herr.	T. cambio Oper.
2	superior	2	8	0.5	0	0
	superior	3	9	6	0.2	0.1
	superior	4	10	4	0.2	0.1
	superior	6	3	15	0.2	0.1
	superior	1	1	1	0.2	0.1
	superior	5	1	7	0	0.1
	superior	7	5	5	0.2	0.1
	lateral	8	5	4	0	0.1
		Subtotales			42.5	1
	Total		44.2			

Tabla 4: Solución encontrada planteando el modelo de programación entera aplicado al centro de mecanizado.

cambios de herramienta para un tiempo de mecanizado total de 68.2 minutos de trabajo en la fresa con 42.5 minutos de mecanizado neto, 25 minutos en cambios de herramienta y 0.7 minutos de movimientos entre operaciones. Mientras que tenemos 44.2 minutos totales en el centro de mecanizado, con 42.5 minutos de mecanizado neto, pero solo 1 minuto de cambios de herramienta y 0.7 de movimiento entre operaciones.

Si bien la secuencia de cada estrategia candidata podría ser modelada por separado de forma similar en trabajos como los ya citados, la posibilidad de modelar distintas estrategias de mecanizado marca el aporte principal de este trabajo. En este sentido, la evaluación manual de las dos estrategias candidatas con sus posibles secuencias le consumieron al planificador humano entrenado 16 minutos, utilizando el software para CAD/CAM de FREECAD y con las herramientas que se podrían llegar a usar precargadas. Mientras que la carga de los datos para este modelo y su ejecución consumieron 6 minutos, lo que representa una mejora del 62%. Además, la secuencia propuesta por el planificador humano requería un 7% más de tiempo en realizarse que los resultados presentados de este trabajo.

4. CONCLUSIONES

Propusimos un modelo matemático de programación entera para automatizar el proceso de planificación de tareas de mecanizado aplicado a una fresa y a un centro de mecanizado, ambos con control numérico. Similar planificación ya había sido estudiada utilizando varios métodos computacionales pero sin incluir la posibilidad de evaluar distintas estrategias contenedoras de la secuencias planificadas. Determinamos la solución óptima para el mecanizado de soportes de álabes de un generador eólico de baja escala. El objetivo último fue minimizar el tiempo total requerido para el mecanizado completo de la pieza desde el tocho rectangular hasta el producto final. El aspecto distintivo de este modelo propuesto fue generalizar la selección de las operaciones de mecanizado necesarias para darle forma a una pieza mediante distintas estrategias, dado que los modelos desarrollados hasta el momento solo pueden resolver una estrategia propuesta con las operaciones a realizar y solo resuelven la secuencia de éstas y las herramientas necesarias. Por lo tanto, este modelo le agrega una mayor flexibilidad a la instancia capaz de resolver, para mejorar la toma de decisiones en la ingeniería de procesos industriales, además de mostrar un caso real de estudio.

Una característica a mejorar es que, si bien retorna la secuencia óptima dentro de las estrategias posibles, todas las operaciones candidatas deben estar previamente precargadas en el modelo, al igual que en los modelos presedentes. Para futuros trabajos, estamos desarrollando técnicas de programación dinámica que permitan elevar aún más el nivel de flexibilidad de la planificación desestructurando, incluso, las estrategias hacia decisiones sobre cada operación.

RECEIVED: AUGUST, 2020.
REVISED: DECEMBER, 2020.

REFERENCIAS

- [1] Achterberg, T. (2009): SCIP: solving constraint integer programs. **Mathematical Programming Computation**, 1, 1-41.
- [2] FreeCAD 3D CAD/CAE parametric modeling application, www.freecadweb.org.
- [3] Chang, P.C. (1994): A practical approach for parts scheduling with alternative process plans in automated manufacturing systems. **Computers Math. Applic.** 2,55-65.
- [4] Iakovou, E., Koulamas, C. y Malik, K. (1998): Part selection and tool allocation in discrete parts manufacturing. **Annals of Operations Research**, 76:187-200.
- [5] Kongchuenjai, J., Prombanpong, S. (2017): An integer programming approach for process planning for mixed-model parts manufacturing on a CNC machining center. **Advances in Production Engineering and Management** 12, 274-284.
- [6] Kongchuenjai, J., Prombanpong, S. (2015): An Optimization of Automated Process Planning for Manufacturing Prismatic Parts on a Machining Center. **Applied Mechanics and Materials** 789,1268-1272.
- [7] A. Kusiak, A., Finke, G. (1988): Selection of process plans in automated manufacturing systems. **IEEE J. Robotics and Automation**, 4, 397-402.
- [8] Mendes, M., Mikhailov, M.D., Qassim, R.Y. (2003): A mixed-integer linear programming model for part mix, tool allocation, and process plan selection in CNC machining centres. **International Journal of Machine Tools and Manufacture** 43, 1179-1184.