

Problemas de Programación de Proyectos con Restricción de Recursos (RCPSP) para el Montaje de Bloques en la Construcción Naval

William M. CIPRIANO¹, Helio A. R. MELLO¹, Raad Y. QASSIM²

¹ EISA - Estaleiro Ilha S.A. – Praia da Rosa 2, Ilha do Governador
Rio de Janeiro, RJ, CEP 21920-630, Brasil.

² Programa de Engenharia Oceânica - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro
Rio de Janeiro, RJ, CEP 21945-970, Brasil.

william.cipriano@eisa.com.br; helioarm@eisa.com.br; qassim@peno.coppe.ufrj.br

Resumen

El proceso de montaje del bloque del casco de un buque es uno de los procesos de fabricación más importantes en la construcción naval; un bloque esta compuesto de varias chapas y perfiles de acero con formas pre-determinadas de acuerdo con el proyecto. Montar un bloque puede ser una actividad crítica en el proceso de construcción, pero esta actividad es tradicionalmente basada en la experiencia del propio astillero. El montaje del bloque es determinado por un número de actividades que poseen relaciones de precedencia y requieren de un número de recursos, tales como mano de obra, equipos y materiales para su ejecución. Como resultado de esto tenemos que planificar, ejecutar y controlar el conjunto del montaje del bloque como un problema de programación de proyectos con recursos limitados. El problema principal es la incerteza en la estimación del tiempo de duración de una actividad, consecuentemente existe la necesidad de tratar esta incerteza en tiempo real. Para tratar este problema introducimos el concepto de RCPSP (*Resource Constrained Project Scheduling Problem*) con el objetivo de minimizar el *makespan* durante el proceso de producción a través de la modelación matemática-computacional que posibilita la optimización de recursos limitados y que puede producir resultados mas eficientes que las técnicas tradicionales de la investigación operativa.

Abstract

The block assembly process of the ship's hull is one of the most important processes in shipbuilding. A block consists of several sheets and steel profiles with predetermined shape according to the project. Assembling a block can be a critical activity in the construction processes, but this activity is traditionally based on the experience of his own yard. The block assembly is determined by a number of activities that have precedence relations and require a number of resources such as manpower, equipment and materials for its implementation. As a result we have to plan, execute and control the entire assembly of the block as a project scheduling project with limited resources. The main problem is the uncertainty of the duration of an activity; therefore there is need to address this uncertainty in real time. To address this problem we introduce the concept of RCPSP (*Resource Constrained Project Scheduling Problem*) with the objective of minimizing the *makespan* for the production process through mathematical – computational modeling that allows optimization of limited resources and can produce results that are more efficient than traditional techniques of operational research.

INTRODUCCIÓN

La gerencia de la cadena productiva se ha tornado un problema de gran importancia en la obtención de las ventajas competitivas entre las industrias. Muchos esfuerzos e inversiones en investigación y tecnología han sido realizados en la búsqueda de un equilibrio que satisfaga las necesidades de reducción de costos, atención al cliente y flujo de la producción.

Uno de los aspectos críticos en la busca del aumento de la productividad en los astilleros es el de administrar la programación del montaje de bloques que involucra los procesos de planificación, implementación y control de todas las operaciones relacionadas a este proceso. La excelente gerencia de este proceso implica la reducción del tiempo de entrega y en los costos, que acaban resultando un aumento sustancial de la productividad.

La planificación normalmente tiene por finalidad, disminuir el tiempo de fabricación y los costos. En muchos casos los planos creados bajo esta óptica, tienden a necesitar al máximo los recursos al menor costo posible. Al llevar esta planificación para la producción, no es raro que los procesos tengan que ser “adaptados” a la realidad de la planta de producción y al realizar la programación de la producción, el montaje es realizado de forma no sincronizada con la planificación, llevando a problemas como el de cumplir con los plazos, recepción de las materias primas, asignación de recursos, etc.

Entre tanto, la aplicación de las herramientas tradicionales de optimización en los procesos de construcción de los astilleros debido a sus peculiaridades, muchas veces no conduce a resultados satisfactorios, generando la necesidad de desarrollo de soluciones específicas. Tales soluciones deben considerar las características de una industria con productos complejos, de grande porte, tiempos de producción elevados y producción de pocas unidades por año.

La búsqueda de herramientas que deán soporte a las particularidades de los procesos de montaje de bloques y que al mismo tiempo representen avances significativos en las funciones de planificación, programación y control de la producción, y que demanden el tratamiento de grandes masas de datos que representan el comportamiento estocástico de difícil previsión sugiere la utilización de herramientas que incorporen técnicas tales como RCPS (Resource Constrained Project Scheduling Problem) que tiene como objetivo de minimizar los factores no controlables en el proyecto y que consigan producir resultados mas eficientes que las técnicas mas tradicionales de la investigación operativa.

Es común que las actividades de un proyecto deban ser programadas sobre recursos limitados. En estas condiciones, frecuentemente es necesario tomar decisiones sobre la orden de ejecución de las tareas, con la intención de minimizar el aumento en la duración del proyecto, además de la duración sin restricción de recursos originalmente calculados utilizando los procedimientos clásicos de PERT/CPM.

Sin duda, el tema de programación de proyectos (*scheduling*) es uno de los más estudiados en los últimos años debido a su demanda práctica. Podemos verificar que los modelos propuestos últimamente se han tornado cada vez más realistas. Existen diversas variaciones que abordan propuestas por los diferentes autores que se han dedicado al estudio de este tema. Entre los investigadores involucrados con el avance del conocimiento en esta área

han dado importantes contribuciones como: Ruehsen (1981), Park et al. (1996), Cho et al. (1998), Kim et al. (2001), Sasaki et al. (2002), Cardoso et al. (2008), Park et al. (2009), Melo (2010) entre otros.

El presente trabajo aborda el desarrollo de un modelo de programación lineal entera (ILP) que permite resolver los problemas de programación de proyectos. El modelo no solo considera la utilización de recursos asociados a cada secuencia de operaciones, también analiza múltiples programaciones actuando en paralelo, para realizar una operación global. A pesar, de que este trabajo nos interesa la reducción del tiempo total, el enfoque principal es el de compatibilizar los tiempos y recursos entre las diferentes estaciones de la línea de montaje del bloque con el intuito de minimizar el retraso en la producción del producto final.

Premisas son establecidas y el modelo es aplicado un ejemplo numérico que consiste en la montaje de un bloque que esta compuesto de un panel con cuatro sub-montajes, el cual consta de cinco casos diferentes respectivamente con el único intuito de distribuir de la manera mas eficiente los recursos limitados. No juzgamos necesarios más ejemplos, pues dentro del alcance de los trabajos en las líneas de producción de montaje de bloques en los astilleros, en la mayoría de casos recae en esta situación.

EL ESTADO DE ARTE

Los problemas de programación de proyectos constituyen una familia de diversos problemas de acuerdo a los objetivos, tipos de recursos disponibles y la tipología de red. El problema principal consiste en minimizar la duración total del proyecto, cuando las actividades que la componen no pueden interrumpir su ejecución y están sujetas exclusivamente a la relaciones de precedencia del tipo *End-Start*. Las actividades utilizan para su ejecución un conjunto de recursos renovables con disponibilidad limitada y constante a lo largo del proyecto. Las actividades tienen un único modo de ejecución, con una duración determinada y un consumo dado de recursos.

Otra clase de problema se genera cuando las actividades presentan distintos modos de ejecución, lo que implica afirmar que cada una de las actividades puede presentar distintas posibilidades o diferentes modos de ejecución. Un modo no es más que una forma de ejecutar la actividad que esta asociada a una determinada duración y un determinado consumo de recursos, donde pueden aparecer recursos no renovables y doblemente limitados. Existen otras variaciones, que permiten interrumpir la ejecución de las actividades, como por ejemplo, incluyendo otros tipos de relaciones de precedencia del tipo *End-Start*, estableciendo fechas obligatorias máximas o mínimas para las actividades, atrasos mínimos o máximos entre las actividades, disponibilidad variable de los recursos al largo del tiempo, así como también, se puede establecer diferentes objetivos como maximizar el valor neto del proyecto, nivelar la demanda de los recursos.

En este trabajo focalizamos el problema de programación de proyectos con recursos limitados (RCPSP), este problema tiene un gran interés práctico ya que es una generalización del *Job Shop*, ampliamente estudiados en los problemas relacionados con la producción. Debido a que estos problemas se encuentran dentro de un entorno de ejecución estática, que no se cumplen en situaciones reales, abordamos el problema de generar una

programación que se mantenga cuando en la ejecución del proyecto aparezca una variabilidad en la duración de las actividades.

Según Kolish and Padman (2001), los objetivos de los problemas de programación de proyectos tienen la siguiente clasificación:

- **Minimizar la Duración del Proyecto (*Makespan*):** es la medida más aplicada en el dominio de la programación de proyectos. La duración está definida como el intervalo de tiempo entre el inicio y el fin del proyecto. Como el inicio del proyecto es usualmente asumido en el tiempo $t = 0$, minimizar la duración es equivalente a minimizar el máximo de los tiempos de finalización de todas las actividades.
- **Minimizar los Atrasos de las Actividades:** otra medida de desempeño regular es la minimización del flujo de tiempo de todas las actividades del proyecto, o si son dadas las fechas de vencimiento es la minimización de los atrasos.
- **Maximizar el Valor Presente Neto (VPN) del Proyecto:** en proyectos de grande envergadura y a lo largo del plazo están presentes cantidades significativas de flujo de dinero, en forma de gastos para iniciar las actividades y pagos para completar las partes del proyecto, el VPN es un criterio adecuado para medir si es óptimo el proyecto, este criterio genera una ruta crítica de costos.
- **Maximizar la Calidad del Proyecto:** este objetivo es muy importante para los gerentes del proyecto, la calidad de un proyecto está dada porque este se debe dar los plazos planificados, debe cumplir con los presupuestos y que el cliente debe quedar satisfecho con el producto. La formulación de este problema se basa en el esfuerzo de minimizar la variación de los plazos y el presupuesto establecido debido a las actividades que deben ser pre-procesadas.
- **Minimizar el Costo del Proyecto:** este objetivo ha atraído mucha atención de los investigadores debido a su relevancia práctica. Se puede minimizar el costo de las actividades debido a que existen diferentes maneras de desarrollar una actividad, resultando distintos costos directos, los cuales deben ser minimizados, por otro lado se puede definir el de minimizar el costo de los recursos que están determinados por la programación de las actividades, el cual influye directamente los costos.
- **Objetivo Basado en Recursos:** el ejemplo de objetivo común basado en recursos que es un problema de nivelación, lo que significa minimizar la diferencia entre la cantidad de utilización de recursos, con el único fin de evitar picos de utilización en las horas punta y el uso de recursos ociosos.

La definición más general del problema de programación de proyectos con recursos limitados es de atribuir recursos escasos a las actividades competidoras a lo largo de un determinado horizonte de tiempo para obtener el mejor desempeño posible, conforme Kempf et al. (2000). Los recursos aplicados para un determinado proyecto tienen la siguiente clasificación, según Kolish and Padman (2001):

- **Recursos Renovables:** como por ejemplo tenemos las horas hombre, maquinas, herramientas, espacio; estos recursos están disponibles periodo a periodo, es decir, la cantidad disponible se renueva de un periodo a otro.
- **Recursos No Renovables:** como por ejemplo tenemos el dinero, materias primas o energía, que son recursos disponibles durante todo el proyecto y se van consumiendo conforme se ejecutan las actividades.
- **Recursos Doblemente Limitados:** son recursos que están limitados tanto por el periodo como un total disponibles en el proyecto, por ejemplo, la restricción de presupuesto limita no solo los gastos de todo el proyecto, si no también el consumo para cada periodo.
- **Recursos Parcialmente No Limitados:** son recursos cuya disponibilidad es renovada en intervalos específicos de tiempo. Estos tipos de recursos pueden ser vistos como un concepto genérico de todos los tipos de recursos.

En estas cuatro clasificaciones, un recurso del mismo tipo es igualmente eficiente para otro. En general la solución ideal para un RCPS es sobre la consideración de satisfacer las restricciones sobre la capacidad de diferentes tipos de recursos en cada periodo de tiempo. Los resultados que pueden ser obtenidos ayudaran a los gerentes a decidir cuantos recursos pueden ser utilizados para el procesamiento de una actividad y minimizar el tiempo de conclusión de un proyecto.

La disponibilidad de un recurso es la cantidad de un determinado recurso, que puede ser utilizado en un determinado momento, pudiendo ser constante o variable, y el requerimiento de una actividad es la cantidad de recurso que se necesita para que pueda ser procesada, conforme Cervantes (2010).

PLANIFICACIÓN Y PROGRAMACIÓN EN LA CONSTRUCCIÓN NAVAL

La actividad de planificación y programación de un astillero es una de las actividades más complejas. Planificación de las diferentes etapas de la cadena de productiva como estoques, producción de paneles, montaje de bloques y actividades de acabado son necesarios prácticamente en cualquier astillero. Cada una de las fases de construcción requiere un método diferente de planificación y programación, *vide* Pinto et al., (2007).

a) Planificación de la Producción:

Ocurre en dos niveles pudiendo ser tácticos y operacionales, en el caso específico de la construcción naval, la definición de la secuencia programada para el montaje de los bloques es un ejemplo de una función de nivel táctico. Ya la definición de las secuencias de fabricación de piezas y componentes, de sub-montajes y montajes, la planificación del *outfitting*, pre edificación y la edificación son funciones del nivel operacional, *vide* Souza (2009).

La planificación básica de la construcción del casco, normalmente recibe mucha atención por parte del equipo de planificación porque se trata de la base sobre las cuales otros planos serán desarrollados. Las programaciones de la construcción del casco y las líneas de

procesamiento están fuertemente relacionadas con la planificación de la construcción del casco. La definición de los bloques es establecida de forma coordinada con las necesidades de instalación del *outfitting* y pintura, estas actividades no pueden ser realizadas en unidades y necesitan ser realizadas en el bloque o a bordo de la embarcación. Por lo tanto, es la secuencia de montaje de los bloques y de la edificación que definen fundamentalmente la planificación del *outfitting* y de la pintura. El aumento de la eficiencia en la construcción de bloques pasa por la estandarización de productos intermedios.

La planificación de la producción en el estado del arte se da a través del desarrollo de un Plan Maestro (*Master Planning*), que programa globalmente todas las actividades de pre-producción y producción de un buque. El Plan Maestro forma parte de un sistema computarizado integrado de planificación, que viabiliza la interacción continua de los niveles de planificación estratégica, táctica, y detallada. Posee orientaciones de sistemas, zonas y departamentos, pero en los niveles mas bajos de planificación es orientado a productos. Por lo tanto, la estructura de un Plan Maestro permite rastrear las actividades desde la producción orientada a productos intermedios hasta los niveles de planificación orientados a sistemas, consecuentemente el plan maestro nunca o raramente es alterado durante el proyecto, sirviendo de referencia para administrar los contratos. En la Figura 1 muestra un ejemplo de análisis de procesos para el montaje de un bloque plano de un buque.

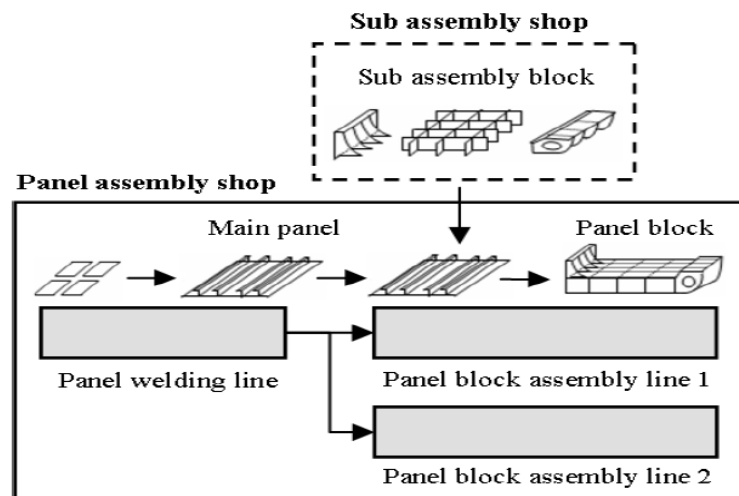


Figura 1. Análisis de Proceso de Construcción de un Bloque

b) Programación de la Producción:

En cuanto, la planificación esta orientado, principalmente, para las actividades y recursos necesarios, la programación establece tiempos para la utilización de los recursos distribuidos a las actividades en la planificación. La programación consiste básicamente en la determinación de cuando las actividades deben ser realizadas, *vide* Souza (2009).

La programación para el montaje de bloques se establece cuando y donde serán montados y sirve como base para la programación del *outfitting* en los bloques. La programación de la edificación establece cuando los bloques y las unidades de *outfitting* serán unidos en el dique o carrera consecuentemente es la base de la programación del *outfitting* a bordo. La programación detallada de la producción es elaborada principalmente para las áreas del

astillero relacionadas con la construcción del casco. De esta, forma son establecidos cronogramas y programas de producción para los talleres de fabricación de partes y para las áreas de sub-montajes, de montaje de bloques y de edificación.

La programación en los talleres de fabricación de partes es basada en los cronogramas maestros (*Masters Scheduling*) de edificación y de montaje. Cada línea de procesamiento definida en el área de fabricación de partes (partes planas, partes conformadas, partes con formas complejas) tiene fecha de inicio de actividades diferente, una vez que las tasas de producción son diferentes y que las partes deben quedar listas al mismo tiempo, de modo que se evite estoques de productos intermediarios. Por lo tanto, piezas que requieren mayor tiempo de procesamiento, por ejemplo, piezas que necesitan de marcación y cortes específicos para la conformación en relación al corte y marcación de piezas planas, son programadas para tener su producción anticipada.

La programación detallada de montaje de los bloques también es generada a partir del cronograma maestro de montaje. Para cada bloque es elaborado un cronograma detallado de la producción, envolviendo todos los procesos de unión y sub-montajes, piezas y componentes de *outfitting*. Las fechas establecidas en el cronograma maestro de montaje definen el tiempo de inicio y fin del montaje de cada bloque. El cronograma detallado del bloque también incluye la programación de recursos para el desarrollo de los procesos, con atención especial para las necesidades de mano de obra y de equipos de movimiento de carga. En la Figura 2 muestra un ejemplo de la estrategia de construcción y programación de un bloque de un buque.

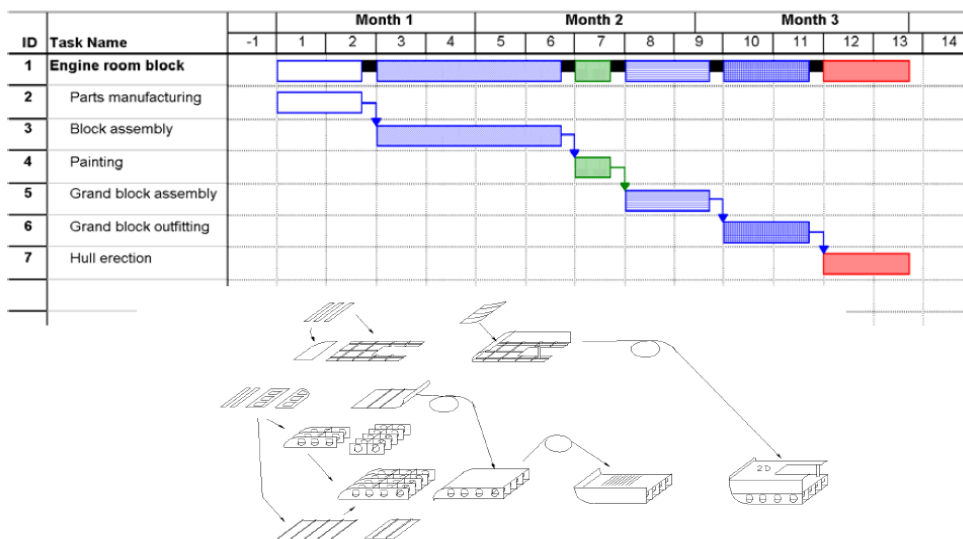


Figura 2. Programación para la Construcción de un Bloque

MODELO MATEMÁTICO

En esta parte, presentamos un modelo de programación lineal entera (ILP) que permite resolver los problemas de programación de proyectos, así mismo, es llevado en cuenta no solo la utilización de recursos asociados a cada secuencia de operaciones, pero también analiza múltiples programaciones actuando en paralelo, para realizar una operación global. Nuestro modelo matemático representa el problema pudiendo interactuar con los parámetros de producción de modo para determinar cuál es la distribución de recursos mas adecuado para el montaje del bloque, minimizando el tiempo total del montaje de una de orden de trabajo.

Consideraciones Iniciales y Premisas Adoptadas:

Nuestra propuesta es presentar un modelo de programación lineal entera (ILP) con el intuito de resolver los problemas de programación en el montaje de bloques en los astilleros basados en el modelo propuesto por Pritsker et al., (1969), para tal caso establecemos las siguientes premisas:

- La relación de precedencia inicial entre dos actividades consecutivas es del tipo Start-End, es decir, ninguna actividad puede tener inicio si las antecesoras no hubieran sido concluidas.
- El modelo es determinístico, no es considerado el riesgo.
- El modelo no considera la necesidad de espacio físico para estoques intermediarios, y no comparte los recursos entre los diferentes sub-montajes.
- El análisis es más apropiada para ambientes estables del proyecto de que para los dinámicos y presupone procesos secuenciales.
- Un conjunto de piezas y recursos esta disponible para la producción, en cantidades que pueden o no ser suficientes para la fabricación de las sub-montajes. Los recursos pueden ser: piezas (reforzadores, cartelas, plomada, etc.), operarios (soldadores, montadores, galiberos, etc.), equipos (maquinas de soldadura, grúa puente, etc.) o pesos para enderezamiento.
- Un conjunto de sub-montajes debe ser fabricado, teniendo como características los plazos máximos de fabricación.
- Cada operación de montaje requiere un tiempo de ejecución y un conjunto de recursos, que pueden o no ser suficientes para cada operación.

Notación Matemática:

i, j - índices para actividades; $i, j \in I$

k - índices para recursos; $k \in K$

t - índices para periodo de tiempo; $t \in T$

D_i - tiempo de duración de la actividad i

EF_i - menor tiempo final para actividad i

- ES_i - menor tiempo inicial para actividad i
 LF_i - mayor tiempo final para actividad i
 LS_i - mayor tiempo inicial para actividad i
 $R_{i,k}$ - consumo del recurso k por unidad de tiempo para actividad i
 $Q_{k,t}$ - cantidad de recurso k disponible en el periodo de tiempo t
 S_i - conjunto de actividad sucesora directa de la actividad i
 $X_{i,t}$ - variable binaria, = 1 si la actividad i es finalizada en el periodo de tiempo t ,
 = 0 en otros casos.
 $Y_{i,t}$ - variable binaria, = 1 si la actividad i es ejecutada en el periodo de tiempo t , =
 0 en otros casos.

Formulación General:

La función objetivo a ser minimizada en este modelo es:

$$\text{Minimise } \sum_{\tau=EF_i}^{LF_i} \tau X_{i,\tau} \quad (1.1)$$

El modelo esta sujeto a las siguientes restricciones:

$$\sum_{\tau=EF_i}^{LF_i} X_{i,\tau} = 1, \forall i \in I; \forall t \in T \quad (1.2)$$

$$\sum_{\tau=EF_j}^{LF_j} (\tau - D_j) X_{i,\tau} \geq \sum_{\tau=EF_i}^{LF_i} \tau X_{i,\tau}, \forall j \in S_i; \forall i \in I \quad (1.3)$$

$$\sum_{\tau=ES_i}^{LF_i} Y_{i,\tau} = D_i, \forall i \in I \quad (1.4)$$

$$\sum_{i \in I} R_{i,k} Y_{i,t} \leq Q_{k,t}, \forall k \in K; \forall t \in T \quad (1.5)$$

$$X_{i,t}, Y_{i,t} \in \{0, 1\} \forall i \in I; \forall t \in T \quad (1.6)$$

La función objetivo (1.1) – minimiza el tiempo total (*makespan*) para el montaje del bloque en la línea de producción. La restricción (1.2) – garantiza que un montaje termina en un determinado instante de tiempo t . La restricción (1.3) – asegura las relaciones de precedencia entre las actividades. La restricción (1.4) – relaciona las variables binarias de la actividad de ejecución para los tiempos de duración de la actividad. La restricción (1.5) – garantiza el consumo de cada recurso que no sea excedida en cada periodo de tiempo. La restricción (1.6) – fija la binariedad de las variables de decisión.

Para obtener resultados numéricos, programamos computacionalmente dos modelos matemáticos que serán presentados posteriormente. Por lo tanto, fue utilizado el software LINGO 10.0 de la Lindo Systems, en una plataforma PC Intel Celeron 2,4G CPU.

RESULTADOS NUMÉRICOS

Presentamos una variedad de casos para la distribución de recursos en el montaje de bloques dentro de los talleres en los astilleros con el intuito de demostrar la capacidad del modelo desarrollado. En el ejemplo se muestra el montaje de bloque constituido por un panel y cuatro sub-montajes, considerando recursos limitados, el análisis a ser realizado es de optimizar la distribución de recursos limitados durante el proceso de producción en la línea de montaje. Para simplificar el trabajo computacional, consideramos adimensionar el tiempo, es decir, los datos imputados dentro del modelo fueron considerados en unidades [U.T.], cuya equivalencia es por ejemplo un día de trabajo (ocho horas) equivalen a dos unidades de tiempo [U.T.].

Es importante definir los recursos disponibles utilizados en nuestro modelo numérico, cuya descripción es dada a seguir:

- **Grúa Puente (R1):** operada por uno de los montadores y con capacidad para izar chapas, perfiles y grandes bloques.
- **Auxiliar/Montador (R2):** personas y equipos necesarios para montaje.
- **Soldador (R3):** personas necesarias para realizar la operación de soldadura.
- **Pesos para Enderezamiento (R4):** bloques de cemento utilizados para enderezar las chapas de acero que son sometidas a altas temperaturas de calor.
- **Galiberos (R5):** personas y equipos necesarios para marcación de las chapas después de ser soldadas.
- **Maquina de Soldadura dura (R6):** equipos necesarios para soldar las chapas.

En la Figura 3 mostramos un bloque constituido por un panel y dos sub-montajes, así mismo, en la Figura 4 ilustramos el diagrama de red AON (*activity on node*) del proyecto con las actividades para el montaje del bloque descrito a seguir:

Inicio de las Actividades

J00: inicio de la orden de montaje del bloque

Línea de Paneles

J11: juntar chapas

J12: soldar chapas

J13: marca y endereza chapas

J14: montar perfiles

J15: soldar perfiles

J16: enderezar el panel listo – línea de calor

Continuación de la Línea de Paneles – se torna Línea de Bloques

J17: transportar y montar sub-montajes en el panel

J18: soldar el sub-montaje en el panel

Línea de Sub-montaje 1

J21: juntar las chapas

J22: soldar las chapas

J23: marcar y enderezar las chapas

J24: soldar las barras

Línea de Sub-montaje 2

J31: juntar las chapas

J32: soldar las chapas

J33: marcar y enderezar las chapas

J34: soldar las barras

Línea de Sub-montaje 3

J41: juntar las chapas

J42: soldar las chapas

J43: marcar y enderezar las chapas

J44: soldar las barras

Línea de Sub-montaje 4

J51: juntar las chapas

J52: soldar las chapas

J53: marcar y enderezar las chapas

J54: soldar las barras

Fin de las Actividades

J99: entrega del bloque

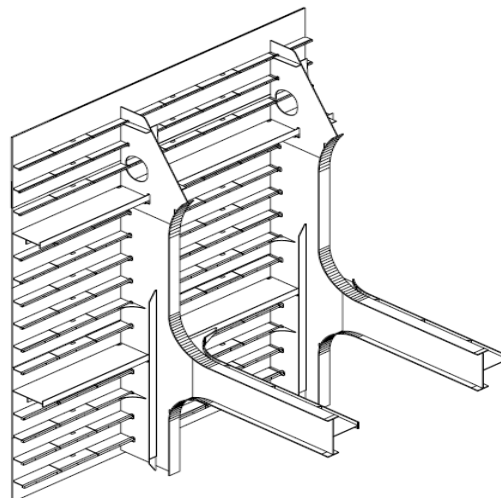


Figura 3. Bloque con 4 Sub-montajes

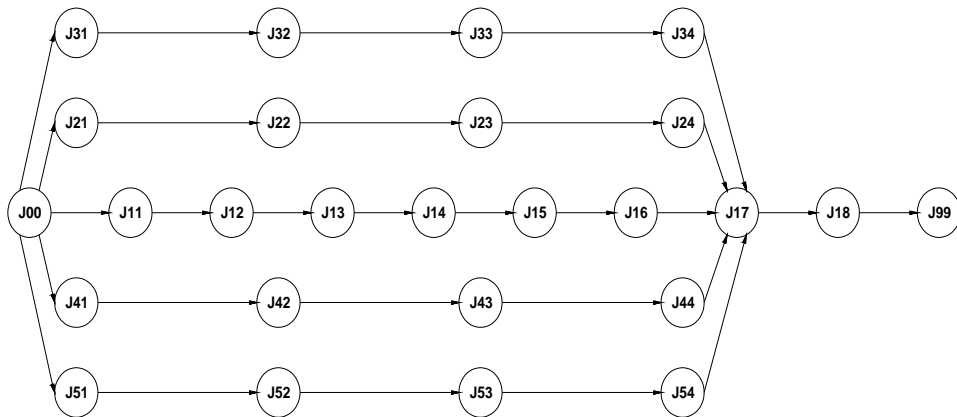


Figura 4. Diagrama AON para Montaje de Bloque – 4 Sub-montajes

En este ejemplo numérico también presentamos cinco casos diferentes con sus respectivos recursos distribuidos para el análisis y el resultado de la minimización de la duración del proyecto (*makespan*), como puede ser visto en la Tabla 1.

CASO	R1	R2	R3	R4	R5	R6	<i>Makespan</i>	
							U.T.	días
Caso 1	1	8	8	8	2	8	35	17.5
Caso 2	1	6	6	6	2	6	43	21.5
Caso 3	2	16	16	8	4	16	31	15.5
Caso 4	2	8	8	16	4	16	32	16.0
Caso 5	1	16	16	8	4	8	35	17.5

Tabla 1. Distribución de los Recursos para Montaje de Bloque - 4 Sub-montajes

En la Tabla 2 presentamos las actividades, la relación de precedencia y distribución de recursos limitados dentro del proyecto para la ejecución del ejemplo numérico en el montaje de un bloque con cuatro sub-montajes.

	S	R1	R2	R3	R4	R5	R6
J11	J12	1	2	0	0	0	0
J12	J13	0	0	6	0	0	6
J13	J14	1	1	0	6	2	0
J14	J15	0	4	2	0	0	4
J15	J16	0	0	6	0	0	6
J16	J17	0	4	0	0	0	4
J17	J18	1	6	2	0	0	6
J18	J99	0	0	6	0	0	6
J21	J22	1	3	0	0	0	3
J22	J23	0	0	6	0	0	6
J23	J24	1	2	0	2	2	0
J24	J17	0	0	4	0	0	4
J31	J32	1	3	0	0	0	3
J32	J33	0	0	4	0	0	4
J33	J34	1	2	0	2	2	0
J34	J17	0	0	4	0	0	4
J41	J42	1	3	0	0	0	3
J42	J43	0	0	4	0	0	4
J43	J44	1	2	0	2	2	0
J44	J17	0	0	4	0	0	4
J51	J52	1	3	0	0	0	3
J52	J53	0	0	4	0	0	4
J53	J54	1	2	0	2	2	0
J54	J17	0	0	4	0	0	4

Tabla 2. Actividades y Distribución de Recursos - 4 Sub-montajes

a) Caso 1:

Las Figuras 5 y 6 muestran las simulaciones numéricas para la distribución de los recursos para el montaje del bloque con cuatro sub-montajes en la línea de producción en los talleres del astillero. En el Caso 1, ver Tabla 2, fue distribuido los recursos de acuerdo como se acostumbra trabajar en los talleres de los astilleros y tenemos como resultado un *makespan* de 35 unidades tiempo, ver Tabla 1. El recurso R1 (Grúa Puente), ver Figura 5, es utilizado por otras actividades es utilizado con mas frecuencia por la actividad J17 (transportar y montar sub-montajes en el panel), es decir, utiliza un único recurso disponible.

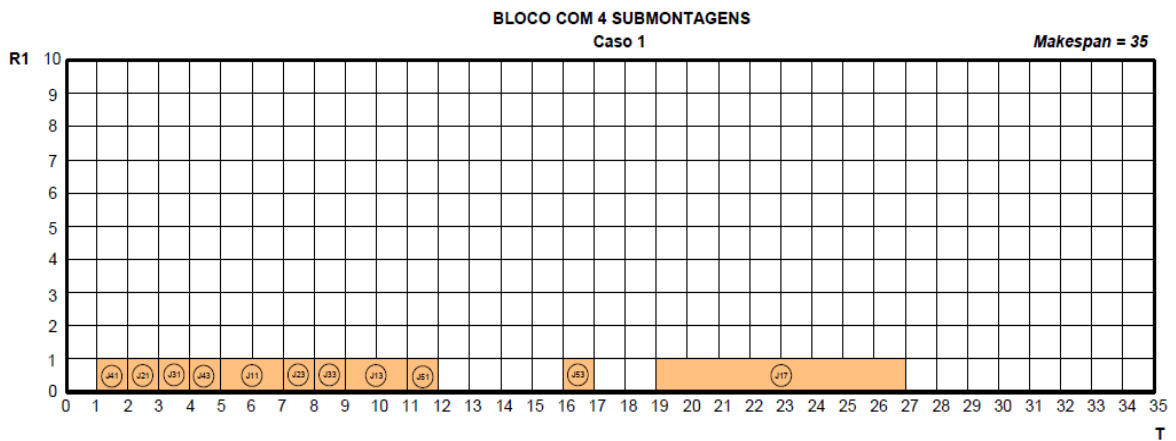


Figura 5. Utilización del Recurso Tipo R1 para el Caso 1

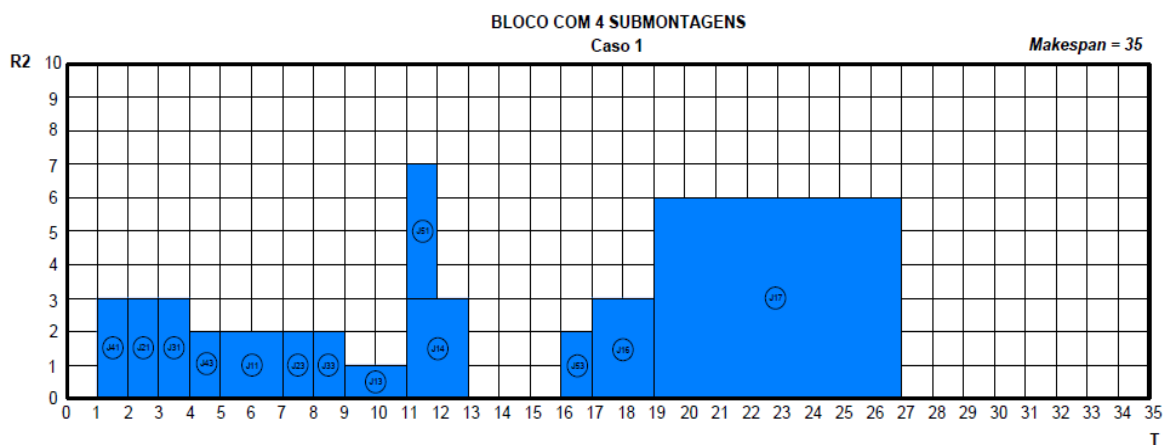


Figura 6. Utilización del Recurso Tipo R2 para el Caso 1

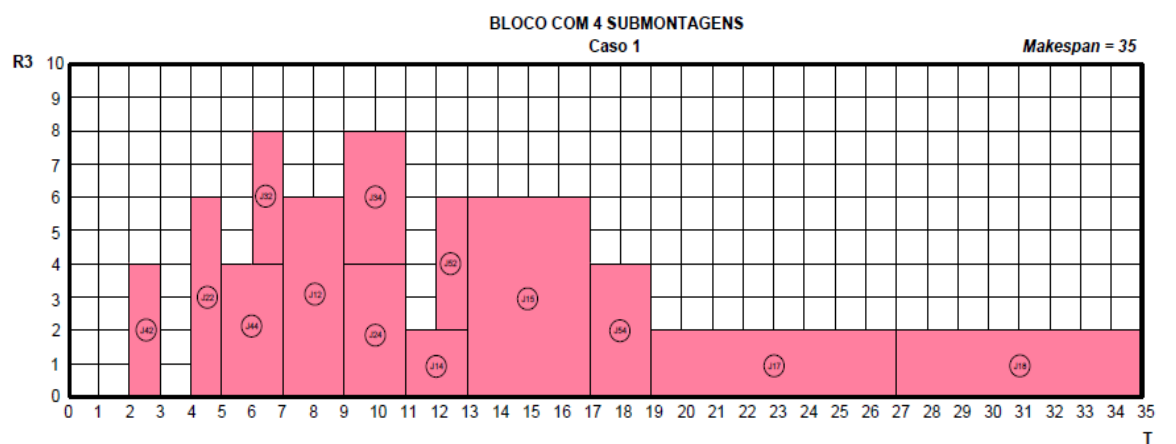


Figura 7. Utilización del Recurso Tipo R3 para el Caso 1

En este ejemplo aumentamos el número de actividades, en consecuencia las Figuras 6, 7 y 8 presentan los resultados de nuestra simulación numérica utilizando los recursos R2 (Auxiliar/Montador), R3 (Soldador) e R4 (Peso para Enderezamiento). En la Figuras 6 y 7 se observa que los recursos R2 (Auxiliar/Montador) y R3 (Soldador) son

utilizados en su máxima capacidad de disponibilidad y que la actividad J17 (transportar y montar sub-montajes en el panel) utiliza más unidades de tiempo de estos recursos. En la Figura 8 muestra el comportamiento del recurso R4 (Peso para Enderezamiento) y se observa que durante las unidades de tiempo de 9 a 11 el recurso es utilizado en su máxima capacidad por la actividad J13 (marca y enderezamiento de chapas).

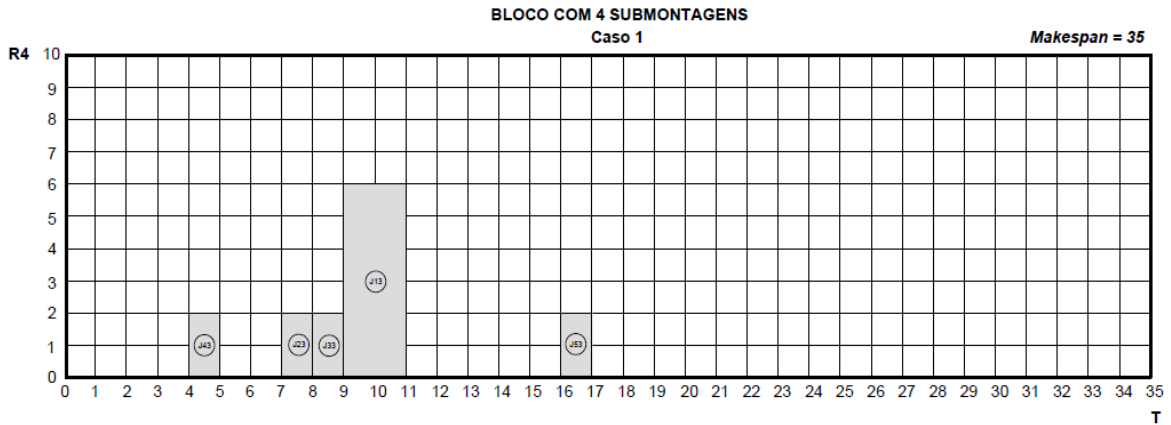


Figura 8. Utilización del Recurso Tipo R4 para el Caso 1

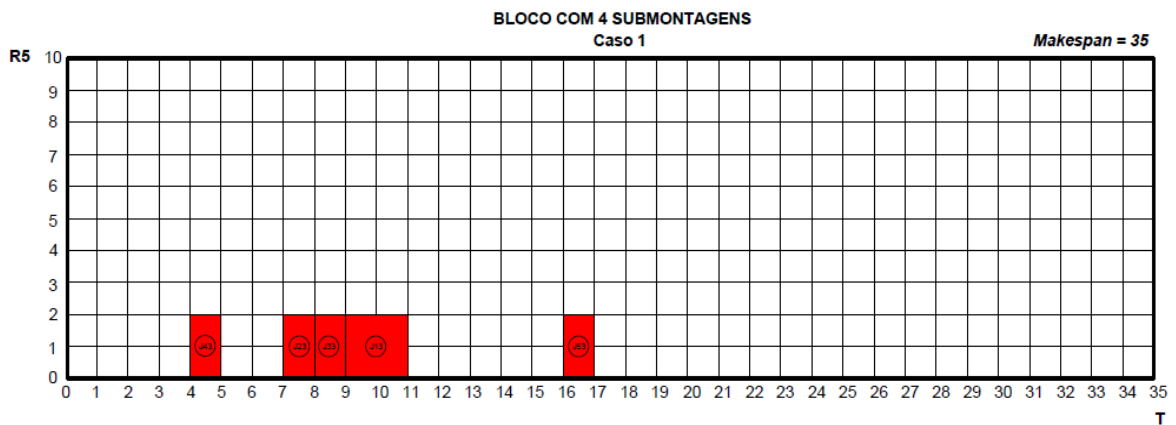


Figura 9. Utilización del Recurso Tipo R5 para el Caso 1

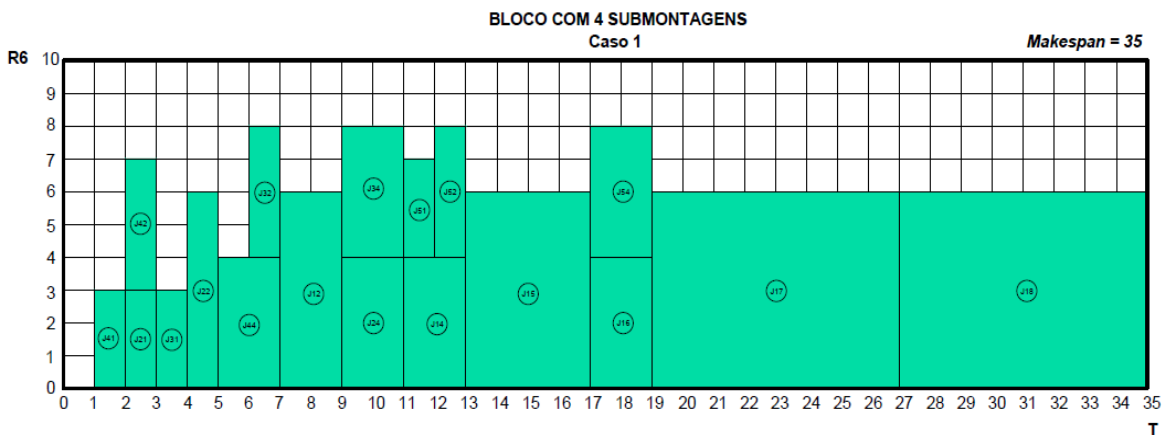


Figura 10. Utilización del Recurso Tipo R6 para el Caso 1

Como se puede observar en las Figuras 9 y 10 los resultados numéricos utilizando los recursos R5 (Galibero) e R6 (Maquina de Soldadura). En la Figura 9 se observa como los recursos de R5 (Galibero) son aprovechados en su máxima capacidad durante todo el proceso de montaje. En la Figura 10 confirma la importancia de este recurso y como el es aprovechado durante toda la actividad del proceso de montaje e inclusive esta siendo aprovechada de forma simultanea por las distintas actividades a su máxima capacidad de disponibilidad, por ejemplo, las actividades J54 (soldar las barras – Línea de sub-montajes 4) y J16 (enderezar el panel listo – Línea de paneles) muestran este detalle durante los intervalos de tiempo de 17 a 19 unidades de tiempo.

b) Caso 2:

Como en el caso del ejemplo anterior las Figuras 11 a 16 muestran las simulaciones numéricas de los diferentes tipos de recursos utilizados en la línea de producción en los talleres del astillero. En este Caso 2, se opto por disminuir el número de recursos tipo R2 (Auxiliar/Montador), R3 (Soldador), R4 (Pesos para Enderezamiento) y R6 (Maquina de Soldadura), ver Tabla 1, para minimizar nuestros recursos y consecuentemente ver el comportamiento de nuestro modelo propuesto, como resultado de esto obtuvimos un aumento del *makespan* a 43 unidades de tiempo, resultado coherente debido a la disminución de recursos. En la Figura 11 muestra como en el caso anterior que el recurso R1 (Grúa Puente) es utilizado con más frecuencia en la actividad J17 (transportar y montar sub-montajes en el panel).

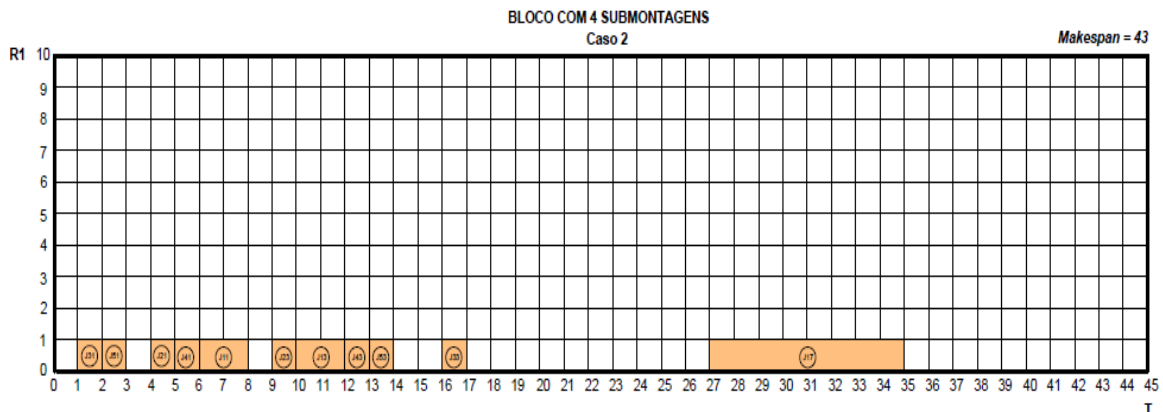


Figura 11. Utilización del Recurso Tipo R1 para el Caso 2

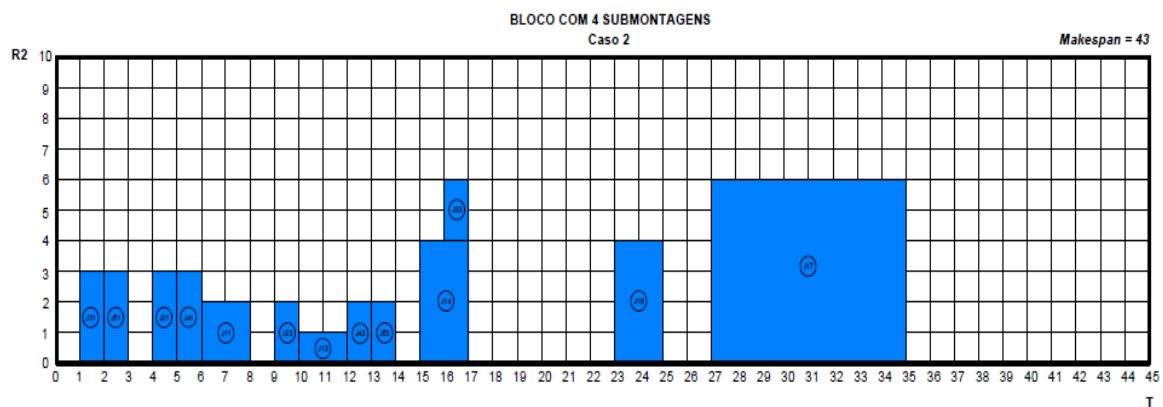


Figura 12. Utilización del Recurso Tipo R2 para el Caso 2

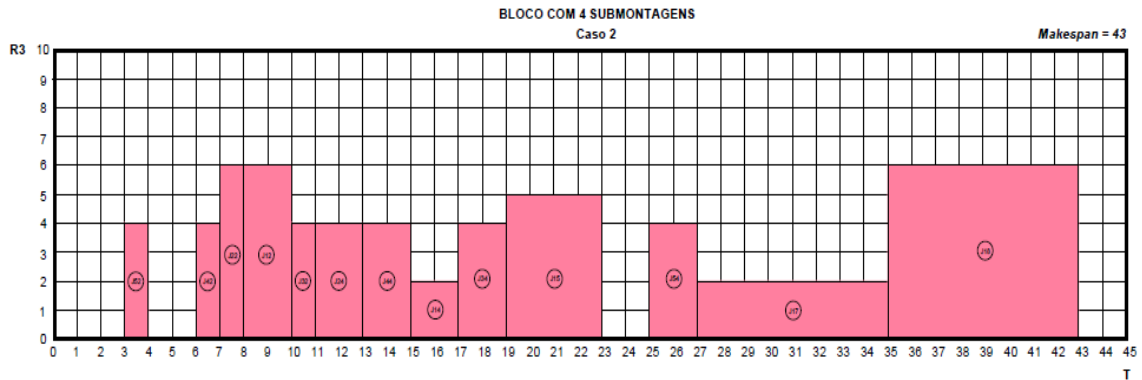


Figura 13. Utilización del Recurso Tipo R3 para el Caso 2

En las Figuras 12, 13 y 14 son presentados los resultados de nuestra simulación numérica utilizando los recursos R2 (Auxiliar/Montador), R3 (Soldador) y R4 (Peso para Enderezamiento). En la Figura 12, 13 y 14 se observa que los recursos R2 (Auxiliar/Montador), R3 (Soldador) y R4 (Pesos para Enderezamiento) son utilizados en su máxima capacidad de disponibilidad debido a los pocos recursos colocados a disposición para la línea de montaje y la actividad J18 (soldar sub-montajes en el panel), ver Figura 13, muestra como el recurso R2 (Auxiliar/Montador) utiliza mas unidades de tiempo y mas recursos durante el intervalo de 27 a 35 unidades de tiempo.

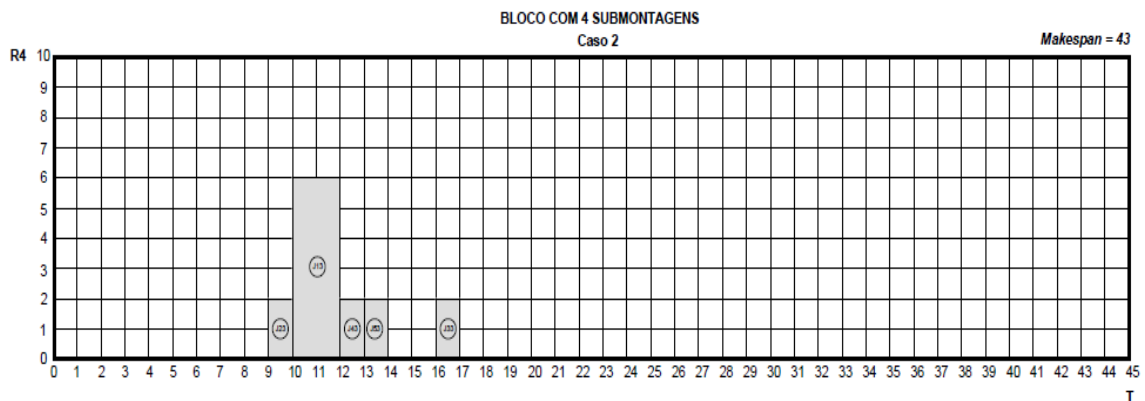


Figura 14. Utilización del Recurso Tipo R4 para el Caso 2

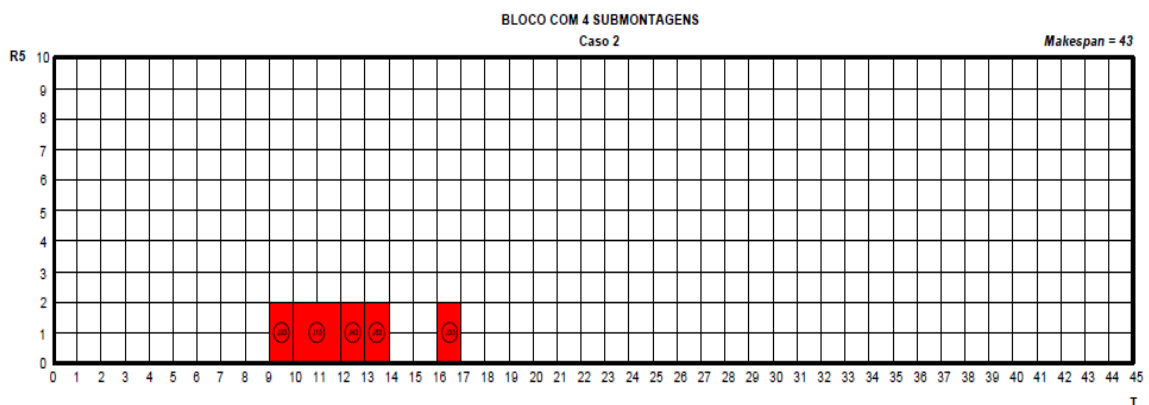


Figura 15. Utilización del Recurso Tipo R5 para el Caso 2

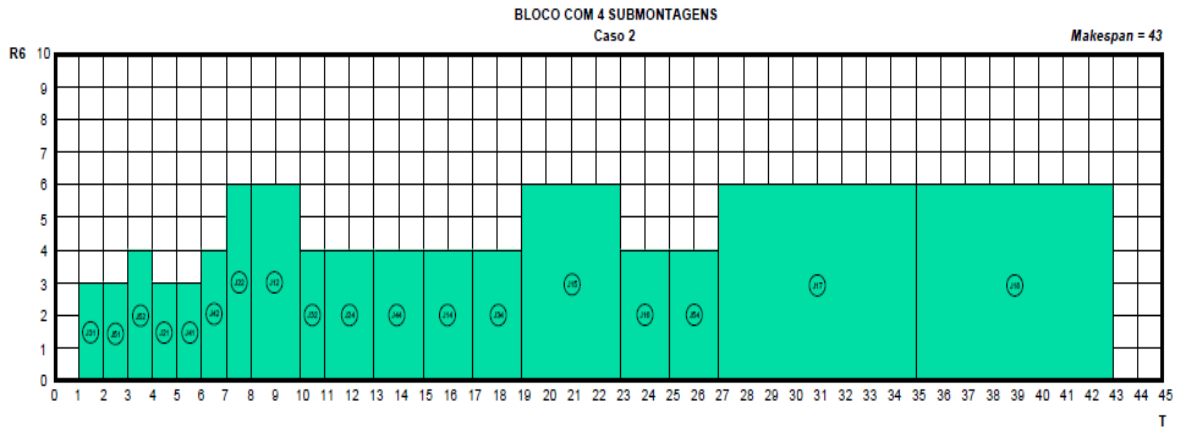


Figura 16. Utilización del Recurso Tipo R6 para el Caso 2

En las Figuras 15 y 16 presentan los resultados numéricos utilizando los recursos R5 (Galibero) y R6 (Maquina de Soldadura), ambos siendo utilizada a su máxima capacidad de disponibilidad. La Figura 16 muestra como el recurso R6 (Maquina de Soldadura) es aprovechado durante toda la actividad del proceso de montaje, ya que los recursos son pocos y limitados no permite que se realicen actividades en paralelo.

c) Caso 3:

En este Caso 3, ver Tabla 1, se opto por duplicar el numero de los recursos utilizados excepto el recurso R4 (Pesos para Enderezamiento), se entiende que este tipo de recurso no afectaría nuestro proceso de montaje, consecuentemente vemos como nuestro *makespan* se reduce a 31 unidades de tiempo como resultado a esta condición. En la Figura 17 muestra que el recurso R1 (Grúa Puente) es utilizado con mucha más frecuencia en el proceso debido al aumento de las actividades en el ejemplo.

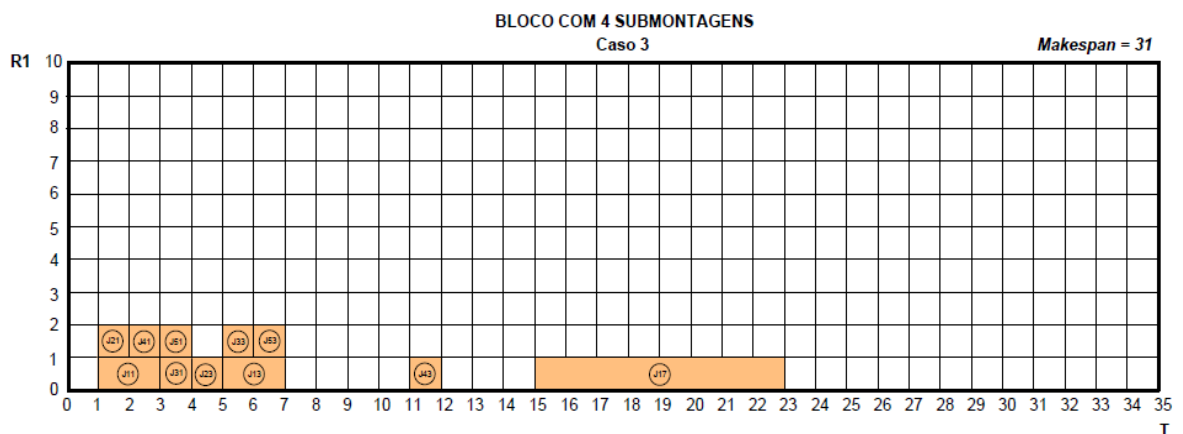


Figura 17. Utilización del Recurso Tipo R1 para el Caso 3

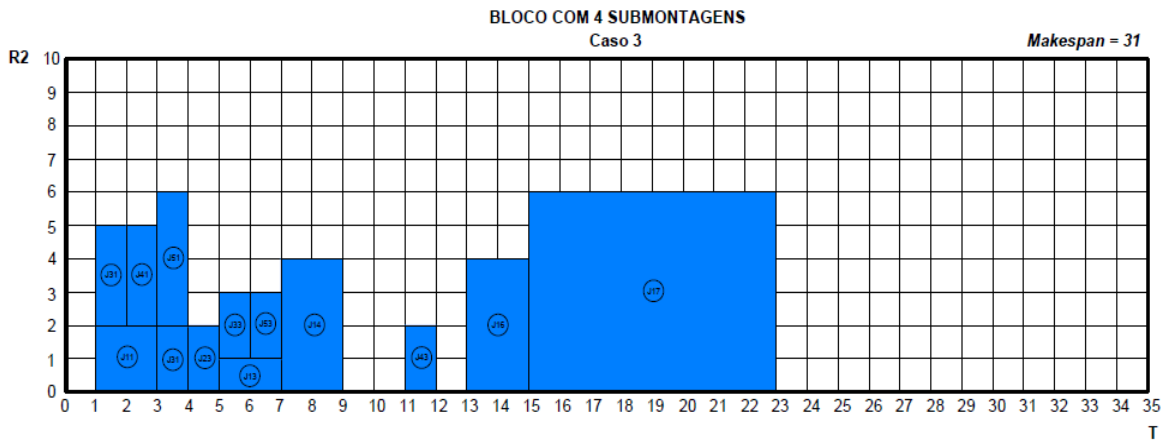


Figura 18. Utilización del Recurso Tipo R2 para el Caso 3

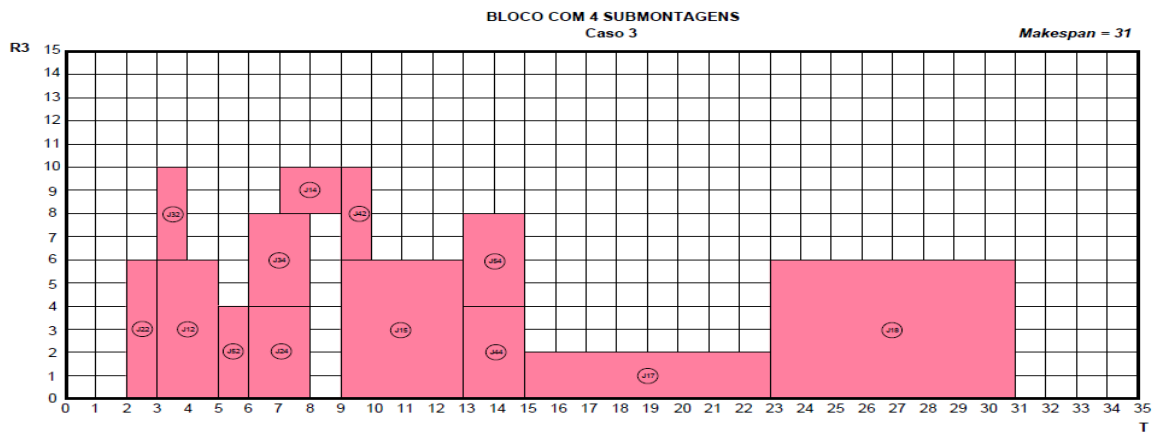


Figura 19. Utilización del Recurso Tipo R3 para el Caso 3

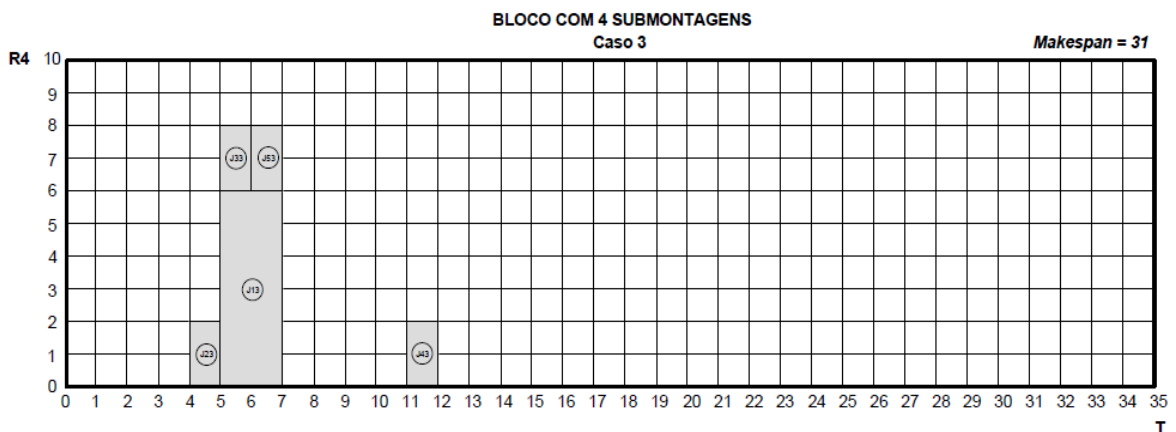


Figura 20. Utilización del Recurso Tipo R4 para el Caso 3

Las Figuras 18, 19 y 20 presentan los resultados de la simulación de nuestro modelo propuesto utilizando los recursos R2 (Auxiliar/Montador), R3 (Soldador) y R4 (Peso para Enderezamiento) y observamos que a medida que tenemos mas recursos la disposición este permite que las actividades puedan trabajar en paralelo, así mismo, se observa que si

se tiene muchos mas recursos la disposición y que no son aprovechados en su máxima capacidad encontrando el valor optimo a ser utilizado en el proceso de montaje.

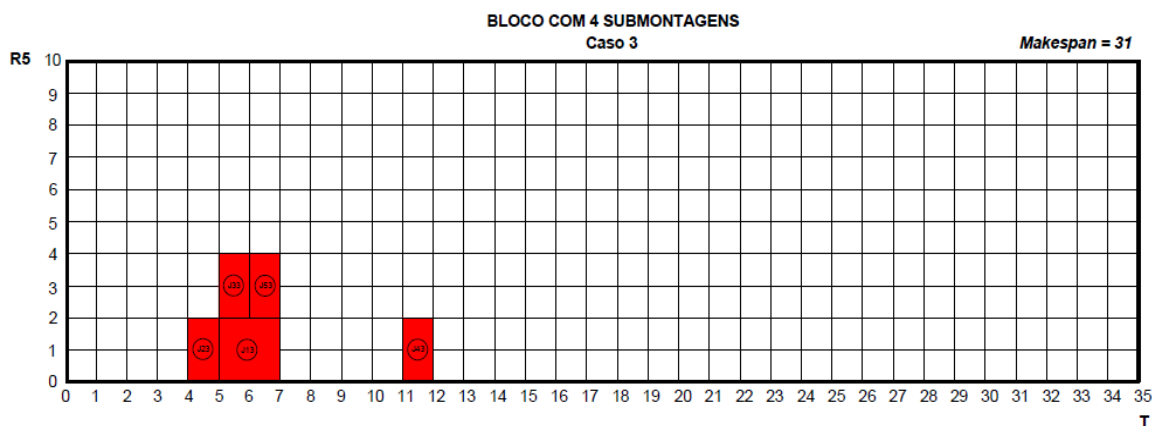


Figura 21. Utilización del Recurso Tipo R5 para el Caso 3

Así también, las Figuras 21 y 22, presentan los resultados numéricos de nuestro modelo propuesto utilizando los recursos R5 (Galibero) y R6 (Maquina de Soldadura), como fue mencionado anteriormente son recursos que fue aumentado en número y observamos que muchas actividades trabajan y paralelo respetando las precedencias de las actividades. El recurso R5 (Galibero) utiliza su capacidad máxima de disponibilidad de recursos.

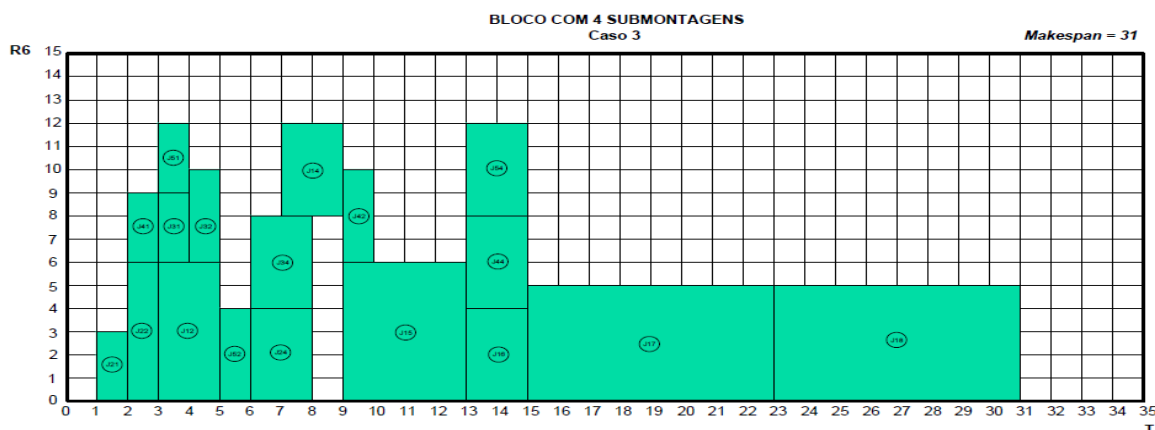


Figura 22. Utilización del Recurso Tipo R6 para el Caso 3

d) Caso 4:

En este caso decidimos duplicar el numero de recursos R1 (Grúa Puente), R4 (Pesos para Enderezamiento) y R6 (Maquina de Soldadura) considerados recursos renovables (equipos, maquinas, materiales) cuando comparamos con la distribución de los recursos del Caso 1, en este Caso 4 tenemos como resultado la disminución de nuestro *makespan* a 32 unidades de tiempo que permite concluir la importancia de aumento de estos recursos en el proceso de montaje. En la Figura 23 muestra que el recurso R1 (Grúa Puente) es utilizado con más unidades de tiempo en la actividad J17 (transportar y montar submontajes en el panel) y este recurso es aprovechado su máxima capacidad por muchas actividades que participan de este proceso.

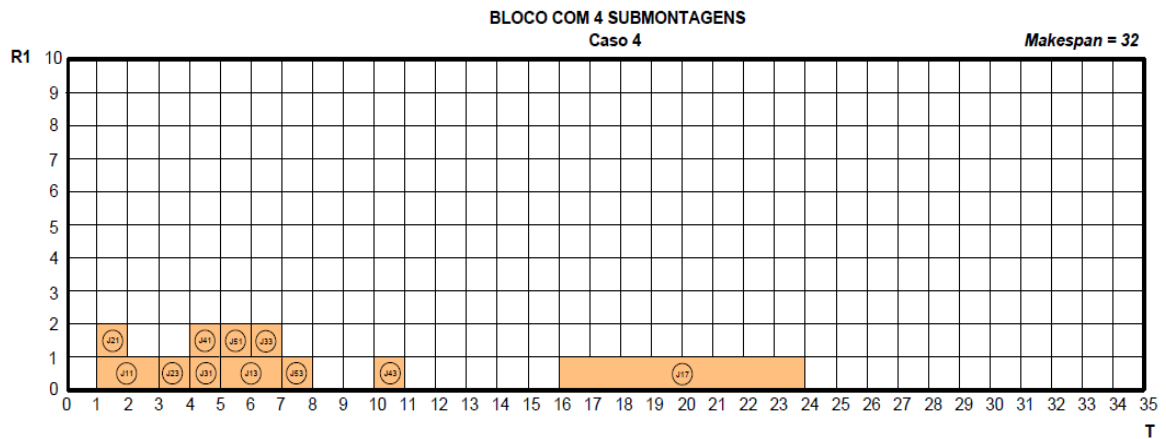


Figura 23. Utilización del Recurso Tipo R1 para el Caso 4

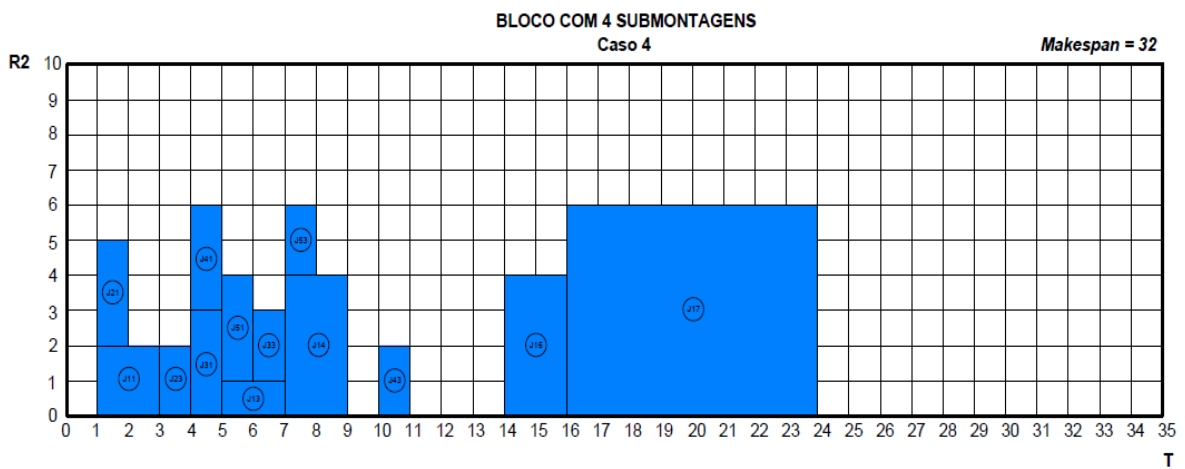


Figura 24. Utilización del Recurso Tipo R2 para el Caso 4

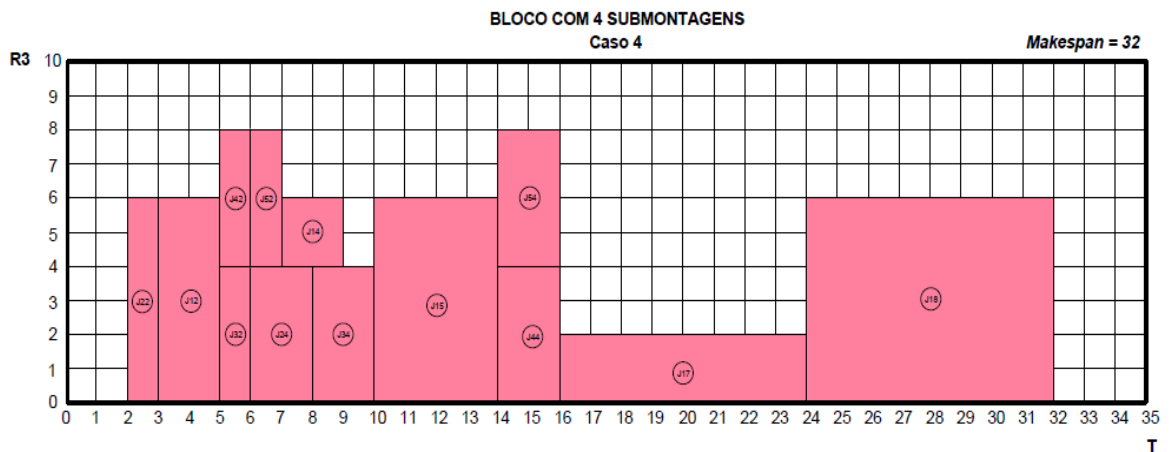


Figura 25. Utilización del Recurso Tipo R3 para el Caso 4

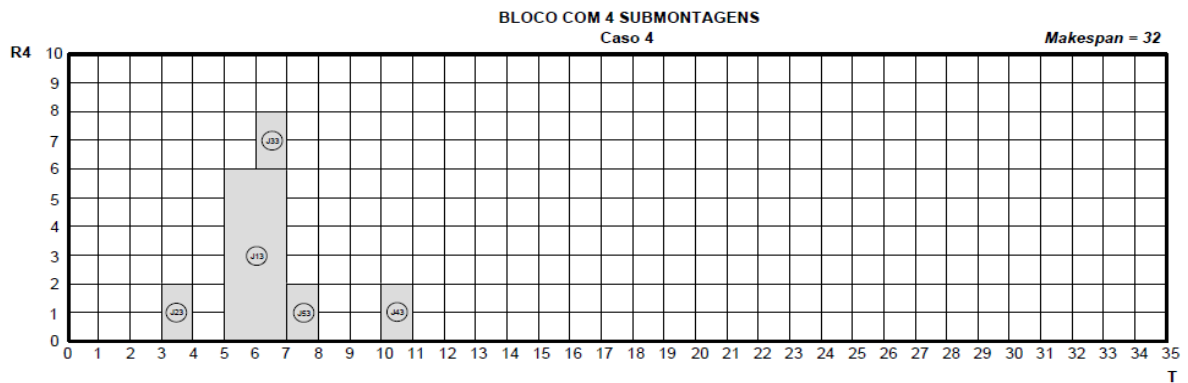


Figura 26. Utilización del Recurso Tipo R4 para el Caso 4

Las Figuras 24, 25 y 26, presentan los resultados de la simulación para los recursos R2 (Auxiliar/Montador), R3 (Soldador) y R4 (Pesos para Enderezamiento) se observa como el recurso R3 (Soldador) es utilizado durante todo el proceso de montaje y este recurso es aprovechado por otras actividades para trabajar en paralelo, por ejemplo, las actividades J44 (soldar las barras – Línea de sub-montajes 3) y J54 (soldar las barras – Línea de sub-montajes 4) aprovechan al máximo su capacidad de disponibilidad durante los intervalos de tiempo de 14 a 16 unidades de tiempo. El recurso R4 (Pesos para Enderezamiento) aprovecha 8 unidades del recurso a pesar de contar con 16 unidades, entonces concluimos que este número de unidades es la mas adecuada para nuestra análisis.

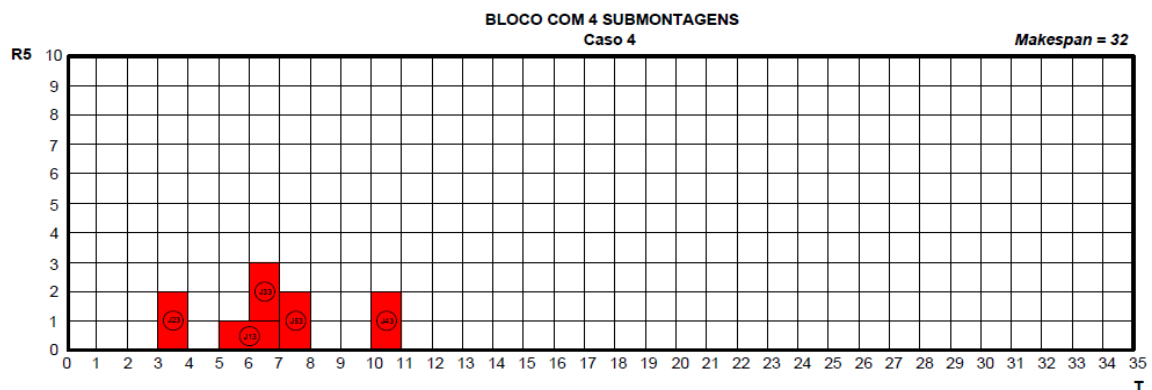


Figura 27. Utilización del Recurso Tipo R5 para el Caso 4

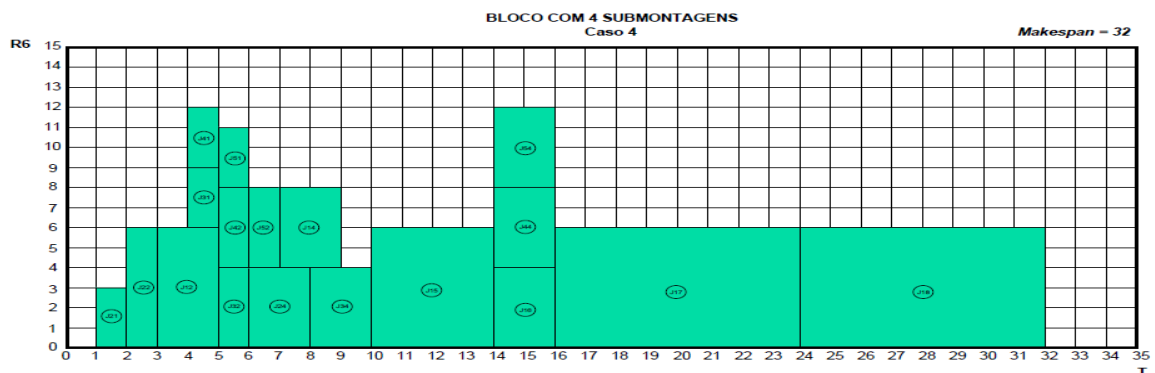


Figura 28. Utilización del Recurso Tipo R6 para el Caso 4

Así también, se observa en las Figuras 27 y 28 los resultados numéricos utilizando los recursos R5 (Galibero) y R6 (Maquina de Soldadura). Como fue mencionado anteriormente decidimos aumentar el número de recursos de R6 (Maquina de Soldadura) para analizar el comportamiento de nuestro modelo, se observa en la Figura 28 que estos recursos son utilizados durante todo el proceso de montaje del bloque ratificando su importancia dentro del proceso, muchas actividades trabajando en paralelo. El recurso R5 (Galibero) es aprovechado simultáneamente por las actividades J33 (marcar y enderezar chapas – Línea de sub-montajes 2) y J13 (marcar y enderezar chapas – paneles) durante los intervalos de tiempo de 6 a 7 unidades de tiempo.

e) Caso 5:

En el Caso 5 las Figuras 29 a 34 muestran las simulaciones numéricas resultado de nuestro modelo, es importante resaltar, que en este caso se opto por duplicar el numero de recursos R2 (Auxiliar/Montador), R3 (Soldador) y R5 (Galibero) considerados como recursos renovables (horas hombre) teniendo como referencia la distribución de recursos del Caso 1. En la Figura 29 muestra que el recurso R1 (Grúa Puente) es un recurso que es utilizado con mas frecuencia por la actividad J17 (transportar y montar sub-montajes en el panel) como en los casos anteriores.

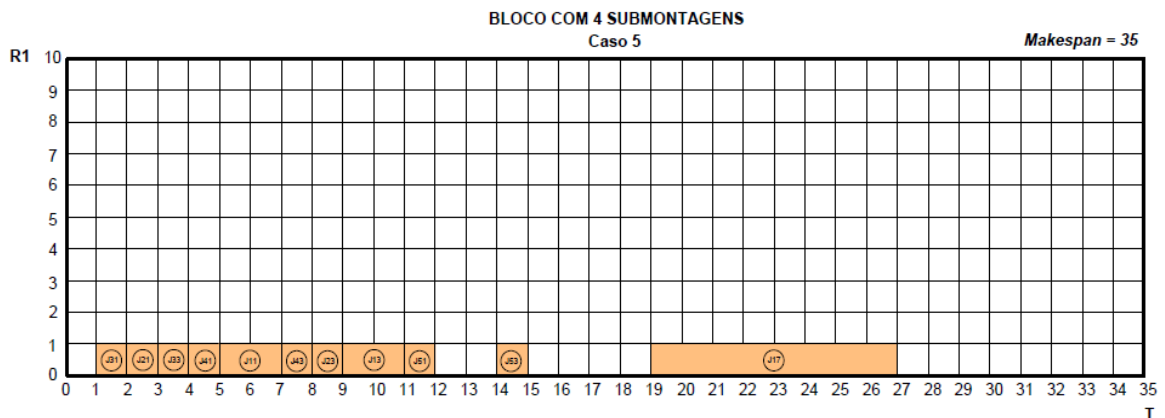


Figura 29. Utilización del Recurso Tipo R1 para el Caso 5

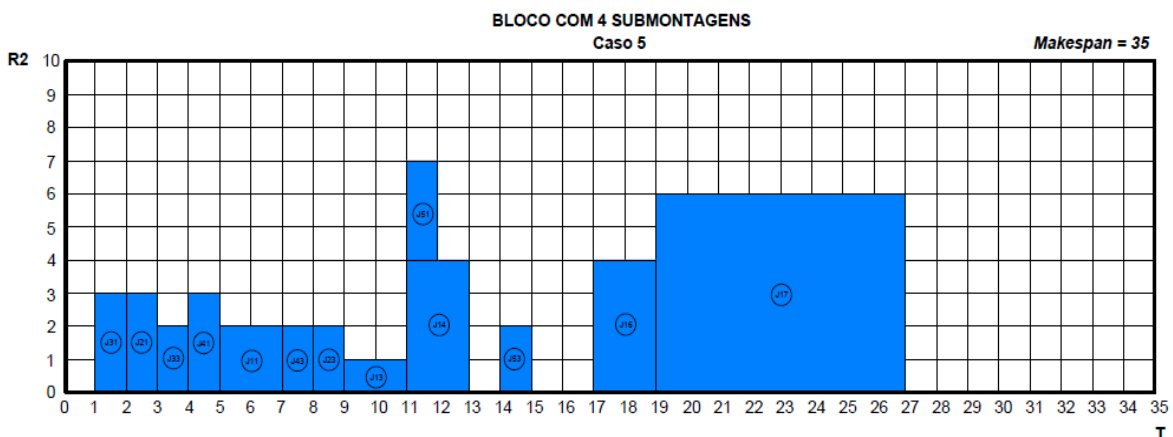


Figura 30. Utilización del Recurso Tipo R2 para el Caso 5

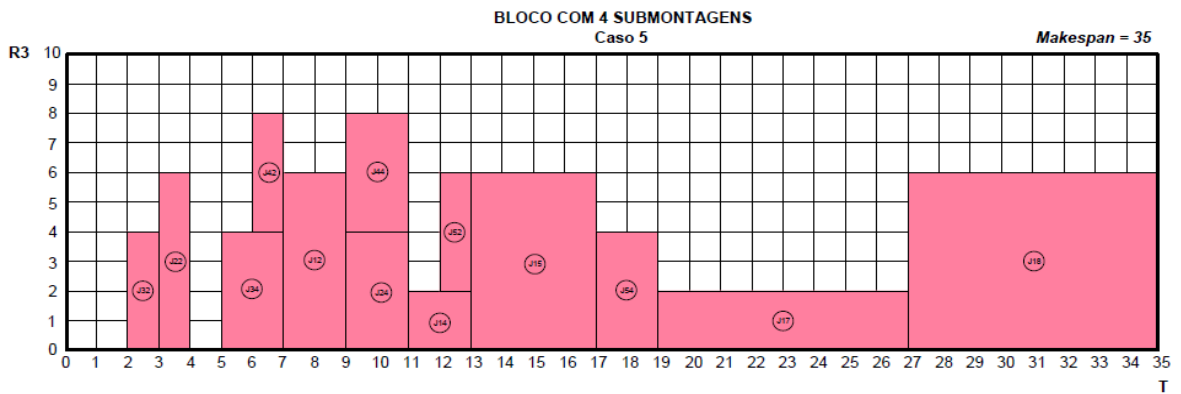


Figura 31. Utilización del Recurso Tipo R3 para el Caso 5

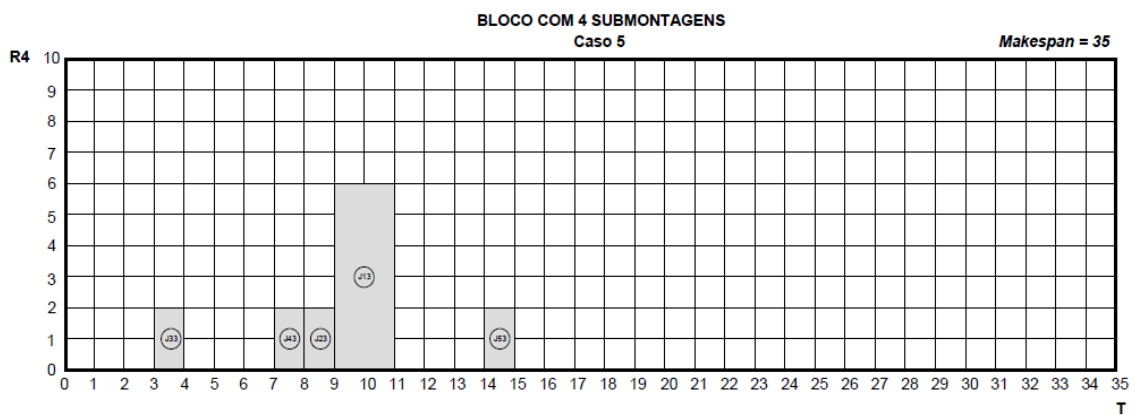


Figura 32. Utilización del Recurso Tipo R4 para el Caso 5

Como consecuencia del aumento de la cantidad de recursos R2 (Auxiliar/Montador) y R3 (Soldador), se observa los resultados en las Figuras 30 y 31 para estos recursos, y visualizamos que no aprovechan todos los recursos que están disponibles, pero tiene actividades que aprovechan los recursos para trabajar en paralelo. Como en los casos anteriores el recurso R3 (Soldador) continúa siendo utilizado durante todo el proceso de montaje confirmando su importancia como recurso dentro del proceso, ver Figura 31.

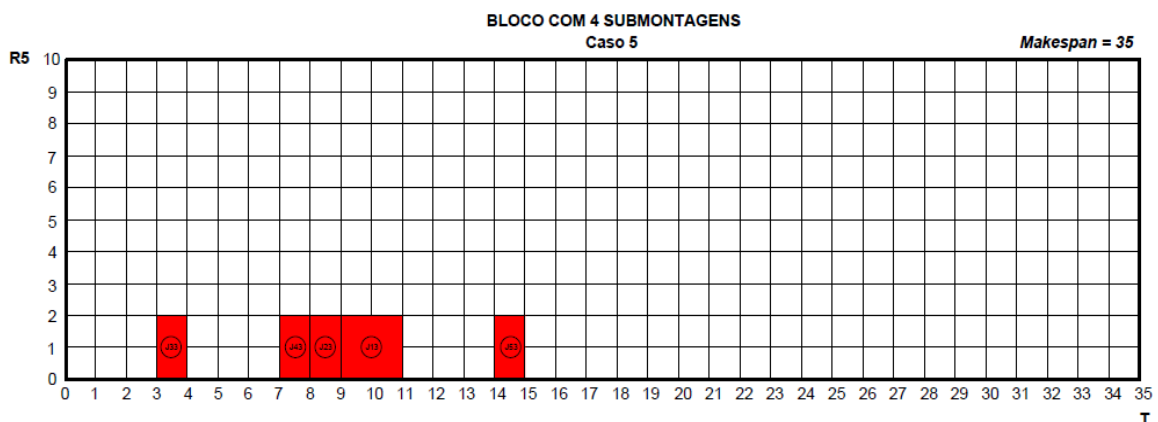


Figura 33. Utilización del Recurso Tipo R5 para el Caso 5

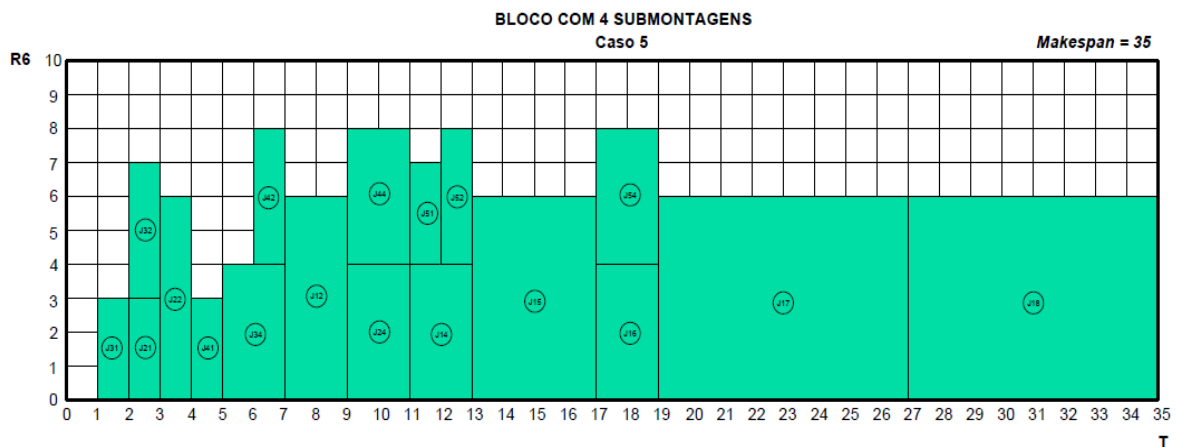


Figura 34. Utilización del Recurso Tipo R6 para el Caso 5

Las Figuras 32, 33 y 34 muestran los resultados numéricos utilizando los recursos R4 (Pesos para Enderezamiento), R5 (Galibero) y R6 (Maquina de Soldadura). En la Figura 32 se observa que el recurso R4 (Peso para Enderezamiento) no aprovecha todos los recursos disponibles y este es aprovechado por la actividad J13 (marcar y enderezar chapas – paneles) como en los casos anteriores. El recurso R6 (Maquina de Soldadura) ratifica como en los casos anteriores que es un recurso que es aprovechado durante todo el proceso de montaje, y este recurso son aprovechados al máximo de su capacidad disponible como puede ser visto en la Figura 34.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo mostramos un modelo de programación matemática simple, pero eficiente para definir como reducir el tiempo de ejecución para el montaje de bloques en la línea de producción de los astilleros, a través de la utilización de las técnicas de RCPSP (*Resource Constrained Project Scheduling Problem*). Diferentemente de la literatura encontrada sobre este tema, nuestro modelo de forma pionera contemplo situaciones reales de lo que sucede dentro de los astilleros. El modelo de IP (Programación Entera) desarrollado y verificado con una serie de casos con diferentes números de actividades y recursos. Con base en los resultados obtenidos de los distintos ejemplos, el modelo propuesto muestra su buen desempeño, aplicabilidad y flexibilidad para proveer la mejor solución para los problemas de RCPSP.

El objetivo de los problemas tradicionales de RCPSP es la programación de las actividades de proyecto sujeta a limitaciones de recursos. Mientras, en la práctica, un gerente de proyectos tiene que programar y distribuir recursos disponibles para cada actividad simultáneamente. Por lo tanto, esta investigación pretende llenar el vacío existente entre la teoría y la práctica que sucede dentro de una línea de producción de un astillero y proponer un enfoque de solución para los gerentes de proyectos. Este es la diferencia entre este trabajo y los documentos existentes que se refieren principalmente a los problemas típicos de RCPSP.

Para simplificación de este trabajo, todos los parámetros y variables del modelo fueron considerados enteros, esto torna una solución computacional más rápida, pero debe ser

visto con cuidado. El análisis de resultados utilizando parámetros no enteros es viable y debe ser utilizado siempre que este fuera relevante para el análisis. El modelo propuesto puede ser modificado para representar las situaciones mencionadas anteriormente, consecuentemente este trabajo servirá para el desarrollo de trabajos futuros.

El objetivo de este trabajo es de minimizar la duración del proyecto (*makespan*). Otros tipos de objetivos pueden ser como la minimización total de los costos o atrasos/aceleración de alguna actividad que se pueden adecuar al modelo de RCPSP con distribución de recursos y programación de necesidades específicas. En la práctica, el recurso puede estar disponible apenas durante algún intervalo de tiempo, algunos recursos también pueden ser más caros que otros debido a la alta demanda, pudiendo ser considerados restricciones adicionales relacionadas a las limitaciones de recursos.

Se propone como un posible desarrollo futuro, un sistema de preparación de datos, de modo que pueda reunir de forma más simple y organizada los datos necesarios para la ejecución de la optimización a través del modelo propuesto, pudiendo ser a través de un software de gerencia de proyectos o de ERP que serían utilizados en la caracterización de los procesos normales de un astillero.

Así mismo, como desarrollo futuro, el modelo de optimización propuesto puede ser integrado a un modelo de simulación en 3D, de modo que se pueda representar visualmente el resultado de la optimización. Una de las principales características es que el modelo de simulación, es que el modelo de simulación tenga la posibilidad de visualización tridimensional del proceso a ser simulado, así como, permita la definición del proceso, su control, tanto en el tiempo (duración, tiempo de inicio y fin) en cuanto las secuencias de las actividades (precedencia y jerarquía).

Por todo lo expuesto, resaltamos la importancia de un sistema como el propuesto, como fue mencionado anteriormente, la tarea de planificación dentro de un astillero es muy complejo. Una herramienta que posibilita esta programación es de grande utilidad para la línea de producción. A pesar de que el modelo propuesto presenta algunas simplificaciones, el mismo puede servir de base para otros trabajos que quieran tratar de otros aspectos de la planificación de los procesos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores manifiestan su agradecimiento al Estaleiro Ilha S.A. – EISA (Brasil) por el apoyo recibido.

REFERENCIAS

CARDOSO, J., GOLDBERG, D., PINTO, M., 2008, “Metodologia para Otimização do Nível de Utilização dos Recursos nas Oficinas de Montaje de Blocos em um Estaleiro”, *22º Congresso Nacional de Transportes Aquaviário, Construção Naval e Offshore*, Rio de Janeiro, Brasil, Setembro.

- CERVANTES, M., 2010, *Nuevos Métodos Meta Heurístico para la Asignación Eficiente, Optimizada y Robusta de Recursos Limitados*. Tese Doctoral, Departamento de Sistemas Informáticos y Computación, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- CHO, K. K., OH, J. S., RYU, K. R., CHOI, H. R., 1998, “An Integrated Process Planning and Scheduling System for Block Assembly in Shipbuilding”, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, vol. 47, no. 1 (January), pp. 419-422.
- KEMPF, K., UZSOY, S., SMITH, S., GARY, K., 2000, “Evaluation and Comparison of Production Schedules”. *Computers in Industry*, vol. 42, pp. 203-220.
- KIM, H., KANG, J., PARK, S., *Scheduling of Shipyard Block Assembly Process Using Constraint Satisfaction Problem*. Department of Industrial Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, KOREA, 2001.
- KOLISH, R., PADMAN, R., 2001, “An Integrated Survey of Deterministic Project Scheduling”. *The International Journal of Management Science*, vol. 29, pp. 249-272.
- MELO, S., 2010, *Planejamento de Processos de Fabricação e Montaje Integrada à Programação da Produção em Estaleiros de Construção Naval*. Tese de D.Sc., COPPE – Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- PARK, K., LEE, K., PARK, S., KIM, S., 1996, “Modeling and Solving the Spatial Block Scheduling Problem in Shipbuilding Company”, *Computers Ind. Engineering*, vol. 30, no. 3, pp. 357-364.
- PARK, C., SEO, J., 2009, “Assembly Block Storage Location Assignment Problem: Revisited”. *Journal Production Planning & Control*, vol. 20, no. 3, pp. 216-2226.
- PINTO, M. O., COLIN, E. C., GOLBERG, D. J., STUPELLO, B et al., 2007, “Contribuições à Eficiência Produtiva de Navios no Brasil Através do Planejamento, Programação e Controle”. *Relatório do Centro de Estudos de Gestão Naval*, USP, Brasil.
- PRITSKER, A., WATTERS, L., WOLFE, P., 1969, “Multiproject Scheduling with Limited Resource a Zero-One Programming Approach”. *Management Science*, vol. 16, pp. 93-108.
- RUEHSEN, H. J., 1981, “Planning and Scheduling Hull Production Operations”, *Marine Technology*, vol. 18, no. 1 (April), pp. 158-187.
- SASAKY, Y., SONDA, M., ITO, K., 2003, “Development of a Computer-Aided Process System Based on a Knowledge Base”, *Journal of Marine Science and Technology*, vol. 7, pp. 175-179.
- SOUZA, C. M., 2009, *Técnicas Avançadas em Planejamento e Controle da Construção Naval*. Tese de D.Sc., COPPE – Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.