



## PSPLIB-ENERGY: Una extensión de la librería PSPLIB para la evaluación de la optimización energética en el RCPSP

Daniel Morillo Torres, Federico Barber, Miguel A. Salido

Instituto de Automática e Informática Industrial, Universidad Politécnica de Valencia

[damotor3@posgrado.upv.es](mailto:damotor3@posgrado.upv.es), [fbarber@dsic.upv.es](mailto:fbarber@dsic.upv.es), [msalido@dsic.upv.es](mailto:msalido@dsic.upv.es)

### Abstract

Scheduling problems is one of the core areas in the planning and development of any project, with a wide applicability to real-world situations. Due to the high complexity of these problems, the solving process is often based on metaheuristics techniques, so that the evaluation of these methods is empirical. Therefore benchmarks, which provide a set of test cases to assess the behavior of algorithms, are generated. This paper extends the PSPLIB library. This extension incorporates to each instance of RCPSP (*Resource Constrained Project Scheduling Problem*), a realistic mathematical model of energy consumption. This proposal provides an alternative to the current trend in the field of optimization and manufacturing that requires the inclusion of components and methods that reduce the environmental impact in the process of decision making. Finally a new optimality criterion is proposed to compare different search techniques. The PSPLIB-ENERGY is available at <http://gps.webs.upv.es/psplib-energy/>.

### Resumen

Los problemas de *scheduling* constituyen una de las áreas centrales en la planificación y desarrollo de cualquier proyecto, con una gran aplicabilidad a situaciones del mundo real. Debido a la gran complejidad que habitualmente presentan estos problemas, su resolución suele basarse en métodos metaheurísticos de optimización, de forma que la evaluación de estos métodos es empírica. Por esta razón se generan *benchmarks*, que proveen de un conjunto de casos de prueba que permiten evaluar el comportamiento de los algoritmos que se desarrollan. En este artículo se extiende la librería PSPLIB. Esta extensión consiste en incorporar a cada instancia del RCPSP (*Resource Constrained Project Scheduling Problem*), un modelo matemático realista de consumo de energía. Esta propuesta brinda una alternativa a la tendencia actual en el campo de la optimización y la manufactura que demanda la inclusión de componentes y métodos que reduzcan el impacto ambiental en el proceso de toma de decisiones. Finalmente se propone un nuevo criterio de optimalidad para comparar las diferentes técnicas de búsqueda. La PSPLIB-ENERGY está disponible en <http://gps.webs.upv.es/psplib-energy/>.

**Keywords:** Energy consumption, PSPLIB, scheduling, RCPSP.

**Palabras Clave:** Consumo de energía, PSPLIB, programación de actividades, RCPSP.

## 1. Introducción

Uno de los principales desafíos en la industria es realizar el proceso de toma de decisiones de manera optimizada. En este proceso se encuentra un subconjunto de problemas característicos, denominados problemas de programación de tareas (conocidos como *scheduling*). Estos problemas se caracterizan

por asignar de manera adecuada los recursos disponibles y organizar apropiadamente las tareas con el propósito de optimizar una determinada función objetivo, generalmente orientada a minimizar el tiempo total de ejecución de un proyecto (*makespan*). Los recursos pueden ser el uso de máquinas, materiales, personas, dinero, tiempo, etc. Estos problemas de *scheduling* son de gran relevancia en la industria debido a sus múltiples aplicaciones en diferentes campos, como la producción, distribución, transporte, administración de proyectos, optimización de la cadena de suministro, etc.

La tendencia actual en diversos sectores académicos está orientada hacia la investigación que incorpore una conciencia ambiental. En el campo de la inteligencia artificial, al igual que en investigación operativa, se analizan y desarrollan metodologías para obtener una asignación óptima de los recursos con el objetivo de minimizar el *makespan*, y simultáneamente, minimizar el impacto ambiental que se pueda generar en la ejecución de los proyectos.

Estudios recientes muestran como se ha duplicado el consumo de energía en las últimas décadas en el sector industrial, llegando éste a ser el responsable del consumo de aproximadamente la mitad de la energía mundial [1] [2], siendo un 30% exclusivo de la industria manufacturera [3]. Se estima que la tendencia creciente va a continuar, llegando a aumentar hasta en un 45% en 2030 [4]. Estas cifras son aún más preocupantes debido a que la mayor parte de energía se produce usando recursos no renovables, con sus altos costes de generación asociados y la considerable emisión de  $CO_2$  que contribuye al efecto invernadero [5].

Existen diferentes estrategias para la optimización energética de los procesos de manufactura. De manera general, estos modelos pueden ser catalogados en dos niveles: nivel de máquina (*machine tool level*) y nivel de sistema (*manufacturing system level*) [6].

El primero, hace referencia a mejorar el proceso teniendo en cuenta el diseño de la máquina que realiza la operación, desde un punto de vista tecnológico, tanto de material como de procedimientos propios, hasta de desarrollo de sistemas complejos de medición del consumo energético. Dentro de esta categoría encontramos trabajos donde se optimizan algunas características de la técnica de corte para el maquinado [7], otros proponen un mejor manejo de fluidos refrigerantes para las máquinas [8]. No obstante la mayoría están enfocados en el desarrollo de modelos de medición del consumo de energía [9] [10] [11] [12].

El segundo modelo, hace hincapié en la optimización del consumo de energía mediante la administración de los sistemas que componen un proyecto, es decir, no centrarse en una actividad, sino en un conjunto de ellas que componen un proceso. La mejora se consigue a través de la administración y asignación en cada punto del tiempo de tareas y recursos. En este nivel las principales herramientas son la programación lineal entera mixta, la simulación, y los métodos metaheurísticos, entre otros. La optimización energética a este nivel es de gran importancia y ofrece diversas oportunidades de mejora [13] [14]. Cabe destacarse las aportaciones que plantean modelos concretos matemáticos de optimización para la minimización de tiempo y consumo energético con la programación de actividades [15] [16] [1].

Muchos problemas de programación de actividades son combinatorios, por lo que instancias relativamente pequeñas son altamente complejas, la mayoría de ellas catalogadas dentro de la complejidad *np-hard*, como por ejemplo el *job shop scheduling problem* (JSP), el *flow shop scheduling problem* (FSP) o el *resource constrained project scheduling problem* (RCPSP). Esta complejidad hace inviable el uso de técnicas exactas para encontrar una solución óptima en un tiempo razonable. Sin embargo, a pesar de la dificultad para ser resueltos, presentan una gran aplicabilidad en situaciones del mundo real. Esto obliga a mejorar constantemente las técnicas y métodos para solucionar estos problemas. De la misma manera, surge la necesidad de librerías de prueba para comparar y evaluar estos algoritmos, dado que su evaluación es empírica, contrastando su aplicación sobre casos de prueba comunes en la bibliografía.

En este artículo nos centraremos en ampliar la librería más usada para evaluar los algoritmos diseñados para resolver el RCPSP: la librería PSPLIB (*Project Scheduling Problem Library*) [17]. Para ello se extendió cada instancia del RCPSP incluyendo un consumo energético asociado a cada actividad, mediante un concreto modelo matemático. Cada valor de consumo de energía está relacionado con un tiempo de procesamiento diferente. Finalmente se compara el comportamiento de la eficiencia energética del modelo propuesto con los reportados en la literatura y se propone un nuevo criterio de optimalidad. Esta nueva librería, denominada PSPLIB-ENERGY, está disponible en <http://gps.webs.upv.es/psplib-energy/>.

## 2. Descripción del problema

Dentro de la programación de proyectos, el problema más conocido quizás sea el RCPSP, el cual consiste en determinar el tiempo de inicio de cada una de las actividades que lo componen, de forma que se cumplan las restricciones de precedencia que existan entre ellas y las debidas a la capacidad limitada de recursos, con el objetivo de minimizar la duración total del proyecto. Cabe mencionar que un requerimiento adicional es que las actividades no pueden ser interrumpidas una vez iniciadas.

De manera formal, el RCPSP puede definirse de la siguiente manera [18] [19]. Un proyecto está compuesto por un conjunto de  $n$  actividades  $X = \{1, \dots, i, \dots, n\}$  y un conjunto de  $m$  de recursos compartidos  $R = \{1, \dots, k, \dots, m\}$ , existiendo una cantidad  $b_k$  de cada recurso disponible. Cada actividad  $i$  tiene una duración  $d_i$  y requiere para su realización una cantidad de recurso  $r_{ik}$  de cada tipo  $k$ . Generalmente las actividades 1 y  $n$  son ficticias con duración y consumo de recursos igual a cero, representando el inicio y la finalización del proyecto.

Las actividades están sujetas a dos tipos de restricciones:

1. Restricciones de precedencia. Indican que cada actividad no puede ser iniciada antes de que todas sus actividades predecesoras hayan finalizado.
2. Restricciones de recursos. Para la realización de cada actividad se requiere de unas cantidades de recursos, los cuales son limitados.

Como menciona Alcaraz [20] en el RCPSP se han considerado tres tipos de recursos: renovables, no renovables y doblemente restringidos. Los recursos renovables están disponibles en cantidades limitadas durante cada periodo de tiempo; los recursos no renovables tienen una cantidad fija para todo el proyecto y los recursos doblemente restringidos tienen cantidades limitadas de periodo a periodo y también para todo el proyecto. En este trabajo nos centraremos en los recursos renovables.

El RCPSP se puede modelar como un problema de programación lineal entera mixta, cuya formulación matemática se detalla en las expresiones 1 a 5. Es importante mencionar que la formulación necesita los intervalos de tiempo *earlystart* ( $es$ ) y *lateststart* ( $ls$ ) que se obtienen definiendo una cota superior  $t_{max}$  y aplicando una revisión hacia adelante y una hacia atrás.

La expresión 1 es la función objetivo la cual tiene por objeto minimizar el inicio de la última actividad ( $n$ ), es decir la actividad ficticia que simboliza el final del proyecto. La expresión 2 asegura que cada actividad sólo inicia una vez. La expresión 3 representa las restricciones de precedencia, el conjunto  $\Gamma_j^{-1}$  contiene las actividades predecesoras inmediatas de la actividad  $j$ . La expresión 4 garantiza que no se exceda la capacidad de cada tipo de recurso en todos los instantes de tiempo. Finalmente la expresión 5 define las variables de decisión  $\xi_{it}$ , que toman el valor uno cuando la actividad  $i$  empieza en el periodo de tiempo  $t$  y cero en cualquier otro caso.

$$Min : \sum_{t=es_n}^{ls_n} t * \xi_{nt} \tag{1}$$

Sujeto a:

$$\sum_{t=es_i}^{ls_i} \xi_{it} = 1 \quad con \ i \in X \tag{2}$$

$$\sum_{t=es_j}^{ls_j} t * \xi_{jt} \geq d_i + \sum_{t=es_i}^{ls_i} t * \xi_{it} \quad con \ (i, j) : i \in \Gamma_j^{-1}, j \in X \tag{3}$$

$$\sum_{i=1}^X r_{ik} * \sum_{\tau=\sigma(t,i)}^t \xi_{i\tau} \leq b_k \quad con \ \sigma(t, i) = max\{0, t - d_i + 1\}, \quad t = 0, \dots, t_{max}, \quad k = 1, \dots, m \tag{4}$$

$$\xi_{it} \in \{0, 1\}, \quad i \in X \tag{5}$$

### 3. Librería PSPLIB

Kolisch y Sprecher propusieron un algoritmo generador de instancias de una clase general de problemas de secuenciamiento y programación de tareas, para el RCPSP unimodal y multimodal (ProGen, disponible en sitio web: <http://www.om-db.wi.tum.de/psplib/main.html>) [17]. Este conjunto de instancias generadas se agruparon en una librería denominada PSPLIB. La finalidad de esta librería es proporcionar un conjunto común de casos de prueba que permitan evaluar la eficiencia de nuevos métodos y técnicas desarrollados para solucionar el RCPSP.

En la librería PSPLIB se generaron los problemas de manera aleatoria usando un diseño de experimentos factorial basados en dos conjuntos de parámetros, uno de ellos fijo y otro variable. El primero hace referencia a parámetros que se mantendrán estáticos para la generación de todo el conjunto de problemas [21]: número de actividades, número de modos en que cada actividad puede ejecutarse, número de sucesores y predecesores de las actividades, número de recursos existentes en el problema, disponibilidad máxima de cada recurso renovable y/o no renovable, consumo de cada tipo de recursos y duración de las actividades.

En el segundo conjunto se encuentran los parámetros que cambiarán de conjunto a conjunto y es aquí donde realmente yace la dificultad del problema. Para una definición más extensa de cada uno de ellos, se remite al lector a [17]:

- Complejidad de la red ( $NC$ , por su sigla en inglés): hace referencia al número de relaciones de precedencia no redundantes de la totalidad de actividades no ficticias.
- Factor de recursos ( $RF$ , por sus sigla en inglés): Hace referencia a la proporción media del número de recursos diferentes que cada actividad no ficticia utiliza.
- Grado de restricción de los recursos ( $RS$ , por su sigla en inglés): Hace referencia a la relación entre el consumo de recursos y la disponibilidad de los mismos.

En la tabla 1 se aprecian los valores de los parámetros fijos. Estos parámetros tienen un valor máximo y un valor mínimo constantes. Cada instancia generada elige de manera aleatoria un valor entero de cada parámetro dentro de sus límites.

Tabla 1: Valores de los parámetros fijos para la generación de la PSPLIB, para el RCPSP.

	Tareas	Modos de realización	Duración	Tipos de recursos	Sucesores	Predecesores
Mínimo	j	1	1	4	1	1
Máximo	j	1	10	4	3	3

Todos los conjuntos de problemas contenidos en la librería se nombran según la siguiente nomenclatura: una  $j$ , que significa *jobs*, seguida de un numeral, #, el cual establece el número de tareas del conjunto. Por ejemplo,  $j30$  es el conjunto de problemas donde cada uno de ellos tiene 30 tareas.

En la tabla 2 se muestran los valores de los parámetros variables para la generación de instancias de los conjuntos  $j30$ ,  $j60$  y  $j90$ . De las 48 combinaciones posibles de estos valores, se generan 10 instancias para cada conjunto, por lo que resulta un total de 480 instancias para cada conjunto  $j30$ ,  $j60$  y  $j90$ . La tabla 3 se utiliza únicamente para la generación de las instancias del conjunto  $j120$ : por cada una de las 60 combinaciones de estos valores se generan 10 problemas, por lo que resulta un total de 600 problemas para el conjunto  $j120$ .

#### 3.1. Evaluación de los métodos propuestos

Para los problemas en los que se conoce la solución óptima, se puede calcular la desviación porcentual media respecto al óptimo ( $\%DOS$ ) para cada instancia y luego promediar las desviaciones de los problemas pertenecientes a un conjunto de  $nP$  instancias  $j\# = \{1, \dots, w, \dots, nP\}$  para una desviación total ( $\%ADOS$ ). Así, si  $R_h$  es la respuesta obtenida con la heurística y  $O^*$  el óptimo de la instancia, la

Tabla 2: Valores de los parámetros variables para la generación de los conjuntos  $j30$ ,  $j60$  y  $j90$  de la PSPLIB, para el RCPSP.

Parámetro	Valores para ( $j30, j60$ y $j90$ )			
NC	1,5	1,8	2,1	–
RF	0,25	0,5	0,75	1,0
RS	0,2	0,5	0,7	1,0

Tabla 3: Valores de los parámetros variables para la generación del conjunto  $j120$  de la PSPLIB, para el RCPSP.

Parámetro	Valores para $j120$				
NC	1,5	1,8	2,1	–	–
RF	0,25	0,5	0,75	1,0	–
RS	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5

desviación porcentual se calcula con la expresión 6 y el promedio de las desviaciones porcentuales según la expresión 7.

$$\%DOS_w = \frac{R_h - O^*}{O^*} * 100 \quad (6)$$

$$\%ADOS = \frac{1}{nP} \sum_{w=1}^{nP} \%DOS_w \quad (7)$$

Para aquellos conjuntos de problemas en los que no se conoce su solución óptima, el error se calcula con base a la cota inferior ( $LB0$ ), ésta se calcula usando el método de la ruta crítica, que consiste en encontrar el mínimo *makespan* de un RCPSP pero tomando en cuenta sólo las restricciones de precedencia entre actividades. Este error se denomina desviación porcentual con respecto a  $LB0$  ( $\%DLB$ , expresión 8), y con ella se calcula el promedio de las desviaciones ( $\%ADLB$ ), mediante la expresión 9.

$$\%DLB_w = \frac{R_h - LB0}{LB0} * 100 \quad (8)$$

$$\%ADLB = \frac{1}{nP} \sum_{w=1}^{nP} \%DLB_w \quad (9)$$

## 4. Ampliación de la librería PSPLIB: PSPLIB-ENERGY

La librería PSPLIB es una referencia clásica del área y se ha usado en innumerables trabajos de optimización. Cada nueva heurística desarrollada para resolver el RCPSP toma como marco de referencia la librería PSPLIB para evaluar su desempeño. Sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, frente al gran esfuerzo académico e industrial en la actualidad para desarrollar alternativas eficientes a nivel energético (y al mismo tiempo a nivel operativo), surge la necesidad de complementar la librería PSPLIB con instancias que incorporen un consumo de energía variable en sus actividades. Para este fin, en este artículo se propone la librería PSPLIB-ENERGY. Esta librería complementa la librería PSPLIB con diferentes consumos de energía asociados a cada actividad y al tiempo de procesamiento de las mismas, con el objetivo de poder evaluar métodos de resolución que tengan como objetivo la minimización tanto del *makespan* como del consumo de energía, simultáneamente. A continuación se explican los supuestos considerados para la ampliación de la librería.

### 4.1. Supuestos

A continuación se enuncian los dos supuestos considerados en el modelo del consumo subyacente de energía para la librería PSPLIB-ENERGY.

**Supuesto 1** *El consumo de energía está asociado a cada actividad, y es independiente del punto de tiempo en el que se programe y de los recursos que utilice.*

Se conservará la definición del consumo de recursos del RCPSP, es decir que cada actividad  $i$  utiliza  $k$  tipos de recursos, en una cantidad  $r_{ik}$  con una disponibilidad máxima constante  $b_k$  para su realización. El consumo de energía se tomará respecto a la ejecución de la actividad, y no se considera un recurso adicional. Así, este primer supuesto consiste en que el consumo de energía es inherente a la actividad, e independiente al número y consumo de recursos y al momento en que se ejecute. El valor de consumo de energía ya engloba toda la energía necesaria para ejecutar la actividad. El consumo de energía total del proyecto ( $CETP$ ) es la suma del consumo de energía  $e_i$  de cada actividad  $i \in X$  de dicho proyecto.

**Supuesto 2** *El tiempo de procesamiento de una actividad depende inversamente de la energía consumida.*

De manera general, en todo proceso que involucra el consumo de energía, el tiempo de ejecución del proceso está habitualmente relacionado inversamente con la cantidad de energía suministrada al proceso. Por ejemplo, en el sector de la manufactura, la energía está relacionada con la velocidad de remoción de las máquinas (*Material Removal Rate*, MRR), de tal forma que cuando esta velocidad aumenta (disminuyendo el tiempo de proceso), se requiere mayor energía [11] [22]. En nuestro caso, asumiremos un comportamiento similar en el consumo de energía de las actividades del RCPSP, de manera que al aumentar la velocidad de procesamiento, disminuye el tiempo de ejecución de las actividades y aumenta el consumo de energía según el modelo que se propone a continuación.

## 4.2. Modelo propuesto de consumo de energía

Bajo los supuestos previos, en este trabajo se propone un modelo matemático continuo que relaciona el tiempo de ejecución de una actividad con el consumo de energía de la máquina que lo lleva a cabo. Asumimos que a mayor energía suministrada, menor será el tiempo de procesamiento de una actividad, manteniendo constantes el consumo de los recursos definidos en el RCPSP. En la expresión 10 se define esta relación, donde  $t_i(c_i)$  es la proporción del tiempo de ejecución respecto a la duración estándar  $d_i$  de la actividad y  $c_i$  es el porcentaje de consumo de energía respecto al consumo estándar  $e_i$ , con  $i \in X$ . Los valores de las constantes  $A_1 = 4,0704$  y  $A_2 = 2,5093$  centran la función en  $c_i = 100\%$  y  $t_i = 100\%$ , representando un consumo de energía y tiempo de procesamiento estándar del 100%. Como ejemplo, un valor de  $c_i = 1,6(160\%)$  representa un consumo de un 60% adicional de energía  $e_i$  y, según la expresión 10, se obtendría un valor de  $t_i = 0,67(67\%)$  representando una disminución del 33% del tiempo de procesamiento  $d_i$ .

$$t_i(c_i) = \frac{A_1 * \ln(2)}{\ln(1 + (c_i * A_2)^3)} = \frac{4,0704 * \ln(2)}{\ln(1 + (c_i * 2,5093)^3)} \quad (10)$$

La figura 1 muestra la gráfica de la expresión 10, una función monótona decreciente, con una asíntota vertical, la cual sugiere que si a la actividad no se le suministra suficiente energía, el tiempo de terminación de la actividad tenderá a infinito. Adicionalmente, una asíntota horizontal indica que el tiempo de ejecución decrece, hasta un punto (asíntota) en el cual por mas energía que se inyecte, el tiempo de terminación de la actividad no decrecerá.

## 4.3. Complemento energético en PSPLIB-ENERGY

La incorporación del consumo de energía en la librería PSPLIB se basa en una simplificación de la función propuesta para el consumo de energía  $t_i(c_i)$  (expresión 10). En este trabajo se asigna a cada actividad un valor estándar de consumo de energía  $e_i^{est}$ , el cual tiene asociada una duración estándar  $d_i^{est}$ , esta última proporcionada por la librería original PSPLIB. Sin pérdida de generalidad, se tomarán tres valores concretos para el consumo de energía  $c_i$ , definiendo así los parámetros  $c_{iz}$ ,  $t_{iz}$ ,  $d_{iz}$  y  $e_{iz}$  con  $z \in \{1, 2, 3\}$ .  $c_{iz}$  representa el porcentaje de consumo de energía respecto al valor estándar  $e_i^{est}$ ;  $t_{iz}$  representa el porcentaje de duración respecto a la duración estándar  $d_i^{est}$ ;  $d_{iz}$  y  $e_{iz}$  representan los valores correspondientes a la duración y al consumo de energía, respectivamente.

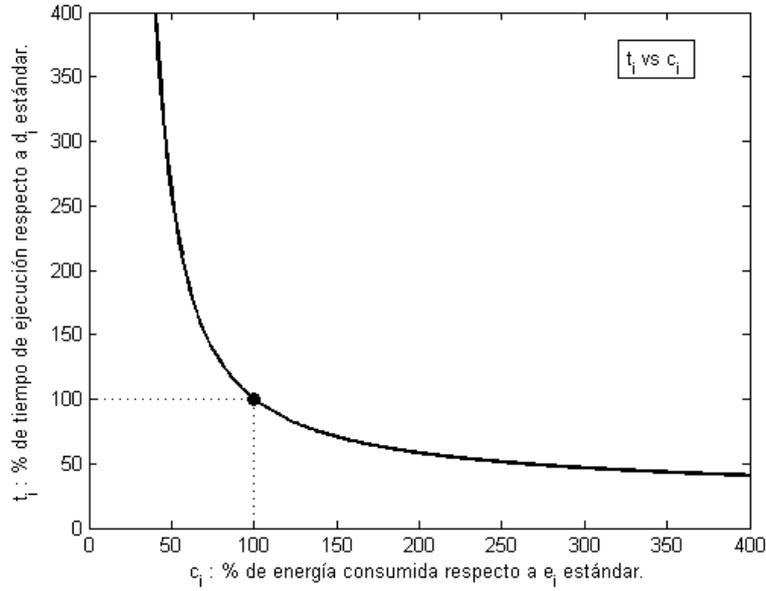


Figura 1: Proporción de tiempo en función del porcentaje de consumo de energía.

El valor  $z = 2$  corresponde al consumo estándar de energía de tal manera que  $e_i^{est} = e_{i2}$ ; vinculado a la duración estándar de tal manera que  $d_i^{est} = d_{i2}$ . El valor  $z = 1$  corresponde a una disminución del consumo de energía respecto a  $e_i^{est}$ , y  $z = 3$  corresponde a un aumento del consumo de energía respecto a  $e_i^{est}$ . Concretamente, en la librería PSPLIB-ENERGY se proponen los porcentajes de consumo energético:  $c_{i1} = 80\%$ ,  $c_{i2} = 100\%$  y  $c_{i3} = 120\%$ , con los porcentajes correspondientes de duración:  $t_{i1}(80\%) = 127,8\%$ ,  $t_{i2}(100\%) = 100\%$  y  $t_{i3}(120\%) = 84,4\%$ , según expresión 10. Los valores correspondientes a los parámetros  $d_{iz}$  y  $e_{iz}$  se pueden calcular mediante las expresiones 11 y 12, respectivamente.

$$d_{iz} = t_{iz} * d_i^{est}, \quad i \in X, z \in \{1, 2, 3\} \quad (11)$$

$$e_{iz} = c_{iz} * e_i^{est}, \quad i \in X, z \in \{1, 2, 3\} \quad (12)$$

Los valores de  $e_i^{est}$  se definen específicamente para cada instancia de la librería PSPLIB-ENERGY, asignándoles un consumo aleatorio entre  $[1, 10]$  a cada actividad de la instancia. Este rango de valores es propuesto, considerando su equiparación con los intervalos usados en la librería PSPLIB original para los otros parámetros. Cabe mencionar que el consumo de energía no tiene una limitación de disponibilidad. Además, cuando el consumo de energía cambia, junto con el tiempo de procesamiento, el consumo de recursos tradicionales del RCPSP se mantiene constante.

Como todos los valores de los parámetros en la librería PSPLIB son enteros, los valores de los parámetros para la librería PSPLIB-ENERGY también lo son. De esta manera, una actividad  $i$  con una duración  $d_{iz} = 1$  no puede reducir más esta duración. Análogamente, si una actividad  $i$  tiene un consumo de energía de  $e_{iz} = 1$  no puede disminuirse más dicho consumo. Las aproximaciones de los demás casos se hacen teniendo en cuenta al valor  $z$  que corresponden. Así, para  $z = 3$  se redondea por defecto el valor  $d_{iz}$  y por exceso el valor  $e_{iz}$ , para el caso de  $z = 1$  se redondea por exceso el valor  $d_{iz}$  y por defecto el valor  $e_{iz}$ .

La expresión 13 muestra como calcular el consumo de energía total del proyecto  $CETP_w$ , teniendo en cuenta el modelo de consumo energético propuesto.

$$CETP_w = \sum_{i=1}^X e_{iz}, \quad i \in X, z \in \{1, 2, 3\} \quad (13)$$

La tabla 4 muestra, como ejemplo, algunos de los valores correspondientes a la implementación del consumo de energía para la instancia *j301.2* de la librería PSPLIB-ENERGY. La primera columna muestra el número de la actividad (la actividad 1 es ficticia, con duración y consumo 0). De la segunda a la séptima columna se ilustran los valores modificados de duración de la actividad en función del consumo de energía en una tupla  $d_{iz}, e_{iz}$ . Los valores de  $d_{i2}$  y  $e_{i2}$  (columna en negrita) muestran el tiempo predeterminado de la librería con un consumo del 100 % de energía. De la octava a la onceava columna se muestra el consumo de los  $k$  tipos de recursos pertenecientes a la PSPLIB.

Tabla 4: Ejemplo de valores de consumo de energía y tiempo de procesamiento para la instancia *j301.2*.

Act.Nr.	$d_{i1}$	$e_{i1}$	$d_{i2}$	$e_{i2}$	$d_{i3}$	$e_{i3}$	$r_{i1}$	$r_{i2}$	$r_{i3}$	$r_{i4}$
1	0	0	<b>0</b>	<b>0</b>	0	0	0	0	0	0
2	3	6	<b>2</b>	<b>8</b>	1	10	0	0	2	0
3	13	6	<b>10</b>	<b>8</b>	8	10	0	8	0	0
4	7	1	<b>7</b>	<b>1</b>	5	2	0	0	7	0
5	2	4	<b>1</b>	<b>6</b>	1	6	8	0	0	0
6	4	2	<b>3</b>	<b>3</b>	2	4	0	0	0	8
7	8	8	<b>6</b>	<b>10</b>	5	12	0	0	5	0

## 5. Criterio de evaluación para las soluciones de la librería PSPLIB-ENERGY

### 5.1. Eficiencia

De manera general, el concepto de eficiencia se puede definir como la relación entre la energía suministrada a un proceso y la energía transformada que entrega el mismo. Por ejemplo, en las operaciones de manufactura de diversas maquinas (fresado, torno, taladro, etcétera), la eficiencia teórica de un motor eléctrico representa la conversión de energía eléctrica en energía mecánica. Esto se representa en la expresión 14, donde  $\eta$  es la eficiencia,  $P_{mechanical}$  representa el energía de salida del eje del motor y  $P_{electrical}$  es la energía eléctrica absorbida [23].

$$\eta = \frac{P_{mechanical}}{P_{electrical}} = \frac{P_{mechanical}}{P_{mechanical} + \sum losses} = \frac{1}{1 + (\sum losses)/(P_{mechanical})} \quad (14)$$

La expresión 14 es una eficiencia teórica, la cual no puede alcanzar un valor del 100 %, debido a que en la transformación de energía eléctrica a energía mecánica existen siempre perdidas, la mayoría en forma de calor. Estas pérdidas van aumentando a medida que aumenta el consumo de energía eléctrica [24]. Por este motivo, la eficiencia se caracteriza por ser una función creciente inicialmente, con una pendiente alta, y a medida que aumenta el consumo energético, esta pendiente disminuye hasta llegar a una asíntota horizontal (figura 2). Las diferentes curvas de eficiencia de diferentes procesos o máquinas, mantienen esta tendencia, variando según la especificidad de cada máquina.

Este comportamiento teórico de la eficiencia es corroborado por diversos estudios prácticos, como [26] [23], con la diferencia de que la eficiencia práctica real, tras alcanzar un máximo, empieza a decrecer [27], tal y como se muestra en la figura 3. Esta figura es resultado de una medición real de la eficiencia de un motor de  $4kw$  [23].

### 5.2. Eficiencia de las soluciones en la librería PSPLIB-ENERGY

#### 5.2.1. Eficiencia de una actividad

El modelo de consumo de energía propuesto para las actividades en la librería PSPLIB-ENERGY es consistente con el comportamiento de la eficiencia energética. Siguiendo el enfoque desarrollado en la expresión 14, se define la eficiencia energética, adaptada a la librería PSPLIB-ENERGY, considerando los siguientes supuestos:

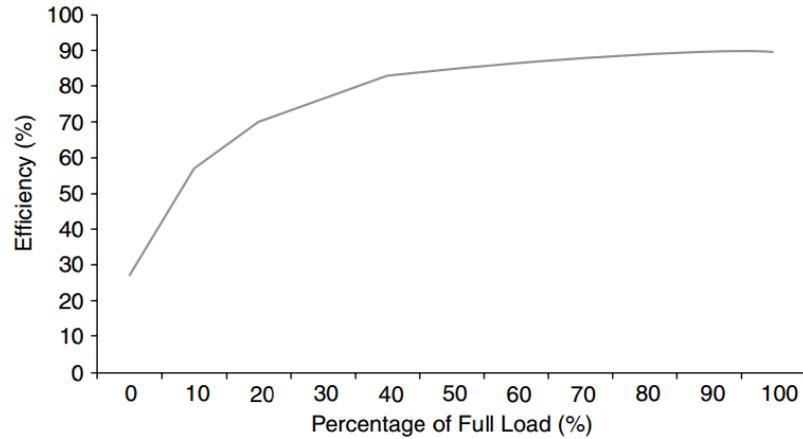


Figura 2: Eficiencia teórica de un motor [25].

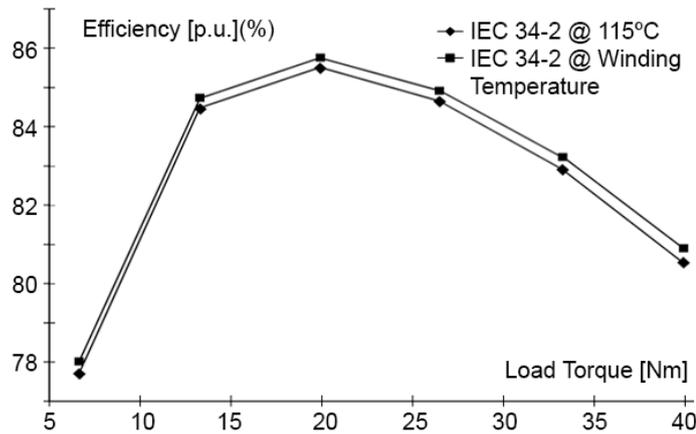


Figura 3: Eficiencia real de un motor de 4kw. [23].

**Supuesto 3** El  $P_{mechanical}$ , definido como la energía de salida, se corresponde a la inversa de la función  $t_i(c_i)$  (expresión 10) aplicada a los tiempos de ejecución  $d_i$ .

**Supuesto 4** El  $P_{electrical}$ , definido como la energía de entrada, se corresponde con  $c_{iz}$  aplicada al consumo de energía de cada actividad  $e_i$ .

Con base en lo anterior, se define  $\eta_i(c_i)$  (expresión 15), como la eficiencia relativa de la actividad  $i$  en función de la proporción de consumo  $c_i$ . Esta expresión se puede interpretar como la eficiencia de la actividad  $i$  respecto a su eficiencia estándar, dado un valor de consumo  $c_i$ . Un valor de  $\eta_i(c_i) = 130\%$ , por ejemplo, indica que a una proporción de consumo de energía  $c_i$  se obtiene una eficiencia 30% superior a la estándar.

$$\eta_i(c_i) = \frac{1/t_i(c_i)}{c_i} = \frac{\ln(1 + (c_i * A_2)^3)}{c_i * A_1 * \ln(2)} = \frac{\ln(1 + (c_i * 2,5093)^3)}{c_i * 4,0704 * \ln(2)} \tag{15}$$

En la figura 4 se representa la función de eficiencia relativa  $\eta_i(c_i)$  dada por la expresión 15. Es relevante notar como la tendencia de la gráfica es similar a la eficiencia real mostrada en [27], [23].

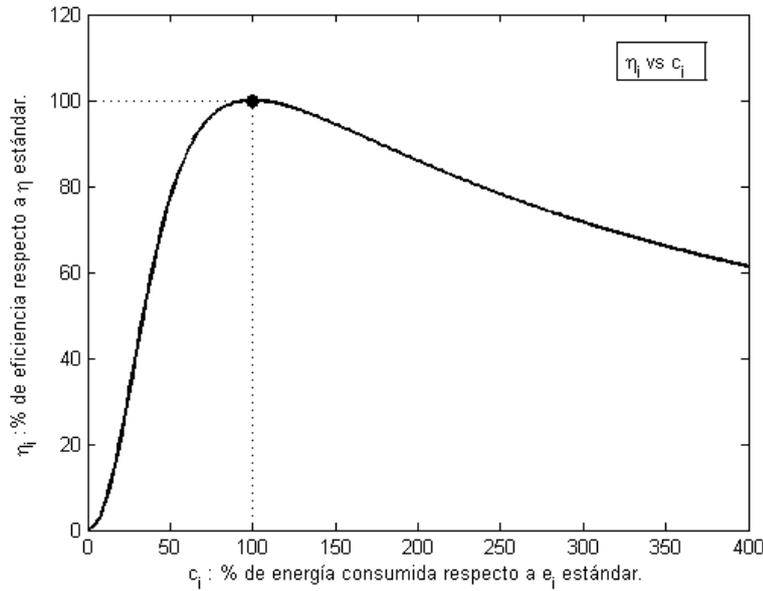


Figura 4: Eficiencia de una actividad respecto a la eficiencia estándar.

### 5.2.2. Eficiencia de un proyecto

El concepto de eficiencia aplicado a una actividad, desarrollado anteriormente, se puede extrapolar para su aplicación a un proyecto completo. En la expresión 16 se define  $\eta_w$ , como la eficiencia relativa del proyecto  $w$ , dado un  $makespan_w$  y un consumo de energía total del proyecto  $CETP_w$ , respecto a la denominada cota superior de rendimiento del proyecto  $CSR_w$  (dada por la expresión 17). Este valor se define con base en los supuestos 3 y 4, así como al concepto de eficiencia dado anteriormente pero, en cambio, no hereda su nombre debido a que el valor de  $CSR_w$  no es adimensional, dado que sus unidades son  $(tiempo * energía)^{-1}$ .

Para calcular el parámetro  $CSR_w$  se debe conocer el  $makespan$  óptimo del proyecto  $w$ , al igual que el consumo total de energía óptimo correspondiente. Dado que determinar estos valores a priori en general no es posible, debido a la complejidad inherente del RCPS, se usa una cota para cada expresión. Para el valor del consumo total de energía se usará la cota  $emin_w = (\sum_{i=1}^n e_{i1})$ . Para el  $makespan$  se usará la cota  $LB0min_w$ , que se calcula usando el método de la ruta crítica, pero considerando las duraciones como las mínimas posibles dado el modelo de consumo de energía propuesto en este trabajo. Estas dos cotas se pueden calcular fácilmente para todo proyecto, de manera que el cálculo de la eficiencia estándar del proyecto está disponible en la librería PSPLIB-ENERGY para cualquier proyecto.

$$\eta_w(makespan_w, CETP_w) = \frac{1}{CSR_w} * \frac{1/makespan_w}{CETP_w} \quad (16)$$

$$CSR_w = \frac{1/LB0min_w}{emin_w} \quad (17)$$

### 5.3. Evaluación de soluciones de la librería PSPLIB-ENERGY

Para la evaluación de las diferentes técnicas que se apliquen para la obtención de soluciones en las instancias de la librería PSPLIB-ENERGY se propone como criterio la maximización de la eficiencia relativa presentada en la expresión 16. Esta expresión tiene en cuenta la naturaleza multiobjetivo de la librería PSPLIB-ENERGY, pues considera tanto el  $makespan_w$  (como RCPS) como el consumo de

energía  $CETP_w$ , persiguiendo minimizar simultaneamente los dos objetivos, con el fin de maximizar la eficiencia relativa.

La formulación matemática de las instancias de la librería PSPLIB-ENERGY mantiene las restricciones del RCPSP, expresiones 2 a 5. La función objetivo para PSPLIB-ENERGY debe ser reformulada según la expresión 18.

$$Max : \eta_w(makespan_w, CETP_w) \tag{18}$$

Para calcular el valor promedio  $\bar{\eta}$  de todo un conjunto  $j30, j60, j90$  o  $j120$  de problemas de la PSPLIB-ENERGY se define la expresión 19.

$$\bar{\eta} = \frac{\sum_{w=1}^{nP} \eta_w(makespan_w, CETP_w)}{nP} \tag{19}$$

## 6. Aplicación de la PSPLIB-ENERGY en una instancia simple del RCPSP

En esta sección se muestra un ejemplo de una instancia pequeña del RCPSP implementando el modelo de consumo energético propuesto. Ésta instancia consta de  $n = 8$  actividades y  $k = 3$  recursos renovables. Las relaciones de precedencia, los consumos de cada tipo de recursos y el consumo de energía se muestran en la figura 5. De igual manera, los diferentes tiempos de ejecución se presentan en la parte superior de cada nodo actividad.

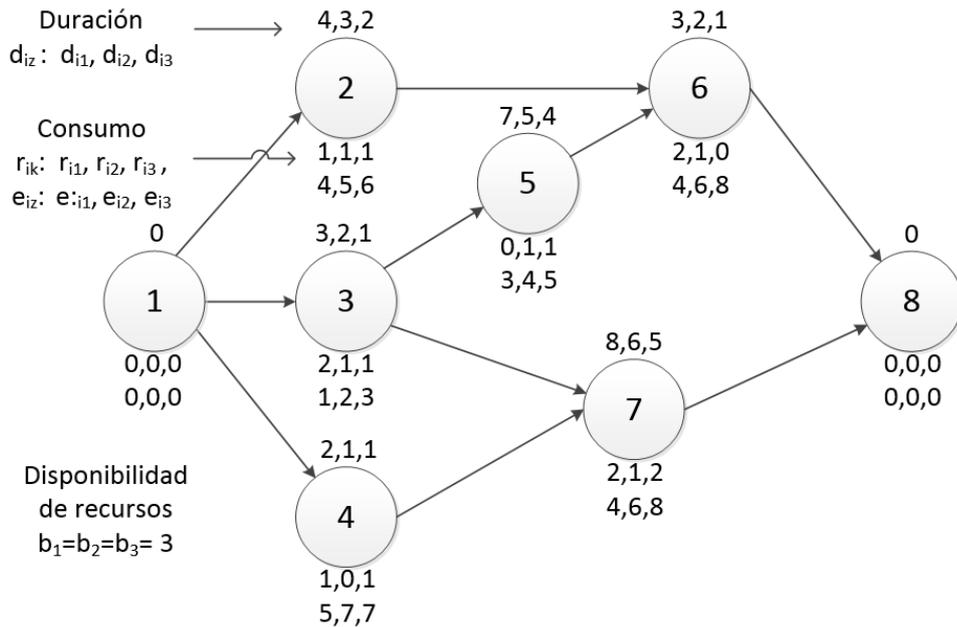


Figura 5: Red de una instancia del RCPSP.

En la figura 6 se muestran tres diagramas de Gantt de soluciones para la instancia de la figura 5. En dicha figura existen tres diagramas (a, b y c). El primero (a) muestra una solución óptima si el problema solo aplicara consumos de energía  $c = 100\%$ , es decir, como un RCPSP estándar. El segundo (b) y tercero (c) muestran dos soluciones usando diferentes consumos de energía, y en consecuencia, diferentes valores para las duraciones de las actividades.

Para calcular el valor de la eficiencia  $\eta_w$  de cada solución, y así usar el criterio de evaluación propuesto, se obtienen los valores  $LBO_w = 6$  y  $emin_w = 21$  del problema de la figura 5. La cota superior de rendimiento del proyecto  $CSR_w$ , el valor de la duración total del proyecto  $makespan_w$ , el consumo de

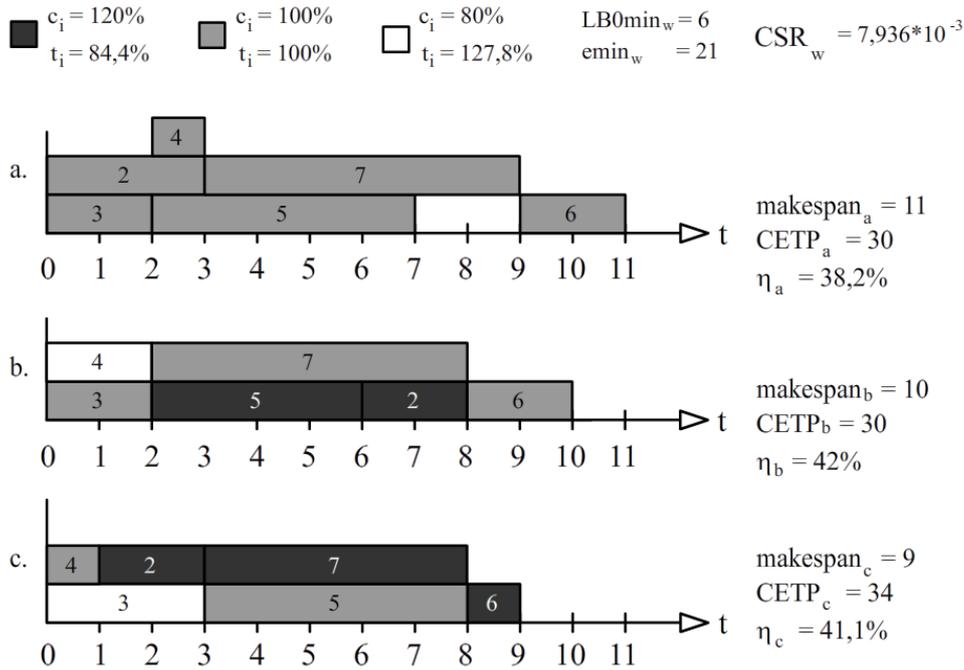


Figura 6: Diagramas de Gantt para unas soluciones de una instancia del RCPSP

energía total del proyecto  $CETP_w$  y el valor del criterio de evaluación  $\eta_w$  de cada diagrama se muestran en la figura 6.

La solución (a) tiene el menor valor de la eficiencia  $\eta_a = 38,2\%$  de los tres. La de menor *makespan* es la solución (c), sin embargo es la de mayor consumo energético; el valor de la eficiencia  $\eta_c = 41,1\%$  la posiciona en segundo lugar, considerándola mejor solución que la (a). La solución (b) mantiene el mismo consumo de energía que la solución (a) pero mejora el *makespan* en una unidad, logrando el mayor valor de la eficiencia relativa del proyecto  $\eta_b = 42\%$ . Así, la solución (b) se considera la mejor solución de las tres.

Es importante mencionar que estos valores de eficiencia son relativamente bajos (cercaos al 40%), debido a que éstos se comparan con el valor ideal de la cota superior de rendimiento del proyecto  $CSR_w$ .

## 7. Conclusiones

En el área general de la toma de decisiones, la programación de tareas es un sector activo de investigación y de gran relevancia, tanto a nivel académico como industrial. La tendencia actual es incorporar técnicas que no sólo optimicen el tiempo de finalización de un proyecto, sino que simultáneamente minimicen el consumo energético de su ejecución. Debido a la evaluación empírica, mediante casos de prueba consensuados, de los métodos habituales de resolución de estos problemas, se genera la necesidad de actualizar las librerías estándar, incorporando en ellas el consumo de energía con el fin de poder evaluar nuevas técnicas que permitan aumentar la eficiencia energética de las soluciones y minimizar el impacto ambiental de su ejecución.

El modelo propuesto de consumo de energía es consistente con los estudios reportados en la literatura académica acerca del consumo energético en máquinas. De igual manera, tanto los modelos de eficiencia teórica como real se ajustan al modelo de eficiencia relativa de actividades propuesta, dotando de coherencia a la ampliación de la librería PSPLIB. Además, se propone cambiar el objetivo tradicional de minimización del *makespan*, configurando un enfoque multiobjetivo que consiste en maximizar la eficiencia relativa del proyecto, minimizando simultáneamente el *makespan* y el consumo energético. Con ello, un único valor de *eficiencia relativa* puede ser usado para comparar diferentes metodologías de solución

a las instancias de la librería PSPLIB-ENERGY.

La publicación de la librería PSPLIB-ENERGY conserva el mismo formato de la librería PSPLIB, con cuatro conjuntos de problemas (*j30*, *j60*, *j90* y *j120*), con 480 problemas cada uno, excepto el conjunto *j120* que cuenta con 600 instancias. La librería PSPLIB-ENERGY está disponibles en <http://gps.webs.upv.es/psplib-energy/>.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto de Investigación TIN2013-46511-C2-1-P.

## Referencias

- [1] G. Mouzon, M. B. Yildirim, and J. Twomey, “Operational methods for minimization of energy consumption of manufacturing equipment,” *International Journal of Production Research*, vol. 45, pp. 4247–4271, Sept. 2007.
- [2] M. Ross, “Efficient energy use in manufacturing.,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 89, pp. 827–831, Feb. 1992.
- [3] International Energy Agency (IEA), “key insights from IEA indicator analysis,” in *World wide trend in energy use and efficiency*, p. 94, IEA PUBLICATION, 2008.
- [4] S. Rahimifard, Y. Seow, and T. Childs, “Minimising Embodied Product Energy to support energy efficient manufacturing,” *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 59, no. 1, pp. 25–28, 2010.
- [5] L. Tacconi, *Biodiversity and Ecological Economics: Participation, Values, and Resource Management*. Earthscan Publications, ilustrada ed., 2000.
- [6] K. Salonitis and P. Ball, “Energy Efficient Manufacturing from Machine Tools to Manufacturing Systems,” *Procedia CIRP*, vol. 7, pp. 634–639, 2013.
- [7] A. Aggarwal, H. Singh, P. Kumar, and M. Singh, “Optimization of multiple quality characteristics for CNC turning under cryogenic cutting environment using desirability function,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 205, no. 1, pp. 42–50, 2008.
- [8] M. Kobya, C. Ciftci, M. Bayramoglu, and M. Sensoy, “Study on the treatment of waste metal cutting fluids using electrocoagulation,” *Separation and Purification Technology*, vol. 60, pp. 285–291, May 2008.
- [9] W. Li, A. Zein, S. Kara, and C. Herrmann, “An investigation into Fixed Energy Consumption of Machine Tools,” *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing*, pp. 268–273, 2001.
- [10] Y. Seow and S. Rahimifard, “A framework for modelling energy consumption within manufacturing systems,” *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 4, no. 3, pp. 258–264, 2011.
- [11] L. Li, J. Yan, and Z. Xing, “Energy requirements evaluation of milling machines based on thermal equilibrium and empirical modelling,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 52, pp. 113–121, 2013.
- [12] M. Mori, M. Fujishima, Y. Inamasu, and Y. Oda, “A study on energy efficiency improvement for machine tools,” *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 60, no. 1, pp. 145–148, 2011.
- [13] Y. He and F. Liu, “Methods for Integrating Energy Consumption and Environmental Impact Considerations into the Production Operation of Machining Processes,” *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 23, 2010.
- [14] J. R. Duflou, J. W. Sutherland, D. Dornfeld, C. Herrmann, J. Jeswiet, S. Kara, M. Hauschild, and K. Kellens, “Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach,” *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 61, no. 2, pp. 587–609, 2012.

- [15] A. Bruzzone, D. Anghinolfi, M. Paolucci, and F. Tonelli, "Energy-aware scheduling for improving manufacturing process sustainability: A mathematical model for flexible flow shops," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 61, no. 1, pp. 459–462, 2012.
- [16] Y. He, F. Liu, H.-j. Cao, and C.-b. Li, "A bi-objective model for job-shop scheduling problem to minimize both energy consumption and makespan," *Journal of Central South University of Technology*, vol. 12, pp. 167–171, Oct. 2005.
- [17] R. Kolisch and A. Sprecher, "PSPLIB - A project scheduling library," *European Journal of Operational Research*, vol. 96, pp. 205–216, 1996.
- [18] A. Mingozzi, V. Maniezzo, S. Ricciardelli, and L. Bianco, "An Exact Algorithm for the Resource Constrained Project Scheduling Problem Based on a New Mathematical Formulation," *Management Science*, vol. 44, no. 5, pp. 714–729, 1995.
- [19] D. Morillo, L. Moreno, and J. Díaz, "Metodologías Analíticas y Heurísticas para la Solución del Problema de Programación de Tareas con Recursos Restringidos (RCPS): una revisión Parte 1," *Ingeniería y Ciencia - ing.cienc.*, vol. 10, pp. 247–271, Jan. 2014.
- [20] J. Alcaraz, C. Maroto, and R. Ruiz, "Solving the Multi-Mode Resource-Constrained Project Scheduling Problem with Genetic Algorithms," *The Journal of the Operational Research Society*, vol. 54, no. 6, pp. 614–626, 2003.
- [21] M. Cervantes, *Nuevos Métodos Meta Heurísticos para la Asignación Eficiente, Optimizada y Robusta de Recursos Limitados*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, 2009.
- [22] S. Kara and W. Li, "Unit process energy consumption models for material removal processes," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 60, pp. 37–40, Jan. 2011.
- [23] A. Boglietti, A. Cavagnino, M. Lazzari, and M. Pastorelli, "International Standards for the Induction Motor Efficiency Evaluation: A Critical Analysis of the Stray-Load Loss Determination," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 40, pp. 1294–1301, Sept. 2004.
- [24] R. Saidur, "A review on electrical motors energy use and energy savings," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp. 877–898, Apr. 2010.
- [25] C. Beggs, *Energy: management, Supply and Conservation*. Butterworth Heinemann, 2002.
- [26] A. G. P. Garcia, A. S. Szklo, R. Schaeffer, and M. A. McNeil, "Energy-efficiency standards for electric motors in Brazilian industry," *Energy Policy*, vol. 35, pp. 3424–3439, June 2007.
- [27] F. Draganescu, M. Gheorghe, and C. Doicin, "Models of machine tool efficiency and specific consumed energy," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 141, pp. 9–15, Oct. 2003.