

Introducción a la programación de operaciones por heurísticos: una propuesta interactiva

Área temática: F - La Educación en la Ingeniería Industrial

Cativa, Daniela⁽¹⁾; Denaro, Dino⁽¹⁾; Zabert, Benjamín⁽¹⁾; Novas, Juan M.⁽¹⁾⁽²⁾

⁽¹⁾GIMSE - Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional
Maestro M. Lopez esq. Cruz Roja Argentina, 5000, Córdoba, Argentina

⁽²⁾CIEM (UNC-CONICET)

Medina Allende s/n, 5000, Córdoba, Argentina

jmnovas@famaf.unc.edu.ar

RESUMEN

En este trabajo se presenta una metodología para la introducción al estudio de la programación de operaciones de planta mediante reglas heurísticas. La propuesta tiene como fin el desarrollo de una herramienta interactiva que de soporte al estudiante o profesional industrial, en su etapa de adquisición de conocimientos avanzados sobre la programación de órdenes de trabajo. El enfoque planteado facilita la clasificación, estudio y evaluación de reglas heurísticas empleadas para agendar actividades u operaciones que demandan recursos (máquinas) donde ejecutarse. A pesar de existir desde hace décadas numerosas técnicas para la resolución del problema (modelos matemáticos, sistemas automáticos, etc.), muchos profesionales, e incluso compañías, no las aplican debido a la complejidad de las mismas, entre otras razones. Las reglas heurísticas, en contraposición, son herramientas de complejidad media que pueden ser de gran utilidad al generar agendas de operaciones factibles y eficientes. En este sentido, las reglas son sencillas de entender por recursos humanos de distintas áreas y con distinto nivel de capacitación. En la presente contribución se exponen los avances en el desarrollo de una metodología que persigue facilitar el aprendizaje de reglas heurísticas para la programación de operaciones, mediante la resolución de casos de distinto grado de complejidad, de manera interactiva. El estudiante/usuario podrá comprender en qué consiste cada regla, cuándo es conveniente su aplicación, comparar resultados empleando diferentes heurísticas, entre otras posibilidades.

Palabras Claves: Ingeniería Industrial, Heurísticas, Programación de Operaciones, Método Iterativo.

ABSTRACT

This work presents a methodology aimed at addressing the introduction learning process to production programming or scheduling, by means of heuristics. The approach consists in the development of an interactive tool that gives support to the student or practitioner when acquiring advanced knowledge about production scheduling. The proposal facilitates the classification, study and test of rules used when a given number of activities requires to be scheduled on given resources. Despite the fact that from many years, a lot of techniques have been developed to tackle the scheduling problem (mathematical models, intelligent systems, etc.), many practitioners in industry still does not apply them, mainly because of their complexity. In contrast, heuristics are accessible tools that can be very helpful to the industrial engineer in order to obtain feasible and efficient schedules. Also, heuristics are easy to understand by employees with different level of expertise. In this contribution, advances in the development of a methodology to ease the learning of production scheduling by means of heuristics are presented. It allows the interaction with the student/user. By means of this approach, the student/user will be able to understand which is the goal of each rule, when is more convenient its application, as well as to compare solutions coming from different heuristics, propose alternative scenarios, etc.

Keywords: Industrial Engineering Education, Heuristic Rules, Scheduling, Iterative Methods.

1. INTRODUCCIÓN

Las plantas de manufactura discreta enfrentan numerosos desafíos en la actualidad, en parte provenientes del entorno global, fuertemente competitivo y de gran dinamicidad. Uno de estos desafíos consiste la correcta gestión de la producción, mediante la programación de las operaciones de manufactura. El fin último de esta actividad clave es atender adecuadamente los requerimientos internos de la compañía, como por ejemplo el uso eficiente de los recursos limitados, a la vez que se minimizan los retrasos en el despacho de productos terminados.

Existen numerosas técnicas que abordan el problema de la programación de operaciones (o “scheduling”), las cuales han sido elaboradas a través del tiempo y desde distintas áreas del conocimiento. Se destacan, entre otros, la programación matemática, proveniente del área de Investigación de Operaciones, los metaheurísticos, surgidos en la comunidad Informática, los sistemas multi-agentes, creados por expertos en Inteligencia Artificial. Cada una de estas metodologías de resolución tiene sus propias ventajas y desventajas. Entre aquellas desventajas que son comunes a todas estas técnicas, se encuentran: la complejidad de las herramientas que las implementan, la necesidad de contar con recursos expertos para su mantenimiento y gestión, la falta de confianza de los encargados de planta sobre estas tecnologías, etc. Gran parte del sector industrial no aplica estos métodos en su operatoria diaria debido a dichos problemas.

Por otra parte, existen métodos para la programación de operaciones que carecen de dicha complejidad y son más sencillos de implementar: las reglas heurísticas [1,2]. Como lo dice su nombre, son reglas, métodos, formas de programar operaciones de producción, siguiendo determinado criterio y buscando minimizar o maximizar un objetivo en particular. Esta manera de programar actividades es más sencilla de entender por los profesionales que trabajan en distintas áreas de la planta, así como con diferentes niveles de capacitación. Además, las reglas generan más confianza en ellos dado a que pueden comprender qué está haciendo la herramienta, qué criterio usa, etc. Si bien estos métodos no pueden garantizar que las soluciones encontradas sean las óptimas, pueden ser de gran utilidad para lograr agendas de operaciones factibles y eficientes.

En la actualidad, y en nuestra región, los gerentes de planta conocen que la gestión de operaciones y la resolución de problemas vinculados a la producción son parte de la competencia profesional de los ingenieros industriales y profesionales afines. Es por ello que, dada la problemática sobre la programación de operaciones, las metodologías de resolución alternativas y la competencia que atañe al ingeniero industrial en este tema, se presenta mediante este trabajo una metodología para la introducción al estudio de la programación de operaciones de planta, mediante reglas heurísticas. La propuesta tiene como objetivo el desarrollo de una herramienta interactiva que permita dar soporte al estudiante de ingeniería o al profesional industrial, en su etapa de adquisición de conocimientos avanzados sobre la programación de órdenes de trabajo en planta.

En esta contribución se exponen los avances en el desarrollo de la metodología propuesta, la cual persigue facilitar el aprendizaje de reglas heurísticas para la programación, mediante la resolución de casos de distinto grado de complejidad creciente, de manera interactiva. El aporte principal de este trabajo consiste en permitir que el estudiante/usuario pueda comprender en qué consiste cada regla, cuándo es conveniente su aplicación, comparar resultados empleando diferentes heurísticas, plantear escenarios alternativos, entre otras posibilidades brindadas por la herramienta. El desarrollo de la propuesta en idioma español es también una ventaja a destacar, ya que la barrera del idioma a veces complica la adopción de determinadas tecnologías. Se espera que en un futuro la plataforma permita también generar y testear nuevas reglas.

El resto del trabajo se divide de la siguiente manera: En la sección 2, se define el problema de la programación de operaciones, para luego identificar y clasificar los principales aspectos que caracterizan al uso de reglas heurísticas al abordar dicho problema. En la sección 3, se describen las principales características de la metodología de introducción a la resolución del problema por heurísticas. Finalmente, en la última sección se concluye y se describe el trabajo futuro.

2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

2.1. El problema de la programación de operaciones

En plantas de manufactura, la programación de operaciones a corto plazo puede definirse como la actividad por medio de la cual las tareas de manufactura demandadas por partes a procesar, son asignadas a los equipos encargados de ejecutarlas, estableciendo una secuencia de estas operaciones sobre cada máquina, fijando los tiempos de inicio y fin de cada una de las actividades, a la vez que se busca optimizar alguna medida de performance [3,4]. También puede involucrar la asignación de otros recursos críticos a las tareas de producción, como dispositivos de transporte, mano de obra, cuadrillas de mantenimiento, servicios (agua, vapor, etc.) [5-7]. La complejidad en la resolución y dimensión del problema aumenta a medida que consideramos más órdenes de trabajo, operaciones, máquinas y restricciones que vinculan a los elementos del dominio.

Es común encontrar desde gerentes a encargados, principalmente en pequeñas y medianas empresas, que confunden la planificación con la programación de la producción. En la planificación se establece el qué, cuánto, cuándo, dónde se fabricará, teniendo como base la proyección de demanda de productos. El horizonte de planificación abarca meses o años. En cambio, la programación de la producción se encarga de, contando ya con órdenes de producción definidas, establecer el cómo se fabricará: se fijan las máquinas encargadas de realizar las operaciones y cuándo las van a ejecutar. El horizonte de la programación es de minutos a días, o a lo sumo semanas, dependiendo del tipo de procesos. La programación de operaciones cobra mayor sentido en aquellas plantas fabriles donde existe una gran variedad de partes a producir y/o numerosas celdas de trabajo o áreas de producción, y sobretodo, donde la capacidad de los recursos productivos es limitada. Entre los beneficios que trae aparejado una correcta programación de operaciones, podemos destacar: aumento de la productividad, disminución del inventario en proceso, mejoras en los índices de despacho a tiempo de la órdenes, mejoras en la adaptación a cambios imprevistos, mayor control y visibilidad de lo que ocurre en planta, etc. El problema de la programación de operaciones es de gran interés tanto para la comunidad académica como industrial. Si bien existe una gran cantidad de aspectos a considerar en su análisis, como se puede ver en [8] y [9], en este trabajo se hace foco en problemas que son factibles de ser resueltos por medio de reglas heurísticas. Se dejan fuera del alcance de la propuesta aquellos de complejidad mayor, demandantes de herramientas más sofisticadas de solución, ya que escapan al objetivo del presente trabajo. A continuación se describen los aspectos considerados hasta el momento por la metodología propuesta: las características de las órdenes de producción, las medidas de desempeño, los tipos de entornos productivos y las reglas.

2.2. Reglas heurísticas: aspectos a considerar

En las siguientes subsecciones se describen los principales conceptos involucrados en la conformación y resolución del problema por medio de reglas [10]. Primero se enumeran las características o atributos principales que definen a una orden de trabajo. Luego, se identifican aquellas medidas de performance o desempeño que serán empleadas en las heurísticas, como objetivos a optimizar. Por medio de la tercer subsección, se introducen y definen los diferentes tipos de ambientes productivos. Finalmente, se dan a conocer las reglas heurísticas que se consideran en la propuesta. La clasificación aquí presentada no es exhaustiva, se pretende a futuro ir incorporando nuevos entornos, reglas, etc.

2.2.1. Características de órdenes

El conjunto de aspectos que caracterizan a las órdenes de producción o trabajos j que se describen a continuación, enumera aquellos que se identifican como los más relevantes para su uso en las heurísticas utilizadas en este trabajo.

- **Tiempo de procesamiento (pt_j):** Es el tiempo durante el cual una tarea de manufactura específica es ejecutada sobre una pieza o lote. Puede incluir el tiempo de puesta a punto necesario para la ejecución de la orden de trabajo.
- **Tiempo de disponibilidad de la orden (r_j):** Es el momento en cual la orden j se encuentra disponible para su procesamiento.
- **Fecha de entrega (d_j):** Representa la fecha límite o de entrega de la orden de trabajo ya elaborada. Un retraso sobre esta fecha, significa algún tipo de costo.
- **Holgura (sl_j):** Es la diferencia entre la fecha de entrega y el tiempo de procesamiento de la orden.

Existen otros aspectos que no se encuentran vinculados a la orden, sino a los recursos, que también son relevantes a la hora de programar las tareas. Un ejemplo es el Tiempo de puesta a punto de un equipo (r_k), que consiste en el tiempo necesario para alistar una dada máquina, k , con el fin de que se encuentre preparada para ejecutar determinada tarea de producción.

2.2.2. Medidas de desempeño

Cuando se define el problema de la programación de operaciones, se identifica la necesidad de contar con una métrica que nos permita conocer si la solución encontrada es de buena calidad o no. Estas se conocen como medidas de desempeño o performance. Un dado método de resolución buscará minimizar o maximizar el valor de la medida de performance que esté empleando, con el objeto de encontrar la mejor solución posible respecto de dicha medida.

Existen numerosas métricas, algunas de las cuales se clasifican y describen a continuación:

1. Medidas de desempeño vinculadas a la fecha de entrega:

- **Desviación de entrega total (TL):** Es la suma de las variaciones asociadas a cada orden de trabajo o lote j . La desviación de un dado lote j , L_j , se define entre la fecha límite y cuando realmente se termina el lote, C_j . Se obtiene una desviación negativa cuando el lote

se termina antes de la fecha límite, en cambio se obtiene una desviación positiva cuando finaliza después de la misma.

$$L_j = C_j - d_j \quad (1)$$

$$TL = \sum_j L_j \quad (2)$$

- **Tardanza Total (TT):** Se establece como la suma de las tardanzas de cada lote j . La tardanza de cada j , T_j , es la magnitud de la desviación positiva de dicho lote respecto a su fecha de entrega. Su valor puede ser mayor o igual a cero.

$$T_j = \max(C_j - d_j, 0) \quad (3)$$

$$TT = \sum_j T_j \quad (4)$$

- **Adelanto Total (TE):** Se define como la suma de los adelantos de todas las órdenes de trabajo j . El adelanto de un lote j , E_j , se establece como la magnitud de la desviación negativa del mismo respecto a su fecha de entrega. Su valor se encuentra en el intervalo entre cero y la holgura de j .

$$E_j = \max(d_j - C_j, 0) \quad (5)$$

$$TE = \sum_j E_j \quad (6)$$

- **Número de órdenes tardías (NT):** Se define como la cantidad de órdenes de trabajo j que cuya última operación finaliza luego de la fecha de entrega pautada. Para cuantificar estos retrasos, es necesario definir una variable binaria, δ_j , que tome el valor 1 cuando la orden sobrepase la fecha de entrega ($T_j > 0$), y 0 en caso contrario.

$$\delta_j = 1 \text{ si } T_j > 0; \delta_j = 0 \text{ si } T_j = 0 \quad (7)$$

$$NT = \sum_j \delta_j \quad (8)$$

2. Medidas de desempeño vinculadas al tiempo de finalización de las operaciones:

- **Makespan (Mk):** Es el tiempo que transcurre desde el inicio del horizonte de programación, hasta que se finaliza la última operación del último lote. Es decir, el momento en el cual todas las órdenes de trabajo ya han sido procesadas, lo cual coincide con el máximo valor de C_j entre todos los j .

$$Mk = \max C_j \quad (9)$$

- **Tiempo de Flujo Promedio, (Fprom):** Es la suma de los tiempos de flujo de cada j sobre el número de trabajos. El tiempo de flujo de un dado j , F_j , es la cantidad de tiempo que la orden j se encuentra en producción.

$$F_j = C_j - r_j \quad (10)$$

$$F_{prom} = \frac{1}{n} \sum_j F_j \quad (11)$$

Pueden considerarse variaciones de algunas medidas, como Tardanza Máxima, Adelanto Máximo, Tiempo de Flujo Máximo, Tardanza Promedio, etc.

Existen también medidas de desempeño vinculadas a costos y recursos, como el nivel de inventario en proceso ("Work-in-process", WIP), costos de operación asociados a cada máquina, utilización de equipos, entre otros costos operativos.

2.2.3. Tipos de entornos productivos

Las empresas existentes a nivel global dedicadas a la obtención de productos tangibles son muy diferentes entre sí, atendiendo a la naturaleza de su estructura y de sus procesos. Es así como se decide por organizar la producción de acuerdo a uno o más criterios que se consideren relevantes, por ejemplo: las restricciones del producto y del proceso, sus características, sus costos, entre otros. Con el propósito de generalizar la gran diversidad de tipos de organización de la producción, se han realizado diversas clasificaciones, siendo la que se muestra en la Figura 1 una de las más utilizadas, teniendo en cuenta la cantidad y la disposición de las máquinas en la planta. Se considera que siempre hay de 2 a n órdenes de trabajo a programar, y pueden existir de 1 a m máquinas.

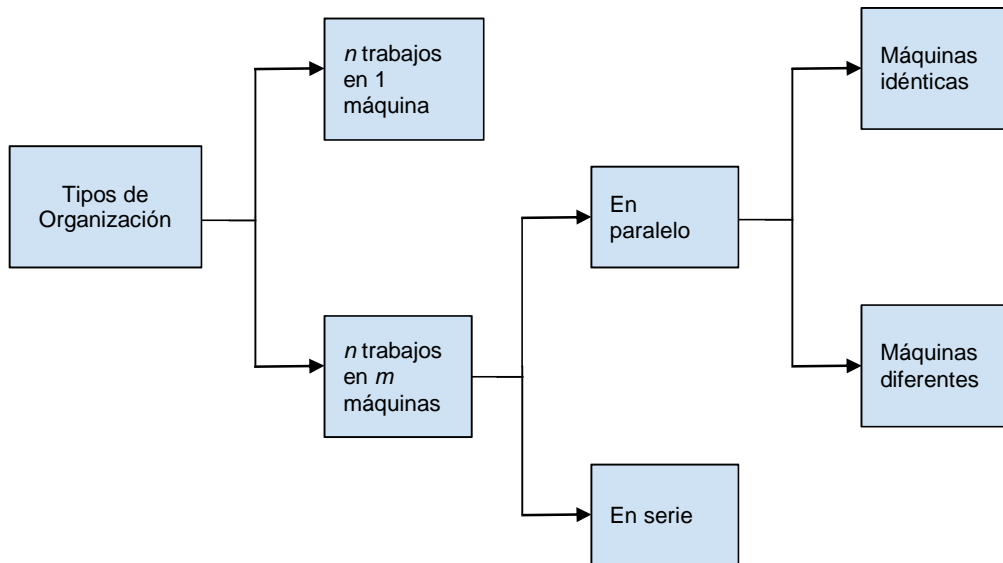


Figura 1. Esquema sobre la clasificación (parcial) de entornos de producción según cantidad y distribución de máquinas.

La clasificación presentada en la Figura 1 no es exhaustiva. Existen otros tipos de entornos de mayor complejidad, los cuales quedan fuera del alcance del presente trabajo. A continuación se dan algunos detalles de los entornos introducidos.

***n* trabajos en 1 máquina:** Es el caso más sencillo para la programación de operaciones: se dispone de una única máquina para la realización de una cantidad finita de trabajos (ver Figura 2). Se supone que todos los trabajos deben ser ejecutados en dicha máquina, todos demandan de una única operación y están disponibles al inicio del horizonte de tiempo, y no hay restricciones de otra índole. Este caso de entorno lo podemos asociar a, por ejemplo, un pequeño taller donde exista un único torno CNC encargado de realizar todas las tareas de mecanizado sobre todas las órdenes de producción.

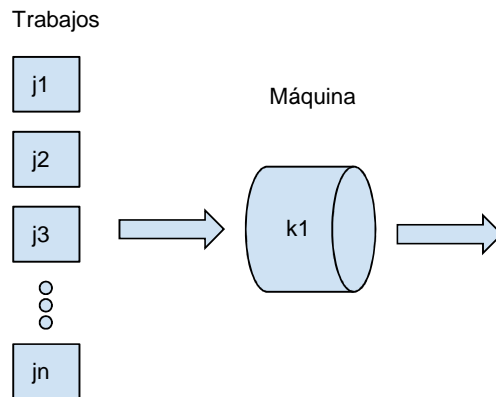


Figura 2. Representación de *n* trabajos en una única máquina.

***n* trabajos en *m* máquinas:** En el caso de ambientes con *m* máquinas, siendo $m > 1$, pueden presentarse distintas situaciones que dependen de la disposición de las mismas en la línea productiva: equipos en paralelo y equipos en serie.

- **Máquinas en paralelo.** Existen dos posibilidades: *máquinas en paralelo idénticas* o *máquinas en paralelo diferentes*. Cuando las máquinas son iguales, se considera que también lo son los tiempos de ejecución de las distintas operaciones. En el caso de máquinas diferentes, los tiempos de procesamiento para una misma operación pueden variar. En ambos casos, la operación sobre el trabajo *j* debe ser ejecutada por una y sólo una máquina del conjunto de máquinas en paralelo. En este tipo de ambientes, una cantidad de *m* trabajos pueden estar siendo procesados en un mismo momento (uno en cada máquina). El esquema representativo que se muestra en la Figura 3, podría aplicarse

a una planta maderera que sólo realiza tareas de corte para suministrar a terceros, para lo cual dispone de tres máquinas en paralelo.

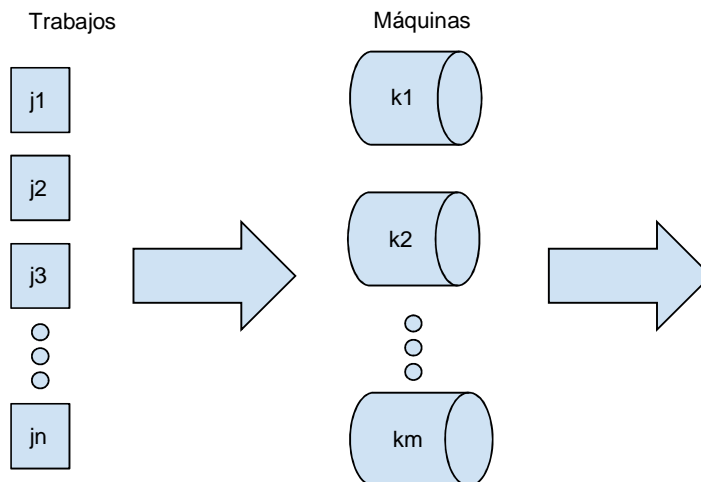


Figura 3. Representación de m máquinas en paralelo.

- Máquinas en serie.** La característica esencial de este tipo de entornos de producción, consiste en que las máquinas se encuentran dispuestas en secuencia. Dicha serie de equipos es atravesada por todas las órdenes de trabajo. A diferencia de los entornos presentados anteriormente, aquí cada orden requiere de m operaciones. Es decir, cada orden sufre una operación en cada máquina, según la secuencia establecida por las mismas. El tipo de entorno ilustrado en la Figura 4, podría aplicarse a una fábrica de ladrillos, donde la materia prima es transformada mediante una dada secuencia de operaciones, tales como molienda, amasado y moldeado.

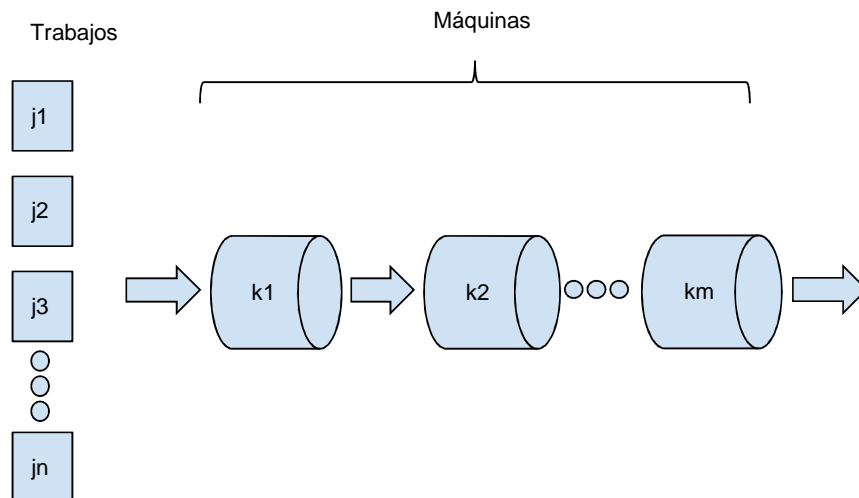


Figura 4. Representación de m máquinas en serie.

2.2.4. Reglas de decisión

Como se describiera en secciones previas, el presente trabajo hace uso de reglas heurísticas para la resolución de problemas de programación. Es posible entender a las reglas como métodos basados en la experiencia, que permiten resolver un problema. Dado que en general cada regla es aplicable a un pequeño grupo de problemas, es necesario conocer cuales son los límites para su aplicación, así como tener en claro que no garantizan soluciones óptimas.

El conjunto de reglas aquí enumeradas no es completo, existe una gran variedad y constantemente se generan y evalúan nuevas. Las heurísticas básicas que aquí se presentan funcionan sobre la base de ciertos supuestos, como por ejemplo, todas las tareas se encuentran en condiciones de ser ejecutadas y todas las máquinas están disponibles al comienzo del período. Un esquema de las mismas, según el entorno al que sirven, se puede observar en la Figura 5.

- **Shortest Processing Time (SPT) o tiempo de procesamiento más corto.** Consiste en ordenar las tareas a realizar según su tiempo de procesamiento, de menor a mayor. Su principal objetivo es minimizar el tiempo de flujo promedio. Asimismo, también minimiza el retraso promedio, el tiempo promedio de espera y la media de número de tareas en espera.
- **Weighted Shortest Processing Time (WSPT) o tiempo de procesamiento más corto ponderado.** Es una variante de SPT donde la diferencia radica en ponderar cada tarea con un valor que represente la importancia de una tarea respecto a las demás, la cual será considerada para la secuenciación.
- **Earliest Due Date (EDD) o fecha requerida más temprana.** Ordena las tareas de modo tal que aquella que deba concluirse con anterioridad a las demás, será la primera en ejecutarse y así sucesivamente con las restantes. Esta regla tiene el objeto de minimizar la máxima tardanza en los trabajos. Sin embargo, esta regla de secuenciación tiende a incrementar el número de órdenes tardías y la tardanza media.
- **Shortest Slack Time (SSLT) o tiempo de holgura más corto.** Busca agendar las tareas en orden creciente respecto de sus holguras. Su fin es minimizar el máximo adelanto en la finalización de las actividades.
- **Longest Processing Time (LPT) o tiempo de procesamiento más largo.** Consiste en ordenar las tareas a realizar según su tiempo de procesamiento en forma decreciente. En general se utiliza en combinación con otras reglas, como por ejemplo con SPT, con lo cual se logran soluciones que reducen el makespan y el tiempo de flujo promedio.
- **Regla de Hodgson.** Su objetivo es minimizar el número de trabajos tardíos. Utiliza para secuenciar las actividades la regla EDD y algunas otras condiciones.
- **Regla de Wilkerson-Irwin.** Su objetivo es minimizar la tardanza media. Utiliza en su algoritmo la regla de decisión EDD y algunas otras condiciones.
- **Regla de Campbell, Dudek y Smith.** Busca obtener buenas soluciones respecto al makespan. Para ello, genera $(m-1)$ secuencias posibles para n trabajos en m máquinas en serie, de las cuales se selecciona la de menor makespan.

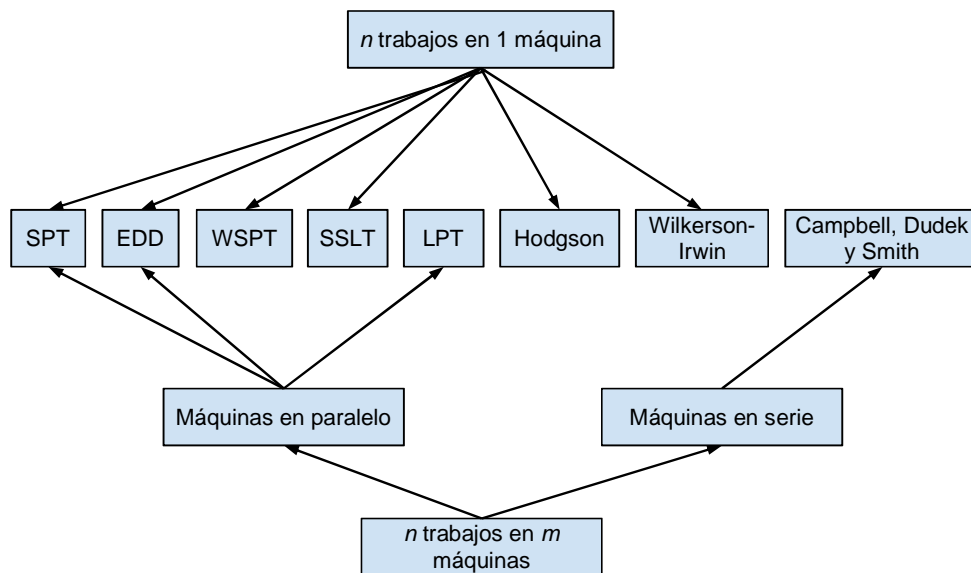


Figura 5. Esquema que representa las reglas de secuenciación más empleadas según el tipo de entorno productivo.

3. METODOLOGÍA PROPUESTA

La metodología de introducción a la programación de operaciones por reglas heurísticas propuesta en este trabajo, contribuye al aprendizaje del estudiante/usuario en estas temáticas. Las facilidades que aporta esta metodología se basan principalmente sobre las siguientes características:

1. Se implementa mediante interfaz brindada por Microsoft Excel, para la interacción amigable con el usuario.
2. Identifica, define y ejemplifica los diferentes aspectos a considerar en la resolución del problema.
3. Integra los distintos elementos a tener en cuenta para la resolución.

4. Facilita la identificación de las relaciones existentes entre los elementos del problema.
5. Hace sencilla la resolución de casos de estudio y el análisis mediante comparación de escenarios.
6. Refuerza una etapa inicial para el estudio posterior de herramientas de mayor complejidad (modelos matemáticos, sistemas, etc.).

La metodología brinda la posibilidad al estudiante de comprender, mediante la resolución de casos de estudio, las relaciones existentes entre los aspectos del problema descritos en la Sección 2 (Figura 6).

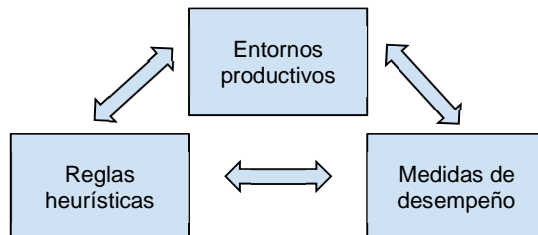


Figura 6. Aspectos abordados por la metodología.

Mediante la Figura 8 se presenta un diagrama de flujo donde se observa la secuencia de pasos que debe atravesar el estudiante/usuario para resolver un caso de estudio. La primer acción consiste en elegir el tipo de entorno productivo. A partir de allí, se puede seleccionar resolver un caso eligiendo una medida de desempeño (M.D.), o bien, una regla. Cualquiera sea la elección luego se puede seleccionar el otro criterio o dejar que la herramienta resuelva utilizando lo configurado por defecto (regla o M.D., según sea el caso).

Luego se realiza la carga de datos del ejemplo a resolver, o se chequea que estén cargados si se está resolviendo un segundo o posterior escenario. Una vez cargado los datos, se ejecuta automáticamente el algoritmo que utiliza la regla elegida para realizar la programación de los trabajos. Finalmente, luego de la resolución e impresión de resultados, se decide si se quiere resolver el caso de estudio considerando otra M.D. u otra regla, para realizar la comparación y análisis de los resultados obtenidos.

Otra característica relevante de la propuesta, consiste en mostrar las definiciones de los distintos elementos y conceptos que intervienen en la resolución del problema, a medida que el usuario va avanzando. El estudiante/usuario puede elegir aquellos aspectos sobre los que necesita mayor información, visualizando su definición o algún ejemplo ilustrador. De la misma manera, se puede acceder al algoritmo que implementa la regla, presentado mediante pseudocódigo. Estas características son opcionales, pudiendo el usuario activarlas o no.

La implementación de la metodología se ha planteado sobre Microsoft Excel (ver capturas de ejemplo en Figura 7). Esta elección ha sido realizada debido a que dicho sistema es ampliamente utilizado tanto por los estudiantes de ingeniería industrial, como por los profesionales afines que se desempeñan en pequeñas y medianas compañías. Además, no es necesario contar con conocimientos avanzados de informática para realizar modificaciones y “personalizaciones” a la herramienta, lo cual la hace versátil y adaptable a distintos requerimientos provenientes de diferentes usuarios. También permite la sencilla extensión para considerar nuevas reglas, medidas de desempeño y/o ambientes productivos. De todas maneras, no se descarta que también pueda implementarse, en un futuro, en un sistema desarrollado exclusivamente a tal fin.

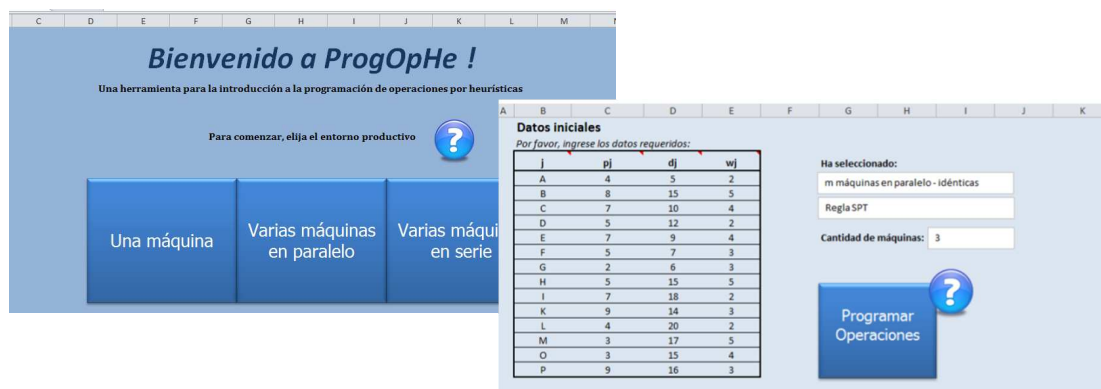


Figura 7. Capturas de pantalla del prototipo en desarrollo de herramienta interactiva. Pantalla de Ingreso (izquierda) y carga de datos (derecha).

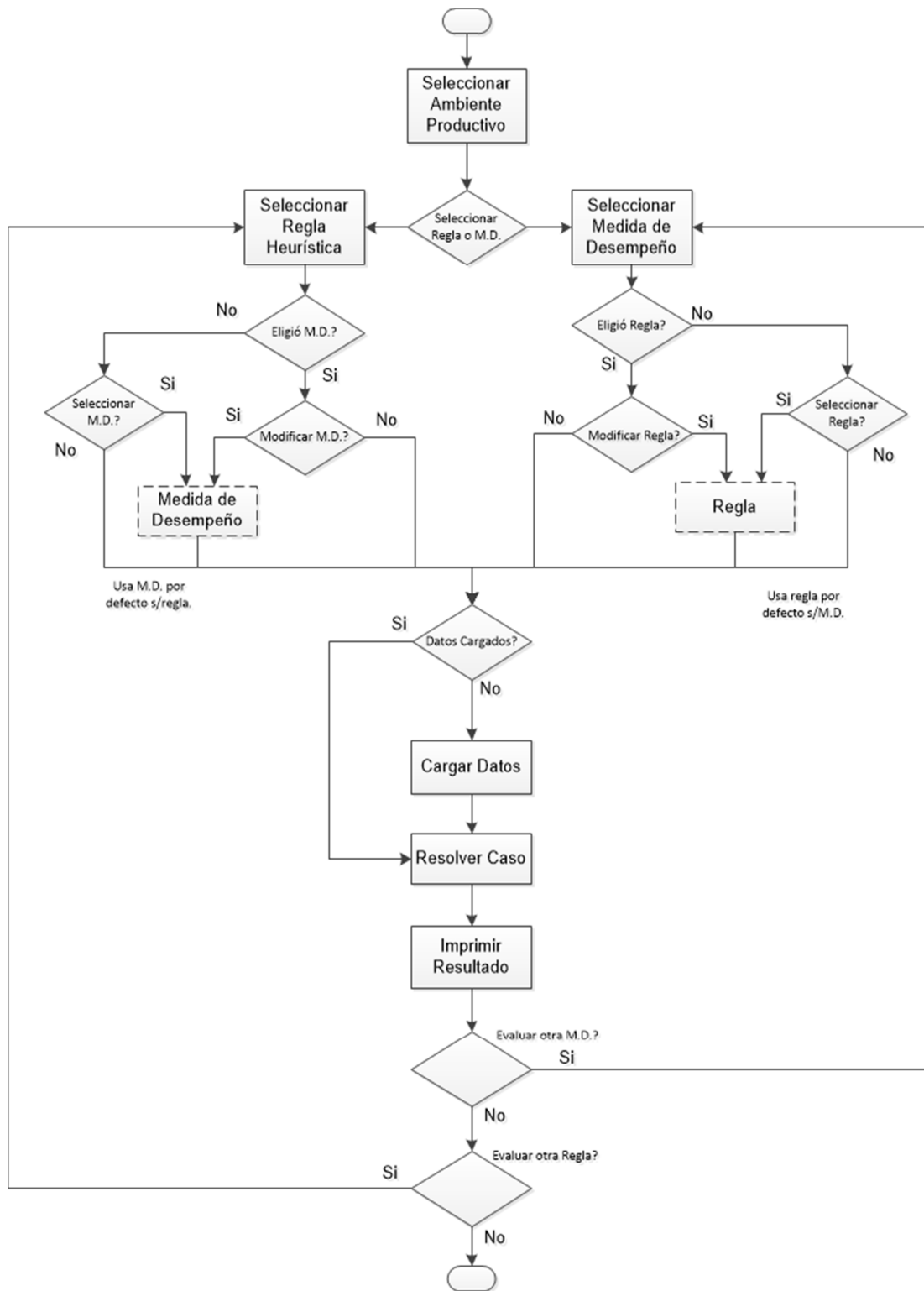


Figura 8. Diagrama de flujo que representa las etapas para la resolución de casos planteada por la metodología propuesta.

4. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Mediante el presente trabajo se presentaron avances en el desarrollo de una metodología interactiva para la introducción del estudiante o profesional de ingeniería industrial, o afines, en la programación de operaciones, mediante reglas heurísticas. La propuesta busca facilitar la comprensión, clasificación, estudio y evaluación de reglas heurísticas utilizadas para agendar operaciones de manufactura que demandan recursos limitados, tal como las máquinas donde deben realizarse dichas actividades.

Se presentaron los conceptos principales empleados en la metodología, así como el esquema lógico de trabajo de la misma. El desarrollo se encuentra siendo implementado en Microsoft Excel, donde de manera incremental se irán implementando nuevas reglas, entornos y métricas. De esta forma, se abordarán casos de estudio de complejidad creciente.

El fin último es que el estudiante/usuario pueda entender los conceptos, en qué consiste cada regla y cuándo es conveniente su aplicación, así como comparar las soluciones halladas empleando distintas heurísticas. Además, la herramienta sirve como base para el estudio de sistemas de programación de operaciones más avanzados. Se espera que el aporte pueda ser empleado en cátedras sobre la temática o en cursos de posgrado y actualización profesional. Como parte del trabajo futuro, se incorporarán nuevas reglas existentes en la literatura, así como también se buscará generar y evaluar nuevas heurísticas.

5. REFERENCIAS

- [1] Blackstone, J.H., Phillips, D.T., Hogg, G.L. (1982). "A state-of-the-art survey of dispatching rules for manufacturing job shop operations". *International Journal of Production Research*, 20, 1, 1982.
- [2] Holthaus, O., Rajendran, C. (1997). "Efficient dispatching rules for scheduling in a job shop". *International Journal of Production Economics*, 48, 1, 87–105.
- [3] Pinedo, M.L. (2012) *Scheduling. Theory, Algorithms, and Systems*. Springer-Verlag New York.
- [4] Vieira, G., Herrmann J., Edward L., "Rescheduling manufacturing systems: a framework of strategies, policies and methods", *Journal of Scheduling*, 6, 39-62, 2003.
- [5] Novas, J.M., Henning, G.P. (2014). "Integrated scheduling of resource-constrained flexible manufacturing systems using constraint programming". *Expert Systems with Applications*, 41, 2286- 2299.
- [6] Sirolla, M. D., Novas, J. M., Henning, G. P. (2015). "Programación de la producción a corto plazo y de tareas de mantenimiento preventivo en ambientes Job Shop flexibles". *Revista Latino- Americana de Inovação e Engenharia de Produção*, en prensa.
- [7] Marchetti, P.A., & Cerdá, J. (2009). "A general resource-constrained scheduling framework for multistage batch facilities with sequence-dependent changeovers". *Computers and Chemical Engineering* 33, 871-886.
- [8] Ouelhadj, D., Petrovic, S. (2009). "A survey of dynamic scheduling in manufacturing systems". *Journal of Scheduling*, 12, 417-431.
- [9] Harjunkski, I., Maravelias C., Bongers, P., Castro, P., Engell, S., Grossmann, I., Hooker, J., Méndez, C., Sand, G., & Wassick, J. (2014). "Scope for Industrial Applications of Production Scheduling Models and Solution Methods". *Computers and Chemical Engineering*, 62, 161-193.
- [10] Baker, K.R. (1974). *Introduction to Sequencing and Scheduling*. New York. John Wiley & Sons. Printed in USA.