

# Modelado del Problema de Calendarización de Recursos para la Fabricación de Compresores

Martín G. Martínez-Rangel<sup>1</sup>, Marco Antonio Cruz-Chávez<sup>1</sup>, Damaris Galván-Montiel<sup>1</sup>, José Crispín Zavala-Díaz<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CIICAP-<sup>2</sup>FCAeI, Universidad Autónoma del Estado de Morelos  
Avenida Universidad 1001. Col. Chamilpa, C.P. 62210. Cuernavaca, Morelos, México  
{mmtzr,mcruz,damaris,crispin\_zavala}@uaem.mx

**Resumen.** En este artículo se presenta un método para la identificación de los procesos y las variables críticas involucradas en el problema de calendarización de recursos para el maquinado de piezas que se utilizan en el ensamble de compresores recíprocos en una empresa de manufactura de clase mundial. Se modelan los procesos involucrados en el problema utilizando en conjunto dos metodologías de la teoría general de sistemas, Checkland e IDEF0, ambas utilizadas de forma individual para el modelado de sistemas suaves, pero que aquí se utilizan para atacar un problema de optimización combinatoria.

## 1 Introducción

El problema de calendarización de máquinas en un taller de manufactura, mejor conocido como *Job Shop* ó JSSP (por sus siglas en inglés)[1], es uno de los problemas más estudiados dentro del área de calendarización, encontrándose que la mayor parte de la investigación realizada en esta área durante las últimas cuatro décadas se ha centrado en darle solución, lo que a dado por resultado una gran cantidad de acercamientos a instancias grandes del problema, pero sin llegar a resolverlo en su totalidad. JSSP no solamente es un problema NP-Duro [2], si no que es considerado como uno de los más difíciles e intratables en esta clasificación. Es tan difícil de resolver que aun instancias pequeñas de 10 trabajos en 10 máquinas [3] tardaron en encontrar la solución por más de 20 años [4]. JSSP es el que tiene más aplicación práctica, pues permite incrementar la eficiencia de los procesos en la industria de la manufactura [5]. Debido a que la administración de recursos y su manejo eficiente dentro de la empresa es de carácter crítico, JSSP resulta muy atractivo para la comunidad científica inmersa dentro de las Ciencias Computacionales.

En este documento se propone un método híbrido para modelar los procesos involucrados en JSSP y la identificación de sus variables críticas. Este método está compuesto de dos metodologías basadas en la teoría general del sistemas: Checkland [6], aplicada para el modelado de procesos en sistemas suaves (Soft Systems Methodology o SSM, por sus siglas en inglés) y el método para el modelado funcional de procesos (Integration Definition for Function Modeling o IDEF0 por sus siglas en inglés) [7]. Cabe señalar que el modelado funcional de procesos mediante IDEF0 sigue la

formulación propuesta por Agarwal y Grossman [8] que es el “Modelado para optimización de Redes Dinámicas Híbridas”, pero que puede ser utilizada para modelar cualquier tipo de problemas dentro del área de optimización combinatoria. En este documento dicha formulación se orienta a JSSP a fin de lograr un modelo conceptual para este problema.

La metodología Checkland fue propuesta por Peter Checkland con el propósito de analizar sistemas blandos. Según Checkland, “un sistema blando es aquel que está conformado por actividades humanas, tiene un fin perdurable en el tiempo y presenta problemáticas no estructuradas o blandas [6], es decir, aquellas problemáticas de difícil definición y carentes de estructura, en la que los fines, metas, propósitos, son problemáticos en sí”. El método IDEF0 está basado en un análisis estructurado y en técnicas de diseño (SADT por sus siglas en inglés) [9] con un enfoque gráfico para la descripción del sistema, introducido por Douglas T. Ross al principio de los años 70, [10], desde entonces se ha utilizado SADT o IDEF0 en una gran variedad de problemas.

Mediante un caso práctico se demuestra la aplicación del método híbrido propuesto en este documento a fin de modelar los procesos para JSSP en una empresa de manufactura de compresores recíprocos industriales y comerciales, “Mayekawa de México”, quien tiene una amplia cobertura en el mercado nacional, exportando a los mercados de Canadá, Estados Unidos, Sudamérica y Europa. En la actualidad esta empresa, ubicada en la Ciudad Industrial de Cuernavaca, México, es la principal planta de producción del consorcio Mayekawa a nivel mundial, al centralizar en una misma área la fundición, fabricación, maquinado y ensamble de compresores con los procesos y maquinaria más moderna que garantiza la calidad internacional de sus productos mediante la inversión en los sistemas más avanzados de manufactura, contando con una capacidad de 3000 toneladas de fundición y una producción de más de 1500 unidades de compresores recíprocos industriales y comerciales al año.

El documento se encuentra estructurado de la siguiente manera. En la sección dos se describe el problema de calendarización en la planta de manufactura de manera conceptual y las restricciones a las que se ve sujeta generalmente, en esta sección también se describe la instancia del problema de optimización que se analiza. En la sección tres se describen las metodologías Checkland e IDEF0 utilizadas como parte del método híbrido aplicado para el modelado de JSSP. En la sección cuatro se presentan los resultados después de aplicar Checkland e IDEF0 traducidos a modelos de los procesos involucrados y variables críticas inmersas en el problema. Por último, en la sección cinco se presentan las conclusiones.

## 2 Problema de calendarización en una planta de manufactura

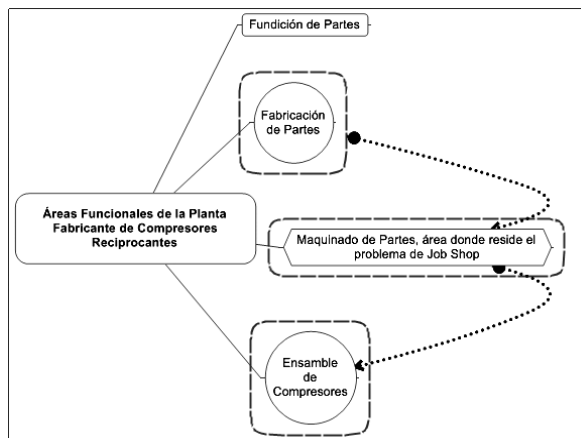
El problema clásico de calendarización en una planta de manufactura (JSSP) se establece como sigue. Se tiene un conjunto finito  $J$  de  $n$  trabajos  $\{J_j\}_{1 \leq j \leq n}$ . Estos trabajos deben ser procesados en un conjunto finito  $M$  de  $m$  máquinas  $\{M_k\}_{1 \leq k \leq m}$ . Cada trabajo es visto como una secuencia tecnológica de máquinas en las cuales este puede ser procesado. Al procesamiento de un trabajo  $J_j$  en una máquina  $M_k$  se le llama

ma operación  $O_{jk}$ . La operación  $O_{jk}$  requiere el uso exclusivo de una máquina  $M_k$  con una duración ininterrumpida  $t_{jk}$ , conocido como tiempo de procesamiento.

Las restricciones clásicas en el área de maquinado se mencionan a continuación:

- Un trabajo o pieza no visita la misma máquina dos veces.
- No hay restricción de operaciones entre operaciones de diferentes trabajos.
- Una operación no se puede interrumpir a menos que se termine su procesamiento.
- En cada par de operaciones que pertenecen al mismo trabajo existe una restricción de precedencia.
- En cada par de operaciones que son ejecutadas por la misma máquina existe una restricción de capacidad de recursos.
- Se debe de cumplir con el tiempo de liberación y tiempo límite en cada trabajo para no retrasar la producción.

La problemática que se desea resolver es el problema de calendarizar las actividades en una planta de manufactura de compresores recíprocos que cuenta con varias áreas importantes como es fundición, fabricación, maquinado y ensamble, como se aprecia en la figura 1. El área analizada en el presente trabajo, es el área de maquinado (una instancia de un JSSP) y el objetivo que se persigue es la de minimizar el tiempo de procesamiento (makespan) por lotes de piezas a maquinar.



**Fig. 1. Áreas funcionales de la planta Mayekawa**

Mediante la planeación de producción de la planta, se determina la cantidad de compresores a producir en esta área de maquinado en base a los pedidos que se tengan. En cuanto se tiene un pedido, de inmediato se hace un explosionado de los componentes que integran a los compresores recíprocos para determinar la cantidad de piezas (poleas, pistones, camisas y otras) que deben ser manufacturadas.

El área de maquinado se divide en líneas de producción, donde cada una de ellas produce cierto tipo de piezas o trabajos que le son asignados. Cada una de las líneas cuenta con un número determinado de máquinas las cuales son capaces de ejecutar una serie de operaciones (fresado, taladrado, rectificado y otras) en cada uno de los trabajos asignados a cada línea. Las piezas (trabajos) terminadas en cada una de las líneas son enviadas a almacén para el ensamblado de los compresores. Se considera que el área de fundición y fabricación siempre tiene un stock de piezas (máximo y mínimo) que garantiza que el área de maquinado siempre tendrá materia prima para iniciar los procesos.

### 3 Metodologías para el modelado de procesos

En la teoría general de sistemas existe una gran variedad de metodologías que se aplican para el modelado de sistemas suaves, aquí se aplican dos metodologías extensamente utilizadas que permiten modelar procesos, pero que no han sido utilizadas para el JSSP el cual se da en un contexto de procesos (hombre-máquina), debido a que por separado, estas metodologías no se pueden aplicar. Se seleccionó la metodología de Checkland por la necesidad de modelar el entorno donde reside el problema, y por otra parte, esta metodología se complementó con IDEF0 que permite identificar los procesos de manera funcional con un menor nivel de abstracción. Este último método nos permite identificar con detalle los procesos involucrados en el problema de JSSP siguiendo la formulación de Agarwal y Grossman ya mencionada para problemas de optimización combinatoria en general.

#### 3.1 Aplicación de Checkland para JSSP

La metodología Checkland se aplicó a fin de encontrar todos los elementos involucrados en el área de maquinado de piezas que se utilizan para el ensamblado de compresores recíprocos. La característica principal de esta metodología es que aborda aspectos cualitativos y cuantitativos que permitirán modelar la problemática del sistema de manufactura en cuestión.

La metodología Checkland se compone de 7 pasos a desarrollar:

1. Situación problemática no estructurada
2. Expresión de la situación problemática, aplicando CATWOE
3. Definiciones raíz del Sistema, aplicando CATWOE
4. Modelos Conceptuales
5. Comparación de 4 con 2
6. Cambios Factibles y Deseables
7. Acciones de Mejora al Sistema

CATWOE es una técnica que forma parte de la metodología Checkland, esta técnica se utiliza para extraer la información de los procesos en donde existe el involu-

cramiento de personas que de alguna forma tienen relación con los procesos que se analizan. Los factores utilizados para extraer esta información son agrupados bajo este nemónico, CATWOE proveniente de sus iniciales en el idioma inglés, estos factores son:

Consumidores (C): son aquellos individuos o entidades que se ven beneficiadas o perjudicadas por el funcionamiento del sistema.

Actores (A): son los que hacen posible el proceso de transformación que se lleva a cabo en el sistema.

Transformación (T): es el proceso realizado por el sistema, que consiste en sintetizar un conjunto de salidas a partir de un conjunto de entradas.

Punto de vista del Usuario (W): es la perspectiva que da origen a la definición raíz, ésta puede provenir de cualquier fuente, pero es recomendable que provenga de los consumidores, actores o el dueño del sistema.

Dueño (O): es aquel individuo, entidad o macro sistema que en algún momento puede decidir por la destrucción (o salida de funcionamiento) del sistema.

Restricciones del Ambiente (E): son aquellas limitaciones al funcionamiento del sistema que son impuestas por agentes externos a él y que conforma su ambiente.

En la figura 2, se aprecia de manera estructurada los pasos que se deben seguir para aplicar la metodología Checkland a JSSP del caso práctico.

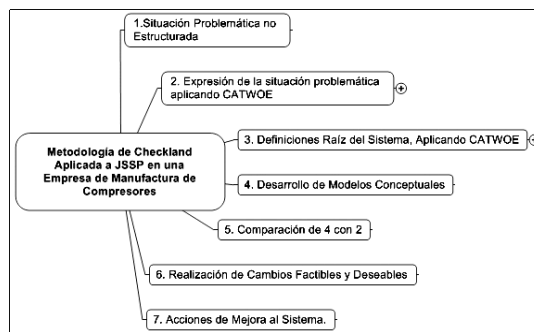


Fig. 2. Aplicación de la metodología Checkland para el problema de JSSP

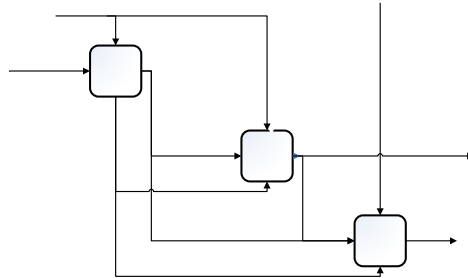
### 3.2 Aplicación de IDEF0 para JSSP

Esta metodología es utilizada para modelar de manera funcional los procesos y representar de manera estructurada y jerárquica las actividades que conforman un sistema o empresa y los objetos o datos que soportan la interacción de esas actividades. En la figura 3 se presenta la estructura de un proceso de manera esquematizada.

La metodología IDEF0 se describe como un conjunto de actividades agrupadas en diagramas, y en donde la relación entre actividades es indicada por su posición y por la orientación de las flechas, así mismo, muestra una vista jerárquica de un modelo entre sus procesos, IDEF0 tiene las siguientes características:

Genérica: permite modelar gráficamente sistemas de diferente propósito y a cualquier nivel de detalle.

Consistencia de uso e interpretación: basada en un estándar con especificaciones precisas y rigurosas.



**Fig. 3.** Esquema de la estructura de un proceso

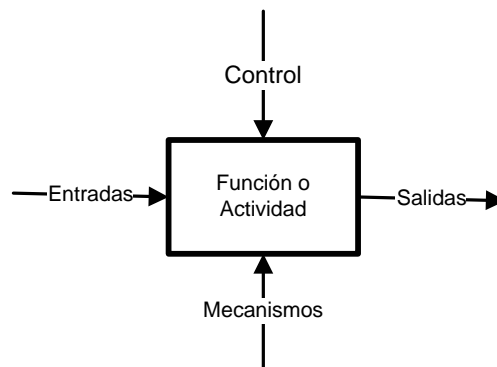
Los elementos que permiten representar una actividad en IDEF0 es la siguiente, ver figura 4:

**Entradas.** Recursos a ser transformados para producir una salida (por ejemplo: información o materia prima). Este recurso está asociado al lado izquierdo de la actividad (caja). No siempre una actividad tiene entradas.

**Salidas.** Producto obtenido durante la actividad desarrollada o proceso. La salida está asociada al lado derecho de la actividad.

**Control.** Objetos que gobiernan o regulan cómo, cuándo y si una actividad se ejecuta o no, como por ejemplo: normas, guías, políticas, calendarios, presupuesto, reglas, especificaciones, procedimientos, todos ellos están asociados al lado superior de la actividad.

**Mecanismos.** Recursos necesarios para ejecutar un proceso, como por ejemplo: maquinaria, programas de cómputo, instalaciones, recursos humanos, todos ellos están asociados al lado inferior de la actividad. Una actividad puede no tener mecanismos.



**Fig. 4.** Elementos de un proceso

## 4 Modelo de JSSP obtenido con Checkland-IDEF0

### 4.1 Aplicación de Checkland

Los resultados obtenidos al aplicar la metodología de Checkland en la parte que corresponde al paso 2 presentado en la sección 3.1, la cual se refiere a la expresión de la situación problemática aplicando CATWOE, se aprecia en la figura 5. En ella se identifica cada uno de los elementos que permiten expresar de manera esquemática la situación problemática (Clientes, Actores, Procesos, Punto de vista del mundo que rodea el problema, los propietarios del proceso y el medio ambiente donde se desenvuelve la situación).

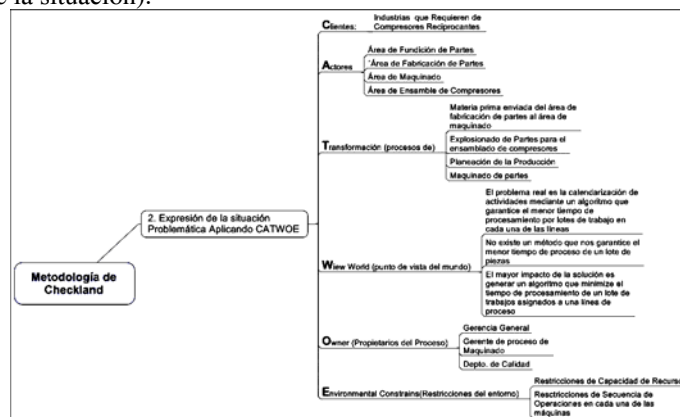


Fig. 5. Expresión de la situación problemática

En la figura 6 se aprecia una definición raíz, obtenida al aplicar CATWOE, y que corresponde a la definición del problema JSSP en la empresa de manufactura. En esta definición existen 3 verbos que se utilizarán para obtener un modelo conceptual que refleje el problema. Estos verbos son Identificar, métodos y modelos.

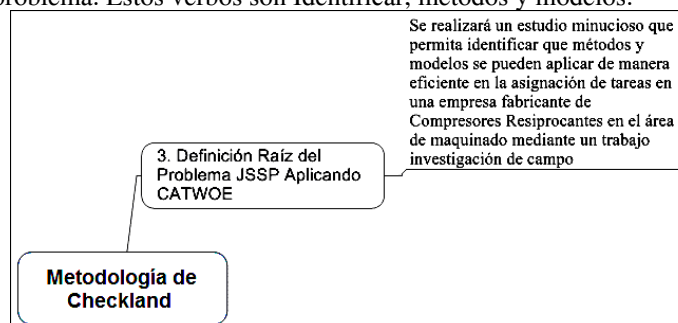


Fig. 6. Definición raíz del problema aplicando CATWOE

#### 4.1.1 Desarrollo de modelo conceptual de JSSP a partir de Checkland

En este estadio se elaboró un modelo conceptual, ver figura 7. Este modelo tienen su origen en los verbos de acción mínimos necesarios presentes en las definiciones raíz, este modelo describe lo que idealmente según el punto de vista de quienes interactúan con la situación problemática, debería hacer el sistema, lo cual consiste en describir e interrelacionar, una a una las actividades humanas que deberían realizarse para cumplir con lo descrito en las definiciones raíz, estas actividades se extraen al explotar la concepción inmersa en cada verbo. En este caso, nada más existe una definición raíz, por lo que solamente se desarrolló un modelo conceptual.

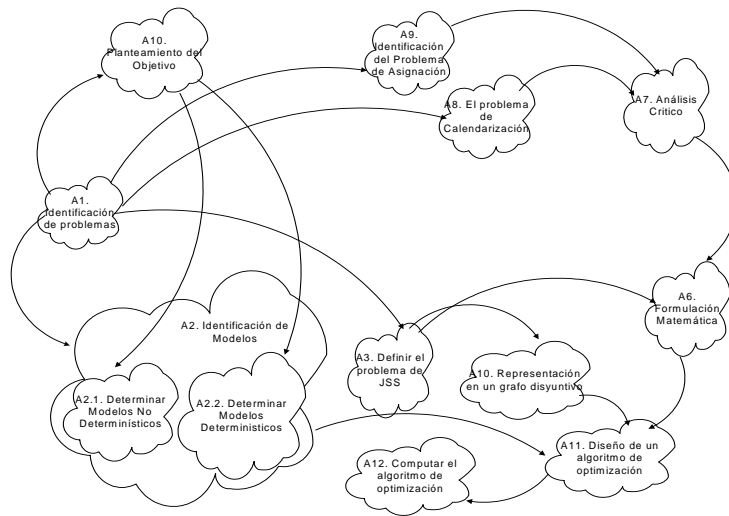


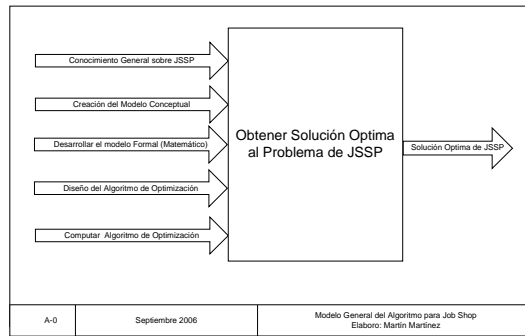
Fig. 7. Modelo Conceptual para el Problema de JSSP a partir de Checkland

#### 4.2 Aplicación de la metodología IDEF0 para JSSP

A partir del modelo conceptual obtenido con Checkland, el cual refleja el entorno o la situación problemática del problema de asignación de recursos de una manera más estructurada se aplica la metodología IDEF0 que forma parte del método híbrido propuesto en este documento. En cada uno de los modelos IDEF0 que corresponde a cada uno de los procesos involucrados en el problema se aprecian las entradas, los mecanismos o elementos necesarios para que se lleve a cabo el proceso, los elementos de control que generalmente son restricciones que pueden alentar el proceso o pararlo y por último la salida que corresponde al resultado generado en el proceso. Los resultados obtenidos se describen a continuación. En la figura 8, se presenta el proceso general que se debe seguir a fin de obtener una solución óptima al problema de JSSP en la planta de manufactura, siguiendo la formulación de Agarwal y Grossman, ya mencionada y que indica de manera estructurada los pasos a seguir para obtener

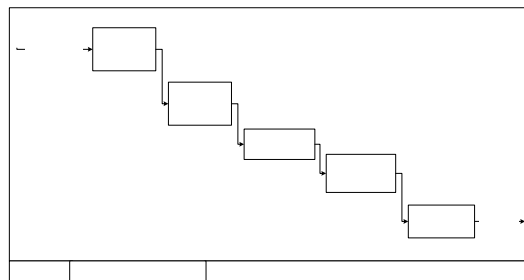


una solución a un problema de optimización combinatoria como lo es JSSP. En este primer modelo se observa que para el proceso de obtener una solución existen 5 entradas y una sola salida. Cada una de estas entradas se desarrolla como un proceso individual aplicando IDEF0.



**Fig. 8.** Proceso para obtener una solución óptima al problema de JSSP

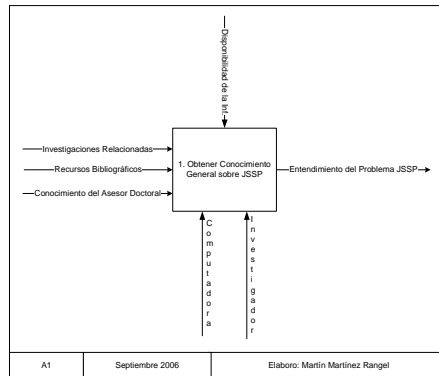
En la figura 9, se presenta la jerarquía de modelos, vistos como procesos, aquí se puede apreciar como se inicia con una actividad básica de entrada que corresponde a la información relacionada con JSSP, y que consiste en obtener el conocimiento general sobre el problema (primer proceso), este resultado se toma como una entrada para crear el modelo conceptual de JSSP (segundo proceso), continuando así para el resto de los proceso, terminando con el proceso para computar el algoritmo que permita resolver el problema.



**Fig. 9.** Procesos para obtener una solución óptima al problema de JSSP

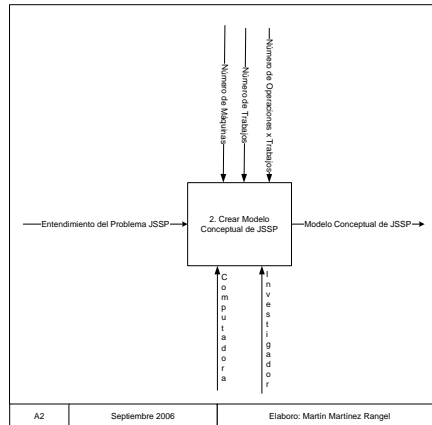
En la figura 10, se presenta el proceso para obtener el conocimiento general sobre JSSP, aquí se puede apreciar que las entradas corresponden a investigaciones relacionadas, recursos bibliográficos y conocimiento de quien dirige la investigación, la sa-

lida es el entendimiento del problema, el control que incide en el proceso corresponde a la disponibilidad de información relacionada con el JSSP.



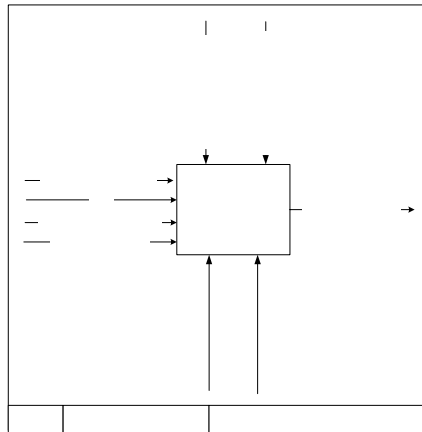
**Fig. 10.** Procesos para obtener conocimiento general sobre JSSP

En la figura 11, se presenta el proceso para crear el modelo conceptual, teniendo como entrada el entendimiento general de JSSP, los mecanismos de control tienen que ver con el número de operaciones por trabajo, el número de trabajos y el número de máquinas disponibles para realizar este trabajo, y como resultado de este proceso el modelo conceptual para el problema.



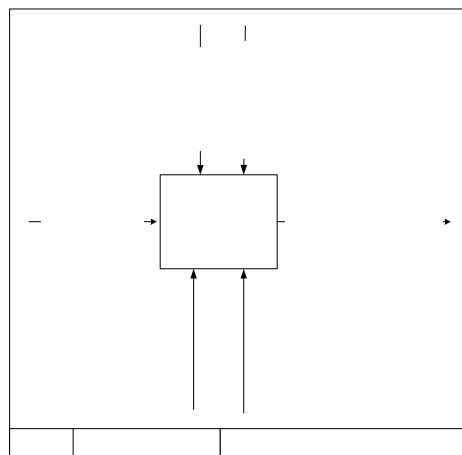
**Fig. 11.** Procesos para crear el modelo conceptual de JSSP

En la figura 12, se presenta el proceso para desarrollar el modelo formal, teniendo como entrada todos los elementos involucrados en el problema y que corresponde al modelo conceptual de JSSP, datos de entrada, variables y tipos de variables y la función o funciones objetivos encontradas para el problema, los elementos de control o restricciones tienen que ver con las restricciones de precedencia y de capacidad de recursos, y el resultado de este proceso es el modelo formal para JSSP.



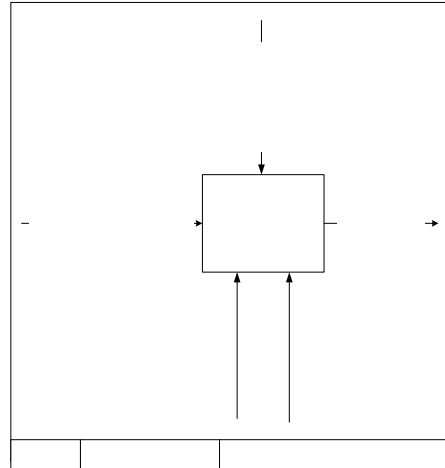
**Fig. 12.** Procesos para desarrollar el modelo formal de JSSP

En la figura 13, se presenta el proceso para diseñar el algoritmo de optimización, teniendo como entrada el modelo formal, los elementos de control o restricciones son los modelos determinísticos o no determinísticos utilizados para resolver el problema dependiendo de las variables involucradas en el problema, y el resultado de este proceso es el algoritmo de optimización para JSSP.



**Fig. 13.** Procesos para diseñar el algoritmo de optimización de JSSP

En la figura 14, se presenta el proceso para computar el algoritmo de optimización, teniendo como entrada el algoritmo propuesto que puede resolver el problema, los elementos de control corresponden a las restricciones lógicas de la programación utilizada y como resultado de este proceso el algoritmo computado que permita obtener la solución al problema de JSSP en la planta de manufactura de Mayekawa.



**Fig. 14.** Procesos para computar el algoritmo de optimización de JSSP

## 5 Conclusiones

El método híbrido propuesto en este documento, conformado por la metodología de Checkland e IDEF0, aplicado a un caso práctico donde reside el problema de asignación de recursos en una planta de manufactura de compresores, nos permite ver que estas metodologías se complementan para el modelado de un problema de optimización. En el caso de Checkland, esta permitió poner en relieve todas las actividades y variables críticas involucradas en el problema de JSSP, permitiendo reconocer el entorno en el cual se genera el problema de asignación de recursos, el resultado que se obtuvo fue el modelo conceptual, el cual contiene todos los conceptos básicos que fueron necesarios para modelar de manera funcional los procesos involucrados en el problema mediante la aplicación de IDEF0. Es importante señalar que aunque la teoría general de sistemas presenta muchas técnicas que permiten modelar un proceso desde el punto de vista sistémico, la mayoría no puede modelar problemas de optimización por sí mismos, pero al utilizar dos metodologías en conjunto lo hace posible. Las dos metodologías se complementan para representar un modelo más enfocado a la realidad de la empresa de manufactura. Por último, podemos decir que el uso del método híbrido Checkland –IDEF0 se puede aplicar para modelar procesos de otros problemas dentro del área de optimización combinatoria, siempre y cuando se utilice como híbrido.

## 6 Agradecimientos

Se agradece la valiosa cooperación de la empresa Mayekawa de México<sup>1</sup>, fabricante a nivel mundial de compresores recíprocos, quien nos dio todas las facilidades para que este trabajo se llevara a cabo.

## 7 Trabajos Futuros

En este documento, se obtuvo mediante el uso de un método híbrido (Checklan-IDEFO) aplicado a un caso práctico, la identificación del entorno donde reside el problema de JSSP en una planta de manufactura, así como la identificación de manera funcional de los procesos involucrados en el problema, pero esto no resuelve en sí el problema, mas bien da las pautas a seguir para resolverlo. Al modelar de manera funcional los procesos involucrados en el problema, nos permite reconocer las tareas que se tienen que realizar a fin de tener una solución factible para JSSP en la planta de manufactura, por lo tanto, lo que se propone como un trabajo futuro es desarrollar todas las actividades involucradas en cada uno de los procesos modelados de manera funcional en IDEFO y desarrollar, bajo esta guía la solución para el problema real existente en la empresa Mayekawa de México.

## 8 Referencias

1. M. Pinedo.: Scheduling Theory, Algorithms, and Systems, ISBN:0130281387, 2 Ed. Prentice Hall, U.S.A., Aug. 2001
2. M. Garey, R. Johnson, D.S. and Sethi, R.: The Complexity of Flow Shop and Job Shop Scheduling, in Mathematics of Operation Research, Vol. 1, No.2 (1976) pag. 117-129
3. J.F. Muth and G.L. Thompson.: Industrial Scheduling, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, Ch. 15, pp.225-251, 1963
4. J.M.J. Schutten.: Practical job shop scheduling, Annals of Operations Research,83, 161-177, 1998
5. J. Adams, E. Balas y D. Zawack.: "The Shifting Bottleneck Procedure for Job Shop Scheduling", Management Science Vol. 34, No. 3, March, 1988.
6. P. Checkland.: Information systems and systems thinking: time to unite? in Cotterman, W.W. & Senn, J.A., Challenges and strategies for research in systems development, Wiley, Chichester, 1992
7. Draft Federal Information Processing Standards.: "Announcing the Standard for integration definition for function modeling (IDEFO)". Publication 183, December 21,1993
8. A. Agarwal and I. E. Grossman.: Modeling for Optimization of Hybrid Dynamic Networks. Submitted to Computers Chemical Engineering, 2004
9. David A. Marca and Clement L. McGowan.: SADT: Structured Analysis and Design Techniques. McGraw-Hill, New York, NY, 1988
10. F. Hillier, G. Lieberman,: Introducción a la investigación de operaciones. Editorial McGraw-Hill.5ª ed. (1994)

---

<sup>1</sup> Av. De los 100 metros número 381. Parque Industrial Civac, Jiutepec, Mor. C.P. 62500