

“Modelos matemáticos para el problema de equilibrado y asignación de puestos en líneas con tiempos dependientes del operario. Aplicación en Centro Especial de Empleo”

C. Miralles, C.Andres, J.P.García M.Cardós

“Procedimientos de resolución para el problema de equilibrado y asignación de puestos en líneas con tiempos dependientes del operario”

C. Miralles, C.Andres, J.P.García, M.Cardós



WWW.CIGIP.ORG



“Modelos matemáticos para el problema de equilibrado y asignación de puestos en líneas con tiempos dependientes del operario. Aplicación en Centro Especial de Empleo”

C. Miralles, C.Andres, J.P.García M.Cardós



WWW.CIGIP.ORG





Agenda

1. Antecedentes
2. Problemática de los Centros Especiales de Empleo
3. Características de las líneas de montaje en CEE
4. Estado del arte
5. Definición del problema de equilibrado
6. Modelos de Programación Matemática
7. Aplicación a un caso real
8. Conclusiones

WWW.CIGIP.ORG



Antecedentes

- Un grupo de profesores del C.I.G.I.P. lleva varios años colaborando con diferentes Centros Especiales de Empleo para personas con discapacidades.
- Fruto de esta colaboración surgió una nueva línea de investigación, de gran potencial, que supone la aplicación y/o adaptación de las técnicas clásicas de Organización Industrial y Métodos Cuantitativos a entornos productivos en que existen trabajadores con discapacidades.
- Los resultados presentados se engloban dentro de esta línea de investigación más amplia pero centra sus objetivos en uno de los aspectos que más potencial de aplicación tienen en los Centros Especiales de Empleo: las líneas de montaje.



WWW.CIGIP.ORG



Objetivos

Análisis de Centros Especiales de Empleo: aplicabilidad de las líneas de montaje como configuración productiva

Métodos de equilibrado de líneas no contemplan algunos de los condicionantes específicos de estos centros



Analizar y modelar los nuevos condicionantes que aparecen en este entorno industrial

Proponer métodos de resolución del problema de equilibrado de líneas que incluye estos nuevos condicionantes

Contribuir a mejorar la eficiencia de estos centros...generando así nuevos puestos de trabajo para personas con discapacidades



WWW.CIGIP.ORG



Centros Especiales de Empleo

- La gestión de los CEE viene condicionada por los siguientes aspectos:
 - Aunque reciben apoyo de las instituciones públicas, estos centros compiten en mercados reales y por tanto, al igual que cualquier empresa, **deben ser eficientes** para poder sobrevivir y para poder crecer, proporcionando así más puestos de trabajo para más personas con discapacidades.
 - Pero por otro lado estos centros deben **tener en cuenta las limitaciones** de las personas que allí trabajan **procurando una evolución positiva** en sus capacidades, que permita dentro de lo posible su transición e integración a la empresa ordinaria.



WWW.CIGIP.ORG



Líneas de montaje en los CEE

- ❑ La división en tareas sencillas y repetitivas típica de las líneas de montaje tiene algunos inconvenientes para el trabajador no discapacitado.
- ❑ Pero en el caso de las personas con discapacidades resulta en cierto modo beneficiosa para su integración socio-laboral. Dicha división y especialización permite hacer **"INVISIBLES"** la mayoría de las discapacidades, siempre que se encuentre el puesto más adecuado para cada persona.



- ❑ Desde este punto de vista el equilibrado de la línea de montaje en este entorno debe tener en cuenta no sólo la asignación de tareas a estaciones sino también la asignación coherente de tareas a las personas según sus capacidades.



WWW.CIGIP.ORG



Características específicas del problema

1. Gran diferencia entre los tiempos de operación de cada tarea en función de qué operario la ejecute.
2. Hay operaciones directamente imposibles para ciertos operarios, habiéndose de definir ciertas incompatibilidades tarea-operario.
3. No suele haber operarios genéricamente más o menos veloces.
4. La deseable rotación de puestos de trabajo como método de enriquecimiento del trabajo, aquí puede llegar a ser imprescindible
5. En cambio para otros casos lo aconsejable puede que sea lo contrario, definiéndose asignaciones "a priori" de tarea-operario.
6. Las rotaciones o reasignaciones radicales de tareas no suelen ser recomendables.
7. Algunas discapacidades necesitan un tratamiento especial en el equilibrado de la línea en cuanto a que significan preasignar ciertas personas a estaciones concretas.



WWW.CIGIP.ORG



Características específicas del problema

8. Es relativamente usual que un trabajador que evolucione muy positivamente deje el CEE para ir a una empresa ordinaria justo cuando alcanza su mejor rendimiento.
9. El absentismo está muy presente, ya que las personas discapacitadas suelen estar más expuestas a problemas de salud, tanto física como psicológica.
10. Además, todo CEE debe mantener un servicio de ajuste personal y social, que implica un seguimiento y control de cada trabajador, para el que éste deberá abandonar su puesto con una periodicidad que dependerá de su discapacidad.

Necesidad de una herramienta para asignar y reasignar las tareas a las personas en función de los trabajadores disponibles en cada momento



WWW.CIGIP.ORG



Definición del problema ALWABP

- Básicamente el problema consiste en una doble asignación de:

- Tareas a estaciones \Rightarrow **Equilibrado**
- Operarios a estaciones \Rightarrow **Asignación puestos**

"Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem - ALWABP"



WWW.CIGIP.ORG



Definición del problema ALWABP

- En analogía con la clasificación de [Baybars, 1986] del SALBP, se han definido dos variantes del problema relativas a distintos objetivos:

ALWABP-1

Dado un tiempo de ciclo deseado...

MINIMIZAR NUMERO DE ESTACIONES

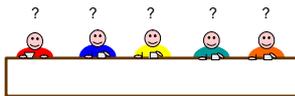
ALWABP-2

Dados unos operarios disponibles...

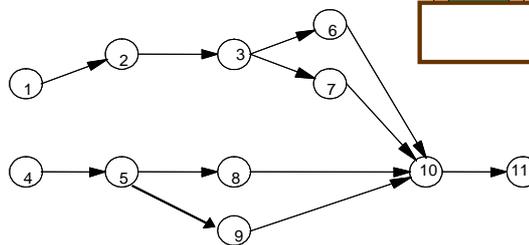
MINIMIZAR EL TIEMPO DE CICLO



Dos objetivos...dos problemas

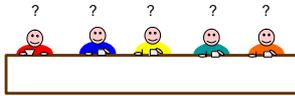


Task	h1	h2	h3	h4	h5
1	45	-	57	45	38
2	12	10	11	11	8
3	7	10	-	9	-
4	44	50	-	52	-
5	23	23	15	15	15
6	14	-	10	12	12
7	-	25	12	15	20
8	12	15	12	12	12
9	12	-	12	12	12
10	8	12	-	8	-
11	30	24	29	35	35

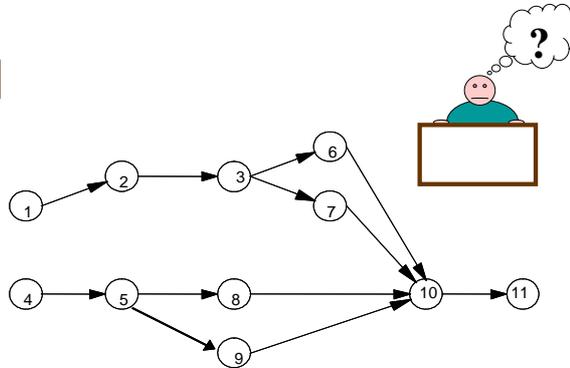




Dos objetivos...dos problemas



Task	h1	h2	h3	h4	h5
1	45	-	57	45	38
2	12	10	11	11	8
3	7	10	-	9	-
4	44	50	-	52	-
5	23	23	15	15	15
6	14	-	10	12	12
7	-	25	12	15	20
8	12	15	12	12	12
9	12	-	12	12	12
10	8	12	-	8	-
11	30	24	29	35	35



ALWABP-1

- Dado un tiempo de ciclo deseado C
- Dada la matriz de tiempos tareas-operarios

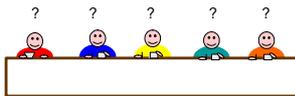


Minimizar el número de estaciones

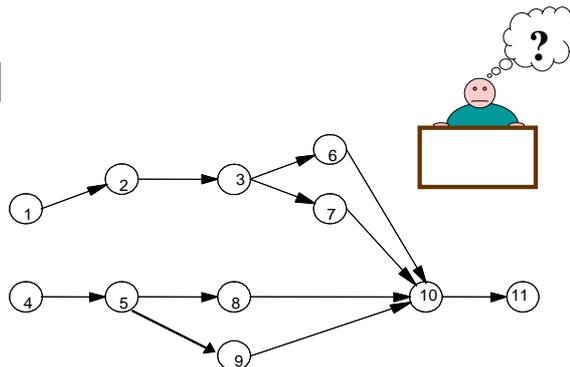
WWW.CIGIP.ORG



Dos objetivos...dos problemas



Task	h1	h2	h3	h4	h5
1	45	-	57	45	38
2	12	10	11	11	8
3	7	10	-	9	-
4	44	50	-	52	-
5	23	23	15	15	15
6	14	-	10	12	12
7	-	25	12	15	20
8	12	15	12	12	12
9	12	-	12	12	12
10	8	12	-	8	-
11	30	24	29	35	35



ALWABP-2

- Dados unos operarios
- Dada la matriz de tiempos tareas-operarios

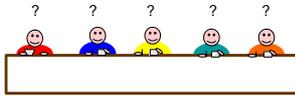


Minimizar C

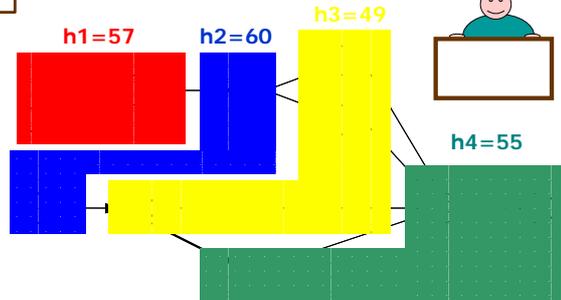
WWW.CIGIP.ORG



Dos objetivos...dos problemas



Task	h1	h2	h3	h4	h5
1	45	-	57	45	38
2	12	10	11	11	8
3	7	10	-	9	-
4	44	50	-	52	-
5	23	23	15	15	15
6	14	-	10	12	12
7	-	25	12	15	20
8	12	15	12	12	12
9	12	-	12	12	12
10	8	12	-	8	-
11	30	24	29	35	35



RESOLUCIÓN
MEDIANTE...

- Programación Matemática
- Procedimientos exactos de resolución
- Procedimientos heurísticos de resolución

WWW.CIGIP.ORG



Referencias más relacionadas

Heterogeneidad del operario	ASDP
[Bartholdi y Eisenstein, 1995]	[Pinto, Dannenbring y Khumawala, 1983]
[Doerr, Klasterin y Magazine, 2000]	[Hillier y So, 1996]
[Gel, Hopp y Van Oyen, 2002]	[Graves y Lamar, 1983]
[Corominas, Pastor y Plans, 2002]	[Bukchin y Tzur, 2000]
[Iskander y Chou, 1990]	[Rubinovitz y Bukchin, 1993]
[Carnahan, Norman y Redfern, 2001]	[Pinnoi y Wilhelm, 1998]
[Van Oyen, Gel y Hopp, 2001]	[Rekiek, de Lit y Delchambre, 2002]



WWW.CIGIP.ORG



Hechos diferenciales fundamentales

- Si bien en la mayoría de estas referencias se define una doble asignación de tareas y recursos a estaciones hay varias diferencias básicas:
 - El criterio del **coste** asociado a cada recurso **no se considera relevante** en el ALWABP.
 - En el caso de los CEE, existen operarios **heterogéneos y únicos**.
 - Cada **persona** es tratada como **única** y, como mucho, puede haber un número de personas con discapacidad muy parecida, cuyos tiempos de operación sean iguales.
 - Cada operario **se asigna sólo una vez** para una estación.



Delimitación del problema: Hipótesis

HIPÓTESIS DEL PROBLEMA:

Tiempos de operación deterministas y distintos en función del operario

Línea de montaje mono-modelo y lineal.

Una operación sólo puede asignarse a una única estación.

Existen restricciones de precedencia que hay que respetar.

En cada estación se asigna un único operario.

Cada operario es único y se asigna sólo a una estación.

Pueden existir definidas ciertas incompatibilidades tarea-operario.

PROBLEMA GENERALIZADO CON RESTRICCIONES DE CEE:

En algunos casos puede ser una hipótesis de trabajo el que todos los operarios tengan asignada al menos una tarea.

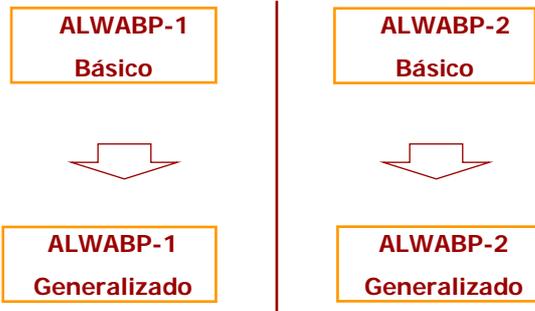
Pueden haber definidas a priori ciertas asignaciones tarea-operario porque así convenga para la recuperación terapéutica de ciertas habilidades

Pueden haber definidas a priori ciertas asignaciones operario-estación.

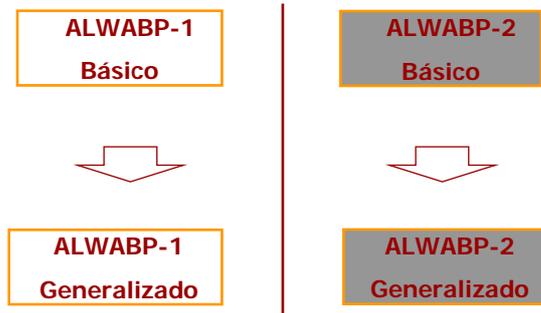




Modelos Matemáticos



Modelos Matemáticos





Modelos Matemáticos: Nomenclatura

- Variable binaria de asignación de la tarea i al operario h en la estación s :
 $x_{shi} \in [0,1] \forall s \in S, h \in H, i \in N$
- Variable binaria de asignación del operario s a la estación h :
 $y_{sh} \in [0,1] \forall s \in S, h \in H$

Índices	
i, j	Tarea
h, g	Operario
s	Estación
N	Conjunto de tareas
H	Conjunto de operarios disponibles
S	Conjunto de estaciones
A	Conjunto de asignaciones a priori (i,h) tarea-operario
I	Conjunto de asignaciones incompatibles (i,h) tarea-operario
Z	Conjunto de asignaciones a priori (h,s) operario-estación
Parámetros	
C	Tiempo de ciclo
m	Número de estaciones
p_{hi}	Tiempo de operación (process time) de la tarea i cuando la ejecuta el operario h
$lowp_i$	Mínimo tiempo de operación de i entre los operarios disponibles
B_j	Conjunto de predecesoras inmediatas de la tarea j



WWW.CIGIP.ORG



Modelo básico ALWABP-2

$$\text{Min } z = C \quad [4.4]$$

sujeto a:

$$\sum_{h \in H} \sum_{s \in S} x_{sh} = 1; \quad \forall i \in N \quad [4.5]$$

$$\sum_{s \in S} y_{sh} \leq 1; \quad \forall h \in H \quad [4.6]$$

$$\sum_{h \in H} y_{sh} \leq 1; \quad \forall s \in S \quad [4.7]$$

$$\sum_{i \in N} p_{hi} \cdot x_{sh} \leq C; \quad \forall h \in H; \forall s \in S \quad [4.8]$$

$$\sum_{i \in N} x_{sh} \leq M \cdot y_{sh}; \quad \forall h \in H; \forall s \in S \quad [4.9]$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{s \in S} s \cdot x_{sh} \leq \sum_{h \in H} \sum_{s \in S} s \cdot x_{sh} \quad \forall i, j / i \in B_j \quad [4.10]$$

WWW.CIGIP.ORG



Modelo básico ALWABP-2

$$\text{Min } z = C \quad [4.4]$$

sujeto a:

$$\sum_{h \in H} \sum_{s \in S} x_{sh} = 1, \quad \forall i \in N \quad [4.5]$$

$$\sum_{s \in S} y_{sh} \leq 1, \quad \forall h \in H \quad [4.6]$$

$$\sum_{h \in H} y_{sh} \leq 1, \quad \forall s \in S \quad [4.7]$$

$$\sum_{i \in N} p_{ih} \cdot x_{sh} \leq C, \quad \forall h \in H, \forall s \in S \quad [4.8]$$

$$\sum_{i \in N} x_{sh} \leq M \cdot y_{sh}, \quad \forall h \in H, \forall s \in S \quad [4.9]$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{s \in S} s \cdot x_{sh} \leq \sum_{h \in H} \sum_{s \in S} s \cdot x_{sh} \quad \forall i, j / i \in B_j \quad [4.10]$$

Cada tarea i debe asignarse a un único operario h en una única estación s



Modelo básico ALWABP-2

$$\text{Min } z = C \quad [4.4]$$

sujeto a:

$$\sum_{h \in H} \sum_{s \in S} x_{sh} = 1, \quad \forall i \in N \quad [4.5]$$

$$\sum_{s \in S} y_{sh} \leq 1, \quad \forall h \in H \quad [4.6]$$

$$\sum_{h \in H} y_{sh} \leq 1, \quad \forall s \in S \quad [4.7]$$

$$\sum_{i \in N} p_{ih} \cdot x_{sh} \leq C, \quad \forall h \in H, \forall s \in S \quad [4.8]$$

$$\sum_{i \in N} x_{sh} \leq M \cdot y_{sh}, \quad \forall h \in H, \forall s \in S \quad [4.9]$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{s \in S} s \cdot x_{sh} \leq \sum_{h \in H} \sum_{s \in S} s \cdot x_{sh} \quad \forall i, j / i \in B_j \quad [4.10]$$

Cada operario es único y por tanto sólo se puede asignar una vez; y en cada estación no se asignará más de un operario



Modelo básico ALWABP-2

$$\text{Min } z = C \quad [4.4]$$

sujeito a:

$$\sum_{h \in H} \sum_{s \in S} x_{sh} = 1, \quad \forall i \in N \quad [4.5]$$

$$\sum_{s \in S} y_{sh} \leq 1, \quad \forall h \in H \quad [4.6]$$

$$\sum_{h \in H} y_{sh} \leq 1, \quad \forall s \in S \quad [4.7]$$

$$\sum_{i \in N} p_{ih} \cdot x_{sh} \leq C, \quad \forall h \in H, \forall s \in S \quad [4.8]$$

$$\sum_{i \in N} x_{sh} \leq M \cdot y_{sh}, \quad \forall h \in H, \forall s \in S \quad [4.9]$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{s \in S} s \cdot x_{sh} \leq \sum_{h \in H} \sum_{s \in S} s \cdot x_{sh} \quad \forall i, j / i \in B_j \quad [4.10]$$

Con [4.8] el sumatorio de los tiempos de procesamiento de las tareas asignadas a cada estación no debe superar el tiempo de ciclo C. Para mantener la linealidad del modelo se formula [4.9] aparte, que la complementa haciendo que en aquellas combinaciones no existentes de operario s y estación h (es decir donde $y_{sh} = 0$) no pueda haber tareas asignadas



Modelo básico ALWABP-2

$$\text{Min } z = C \quad [4.4]$$

sto a:

$$\sum_{h \in H} \sum_{s \in S} x_{sh} = 1, \quad \forall i \in N \quad [4.5]$$

$$\sum_{s \in S} y_{sh} \leq 1, \quad \forall h \in H \quad [4.6]$$

$$\sum_{h \in H} y_{sh} \leq 1, \quad \forall s \in S \quad [4.7]$$

$$\sum_{i \in N} p_{ih} \cdot x_{sh} \leq C, \quad \forall h \in H, \forall s \in S \quad [4.8]$$

$$\sum_{i \in N} x_{sh} \leq M \cdot y_{sh}, \quad \forall h \in H, \forall s \in S \quad [4.9]$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{s \in S} s \cdot x_{sh} \leq \sum_{h \in H} \sum_{s \in S} s \cdot x_{sh} \quad \forall i, j / i \in B_j \quad [4.10]$$

La tarea i, precedente de j, se asigna a una estación de menor o igual índice que la tarea j



Modelo generalizado ALWABP-2

$$\text{Min } z = C \quad [4.4]$$

sto a:

$$\sum_{h \in H} \sum_{s \in S} x_{sh} = 1; \quad \forall i \in N \quad [4.5]$$

$$\sum_{s \in S} y_{sh} \leq 1; \quad \forall h \in H \quad [4.6]$$

$$\sum_{h \in H} y_{sh} \leq 1; \quad \forall s \in S \quad [4.7]$$

$$\sum_{i \in N} p_{ih} \cdot x_{sh} \leq C; \quad \forall h \in H; \forall s \in S \quad [4.8]$$

$$\sum_{i \in N} x_{sh} \leq M \cdot y_{sh}; \quad \forall h \in H; \forall s \in S \quad [4.9]$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{s \in S} s \cdot x_{sh} \leq \sum_{h \in H} \sum_{s \in S} s \cdot x_{sh} \quad \forall i, j / i \in B_j \quad [4.10]$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{s \in S} x_{sh} \geq 1; \quad \forall h \in H \quad [4.12]$$

$$\sum_{s \in S} x_{sh} = 1; \quad \forall (i, h) \in A \quad [4.13]$$

$$y_{sh} = 1; \quad \forall (s, h) \in Z \quad [4.14]$$

WWW.CIGIP.ORG



Modelo generalizado ALWABP-2

$$\text{Min } z = C \quad [4.4]$$

sto a:

$$\sum_{h \in H} \sum_{s \in S} x_{sh} = 1; \quad \forall i \in N \quad [4.5]$$

$$\sum_{s \in S} y_{sh} \leq 1; \quad \forall h \in H \quad [4.6]$$

$$\sum_{h \in H} y_{sh} \leq 1; \quad \forall s \in S \quad [4.7]$$

$$\sum_{i \in N} p_{ih} \cdot x_{sh} \leq C; \quad \forall h \in H; \forall s \in S \quad [4.8]$$

$$\sum_{i \in N} x_{sh} \leq M \cdot y_{sh}; \quad \forall h \in H; \forall s \in S \quad [4.9]$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{s \in S} s \cdot x_{sh} \leq \sum_{h \in H} \sum_{s \in S} s \cdot x_{sh} \quad \forall i, j / i \in B_j \quad [4.10]$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{s \in S} x_{sh} \geq 1; \quad \forall h \in H \quad [4.12]$$

$$\sum_{s \in S} x_{sh} = 1; \quad \forall (i, h) \in A \quad [4.13]$$

$$y_{sh} = 1; \quad \forall (s, h) \in Z \quad [4.14]$$

Cuando **no** es deseable **marginar** del equipo de trabajo de la línea a **ningún operario** (aunque sus tiempos sean altos), esto se puede evitar añadiendo una restricción que obligue a asignar, al menos, una tarea a cada operario h

WWW.CIGIP.ORG



Modelo generalizado ALWABP-2

$$\text{Min } z = C \quad [4.4]$$

sto a:

$$\sum_{h \in H} \sum_{s \in S} x_{sh} = 1; \quad \forall i \in N \quad [4.5]$$

$$\sum_{s \in S} y_{sh} \leq 1; \quad \forall h \in H \quad [4.6]$$

$$\sum_{h \in H} y_{sh} \leq 1; \quad \forall s \in S \quad [4.7]$$

$$\sum_{i \in N} p_{ih} \cdot x_{sh} \leq C; \quad \forall h \in H; \forall s \in S \quad [4.8]$$

$$\sum_{i \in N} x_{sh} \leq M \cdot y_{sh}; \quad \forall h \in H; \forall s \in S \quad [4.9]$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{s \in S} s \cdot x_{sh} \leq \sum_{h \in H} \sum_{s \in S} s \cdot x_{sh} \quad \forall i, j / i \in B_j \quad [4.10]$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{s \in S} x_{sh} \geq 1; \quad \forall h \in H \quad [4.12]$$

$$\sum_{s \in S} x_{sh} = 1; \quad \forall (i, h) \in A \quad [4.13]$$

$$y_{sh} = 1; \quad \forall (s, h) \in Z \quad [4.14]$$

En algunos casos, suele convenir que **personas** con alguna discapacidad física **trabajen** en determinado **tipo de tareas**. Esto añadiría al modelo restricciones del tipo [4.13] que preasignan cierta tarea i a cierto operario h . Esto también sería útil para la rotación.

WWW.CIGIP.ORG



Modelo generalizado ALWABP-2

$$\text{Min } z = C \quad [4.4]$$

sto a:

$$\sum_{h \in H} \sum_{s \in S} x_{sh} = 1; \quad \forall i \in N \quad [4.5]$$

$$\sum_{s \in S} y_{sh} \leq 1; \quad \forall h \in H \quad [4.6]$$

$$\sum_{h \in H} y_{sh} \leq 1; \quad \forall s \in S \quad [4.7]$$

$$\sum_{i \in N} p_{ih} \cdot x_{sh} \leq C; \quad \forall h \in H; \forall s \in S \quad [4.8]$$

$$\sum_{i \in N} x_{sh} \leq M \cdot y_{sh}; \quad \forall h \in H; \forall s \in S \quad [4.9]$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{s \in S} s \cdot x_{sh} \leq \sum_{h \in H} \sum_{s \in S} s \cdot x_{sh} \quad \forall i, j / i \in B_j \quad [4.10]$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{s \in S} x_{sh} \geq 1; \quad \forall h \in H \quad [4.12]$$

$$\sum_{s \in S} x_{sh} = 1; \quad \forall (i, h) \in A \quad [4.13]$$

$$y_{sh} = 1; \quad \forall (s, h) \in Z \quad [4.14]$$

En algunos casos, suele convenir que ciertas **personas ocupen** ciertas **estaciones** preferentemente. Esta vez [4.14] se añadiría para esos casos.

WWW.CIGIP.ORG



Aplicación a un caso real

- ACTIVIDAD DE LA EMPRESA: "Montajes Diversos"
- El abanico de montajes realizados es amplio e incluye Interruptores magnetotérmicos, Componentes electrónicos, Iluminación, Alógenos, Emblistados, Embolsados, Etiquetados, Productos de limpieza textil, Doblados y encajados, relleno de cajas con productos varios...



WWW.CIGIP.ORG

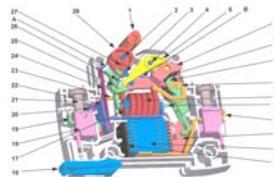


Sección de interruptores

- Algunos de los empleados son **flexibles** y capaces de realizar diversas funciones y ser asignados a distintas secciones en función de las necesidades del CEE...
- En cambio **otros** operarios ven **limitado** su campo de acción a unas **determinadas secciones** donde realizan aquellas tareas que su discapacidad les permite, por lo que las nuevas líneas de montaje han supuesto para este segundo grupo más posibilidades de realizar trabajos en los que antes no podían participar.

REINGENIERIA DE PROCESOS:

Puestos individuales → líneas de montaje



WWW.CIGIP.ORG





Transición

- ❑ ANTES: puestos de trabajo individuales...



- ❑ DESPUES: líneas de montaje...

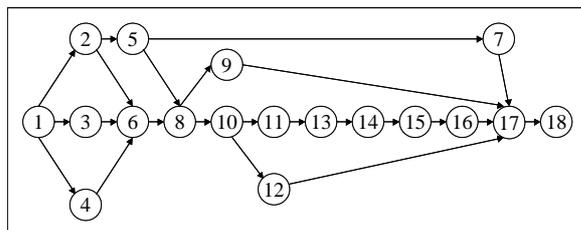


WWW.CIGIP.ORG



Solución proporcionada

- ❑ Línea 1:



- | | | |
|-------------|-------------|-------------|
| Operario h1 | Operario h4 | Operario h7 |
| Operario h2 | Operario h5 | |
| Operario h3 | Operario h6 | |

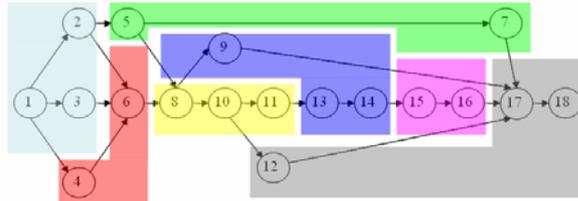


WWW.CIGIP.ORG



Solución proporcionada

□ Línea 1:



$$s1: h4 / 26+53+73 = 152 \quad s4: h2 / 81+44+42 = 167 \quad s7: h6 / 16+124+26 = 166$$

$$s2: h5 / 73+56 = 159 \quad s5: h1 / 26+70+81 = 177 \quad \text{Est. Cuello de botella}$$

$$s3: h3 / 84+80 = 164 \quad s6: h7 / 63+85 = 148$$

- Operario h1
- Operario h2
- Operario h3
- Operario h4
- Operario h5
- Operario h6
- Operario h7

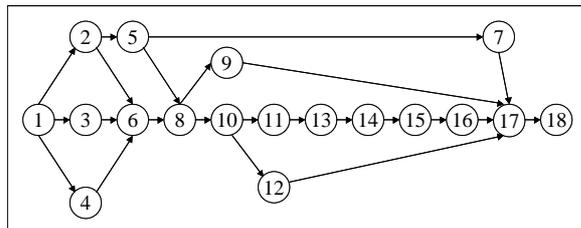


WWW.CIGIP.ORG



Solución proporcionada

□ Línea 2:



- Operario h1
- Operario h2
- Operario h3
- Operario h4
- Operario h5
- Operario h6

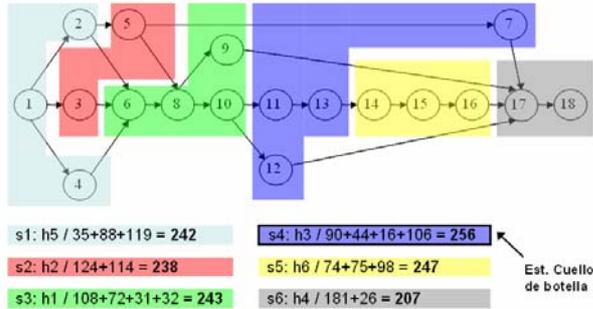


WWW.CIGIP.ORG



Solución proporcionada

□ Línea 2:



Operario h1 Operario h4
Operario h2 Operario h5
Operario h3 Operario h6

WWW.GIGIP.ORG



Conclusiones

- Notable **incremento** de la cuota de producción y **productividad**
- Muchas **más personas** son ahora **capaces** de participar en el montaje de interruptores
- Se **acorta** además el tiempo de **aprendizaje**
- Esto ha llevado a la empresa a **ampliar** las **contratas** y a requerir **nuevo personal**, por lo que en la actualidad se están implementando **nuevas líneas** de montaje **basadas en esta experiencia piloto**
- También en **otras secciones** se está empezando la implantación de líneas



WWW.GIGIP.ORG



WWW.CIGIP.ORG

“Procedimientos de resolución para el problema de equilibrado y asignación de puestos en líneas con tiempos dependientes del operario”

C. Miralles, C.Andres, J.P.García, M.Cardós



WWW.CIGIP.ORG

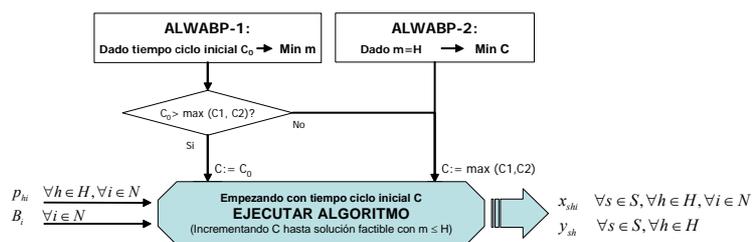


Agenda

1. Procedimientos BnB desarrollados
2. Cota inferior
3. Estrategias de búsqueda: DFSC, BFS, MLB
4. Estudio Experimental
5. Heurística desarrollada a partir de DFSC
6. Aplicación de la heurística a un caso real
7. Conclusiones



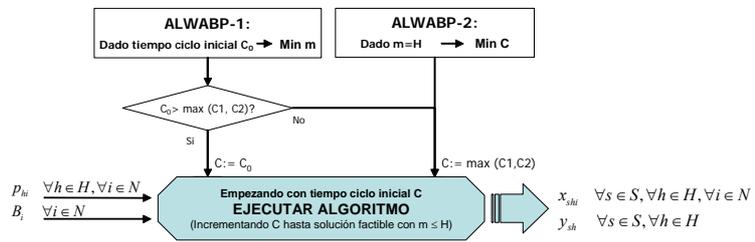
Branch and Bound



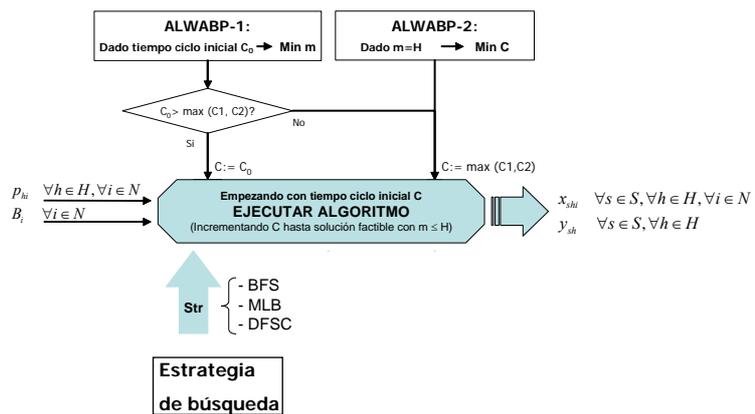
- En el caso de ALWABP-2, el primer intento se efectúa con $C := \max(C1, C2)$, y si C no es posible se incrementa una unidad.
- En el caso de ALWABP-1 el primer intento se efectúa con el C de entrada C_0 . Si C_0 no es posible (si es muy bajo con los operarios disponibles). Se reenfoca el problema y se va probando con sucesivos tiempos de ciclo superiores como en ALWABP-2 (Si C_0 es menor que $\max(C1, C2)$ directamente no es posible).



Branch and Bound

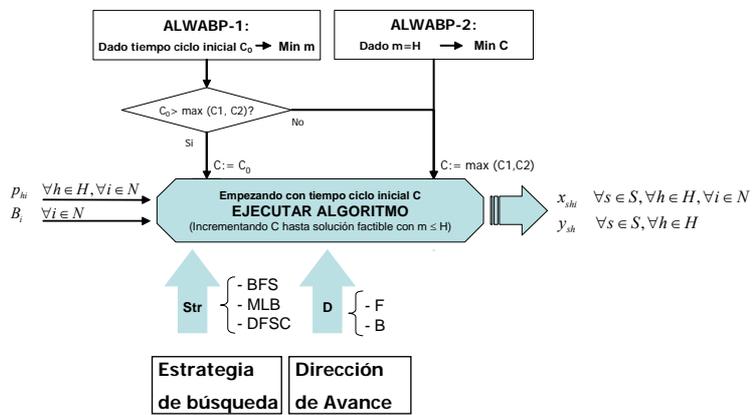


Branch and Bound

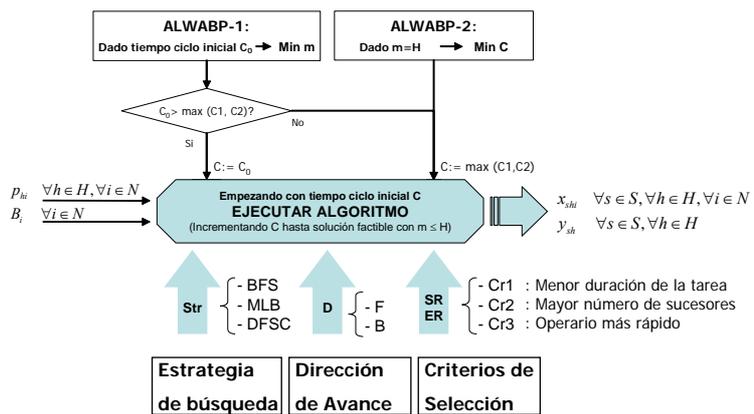




Branch and Bound

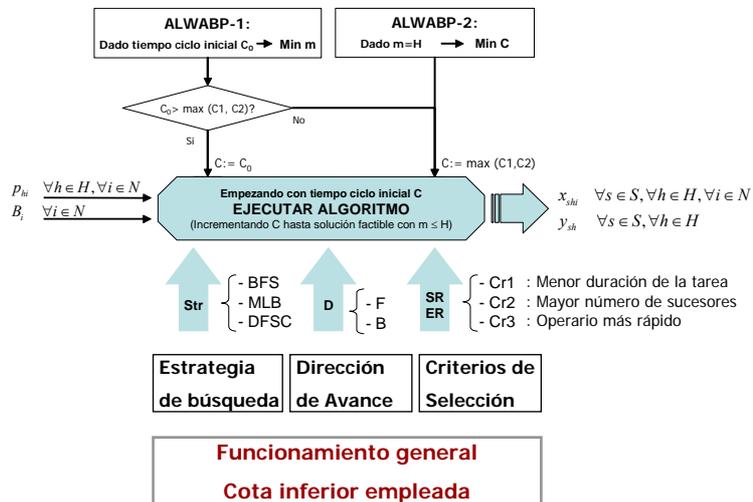


Branch and Bound





Branch and Bound



WWW.CIGIP.ORG



Funcionamiento general

- **RAMIFICACIÓN** Partiendo del nodo cero, en el proceso de ramificación se darán dos tipos de situaciones:
 - a) **BN: Cuando se abre una nueva estación** se debe ramificar un nodo para cada combinación de operarios todavía no asignados y tareas factibles de cada uno de esos operarios
 - b) **BA: Una vez dentro de la estación** y asignada la primera tarea y el operario para una estación concreta, dentro de esa estación sólo se ramifica un nodo para cada tarea de entre las factibles para ese operario.
- **ACOTACIÓN** Para cada nodo q ramificado se calcula su cota inferior



WWW.CIGIP.ORG



Cota inferior en cada nodo

K = numero actual de estaciones
 g = operario seleccionado en el nodo actual q .
 G = conjunto de tareas ya asignadas al operario g actual en la estación abierta.
 σ = conjunto de tareas todavía no asignadas.
 $lowp_i$ = Minimo tiempo de operación de la tarea i entre los operarios aún disponibles

$$LB = K + \left\lceil \frac{\sum_{i \in G} p_{ig} + \sum_{i \in \sigma} lowp_i}{C} \right\rceil$$



Cota inferior en cada nodo

K = numero actual de estaciones
 g = operario seleccionado en el nodo actual q .
 G = conjunto de tareas ya asignadas al operario g actual en la estación abierta.
 σ = conjunto de tareas todavía no asignadas.
 $lowp_i$ = Minimo tiempo de operación de la tarea i entre los operarios aún disponibles

$$LB = \left\lceil \frac{\sum_{i \in G} p_{ig} + \sum_{i \in \sigma} lowp_i}{C} \right\rceil$$

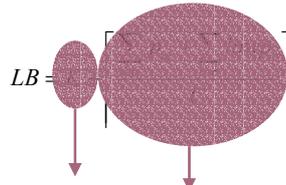
ESTACIONES ACTUALES:
número actual de
estaciones ya cerradas





Cota inferior en cada nodo

K = número actual de estaciones
 g = operario seleccionado en el nodo actual q .
 G = conjunto de tareas ya asignadas al operario g actual en la estación abierta.
 σ = conjunto de tareas todavía no asignadas.
 $lowp_i$ = Mínimo tiempo de operación de la tarea i entre los operarios aún disponibles



ESTACIONES ACTUALES:
número actual de
estaciones ya cerradas

MEJOR ASIGNACIÓN FUTURA POSIBLE:
- Cada tarea se asignaría al operario aún libre que la desempeña en menor tiempo.
- Ignorando las relaciones de precedencia se daría una división perfecta de las tareas



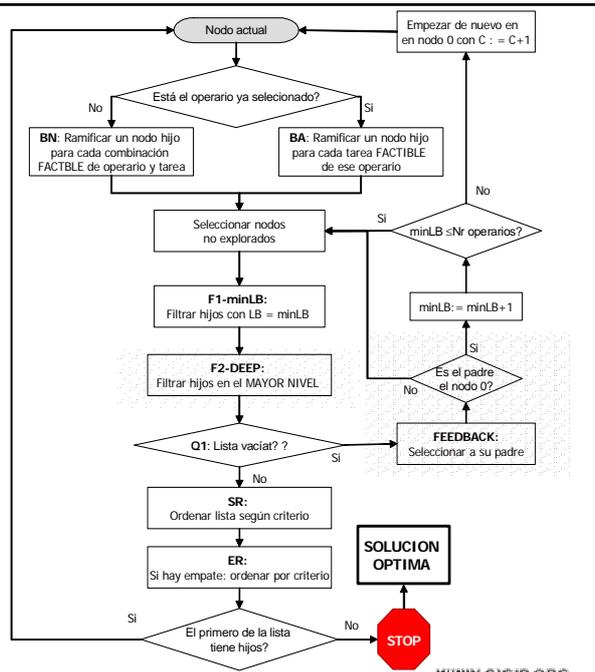
Estrategias de búsqueda

- ❑ Búsqueda en profundidad con desarrollo completo de nodos (DFSC)
- ❑ Estrategia mejor nodo en cada nivel (BFS)
- ❑ Estrategia de mínima cota inferior (MLB)





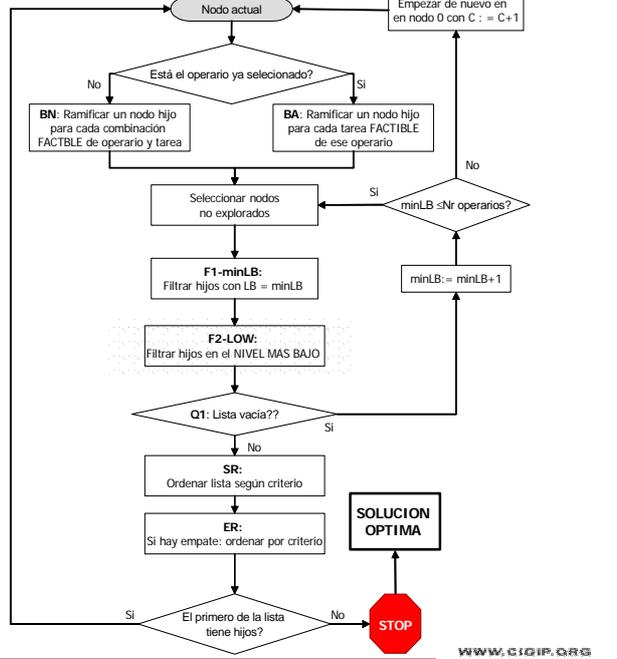
DFSC



WWW.CIGIP.ORG



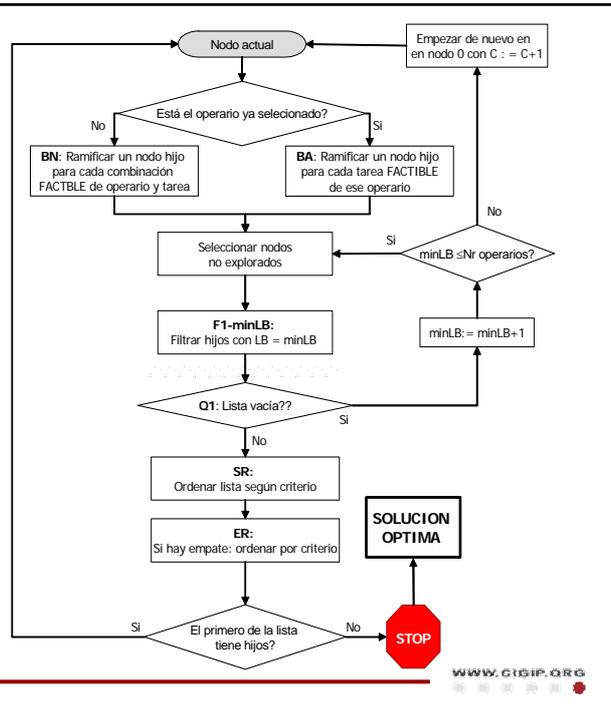
BFS



WWW.CIGIP.ORG



MLB



Estudio Experimental

- Se pretende observar el distinto comportamiento de las variantes del procedimiento, así como su interacción con los distintos tipos de problemas:

PROCEDIMIENTO	PROBLEMA
Estrategia DFSC BFS MLB	Num operarios Bajo Alto
Dirección Adelante Atras	Variabilidad Baja Alta
Criterios SR/ER Combinaciones de Cr1, Cr2 Y Cr3	%Incompatibilidades Bajo Alto





Estudio comparativo procedimientos

- Se ha resuelto **cada problema con cada variante** y en cada experimento se ha obtenido el **incremento porcentual de nodos** respecto a la variante que ha necesitado menos nodos para obtener la solución óptima:

$$NPI_{Ex} = \frac{Ex_{NO} - MejorEx_{NO}}{MejorEx_{NO}} \cdot 100$$

MejorEx_{NO} Nr nodos en el método exacto que menos desarrollo de nodos ha necesitado
Ex_{NO} es el número de nodos del método evaluado.

- De este modo un NPI bajo indica mayor ahorro de nodos

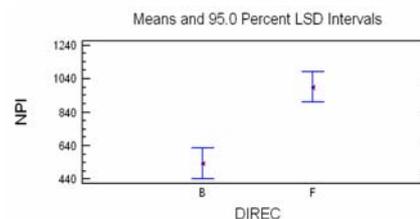
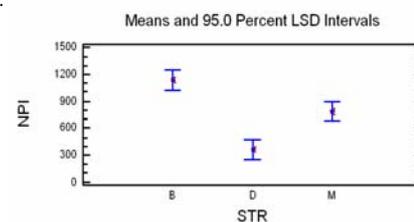


WWW.CIGIP.ORG



Resultados estudio comparativo

- Del análisis ANOVA realizado se observó como las reglas SR y ER empleadas apenas afectan en comparación con la dirección de avance (DIREC) y la estrategia empleada (STR), que son estadísticamente mucho más significativos:

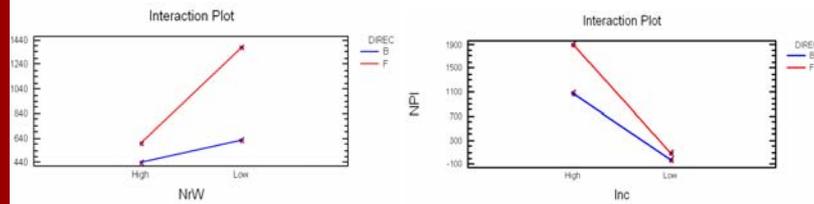


WWW.CIGIP.ORG



Resultados estudio comparativo

- En cuanto a las interacciones dobles de los factores relativos a los problemas respecto a los factores del propio procedimiento, se extrae un **comportamiento robusto**.
- Sólo se producen ciertas interacciones en la **dirección de avance** respecto al porcentaje de **incompatibilidades** de los problemas y también de la dirección de avance respecto al mayor o menor **número de operarios** respecto al número de tareas:



- Se observa como la **conveniencia** de la dirección **hacia atrás** es más acusada cuando se resuelven problemas con **bajo número de operarios** respecto al número de tareas y cuando se resuelven problemas con **alto porcentaje de incompatibilidades**



WWW.CIGIP.ORG



Heurísticas



WWW.CIGIP.ORG

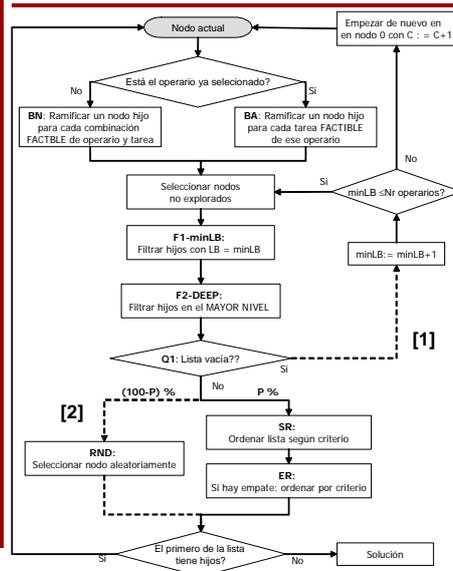


Heurísticas

- Dados los mejores resultados de la estrategia de búsqueda en profundidad DFSC, ésta ha sido seleccionada para generar a partir de ella una heurística rápida que proporcione buenas soluciones



H-DFS





Aplicación al caso real visto



WWW.CIGIP.ORG



Aplicación de heurística H-DFS

- En la gran **mayoría** de los procedimientos aplicados **no se supera el 15%** de desviación respecto a la solución óptima.
- A esto se le suma la ventaja adicional que supone para estos procedimientos el que tengan un **tiempo de ejecución** fijo que es **conocido** a priori.
- Esto es importante porque al inicio de cada jornada laboral es cuando se conoce con certeza de qué operarios se dispone, por lo que es en ese mismo momento cuando se debe poder disponer de una solución aceptable y rápida, ya que la puesta en marcha diaria de la línea no puede demorarse en espera de la solución al equilibrado.

Nr Exp	Problem	Heurística	C Optimo	C obtenido	SQPD (%)
1	Linea 1	H_F_D126_P010_S_1_2_NA	177	190	7
2	Linea 1	H_F_D252_P010_S_1_2_NA	177	203	14
3	Linea 1	H_F_D504_P010_S_1_2_NA	177	190	7
4	Linea 1	H_F_D126_P040_S_1_2_NA	177	190	7
5	Linea 1	H_F_D252_P040_S_1_2_NA	177	190	7
6	Linea 1	H_F_D504_P040_S_1_2_NA	177	190	7
7	Linea 1	H_F_D126_P010_S_1_3_NA	177	205	15
8	Linea 1	H_F_D252_P010_S_1_3_NA	177	207	16
9	Linea 1	H_F_D504_P010_S_1_3_NA	177	204	15
10	Linea 1	H_F_D126_P040_S_1_3_NA	177	190	7
11	Linea 1	H_F_D252_P040_S_1_3_NA	177	207	16



WWW.CIGIP.ORG



Logros conseguidos

- ❑ Notable **incremento** de la cuota de producción y **productividad**
- ❑ Muchas **más personas** son ahora **capaces** de participar en el montaje de interruptores
- ❑ Se **acorta** además el tiempo de **aprendizaje**
- ❑ Esto ha llevado a la empresa a **ampliar** las **contratas** y a requerir **nuevo personal**, por lo que en la actualidad se están implementando **nuevas líneas** de montaje **basadas en esta experiencia piloto**
- ❑ También en **otras secciones** se está empezando la implantación de líneas



WWW.CIGIP.ORG



Conclusiones

- ❑ Este esfuerzo ha merecido la pena desde el momento en que se han conseguido simultanear los objetivos complementarios que han sido comentados a lo largo de esta tesis, y que se resumen en:
 - el **respeto** hacia los trabajadores, y sus **limitaciones** y **condicionantes** específicos;
 - la posibilidad de que **personal del CEE** desempeñe **puestos** que antes no podía desempeñar;
 - la **mejora** de la **eficiencia** productiva del CEE;
 - y como consecuencia de ésta última, el **crecimiento** experimentado en el CEE, que está posibilitando en la actualidad la **generación de** un mayor número de puestos de **trabajo** para personas con discapacidades.



WWW.CIGIP.ORG