Optimización de la Asignación Conductores-Viajes en una empresa de transporte: un algoritmo de mejoras basado en un modelo de Programación Lineal Entera

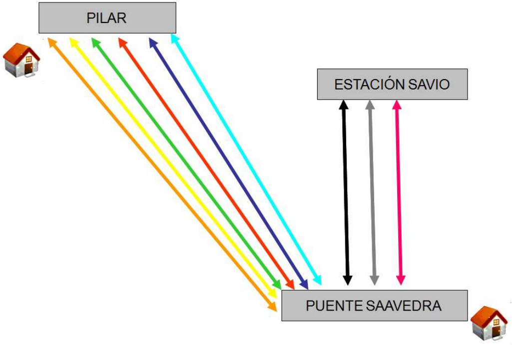
María Eugenia Alvarado[1], Graciela Nasini[1,2], Daniel Severin[1,2]

[1] Universidad Nacional de Rosario [2]CONICET

Septiembre 2013


Ramal Escobar
Matheu
Ingeniero Maschwitz
Maquinista Savio
Benavidez
Rincón de Milberg
Tigre
Villa Rosa
Garín
Manuel Alberti
Ramal Pilar
San Fernando
Victoria
Pilar
Av Sgto Cayetano Beliera
Ricardo Rojas
General Pacheco
San Isidro
El Talar
Tortuguitas
La Lucila
Villa Astolfi
Pdte Derqui
Grand Bourg
Don Torcuato
Panamericana
Martínez
Tortuguitas
Los Polvorines
Boulogne
Olivos
Villa Adelina
José C. Paz
Camino del Buen Ayre
Munro
San Miguel
Villa Ballester
Villa Martelli
Núñez
Cuartel V
Belgrano
Bella Vista
Av Rivadavia
William C. Morris
San Martín
Colegiales
Dr. Luis Leloir
Villa Lynch
Agronomía
Trujui
Hurlingham
3 de Febrero
Villa Devoto
Caseros
Au. Acceso Oeste
Diag. Norte
Parque Leloir
Villa Tesei
Monte Castro
Caballito
Mercedes
Francisco Alvarez
Moreno
Paso del Rey
El Palomar
Ciudadela
Villa Luro
Flores

INTRODUCCIÓN

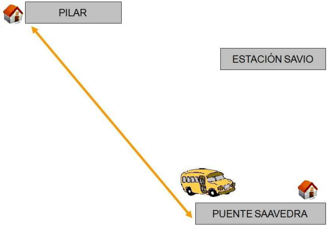


- Aprox. 700 viajes diarios en días de semana, 500 en fin de semana.
- 200 conductores
- 95 coches en dos depósitos

- Originalmente, los conductores cubrían viajes de un único ramal $\longrightarrow$ **ineficiencia**

Ejemplo 1:

- Ramal naranja: duración 3hs (Jornada laboral:**8hs**)

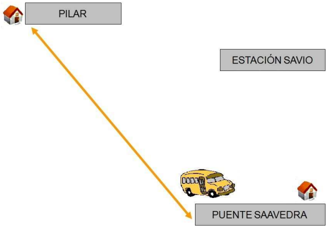


Introducción

- Originalmente, los conductores cubrían viajes de un único ramal $\longrightarrow$ **ineficiencia**

Ejemplo 1:

- Ramal naranja: duración 3hs (Jornada laboral:**8hs**)

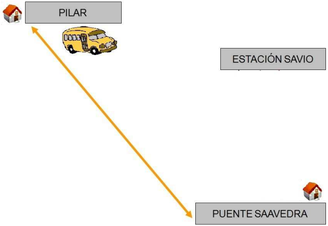


- 2 viajes $\rightarrow$ 6:30hs

- Originalmente, los conductores cubrían viajes de un único ramal $\longrightarrow$ **ineficiencia**

Ejemplo 1:

- Ramal naranja: duración 3hs (Jornada laboral:**8hs**)

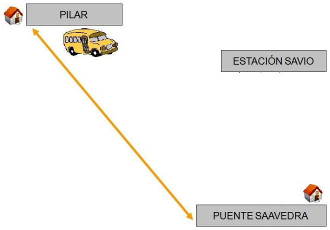


- 2 viajes $\rightarrow$ 6:30hs

- Originalmente, los conductores cubrían viajes de un único ramal $\longrightarrow$ **ineficiencia**

Ejemplo 1:

- Ramal naranja: duración 3hs (Jornada laboral:**8hs**)

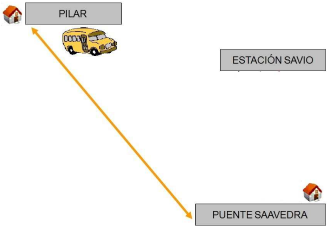


- 2 viajes $\rightarrow$ 6:30hs$\rightarrow$ **horas perdidas**

- Originalmente, los conductores cubrían viajes de un único ramal $\longrightarrow$ **ineficiencia**

Ejemplo 1:

- Ramal naranja: duración 3hs (Jornada laboral:**8hs**)

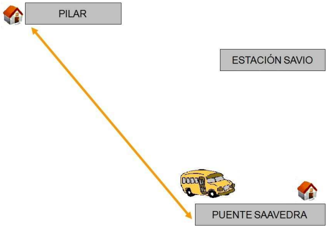


- 2 viajes $\rightarrow$ 6:30hs$\rightarrow$ **horas perdidas**
- 3 viajes $\rightarrow$ 9:45hs

- Originalmente, los conductores cubrían viajes de un único ramal $\longrightarrow$ **ineficiencia**

Ejemplo 1:

- Ramal naranja: duración 3hs (Jornada laboral:**8hs**)



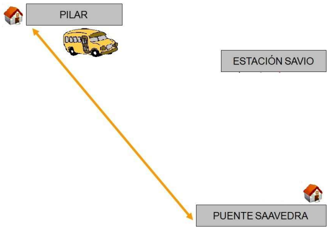
- 2 viajes $\rightarrow$ 6:30hs $\rightarrow$ **horas perdidas**
- 3 viajes $\rightarrow$ 9:45hs

INTRODUCCIÓN

- Originalmente, los conductores cubrían viajes de un único ramal $\longrightarrow$ **ineficiencia**

Ejemplo 1:

- Ramal naranja: duración 3hs (Jornada laboral:**8hs**)

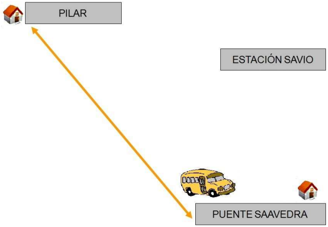


- 2 viajes $\rightarrow$ 6:30hs $\rightarrow$ **horas perdidas**
- 3 viajes $\rightarrow$ 9:45hs

- Originalmente, los conductores cubrían viajes de un único ramal $\longrightarrow$ **ineficiencia**

Ejemplo 1:

- Ramal naranja: duración 3hs (Jornada laboral:**8hs**)

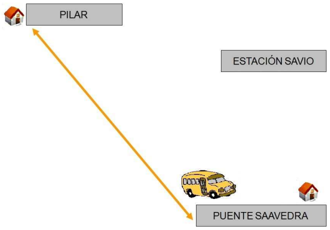


- 2 viajes $\rightarrow$ 6:30hs $\rightarrow$ **horas perdidas**
- 3 viajes $\rightarrow$ 9:45hs

- Originalmente, los conductores cubrían viajes de un único ramal $\longrightarrow$ **ineficiencia**

Ejemplo 1:

- Ramal naranja: duración 3hs (Jornada laboral:**8hs**)

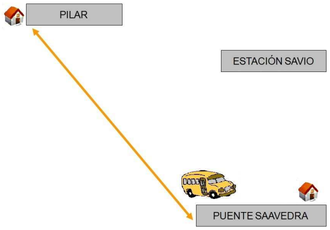


- 2 viajes $\rightarrow$ 6:30hs $\rightarrow$ **horas perdidas**
- 3 viajes $\rightarrow$ 9:45hs $\rightarrow$ **horas extras**

- Originalmente, los conductores cubrían viajes de un único ramal $\longrightarrow$ **ineficiencia**

Ejemplo 1:

- Ramal naranja: duración 3hs (Jornada laboral:**8hs**)

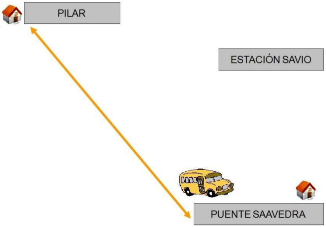


- 2 viajes $\rightarrow$ 6:30hs $\rightarrow$ **horas perdidas**
- 3 viajes $\rightarrow$ 9:45hs $\rightarrow$ **horas extras** y coche **cruzado**

- Originalmente, los conductores cubrían viajes de un único ramal $\longrightarrow$ **ineficiencia**

Ejemplo 1:

- Ramal naranja: duración 3hs (Jornada laboral:**8hs**)



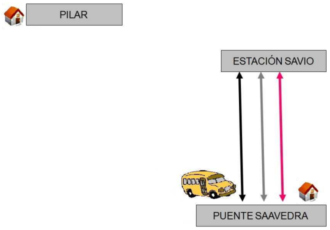
- 2 viajes $\rightarrow$ 6:30hs $\rightarrow$ **horas perdidas**
- 3 viajes $\rightarrow$ 9:45hs $\rightarrow$ **horas extras** y coche **cruzado**

☞ problemas con Mantenimiento.

- Originalmente, los conductores cubrían viajes de un único ramal $\longrightarrow$ **ineficiencia**

Ejemplo 2:

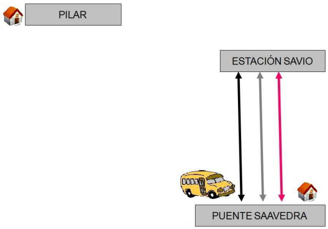
- Ramales Estación Savio-Puente Saavedra:



- Originalmente, los conductores cubrían viajes de un único ramal $\longrightarrow$ **ineficiencia**

Ejemplo 2:

- Ramales Estación Savio-Puente Saavedra:

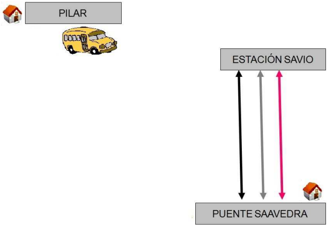


- La capacidad del depósito Puente Saavedra es insuficiente para los coches necesarios para cubrir estos viajes.

- Originalmente, los conductores cubrían viajes de un único ramal $\longrightarrow$ **ineficiencia**

Ejemplo 2:

- Ramales Estación Savio-Puente Saavedra:

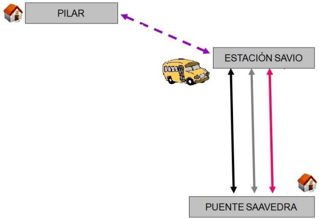


- La capacidad del depósito Puente Saavedra es insuficiente para los coches necesarios para cubrir estos viajes. $\longrightarrow$ Se utilizan coches del depósito Pilar

- Originalmente, los conductores cubrían viajes de un único ramal $\longrightarrow$ **ineficiencia**

Ejemplo 2:

- Ramales Estación Savio-Puente Saavedra:



- La capacidad del depósito Puente Saavedra es insuficiente para los coches necesarios para cubrir estos viajes. $\longrightarrow$ Se utilizan coches del depósito Pilar $\longrightarrow$ **Viajes vacíos**

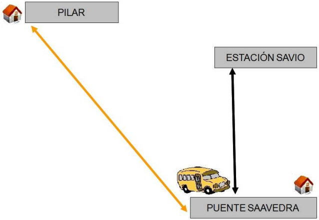
Objetivo de la Empresa

“Combinar viajes de distintos ramales para optimizar en horas extras, viajes vacíos y problemas con Mantenimiento”

Objetivo de la Empresa

"Combinar viajes de distintos ramales para optimizar en horas extras, viajes vacíos y problemas con Mantenimiento"

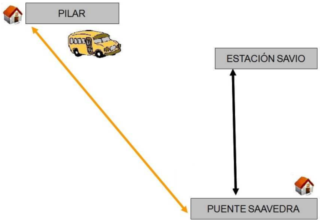
Ejemplo: 2 viajes ramal naranja + 2 viajes ramal negro



OBJETIVO DE LA EMPRESA

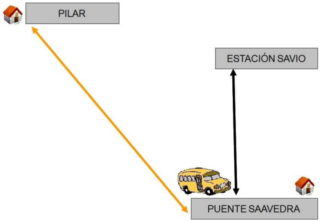
“Combinar viajes de distintos ramales para optimizar en Hs extras, viajes vacíos y problemas con Mantenimiento”

Ejemplo: 2 viajes ramal naranja + 2 viajes ramal negro



“Combinar viajes de distintos ramales para optimizar en Hs extras, viajes vacíos y problemas con Mantenimiento”

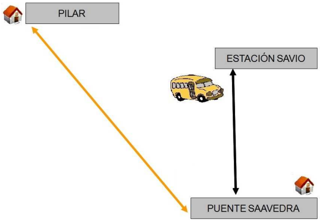
Ejemplo: 2 viajes ramal naranja + 2 viajes ramal negro



Objetivo de la Empresa

“Combinar viajes de distintos ramales para optimizar en Hs extras, viajes vacíos y problemas con Mantenimiento”

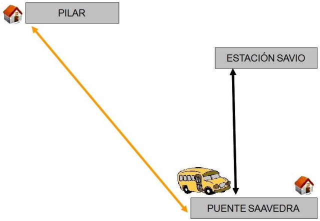
Ejemplo: 2 viajes ramal naranja + 2 viajes ramal negro



Objetivo de la Empresa

“Combinar viajes de distintos ramales para optimizar en Hs extras, viajes vacíos y problemas con Mantenimiento”

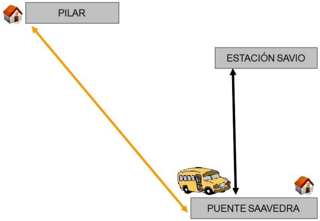
Ejemplo: 2 viajes ramal naranja + 2 viajes ramal negro



Objetivo de la Empresa

"Combinar viajes de distintos ramales para optimizar en Hs extras, viajes vacíos y problemas con Mantenimiento"

Ejemplo: 2 viajes ramal naranja + 2 viajes ramal negro

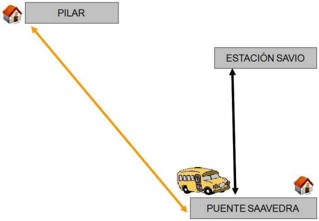


- ☞ duración jornada laboral: 8:15 hs.
- ☞ menos horas extras y sin coche cruzado

Objetivo de la Empresa

“Combinar viajes de distintos ramales para optimizar en Hs extras, viajes vacíos y problemas con Mantenimiento”

Ejemplo: 2 viajes ramal naranja + 2 viajes ramal negro



- ☞ duración jornada laboral: 8:15 hs.
- ☞ menos horas extras y sin coche cruzado

Combinar 700 viajes $\rightarrow$ más de 20000 jornadas posibles

Problema de Asignación Conductores-Viajes

Problema de Asignación Conductores-Viajes

Asignar los 700 viajes a los conductores de forma tal que:

- Las jornadas laborales comiencen y finalicen en el mismo depósito.

Problema de Asignación Conductores-Viajes

Asignar los 700 viajes a los conductores de forma tal que:

- Las jornadas laborales comiencen y finalicen en el mismo depósito.
- Respeten los descansos establecidos por el gremio de conductores.

Problema de Asignación Conductores-Viajes

Asignar los 700 viajes a los conductores de forma tal que:

- Las jornadas laborales comiencen y finalicen en el mismo depósito.
- Respeten los descansos establecidos por el gremio de conductores.
- La duración de la jornada está comprendida entre 6:30 y 9:30 hs.

Asignar los 700 viajes a los conductores de forma tal que:

- Las jornadas laborales comiencen y finalicen en el mismo depósito.
- Respeten los descansos establecidos por el gremio de conductores.
- La duración de la jornada está comprendida entre 6:30 y 9:30 hs.

...y minimizando la cantidad total de horas extras

Asignar los 700 viajes a los conductores de forma tal que:

- Las jornadas laborales comiencen y finalicen en el mismo depósito.
- Respeten los descansos establecidos por el gremio de conductores.
- La duración de la jornada está comprendida entre 6:30 y 9:30 hs.

...y minimizando la cantidad total de horas extras

☞ Problema NP-Difícil

Problema de Asignación Conductores-Viajes

Asignar los 700 viajes a los conductores de forma tal que:

- Las jornadas laborales comiencen y finalicen en el mismo depósito.
- Respeten los descansos establecidos por el gremio de conductores.
- La duración de la jornada está comprendida entre 6:30 y 9:30 hs.

...y minimizando la cantidad total de horas extras

☞ Problema NP-Difícil

Herramientas comerciales ⟶ **IVU.Plan** (ZIB-Berlín)

- 0 $\longleftrightarrow$ Estación Savio
- 1 $\longleftrightarrow$ Puente Saavedra
- 2 $\longleftrightarrow$ Pilar

Conductor 1:

Salida	Duración $d(v)$	$i(v)-f(v)$	Descanso	Descanso mínimo
7:23	79	2–1	31	10
9:13	107	1–2	13	14
11:13	82	2–1	26	10
13:01	108	1–2	–	–

- 0 $\longleftrightarrow$ Estación Savio
- 1 $\longleftrightarrow$ Puente Saavedra
- 2 $\longleftrightarrow$ Pilar

Conductor 1:

Salida	Duración $d(v)$	$i(v)-f(v)$	Descanso	Descanso mínimo
7:23	79	2–1	31	10
9:13	107	1–2	13	14
11:13	82	2–1	26	10
13:01	108	1–2	–	–

☞ No respeta los tiempos de descanso

Conductor 2:

Salida	Duración $d(v)$	$i(v) - f(v)$	Descanso
14:42	83	2–1	26
16:31	88	1–2	21
18:20	123	2–1	16
20:39	84	1–2	–

duración jornada = 7:39 hs. $\rightarrow$ 21 minutos perdidos

Conductor 3:

Salida	Duración $d(v)$	$i(v) - f(v)$	Descanso
14:30	85	2–1	23
16:18	80	1–2	20
17:58	170	2–1	27
21:15	61	1–0	0
22:16	30	0–2	–

duración jornada = 8:40 hs. $\rightarrow$ 40 minutos extras

Conductor 2:

Salida	Duración $d(v)$	$i(v)-f(v)$	Descanso
14:42	83	2–1	26
16:31	88	1–2	21
18:20	123	2–1	16
20:39	84	1–2	–

duración jornada = 7:39 hs. $\rightarrow$ 21 minutos perdidos

Conductor 3:

Salida	Duración $d(v)$	$i(v)-f(v)$	Descanso
14:30	85	2–1	23
16:18	80	1–2	20
17:58	170	2–1	27
21:15	61	1–0	0
22:16	30	0–2	–

duración jornada = 8:40 hs. $\rightarrow$ 40 minutos extras

Conductor 2:

Salida	Duración $d(v)$	$i(v)-f(v)$	Descanso
14:30	85	2–1	36
16:31	88	1–2	21
18:20	123	2–1	16
20:39	84	1–2	–

duración jornada = 7:51 hs. $\rightarrow$ 9 minutos perdidos

Conductor 3:

Salida	Duración $d(v)$	$i(v)-f(v)$	Descanso
14:42	83	2–1	13
16:18	80	1–2	20
17:58	170	2–1	27
21:15	61	1–0	0
22:16	30	0–2	–

duración jornada = 8:28 hs. $\rightarrow$ 28 minutos extras ☺

Un día de trabajo:

	Solución de IVU.Plan	Solución de la empresa
Jornadas infactibles	10	8
Minutos extras	1869	1827

- 2 jornadas infactibles menos
- 42 minutos extras menos

Teoría de Grafos + PLE

$\downarrow$

Mejorar la performance de la estrategia actual de la empresa

Teoría de Grafos + PLE
$\downarrow$
Mejorar la performance de la estrategia actual de la empresa

1er Tarea$\longrightarrow$ Obtener un modelo de PLE que considere todos los convenios particulares con los trabajadores de la empresa y optimice la cantidad de horas extras.

Convenio de descansos en Estación Savio (0)

- Si viene de (1) $\rightarrow$ descansa en (0) cualquier valor entre 5 y 35 minutos. Cuando vuelve hacia (1) debe descansar al menos 10 minutos.
- Si viene de (2) $\rightarrow$ no descansa en 0 y descansa en (1) lo correspondiente a los dos viajes (2–0 + 0–1)

	Salida	Duración $d(v)$	$i(v) - f(v)$	Desc.Mín	Desc.Máx
h	21:15	61	1-0		
i	22:45	60	0-1		

CONVENIO DE DESCANSOS EN ESTACIÓN SAVIO (0)

- Si viene de (1) $\rightarrow$ descansa en (0) cualquier valor entre 5 y 35 minutos. Cuando vuelve hacia (1) debe descansar al menos 10 minutos.
- Si viene de (2) $\rightarrow$ no descansa en 0 y descansa en (1) lo correspondiente a los dos viajes (2–0 + 0–1)

	Salida	Duración $d(v)$	$i(v) - f(v)$	Desc.Mín	Desc.Máx
h	21:15	61	1-0	0 ó 5	35
i	22:45	60	0-1	$max\left\{10, \frac{8}{60} \times d(i)\right\}$	45

Convenio de descansos en Estación Savio (0)

- Si viene de (1) $\rightarrow$ descansa en (0) cualquier valor entre 5 y 35 minutos. Cuando vuelve hacia (1) debe descansar al menos 10 minutos.
- Si viene de (2) $\rightarrow$ no descansa en 0 y descansa en (1) lo correspondiente a los dos viajes (2–0 + 0–1)

	Salida	Duración $d(v)$	$i(v) - f(v)$	Desc.Mín	Desc.Máx
h	21:15	61	1-0	0 ó 5	35
i	22:45	60	0-1	$max\left\{10, \frac{8}{60} \times d(i)\right\}$	45
i’	22:15	90	2-1	12	45

Solución: por cada viaje de 0–1 $\longrightarrow$ Se crea un viaje mellizo 2–1.

- Si viene de (1) $\rightarrow$ descansa en (0) cualquier valor entre 5 y 35 minutos. Cuando vuelve hacia (1) debe descansar al menos 10 minutos.
- Si viene de (2) $\rightarrow$ no descansa en 0 y descansa en (1) lo correspondiente a los dos viajes (2–0 + 0–1)

	Salida	Duración $d(v)$	$i(v)-f(v)$	Desc.Mín	Desc.Máx
h	21:15	61	1-0	0 ó 5	35
i	22:45	60	0-1	$max\left\{10, \frac{8}{60} \times d(i)\right\}$	45
i'	22:15	90	2-1	12	45

Solución: por cada viaje de 0–1 $\longrightarrow$ Se crea un viaje mellizo 2–1.

Observacion: entre i e i', solo debe cubrirse uno de los dos

$$V = \{\textbf{Viajes a cubrir}\} \quad \text{y} \quad K = \{\textbf{Conductores}\}$$

$$V = \{\textbf{Viajes a cubrir}\} \quad \text{y} \quad K = \{\textbf{Conductores}\}$$

Variables de asignación:

$$x(k,v) = \begin{cases} 1 & \text{si el conductor } k \text{ toma el viaje } v \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

$$V = \{\textbf{Viajes a cubrir}\} \quad \text{y} \quad K = \{\textbf{Conductores}\}$$

Variables de asignación:

$$x(k,v) = \begin{cases} 1 & \text{si el conductor } k \text{ toma el viaje } v \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

Restricciones: “Todo viaje de V debe ser cubierto por algún conductor”

$$\sum_{k \in K} x(k,v) = 1, \qquad \forall v \in V,\ i(v) \neq 0. \tag{1}$$

$$\sum_{k \in K} [x(k,v) + x(k,v')] = 1, \qquad \forall v \in V,\ i(v) = 0. \tag{2}$$

$$V = \{\textbf{Viajes a cubrir}\} \quad \text{y} \quad K = \{\textbf{Conductores}\}$$

Variables de asignación:

$$x(k,v) = \begin{cases} 1 & \text{si el conductor } k \text{ toma el viaje } v \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

Restricciones: "Todo viaje de V debe ser cubierto por algún conductor"

$$\sum_{k \in K} x(k,v) = 1, \qquad \forall v \in V,\ i(v) \neq 0. \tag{1}$$

$$\sum_{k \in K} [x(k,v) + x(k,v')] = 1, \qquad \forall v \in V,\ i(v) = 0. \tag{2}$$

"Si los viajes u y v no pueden ser asignados al mismo conductor

$$x(k,u) + x(k,v) \leq 1,\ \forall k \in K\text{''}.$$

Digrafo compatibilidad

¿ Cómo determinamos los pares de viajes *uv* que no pueden ser asignados a un mismo conductor?

Digrafo compatibilidad

¿ Cómo determinamos los pares de viajes uv que no pueden ser asignados a un mismo conductor? $\longrightarrow$ digrafo de compatibilidad

¿ Cómo determinamos los pares de viajes uv que no pueden ser asignados a un mismo conductor? $\longrightarrow$ digrafo de compatibilidad
Ejemplo:

	Salida	Duración $d(v)$	$i(v)-f(v)$	Desc.Mín	Desc.Máx
a	14:30	85	2-1	11	45
b	14:42	83	2-1	11	45
c	16:18	80	1-2	10	45
d	16:31	88	1-2	11	45
e	17:58	170	2-1	22	45
f	18:20	123	2-1	16	45
g	20:39	84	1-2	11	45
h	21:15	61	1-0	0 ó 5	35

¿ Cómo determinamos los pares de viajes *uv* que no pueden ser asignados a un mismo conductor? $\longrightarrow$ digrafo de compatibilidad

Ejemplo:

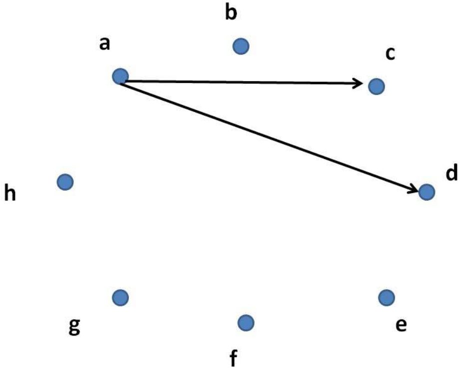
	Salida	Duración $d(v)$	$i(v) - f(v)$	Desc.Mín	Desc.Máx
a	14:30	85	2-1	11	45
b	14:42	83	2-1	11	45
c	16:18	80	1-2	10	45
d	16:31	88	1-2	11	45
e	17:58	170	2-1	22	45
f	18:20	123	2-1	16	45
g	20:39	84	1-2	11	45
h	21:15	61	1-0	0 ó 5	35

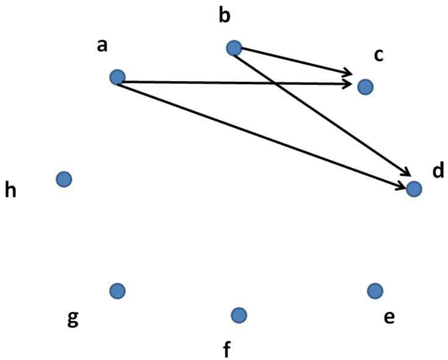
$a \rightarrow$ Llega a 1 a las 15:55 $\longrightarrow$ buscamos un v que salga de 1 entre las 16:06 y 16:40

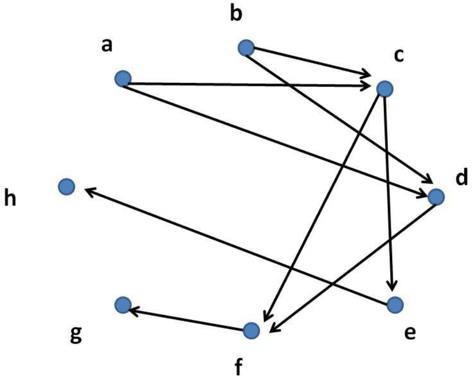
¿ Cómo determinamos los pares de viajes uv que no pueden ser asignados a un mismo conductor? $\longrightarrow$ digrafo de compatibilidad
Ejemplo:

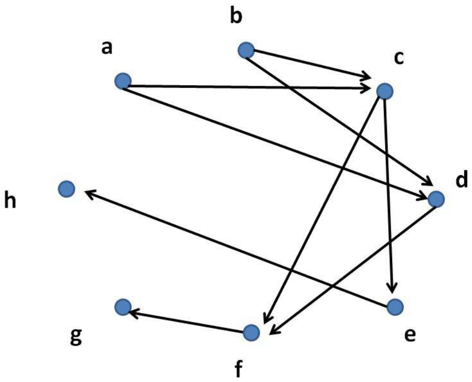
	Salida	Duración $d(v)$	$i(v)-f(v)$	Desc.Mín	Desc.Máx
a	14:30	85	2-1	11	45
b	14:42	83	2-1	11	45
c	16:18	80	1-2	10	45
d	16:31	88	1-2	11	45
e	17:58	170	2-1	22	45
f	18:20	123	2-1	16	45
g	20:39	84	1-2	11	45
h	21:15	61	1-0	0 ó 5	35

$a \rightarrow$ Llega a 1 a las 15:55 $\longrightarrow$ buscamos un v que salga de 1 entre las 16:06 y 16:40 $\rightarrow$ c ó d

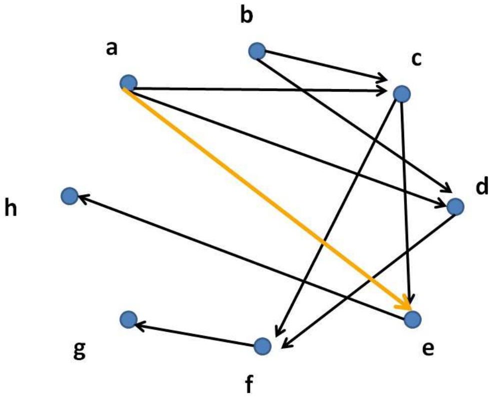

b
a
c
d
h
g
f
e


a
b
c
d
e
f
g
h


a
b
c
d
e
f
g
h



$(u, v) \in A$ si el viaje v puede ser tomado inmediatamente después del viaje u



$(u,v) \in A$ si el viaje v puede ser tomado inmediatamente después del viaje u
Observación:
Los viajes a y e pueden ser asignados a un mismo conductor aunque $(a,e) \notin A$

$A^{+} = \{(u,v) : \ u \text{ y } v \text{ pueden estar en una misma jornada laboral}\}$

$A^+ = \{(u,v): \; u$ y v pueden estar en una misma jornada laboral$\}$

- existe un uv-camino en D
- $T(u,v)$: Tiempo mínimo necesario para realizar u y v en la misma jornada laboral $\longrightarrow T(u,v) \leq 9:30hs$ (570 minutos).

$A^+ = \{(u,v):\ u \text{ y } v \text{ pueden estar en una misma jornada laboral}\}$

- existe un uv-camino en D
- $T(u,v)$: Tiempo mínimo necesario para realizar u y v en la misma jornada laboral $\longrightarrow T(u,v) \leq 9:30hs$ (570 minutos).

Restricciones de compatibilidad:

Si u y v no pueden estar en la misma jornada laboral $\rightarrow (u,v) \notin A^+$.

$$x(k,u) + x(k,v) \leq 1,\ \forall k \in K \quad \forall (u,v):\ (u,v) \notin A^+ \quad \wedge \quad (v,u) \notin A^+. \qquad (3)$$

$A^+ = \{(u,v): \ u \text{ y } v \text{ pueden estar en una misma jornada laboral}\}$

- existe un uv-camino en D
- $T(u,v)$: Tiempo mínimo necesario para realizar u y v en la misma jornada laboral $\longrightarrow T(u,v) \leq 9:30hs$ (570 minutos).

Restricciones de compatibilidad:
Si u y v no pueden estar en la misma jornada laboral $\rightarrow (u,v) \notin A^+$.

$$x(k,u) + x(k,v) \leq 1, \ \forall k \in K \quad \forall (u,v): \ (u,v) \notin A^+ \ \wedge \ (v,u) \notin A^+. \tag{3}$$

Observación:
Dado $(u,v) \in A^+ \setminus A$, la restricción anterior no evita que se asigne a un conductor el viaje v inmediatamente después de u.

$A^+ = \{(u,v): \; u \text{ y } v \text{ pueden estar en una misma jornada laboral}\}$

- existe un *uv*-camino en D
- $T(u,v)$: Tiempo mínimo necesario para realizar u y v en la misma jornada laboral $\longrightarrow T(u,v) \leq 9:30hs$ (570 minutos).

Restricciones de compatibilidad:
Si u y v no pueden estar en la misma jornada laboral $\rightarrow (u,v) \notin A^+$.

$$x(k,u) + x(k,v) \leq 1, \; \forall k \in K \quad \forall (u,v): \; (u,v) \notin A^+ \;\; \wedge \;\; (v,u) \notin A^+. \tag{3}$$

Observación:
Dado $(u,v) \in A^+ \setminus A$, la restricción anterior no evita que se asigne a un conductor el viaje v inmediatamente después de u.

$$\sum_{w \in \delta_A^+(u)} x(k,w) \geq x(k,u) + x(k,v) - 1, \; \forall k \in K \; \forall (u,v) \in A^+ \setminus A, \tag{4}$$

$$\sum_{w \in \delta_A^-(v)} x(k,w) \geq x(k,u) + x(k,v) - 1, \; \forall k \in K \; \forall (u,v) \in A^+ \setminus A. \tag{5}$$

Restricciones por convenios respecto a la jornada laboral

Convenios:

- No puede haber jornadas de una vuelta.
- La duración total debe ser mayor a 390 minutos y menor a 570 minutos.
- Comienza y finaliza en el mismo depósito.

Convenios:

- No puede haber jornadas de una vuelta.
- La duración total debe ser mayor a 390 minutos y menor a 570 minutos.
- Comienza y finaliza en el mismo depósito.

$$J = \{(u,v) \in A^+ : u \text{ y } v \text{ son posibles primer y último viaje de un conductor}\}$$

Convenios:

- No puede haber jornadas de una vuelta.
- La duración total debe ser mayor a 390 minutos y menor a 570 minutos.
- Comienza y finaliza en el mismo depósito.

$$J = \{(u,v) \in A^+ : u \text{ y } v \text{ son posibles primer y último viaje de un conductor}\}$$

"Si $(u,v) \notin J$ ningún conductor podrá tener asignado a u como primer viaje y a v como último viaje"

$$[x(k,u)+x(k,v)] - \left[\sum_{w\in\delta^-_{A^+}(u)} x(k,w) + \sum_{w\in\delta^+_{A^+}(v)} x(k,w)\right] \leq 1,$$
$$\forall k \in K\ \forall (u,v) \in A^+ \setminus J \quad (6)$$

Función objetivo

“Minimizar las horas extras”

$T(u,v)$: Tiempo mín. necesario para tomar u y v en la misma jornada laboral

$$P = \{(u,v) \in J : T(u,v) \geq 480 \text{ minutos}\}$$

"Minimizar las horas extras"

$T(u,v)$: Tiempo mín. necesario para tomar u y v en la misma jornada laboral

$$P = \{(u,v) \in J : T(u,v) \geq 480 \text{ minutos}\}$$

Dada una asignación $x \in \{0,1\}^{|K|\times|V|}$, definimos nuevas variables:

$$y(u,v) = \begin{cases} 1 & \text{si } u \text{ es el primer viaje que toma un conductor } k \text{ y } v \text{ el último.} \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

"Minimizar las horas extras"

$T(u,v)$: Tiempo mín. necesario para tomar u y v en la misma jornada laboral

$$P = \{(u,v) \in J : T(u,v) \geq 480 \text{ minutos}\}$$

Dada una asignación $x \in \{0,1\}^{|K|\times|V|}$, definimos nuevas variables:

$$y(u,v) = \begin{cases} 1 & \text{si } u \text{ es el primer viaje que toma un conductor } k \text{ y } v \text{ el último.} \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

$$min \sum_{(u,v)\in P} (T(u,v) - 480) y(u,v)$$

"Minimizar las horas extras"

$T(u,v)$: Tiempo mín. necesario para tomar u y v en la misma jornada laboral

$$P = \{(u,v) \in J : T(u,v) \geq 480 \text{ minutos}\}$$

Dada una asignación $x \in \{0,1\}^{|K|\times|V|}$, definimos nuevas variables:

$$y(u,v) = \begin{cases} 1 & \text{si } u \text{ es el primer viaje que toma un conductor } k \text{ y } v \text{ el último.} \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

$$min \sum_{(u,v)\in P} (T(u,v) - 480) y(u,v)$$

¿Cómo modelamos el comportamiento de y ?

"Minimizar las horas extras"

$T(u,v)$: Tiempo mín. necesario para tomar u y v en la misma jornada laboral

$$P = \{(u,v) \in J : T(u,v) \geq 480 \text{ minutos}\}$$

Dada una asignación $x \in \{0,1\}^{|K|\times|V|}$, definimos nuevas variables:

$$y(u,v) = \begin{cases} 1 & \text{si } u \text{ es el primer viaje que toma un conductor } k \text{ y } v \text{ el último.} \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

$$min \sum_{(u,v)\in P} (T(u,v) - 480) y(u,v)$$

¿Cómo modelamos el comportamiento de y ?

$$y(u,v) \geq x(k,u) + x(k,v) - 1 - \sum_{w \in \delta^-_{A^+}(u)} x(k,w) - \sum_{w \in \delta^+_{A^+}(v)} x(k,w),$$

$$\forall k \in K \;\; \forall (u,v) \in P$$

Modelo para el PACV:

$$\text{minimizar} \sum_{(u,v)\in P} (T(u,v)-480)y(u,v)$$

sujeto a

$$\sum_{k\in K} x(k,v) = 1, \qquad \forall v\in V, i(v)\neq 0$$

$$\sum_{k\in K} [x(k,v)+x(k,v')] = 1, \qquad \forall v\in V, i(v) = 0$$

$$x(k,u)+x(k,v)\leq 1, \qquad \forall k\in K,\ \forall (u,v) : (u,v)\notin A^+ \wedge (v,u)\notin A^+$$

$$\sum_{w\in\delta_A^+(u)} x(k,w) \geq x(k,u)+x(k,v)-1, \qquad \forall k\in K,\ \forall (u,v)\in A^+\setminus A$$

$$\sum_{w\in\delta_A^-(v)} x(k,w) \geq x(k,u)+x(k,v)-1, \qquad \forall k\in K,\ \forall (u,v)\in A^+\setminus A$$

$$x(k,u)-\sum_{w\in\delta_{A^+}^-(u)} x(k,w)+x(k,v)-\sum_{w\in\delta_{A^+}^+(v)} x(k,w)\leq 1, \qquad \forall k\in K,\ \forall (u,v)\in A^+\setminus J$$

$$y(u,v)\geq x(k,u)-\sum_{w\in\delta_{A^+}^-(u)} x(k,w)+x(k,v)-\sum_{w\in\delta_{A^+}^+(v)} x(k,w)-1,\ \ \forall k\in K,\ \forall (u,v)\in P$$

$$x(k,v)\in\{0,1\}, \qquad \forall v\in V,\ \forall k\in K$$

$$y(u,v)\in\{0,1\}, \qquad \forall (u,v)\in P.$$

- Instancia real de la empresa para un día Domingo: 484 viajes y 118 conductores.
  - Digrafo $D \longrightarrow$ 563 vértices, 5.208 arcos.
  - Digrafo $D^+ \longrightarrow$ 44.712 arcos.
  - Variables binarias: 76.251
  - Restricciones: **más de 13 millones**

☞ CPLEX no resuelve la relajación lineal.

- Instancia real de la empresa para un día Domingo: 484 viajes y 118 conductores.
    - Digrafo $D \longrightarrow$ 563 vértices, 5.208 arcos.
    - Digrafo $D^{+} \longrightarrow$ 44.712 arcos.
    - Variables binarias: 76.251
    - Restricciones: **más de 13 millones**

  ☞ CPLEX no resuelve la relajación lineal.

- Instancias con viajes correspondientes a 2 o 3 jornadas laborales son resueltas en menos de un segundo.

OPT-2:

Dada una asignación conductores-viaje:

- Ordenar todas las jornadas (factibles o no) de mayor a menor duración.
- Resolver el PLE sobre el conjunto de viajes correspondiente a los asignados a la peor jornada y otra jornada *mejor* (recorriendo la lista de jornadas de menor a mayor duración).
- Si la solución del PLE *mejora* ambas jornadas, sacar de la lista la nueva jornada de mayor duración.
- Caso contrario, sacar de la lista la jornada de mayor duración original

474 viajes - 118 conductores

Solución de IVU.plan
8 jornadas infactibles
1863 minutos extras

484 viajes - 118 conductores

Solución de la empresa
8 jornadas infactibles
1827 minutos extras

OPT–2 (24 min.)

4 jornadas infactible
1687 minutos extras

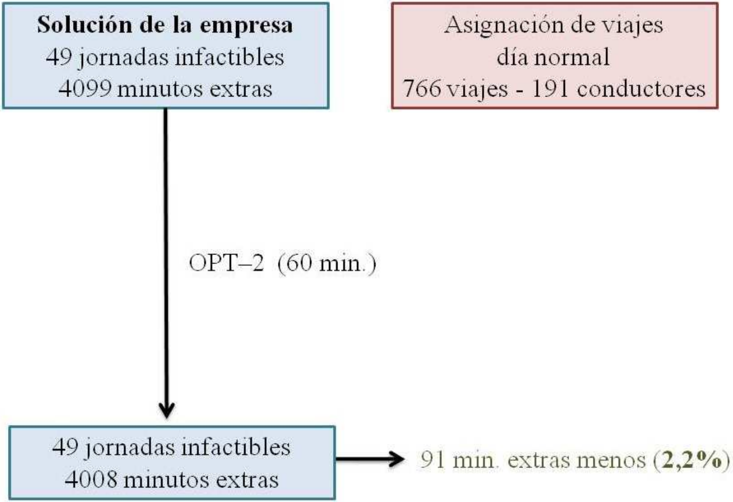
176 min. extras menos (**9,5%**)

(comparado con la solución de la empresa son 140 min. menos, es decir **7,7%** de mejora)

CONCLUSIONES

- Desarrollamos un modelo de PLE que contempla todos los convenios específicos con los trabajadores de la empresa que no son implementables en IVU.Plan.
- Basados en el modelo, diseñamos un algoritmo de mejora para disminuir las infactibilidades y la cantidad de horas extras de una asignación Conductores-Viajes dada por IVU.Plan.
- Las pruebas sobre los viajes correspondientes a los fines de semana permitieron disminuir horas extras que, en un mes, equivalen económicamente a 2 sueldos de conductores.
- Las mejoras obtenidas superan en un 7.7% de hs. extras a lo obtenido con la actual metodología de la empresa.
- Respecto a las jornadas infactibles, la mejora es de 5 jornadas.
- Las mejoras se obtienen en menos de media hora mientras que la actual metodología de la empresa requiere de un día de trabajo completo de dos empleados.

Y AHORA... SOBRE LOS DÍAS DE SEMANA



TRABAJOS A FUTURO

- Evaluar la mejora que produce nuestro algoritmo sobre la solución brindada por IVU para los días de semana.

TRABAJOS A FUTURO

- Evaluar la mejora que produce nuestro algoritmo sobre la solución brindada por IVU para los días de semana.
- Evaluar nuevas reglas de "optimización local" que nos permitan mejorar la performance de nuestro algoritmo.
- Incorporar a la función objetivo:
    - "costo-beneficio" de los viajes vacíos,

TRABAJOS A FUTURO

- Evaluar la mejora que produce nuestro algoritmo sobre la solución brindada por IVU para los días de semana.
- Evaluar nuevas reglas de "optimización local" que nos permitan mejorar la performance de nuestro algoritmo.
- Incorporar a la función objetivo:
    - "costo-beneficio" de los viajes vacíos,
    - costo de la "infactibilidad".

Trabajos a futuro

- Evaluar la mejora que produce nuestro algoritmo sobre la solución brindada por IVU para los días de semana.
- Evaluar nuevas reglas de "optimización local" que nos permitan mejorar la performance de nuestro algoritmo.
- Incorporar a la función objetivo:
  - "costo-beneficio" de los viajes vacíos,
  - costo de la "infactibilidad".
- Diseñar, en base a este algoritmo, una herramienta "amigable" que permita ser operada por el personal administrativo de la empresa.

¡ Gracias !