



**Universidad de  
Concepción  
Chile**

# **PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCION EN FUNDICIONES DE COBRE**

Lorena Pradenas (lpradena@udec.cl), DII-UDEC  
Víctor Parada (victor.parada@usach.cl), DIINF-USACH

6° SAT, Calama-Chile, Julio de 2012

# Contenidos

1. Introducción

2. Programando operaciones de F-C

4. Resultados

3. Programando operaciones de R-M

4. Resultados

5. Conclusiones

# Introducción

Optimización de recursos (equipos, personas, etc.)

Optimización combinatoria (problemas reales)

Programación de la producción

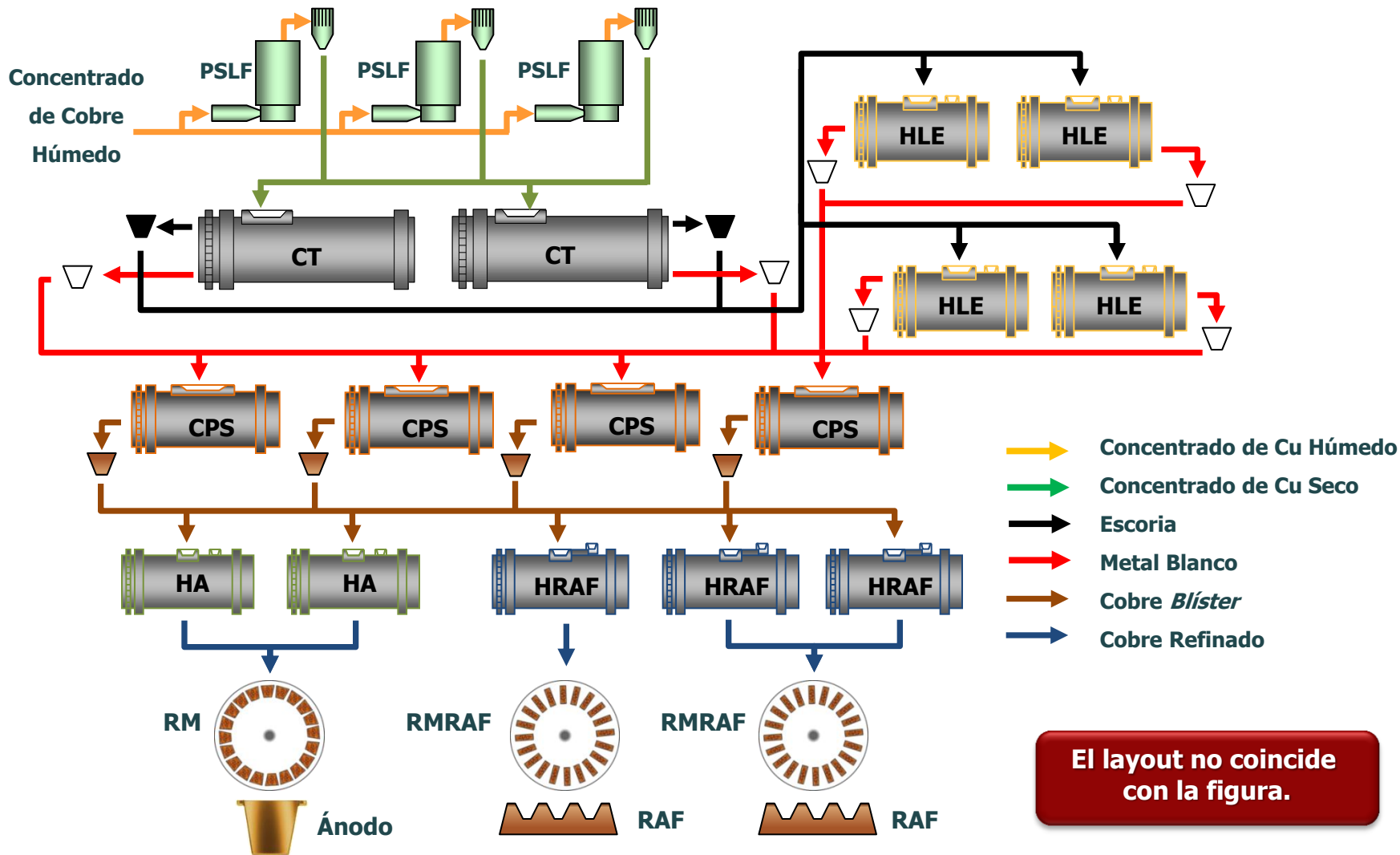
## Metodología

**Estudiar , modelar y diseñar métodos eficientes de solución para el problema de optimización .**

**Implementar computacionalmente métodos de solución sobre un conjunto de instancias de prueba.**

**Resultados en un formato apropiado para el usuario.**

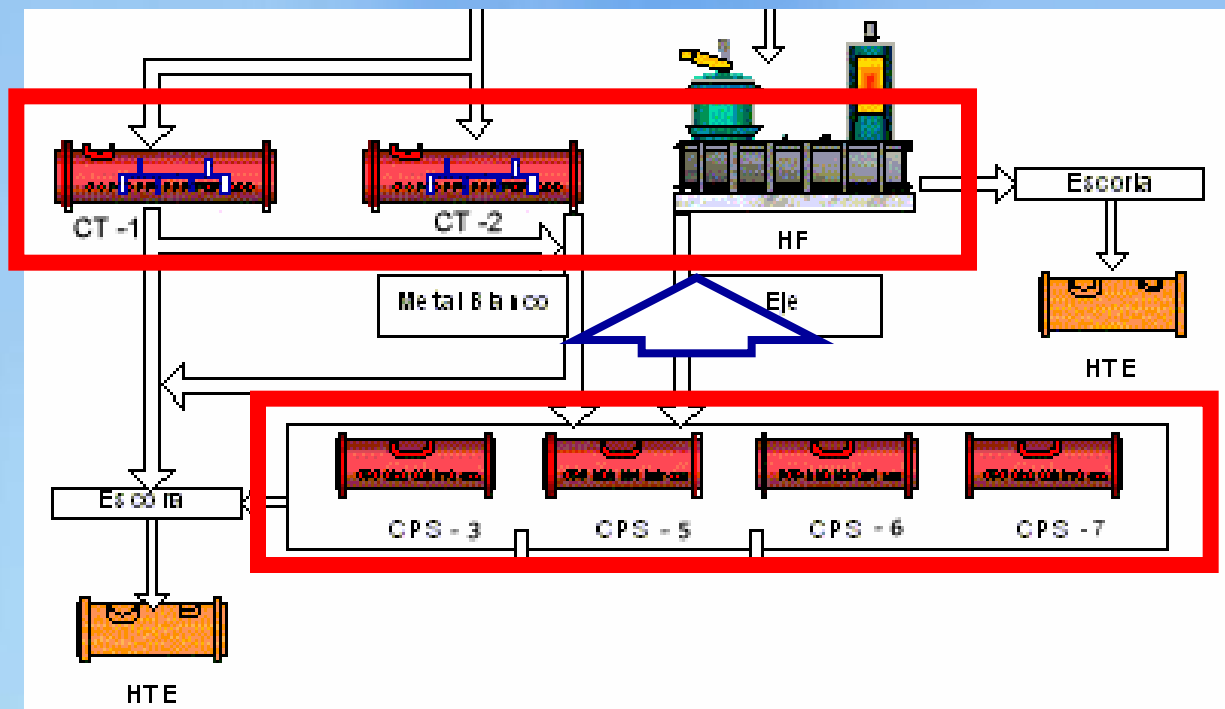
# Programando equipos



El layout no coincide con la figura.

## Programando operaciones de F-C

- Optimización de ciclos en los CPS
- Aproximación de maquinas paralelas (Cada ciclo es un trabajo)



# Programando operaciones de F-C

## Objective function and constraints



**Objective function**

◆ Maximize daily production .

**Constraints**

- Operation Constraints .
- Environmental Constraints.
- Metallurgic Constraints .
- Loading and Unloading Constraints .
- Mass-balance Constraints .
- Initial Situation Constraints.



1) First, divide the planning horizon in “D” discrete time periods. (For 1 day of planning D=144 periods)

| Decision Variables | Mean   |
|--------------------|--|
| $x_{ijk}$          | 1: If a cycle of type $k$ is initiated on PSC $j$ during period $i$ .<br>0: Otherwise. |
| $v_i$              | 1: If a ladle from FF is available during period $i$ .<br>0: Otherwise.                |
| $w_i$              | 1: If a ladle from TC is available during period $i$ .<br>0: Otherwise.                |
| $y_{ij}$           | 1: If a ladle from FF is input in PSC $j$ during period $i$ .<br>0: Otherwise. (2.1)   |
| $z_{ij}$           | 1: If a ladle from TC is input in PSC $j$ during period $i$ .<br>0: Otherwise.         |

(1)

$$\text{Max } z = \sum_{i=1}^D T_{EJE} v_i + \sum_{i=1}^D T_{MB} w_i$$



**Capacity's Constraints of FF and TC** respectively ( in tons of concentrated Copper).

$$(2) \quad \sum_{i=1}^D T_{MB} w_i \leq C_{CT}$$

$$(3) \quad \sum_{i=1}^D T_{EJE} v_i \leq C_{HF}$$

(2.8)

**Mass Balance's Constraints between output of FF (and TC) and input to PSC**

$$(4) \quad \sum_{j=1}^3 y_{ij} = v_i, \quad \forall i = 1, 2, \dots, D$$

$$(5) \quad \sum_{j=1}^3 z_{ij} = w_i, \quad \forall i = 1, 2, \dots, D$$

**Homogeneous quantity of ladle's Constraints**, produced in any interval of time to  $T_H$  from FF (and TC).

$$(6) \quad V_{MIN} \leq \sum_{i=\rho}^{\rho+T_H} v_i \leq V_{MAX}, \quad \forall \rho = 1, 2, \dots, D - T_H$$

$$(7) \quad W_{MIN} \leq \sum_{i=\rho}^{\rho+T_H} w_i \leq W_{MAX}, \quad \forall \rho = 1, 2, \dots, D - T_H$$

**Unloading Constrains.** In the unloading configuration, there cannot be two simultaneous ladles unloading the FF or the TC. In fact, at least  $T_V$  periods in FF and  $T_W$  in TC between two consecutive unloading are necessary.

$$(8) \quad \sum_{j=i}^{i+T_v-1} v_j \leq 1, \quad \forall i = 1, \dots, D - T_v + 1$$

$$(9) \quad \sum_{j=i}^{i+T_w-1} w_j \leq 1, \quad \forall i = 1, \dots, D - T_w + 1$$





Are Between Shift's Constrains: Unloading from FF and TC is not allowed during the last 2 periods of a shift and the first a periods of a shift. Assume 3 shifts daily, of an extension of 48 time periods each one.

(10)

$$v_1 + v_2 + v_{47} + v_{48} + v_{49} + v_{50} + v_{95} + v_{96} + v_{97} + v_{98} + v_{143} + v_{144} = 0$$

(11)

$$w_1 + w_2 + w_{47} + w_{48} + w_{49} + w_{50} + w_{95} + w_{96} + w_{97} + w_{98} + w_{143} + w_{144} = 0$$

Are Sulfur Dioxide (SO<sub>2</sub>) emission's constrains Of the three operative PSC, at most two PSC can perform the blowing operation at the same time

$$\sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^3 \sum_{t=\tau-D^k+1}^{\tau} x_{tjk} \leq 2 \quad \forall \tau \in [D^k, D] \quad (12)$$

Never more than one cycle of any type in progress at any time on any PSC

$$\sum_{k=1}^3 \sum_{t=\tau-D^k+1}^{\tau} x_{tjk} \leq 1 \quad \forall j = 1, 2, 3 \quad \forall \tau \in [D^k, D] \quad (13)$$



**Operation Constrains:** 4 ladles from FF must be input in PSC  $j$  since the end of previous cycle (including setup time for drained emptying and cleaning) before a new cycle is initiated.

$$x_{ijk} \leq \sum_{\nu} \sum_{\bar{k}=1}^3 \left[ \frac{\sum_{t=\nu+ST+D_2^{\bar{k}}+D_1^{\bar{k}}-1}^{i-1} y_{tj}}{4} \right] x_{\nu j \bar{k}} \quad (14)$$

(2.17)

**Operation Constrains:** All ladles from TC must be input after the slay blowing period but at least 12 periods (120 min) before the end of the copper blowing.

**Operation's Constrains:** All ladles from FF must be input at least 3 periods before the end of the slay blowing (before the end of the part of cycle where ladles from FF are processed)

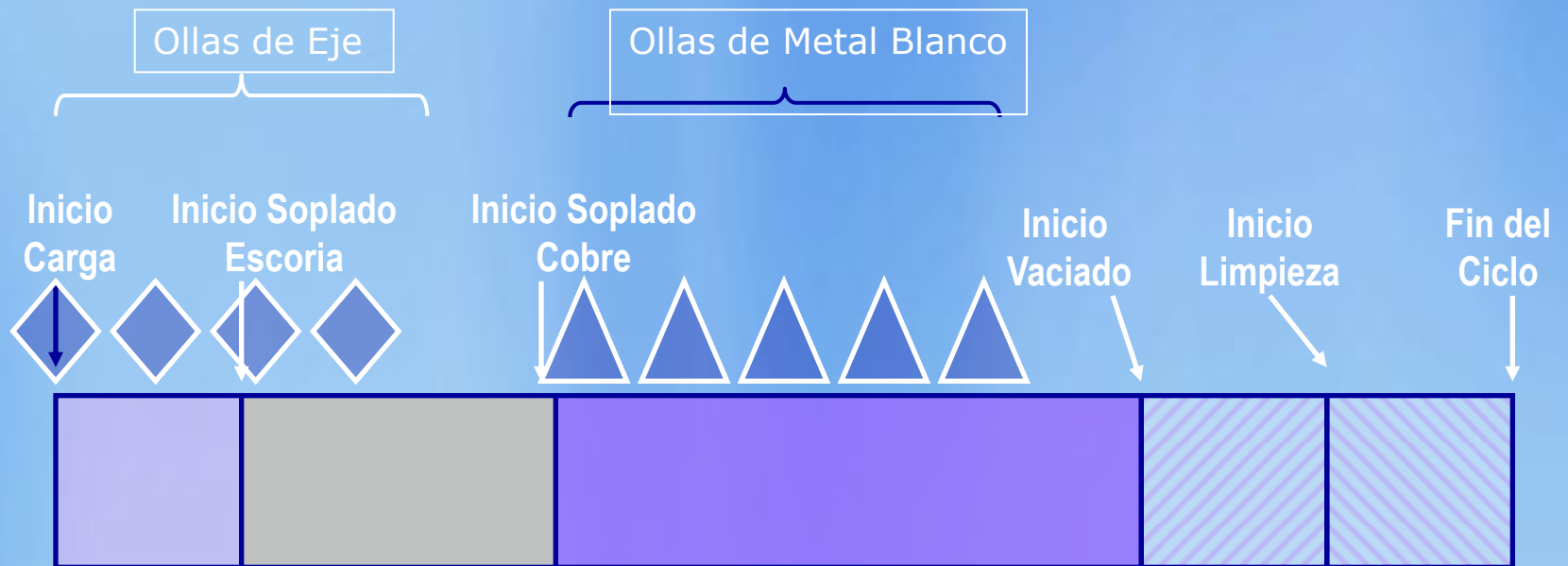
$$x_{ijk} \leq \sum_{\nu} \sum_{\bar{k}=1}^3 \left[ \frac{\sum_{t=\nu+ST+D_2^{\bar{k}}+D_1^{\bar{k}}-1}^{i+(D_1^{\bar{k}}-1)-3} y_{tj}}{k_1} \right] x_{\nu j \bar{k}} \quad (15)$$

$$x_{ijk} \leq \sum_{\nu} \sum_{\bar{k}=1}^3 \left[ \frac{k_1}{\sum_{t=\nu+ST+D_2^{\bar{k}}+D_1^{\bar{k}}-1}^{i+(D_1^{\bar{k}}-1)-3} y_{tj}} \right] x_{\nu j \bar{k}} \quad (16)$$

$$x_{ijk} \leq \sum_{\nu} \sum_{\bar{k}=1}^3 \left[ \frac{\sum_{t=i+D_1^{\bar{k}}}^{i+D_1^{\bar{k}}+(D_2^{\bar{k}}-1)-12} z_{tj}}{k_2} \right] x_{\nu j \bar{k}} \quad (17)$$

$$x_{ijk} \leq \sum_{\nu} \sum_{\bar{k}=1}^3 \left[ \frac{k_2}{\sum_{t=i+D_1^{\bar{k}}}^{i+D_1^{\bar{k}}+(D_2^{\bar{k}}-1)-12} z_{tj}} \right] x_{\nu j \bar{k}} \quad (18)$$

# Representación de solución



Un "Ciclo" es una combinación de Ollas de Eje y Metal Blanco en un CPS (9 ollas en total)



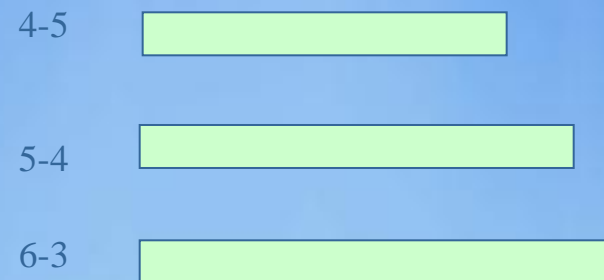
# Esquema de Búsqueda de Soluciones.



5AM

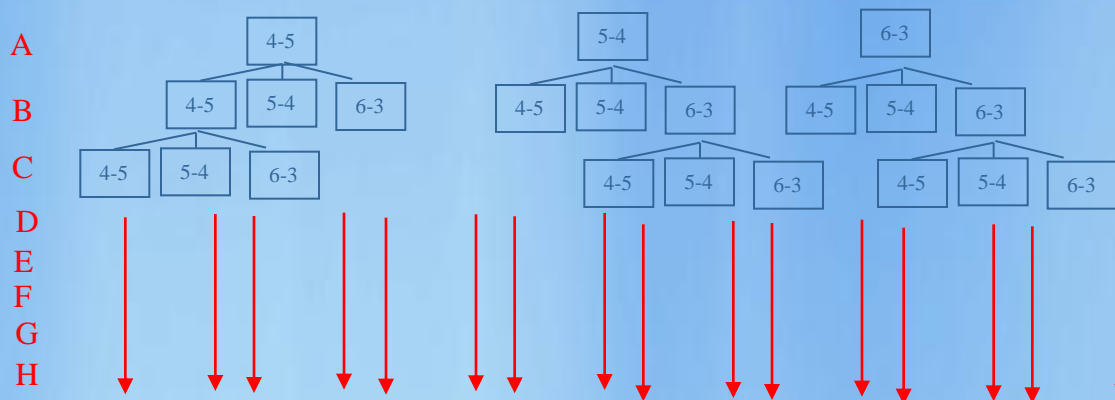
5AM

Ciclos Estándar Disponibles:



## Árbol de combinaciones

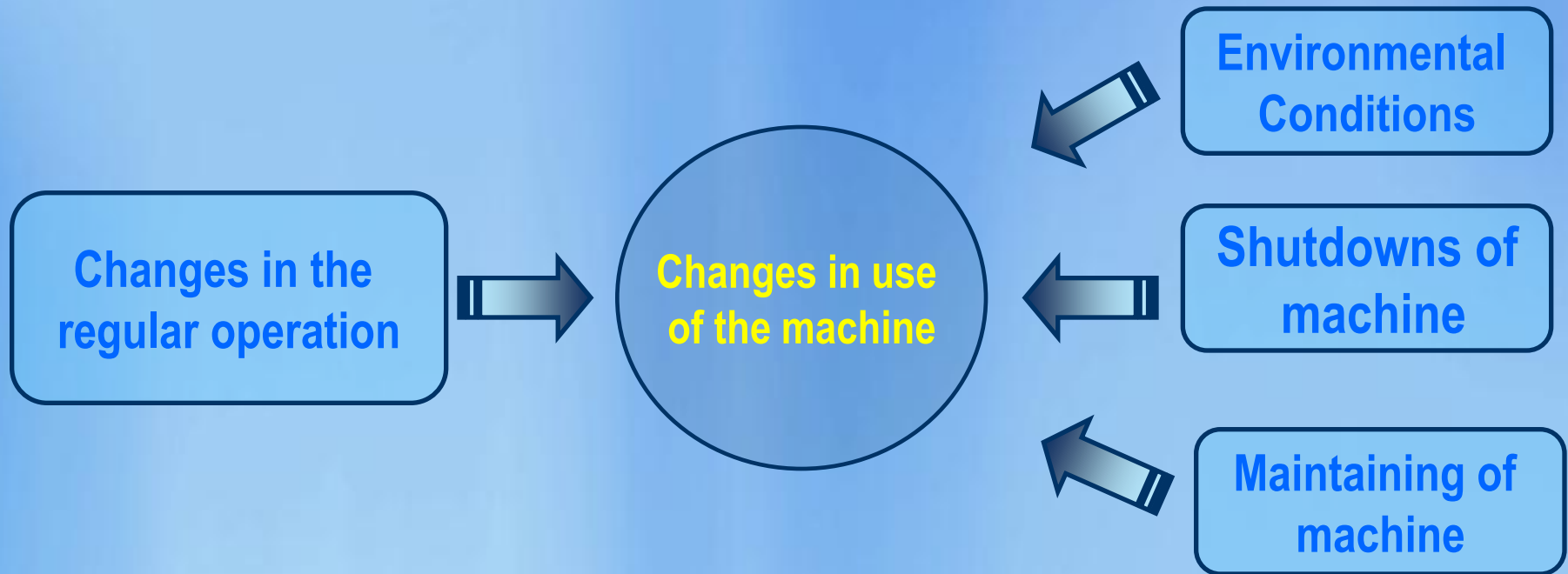
Ciclo



Problema complejo:  
 Ubicando 9 ciclos se tienen  
**19683** programaciones diarias  
 Diferentes!



## Contingencies

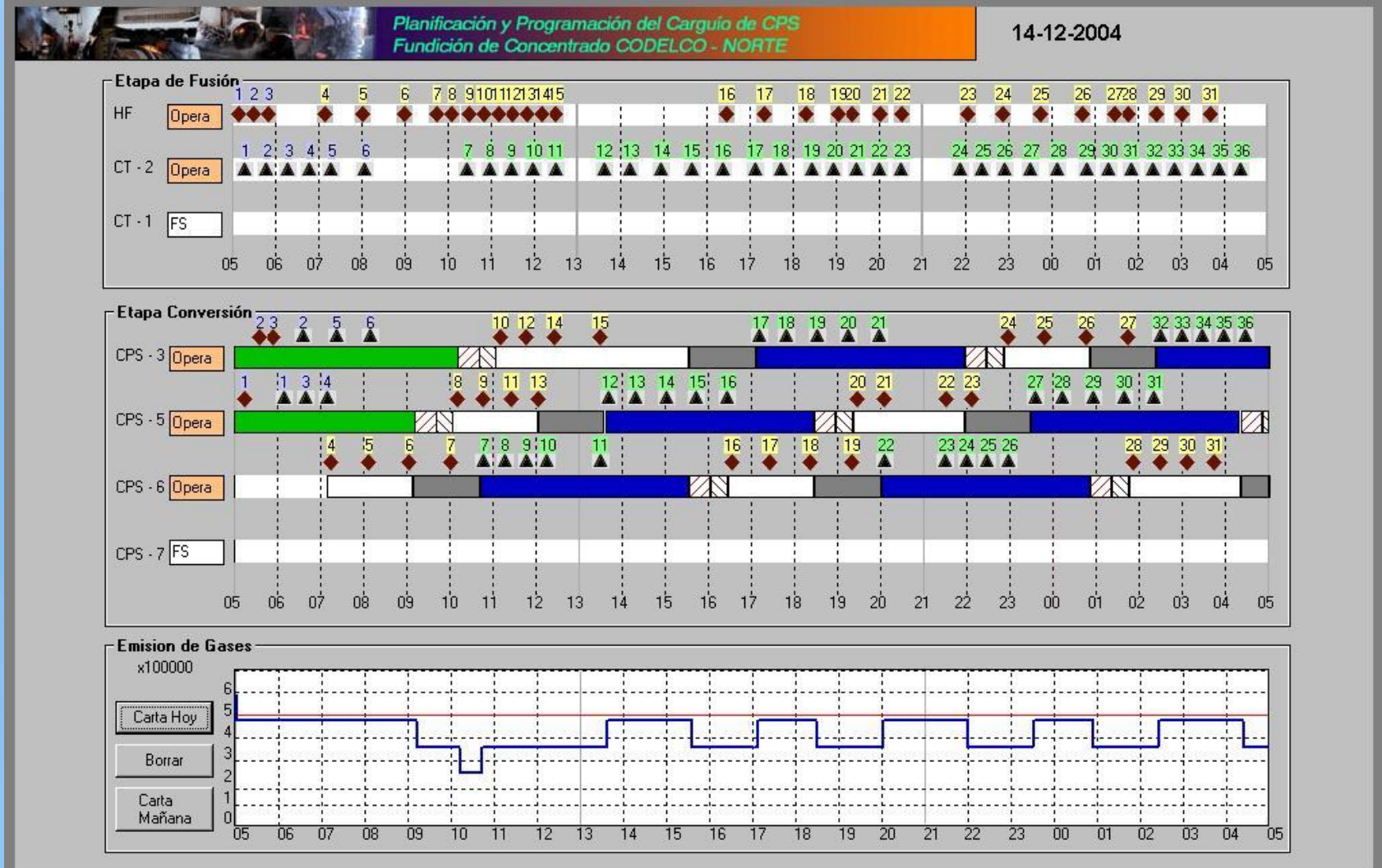


# Programando operaciones de F-C. Resultados



Planificación y Programación del Carguío de CPS. Codelco - Chile, División Chuquicamata

Archivo Ingreso de Datos Optimizar Resultados Registro Real Ventana Ayuda



# Programando operaciones de F-C. Resultados



## 1. Pantalla de Inicio: "Ingreso de situación al inicio del día" (5 AM)

Secuencia a ejecutar:

1. Seleccione CPS Activos

2. Ingresar Ollas por cargar.

3. Ingresar Hora Fin de Soplado Estimado de cada CPS

### Opcionales

4. Si existen Ollas de Eje cargadas en CPS

5. Si existe Parada Programada de CPS

6. Si existe Parada Programada de HF o CT

The screenshot shows the 'Inicio de Sistema' (System Start) window. It contains four main sections for configuring CPS units: CPS 3, CPS 6, CPS 5, and CPS 7. Each section includes a diagram of the unit, an 'Activo' (Active) status selector with radio buttons for 'Sí' (Yes) and 'No', a 'Número de Toberas Disponibles' (Number of Available Nozzles) input field set to 55, and an 'Hora fin de Soplado' (End of Blowing Time) input field set to 5 hours and 0 minutes. Below each diagram are buttons for 'Ollas' (Jars) with radio buttons for 'EJE FLASH' and 'OLLAS M.B.', a 'Borrar' (Delete) button, and buttons for 'Ingreso/Eliminar Parada' (Add/Remove Stop) and 'Ollas previas de EJE' (Jars before EJE). At the bottom of the window, there are sections for 'HF' and 'CT' (CT 2 and CT 1) with 'Parada Programada' (Programmed Stop) radio buttons for 'Sí' and 'No'. A 'Salir' (Exit) button is on the bottom left and an 'Aplicar' (Apply) button is on the bottom right. Red circles highlight the 'Activo' status selectors for CPS 3, 6, and 5.

# Programando operaciones de F-C. Resultados



1. Pantalla de Inicio: "Ingreso de situación al inicio del día" (5 AM)

Secuencia a ejecutar:

The screenshot shows the 'Inicio de Sistema' window with the following configuration:

- CPS 3:** Activo  Sí  No. Número de Toberas Disponibles: 55. Hora fin de Soplado: 10 hrs - 0 min. Ollas:  EJE FLASH,  DLLAS M.B. (4 triangles). Buttons: Ingreso/Eliminar Parada, Ollas previas de EJE.
- CPS 6:** Activo  Sí  No. Número de Toberas Disponibles: 55. Hora fin de Soplado: 7 hrs - 50 min. Ollas:  EJE FLASH,  DLLAS M.B. (1 triangle). Buttons: Ingreso/Eliminar Parada, Ollas previas de EJE.
- CPS 5:** Activo  Sí  No. Número de Toberas Disponibles: 55. Hora fin de Soplado: 5 hrs - 0 min. Ollas:  EJE FLASH,  DLLAS M.B. Buttons: Ingreso/Eliminar Parada, Ollas previas de EJE.
- CPS 7:** Activo  Sí  No. Número de Toberas Disponibles: 55. Hora fin de Soplado: 5 hrs - 0 min. Ollas:  EJE FLASH,  DLLAS M.B. Buttons: Ingreso/Eliminar Parada, Ollas previas de EJE.
- HF:** Parada Programada  Sí  No.
- CT 2:** Parada Programada  Sí  No.
- CT 1:** Parada Programada  Sí  No.

Buttons at the bottom: Salir (left), Aplicar (right).

1. Seleccione CPS Activos

2. Ingresar Ollas por cargar.

3. Ingresar Hora Fin de Soplado Estimado de cada CPS

## Opcionales

4. Si existen Ollas de Eje cargadas en CPS

5. Si existe Parada Programada de CPS

6. Si existe Parada Programada de HF o CT



# Programando operaciones de F-C. Resultados



1. Pantalla de Inicio: “ Ingreso de situación al inicio del día” (5 AM)

Secuencia a ejecutar:

1. Seleccione CPS Activos
2. Ingresar Ollas por cargar.
3. Ingresar Hora Fin de Soplado Estimado de cada CPS

**Inicio de Sistema**

| CPS   | Activo   | Número de Toberas Disponibles | Hora fin de Soplado |
|-------|--|-------------------------------|---------------------|
| CPS 3 | <input checked="" type="radio"/> Sí <input type="radio"/> No | 55                            | 10 hrs - 0 min      |
| CPS 6 | <input checked="" type="radio"/> Sí <input type="radio"/> No | 55                            | 7 hrs - 50 min      |
| CPS 5 | <input checked="" type="radio"/> Sí <input type="radio"/> No | 55                            | 5 hrs - 0 min       |
| CPS 7 | <input type="radio"/> Sí <input checked="" type="radio"/> No | 55                            | 5 hrs - 0 min       |

**HF**  
Parada Programada:  Sí  No

**CT 2**  
Parada Programada:  Sí  No

**CT 1**  
Parada Programada:  Sí  No

Botones: Salir, Aplicar

## Opcionales

4. Si existen Ollas de Eje cargadas en CPS
5. Si existe Parada Programada de CPS
6. Si existe Parada Programada de HF o CT

# Programando operaciones de F-C. Resultados



1. Pantalla de Inicio: "Ingreso de situación al inicio del día" (5 AM)

Secuencia a ejecutar:

1. Seleccione CPS Activos
2. Ingresar Ollas por cargar.
3. Ingresar Hora Fin de Soplado Estimado de cada CPS

**Inicio de Sistema**

| CPS   | Activo   | Número de Toberas Disponibles | Hora fin de Soplado | Ollas  | Borrar | Ingreso/Eliminar Parada |
|-------|--|-------------------------------|---------------------|--|--------|-------------------------|
| CPS 3 | <input checked="" type="radio"/> Sí <input type="radio"/> No                         | 55                            | 10 hrs - 0 min      | <input type="radio"/> EJE FLASH<br><input checked="" type="radio"/> DLLAS M.B. | ▲▲▲▲   | Ollas previas de EJE    |
| CPS 6 | <input checked="" type="radio"/> Sí <input type="radio"/> No                         | 55                            | 7 hrs - 50 min      | <input type="radio"/> EJE FLASH<br><input checked="" type="radio"/> DLLAS M.B. | ▲      | Ollas previas de EJE    |
| CPS 5 | <input checked="" type="radio"/> Sí <input type="radio"/> No                         | 55                            | 5 hrs - 0 min       | <input type="radio"/> EJE FLASH<br><input checked="" type="radio"/> DLLAS M.B. |        | Ollas previas de EJE    |
| CPS 7 | <input type="radio"/> Sí <input checked="" type="radio"/> No                         | 55                            | 5 hrs - 0 min       | <input type="radio"/> EJE FLASH<br><input checked="" type="radio"/> DLLAS M.B. |        | Ollas previas de EJE    |
| HF    | Parada Programada<br><input type="radio"/> Sí<br><input checked="" type="radio"/> No |                               |                     |  |        |                         |
| CT 2  | Parada Programada<br><input type="radio"/> Sí<br><input checked="" type="radio"/> No |                               |                     |  |        |                         |
| CT 1  | Parada Programada<br><input type="radio"/> Sí<br><input checked="" type="radio"/> No |                               |                     |  |        |                         |

Salir      Aplicar

## Opcionales

4. Si existen Ollas de Eje cargadas en CPS

5. Si existe Parada Programada de CPS

6. Si existe Parada Programada de HF o CT

# Programando operaciones de F-C. Resultados



## 1. Pantalla de Inicio: "Ingreso de situación al inicio del día" (5 AM)

Secuencia a ejecutar:

1. Seleccione CPS Activos
2. Ingresar Ollas por cargar.
3. Ingresar Hora Fin de Soplado Estimado de cada CPS

**Inicio de Sistema**

| CPS   | Activo   | Número de Toberas Disponibles | Hora fin de Soplado | Ollas  | Borrar | Ingreso/Eliminar Parada                           |
|-------|--|-------------------------------|---------------------|--|--------|---|
| CPS 3 | <input checked="" type="radio"/> Sí <input type="radio"/> No | 55                            | 10 hrs - 0 min      | <input type="radio"/> EJE FLASH<br><input checked="" type="radio"/> DLLAS M.B. | ▲▲▲▲   | <input type="text" value="Ollas previas de EJE"/> |
| CPS 6 | <input checked="" type="radio"/> Sí <input type="radio"/> No | 55                            | 7 hrs - 50 min      | <input type="radio"/> EJE FLASH<br><input checked="" type="radio"/> DLLAS M.B. | ▲      | <input type="text" value="Ollas previas de EJE"/> |
| CPS 5 | <input checked="" type="radio"/> Sí <input type="radio"/> No | 55                            | 5 hrs - 0 min       | <input type="radio"/> EJE FLASH<br><input checked="" type="radio"/> DLLAS M.B. |        | <input type="text" value="Ollas previas de EJE"/> |
| CPS 7 | <input type="radio"/> Sí <input checked="" type="radio"/> No | 55                            | 5 hrs - 0 min       | <input type="radio"/> EJE FLASH<br><input checked="" type="radio"/> DLLAS M.B. |        | <input type="text" value="Ollas previas de EJE"/> |

| HF   | CT 2   | CT 1   |
|--|--|--|
| Parada Programada<br><input type="radio"/> Sí<br><input checked="" type="radio"/> No | Parada Programada<br><input type="radio"/> Sí<br><input checked="" type="radio"/> No | Parada Programada<br><input type="radio"/> Sí<br><input checked="" type="radio"/> No |

## Opcionales

4. Si existen Ollas de Eje cargadas en CPS

5. Si existe Parada Programada de CPS

6. Si existe Parada Programada de HF o CT

# Programando operaciones de F-C. Resultados



1. Pantalla de Inicio: "Ingreso de situación al inicio del día" (5 AM)

Secuencia a ejecutar:

1. Seleccione CPS Activos
2. Ingresar Ollas por cargar.
3. Ingresar Hora Fin de Soplado Estimado de cada CPS

**Inicio de Sistema**

| CPS   | Activo  | Número de Toberas Disponibles | Hora fin de Soplado | Ollas   | Borrar | Ingreso/Eliminar Parada | Ollas previas de EJE |
|-------|---|-------------------------------|---------------------|---|--------|-------------------------|----------------------|
| CPS 3 | <input checked="" type="radio"/> Sí <input type="radio"/> No              | 55                            | 10 hrs - 0 min      | <input type="radio"/> EJE FLASH<br><input checked="" type="radio"/> OLLAS M.B. ▲▲▲▲ |        | Ingreso/Eliminar Parada | Ollas previas de EJE |
| CPS 6 | <input checked="" type="radio"/> Sí <input type="radio"/> No              | 55                            | 7 hrs - 50 min      | <input type="radio"/> EJE FLASH<br><input checked="" type="radio"/> OLLAS M.B. ▲    |        | Ingreso/Eliminar Parada | Ollas previas de EJE |
| CPS 5 | <input checked="" type="radio"/> Sí <input type="radio"/> No              | 55                            | 5 hrs - 0 min       | <input type="radio"/> EJE FLASH<br><input type="radio"/> OLLAS M.B.                 |        | Ingreso/Eliminar Parada | Ollas previas de EJE |
| CPS 7 | <input type="radio"/> Sí <input checked="" type="radio"/> No              | 55                            | 5 hrs - 0 min       | <input type="radio"/> EJE FLASH<br><input type="radio"/> OLLAS M.B.                 |        | Ingreso/Eliminar Parada | Ollas previas de EJE |
| HF    | Parada Programada<br><input type="radio"/> Sí<br><input type="radio"/> No |                               |                     |   |        |                         |                      |
| CT 2  | Parada Programada<br><input type="radio"/> Sí<br><input type="radio"/> No |                               |                     |   |        |                         |                      |
| CT 1  | Parada Programada<br><input type="radio"/> Sí<br><input type="radio"/> No |                               |                     |   |        |                         |                      |

**Salir** **Aplicar**

## Opcionales

4. Si existen Ollas de Eje cargadas en CPS
5. Si existe Parada Programada de CPS
6. Si existe Parada Programada de HF o CT

# 1. Programando operaciones de F-C. Resultados

Pantalla de Inicio: "Ingreso de situación al inicio del día" (5 AM)



Secuencia a ejecutar:

1. Seleccione CPS Activos
2. Ingresar Ollas por cargar.
3. Ingresar Hora Fin de Soplado Estimado de cada CPS

## Opcionales

4. Si existen Ollas de Eje cargadas en CPS
5. Si existe Parada Programada de CPS
6. Si existe Parada Programada de HF o CT

The screenshot shows the 'Inicio de Sistema' window with the following configuration:

- CPS 3:** Activo  Sí  No. Número de Toberas Disponibles: 55. Hora fin de Soplado: 10 hrs - 0 min. Ollas:  EJE FLASH,  DLLAS M.B. (4 triangles). Buttons: Ingreso/Eliminar Parada, Ollas previas de EJE.
- CPS 6:** Activo  Sí  No. Número de Toberas Disponibles: 55. Hora fin de Soplado: 7 hrs - 50 min. Ollas:  EJE FLASH,  DLLAS M.B. (1 triangle). Buttons: Ingreso/Eliminar Parada, Ollas previas de EJE.
- CPS 5:** Activo  Sí  No. Número de Toberas Disponibles: 55. Hora fin de Soplado: 5 hrs - 0 min. Ollas:  EJE FLASH,  DLLAS M.B. Buttons: Ingreso/Eliminar Parada, Ollas previas de EJE.
- CPS 7:** Activo  Sí  No. Número de Toberas Disponibles: 55. Hora fin de Soplado: 5 hrs - 0 min. Ollas:  EJE FLASH,  DLLAS M.B. Buttons: Ingreso/Eliminar Parada, Ollas previas de EJE.
- HF:** Parada Programada  Sí  No.
- CT 2:** Parada Programada  Sí  No.
- CT 1:** Parada Programada  Sí  No.

Buttons at the bottom: Salir (left) and Aplicar (right, circled in red with an arrow pointing to it).

Finalmente:  
Las Condiciones Iniciales  
son Aplicadas

# Programando operaciones de F-C. Resultados



## Ingreso de Parámetros Operativos.

### Modalidades:

A) Valores Ideales

B) Ingreso Manual

C) PI-System

**Planificación y Programación del Carguío de CPS (PPCO)**

Archivo Ingreso de Datos Datos en línea Mostrar Resultados Cartas Gantt Opciones Ayuda

Planificación y Programación del Carguío de CPS  
Fundición de Concentrado CODELCO - NORTE

Ingreso de Datos  
15/01/2003

Datos de ingreso Balance de Masa Información de Ciclos

Datos CPS y de Proceso

| CPS     | Operativo    | Flujo de Aire [Nm3/min] | Enriquecimiento O2 (%) | Temperatura (°C) | Soplado Escoria | Soplado Cu |
|---------|--------------|-------------------------|------------------------|------------------|-----------------|------------|
| CPS - 3 | OPERATIVO    | 700                     | 21                     | 1230             | 700             | 700        |
| CPS - 6 | OPERATIVO    | 670                     | 21                     | 1230             | 690             | 690        |
| CPS - 5 | OPERATIVO    | 720                     | 21                     | 1230             | 720             | 720        |
| CPS - 7 | NO OPERATIVO | 750                     | 21                     | 1230             | 820             | 820        |

Adicional

|                           |      |
|---------------------------|------|
| Eficiencia (%)            | 95   |
| Ley de eje (%)            | 62   |
| Ley metal blanco (%)      | 72   |
| Ley de Concentrado Cu (%) | 33   |
| Alimentación HF (TPD)     | 2800 |
| Alimentación CT (TPD)     | 2200 |

Ingreso de Datos

CPS al inicio PI-SYSTEM Manual Restaurar Valores Ideales Limpiar Aceptar

# Programando operaciones de F-C. Resultados

Ingreso de Parámetros Operativos.



Modalidades:

A) Valores Ideales

B) Ingreso Manual

C) PI-System

**Planificación y Programación del Carguío de CPS (PPCO)**

Archivo Ingreso de Datos Datos en línea Mostrar Resultados Cartas Gantt Opciones Ayuda

Planificación y Programación del Carguío de CPS  
Fundición de Concentrado CODELCO - NORTE

Ingreso de Datos  
15/01/2003

Datos de ingreso Balance de Masa | Información de Ciclos |

Datos CPS y de Proceso

| CPS - 3 OPERATIVO  | CPS - 6 OPERATIVO | CPS - 5 OPERATIVO | CPS - 7 NO OPERATIVO | Adicional               |     |     |                        |    |    |                  |      |  |  |  |                 |            |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |  |  |                 |            |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |  |  |                 |            |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |   |
|--|-------------------|-------------------|----------------------|-------------------------|-----|-----|------------------------|----|----|------------------|------|--|--|--|-----------------|------------|-------------------------|-----|-----|------------------------|----|----|------------------|------|--|--|--|-----------------|------------|-------------------------|-----|-----|------------------------|----|----|------------------|------|--|--|--|-----------------|------------|-------------------------|-----|-----|------------------------|----|----|------------------|------|--|---|
| <table border="1"><thead><tr><th></th><th>Soplado Escoria</th><th>Soplado Cu</th></tr></thead><tbody><tr><td>Flujo de Aire [Nm3/min]</td><td>700</td><td>700</td></tr><tr><td>Enriquecimiento O2 (%)</td><td>21</td><td>23</td></tr><tr><td>Temperatura (°C)</td><td>1230</td><td></td></tr></tbody></table> |                   | Soplado Escoria   | Soplado Cu           | Flujo de Aire [Nm3/min] | 700 | 700 | Enriquecimiento O2 (%) | 21 | 23 | Temperatura (°C) | 1230 |  | <table border="1"><thead><tr><th></th><th>Soplado Escoria</th><th>Soplado Cu</th></tr></thead><tbody><tr><td>Flujo de Aire [Nm3/min]</td><td>670</td><td>690</td></tr><tr><td>Enriquecimiento O2 (%)</td><td>21</td><td>23</td></tr><tr><td>Temperatura (°C)</td><td>1230</td><td></td></tr></tbody></table> |  | Soplado Escoria | Soplado Cu | Flujo de Aire [Nm3/min] | 670 | 690 | Enriquecimiento O2 (%) | 21 | 23 | Temperatura (°C) | 1230 |  | <table border="1"><thead><tr><th></th><th>Soplado Escoria</th><th>Soplado Cu</th></tr></thead><tbody><tr><td>Flujo de Aire [Nm3/min]</td><td>720</td><td>720</td></tr><tr><td>Enriquecimiento O2 (%)</td><td>21</td><td>22</td></tr><tr><td>Temperatura (°C)</td><td>1230</td><td></td></tr></tbody></table> |  | Soplado Escoria | Soplado Cu | Flujo de Aire [Nm3/min] | 720 | 720 | Enriquecimiento O2 (%) | 21 | 22 | Temperatura (°C) | 1230 |  | <table border="1"><thead><tr><th></th><th>Soplado Escoria</th><th>Soplado Cu</th></tr></thead><tbody><tr><td>Flujo de Aire [Nm3/min]</td><td>750</td><td>820</td></tr><tr><td>Enriquecimiento O2 (%)</td><td>21</td><td>24</td></tr><tr><td>Temperatura (°C)</td><td>1230</td><td></td></tr></tbody></table> |  | Soplado Escoria | Soplado Cu | Flujo de Aire [Nm3/min] | 750 | 820 | Enriquecimiento O2 (%) | 21 | 24 | Temperatura (°C) | 1230 |  | Eficiencia (%)<br>95<br>Ley de eje (%)<br>62<br>Ley metal blanco (%)<br>72<br>Ley de Concentrado Cu (%)<br>33<br>Alimentación HF (TPD)<br>2800<br>Alimentación CT (TPD)<br>2200 |
|  | Soplado Escoria   | Soplado Cu        |                      |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |  |  |                 |            |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |  |  |                 |            |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |  |  |                 |            |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |   |
| Flujo de Aire [Nm3/min]  | 700               | 700               |                      |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |  |  |                 |            |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |  |  |                 |            |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |  |  |                 |            |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |   |
| Enriquecimiento O2 (%)   | 21                | 23                |                      |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |  |  |                 |            |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |  |  |                 |            |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |  |  |                 |            |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |   |
| Temperatura (°C)   | 1230              |                   |                      |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |  |  |                 |            |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |  |  |                 |            |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |  |  |                 |            |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |   |
|  | Soplado Escoria   | Soplado Cu        |                      |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |  |  |                 |            |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |  |  |                 |            |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |  |  |                 |            |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |   |
| Flujo de Aire [Nm3/min]  | 670               | 690               |                      |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |  |  |                 |            |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |  |  |                 |            |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |  |  |                 |            |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |   |
| Enriquecimiento O2 (%)   | 21                | 23                |                      |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |  |  |                 |            |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |  |  |                 |            |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |  |  |                 |            |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |   |
| Temperatura (°C)   | 1230              |                   |                      |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |  |  |                 |            |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |  |  |                 |            |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |  |  |                 |            |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |   |
|  | Soplado Escoria   | Soplado Cu        |                      |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |  |  |                 |            |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |  |  |                 |            |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |  |  |                 |            |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |   |
| Flujo de Aire [Nm3/min]  | 720               | 720               |                      |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |  |  |                 |            |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |  |  |                 |            |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |  |  |                 |            |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |   |
| Enriquecimiento O2 (%)   | 21                | 22                |                      |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |  |  |                 |            |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |  |  |                 |            |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |  |  |                 |            |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |   |
| Temperatura (°C)   | 1230              |                   |                      |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |  |  |                 |            |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |  |  |                 |            |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |  |  |                 |            |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |   |
|  | Soplado Escoria   | Soplado Cu        |                      |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |  |  |                 |            |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |  |  |                 |            |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |  |  |                 |            |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |   |
| Flujo de Aire [Nm3/min]  | 750               | 820               |                      |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |  |  |                 |            |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |  |  |                 |            |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |  |  |                 |            |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |   |
| Enriquecimiento O2 (%)   | 21                | 24                |                      |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |  |  |                 |            |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |  |  |                 |            |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |  |  |                 |            |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |   |
| Temperatura (°C)   | 1230              |                   |                      |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |  |  |                 |            |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |  |  |                 |            |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |  |  |                 |            |                         |     |     |                        |    |    |                  |      |  |   |

Ingreso de Datos

CPS al inicio PI-SYSTEM **Manual** Restaurar Valores Ideales Limpiar Aceptar

# Programando operaciones de F-C. Resultados

Ingreso de Parámetros Operativos.



Modalidades:

A) Valores Ideales

B) Ingreso Manual

C) PI-System

**Planificación y Programación del Carguío de CPS (PPCO)**

Archivo Ingreso de Datos Datos en línea Mostrar Resultados Cartas Gantt Opciones Ayuda

Planificación y Programación del Carguío de CPS  
Fundición de Concentrado CODELCO - NORTE

Ingreso de Datos  
15/01/2003

Datos de ingreso Balance de Masa | Información de Ciclos |

Datos CPS y de Proceso

| CPS - 3 OPERATIVO       |                 |            | CPS - 6 OPERATIVO       |                 |            | CPS - 5 OPERATIVO       |                 |            | CPS - 7 NO OPERATIVO    |                 |            |
|-------------------------|-----------------|------------|-------------------------|-----------------|------------|-------------------------|-----------------|------------|-------------------------|-----------------|------------|
|                         | Soplado Escoria | Soplado Cu |                         | Soplado Escoria | Soplado Cu |                         | Soplado Escoria | Soplado Cu |                         | Soplado Escoria | Soplado Cu |
| Flujo de Aire [Nm3/min] | 700             | 700        | Flujo de Aire [Nm3/min] | 670             | 690        | Flujo de Aire [Nm3/min] | 720             | 720        | Flujo de Aire [Nm3/min] | 750             | 820        |
| Enriquecimiento O2 (%)  | 21              | 23         | Enriquecimiento O2 (%)  | 21              | 23         | Enriquecimiento O2 (%)  | 21              | 22         | Enriquecimiento O2 (%)  | 21              | 24         |
| Temperatura (°C)        | 1230            |            | Temperatura (°C)        | 1230            |            | Temperatura (°C)        | 1230            |            | Temperatura (°C)        | 1230            |            |

Adicional

Eficiencia (%) 95

Ley de eje (%) 62

Ley metal blanco (%) 72

Ley de Concentrado Cu (%) 33

Alimentación HF (TPD) 2800

Alimentación CT (TPD) 2200

Ingreso de Datos

CPS al inicio **PI-SYSTEM** Manual Restaurar Valores Ideales Limpiar Aceptar



# Programando operaciones de F-C. Resultados

## 2) Ingreso de Parámetros Operativos.



### Modalidades:

A) Valores Ideales

B) Ingreso Manual

C) PI-System

**Planificación y Programación del Carguío de CPS (PPCO)**

Archivo Ingreso de Datos Datos en línea Mostrar Resultados Cartas Gantt Opciones Ayuda

Planificación y Programación del Carguío de CPS  
Fundición de Concentrado CODELCO - NORTE

Ingreso de Datos  
15/01/2003

Datos de ingreso Balance de Masa Información de Ciclos

Datos CPS y de Proceso

| CPS - 3 OPERATIVO       |                 |            | CPS - 6 OPERATIVO       |                 |            | CPS - 5 OPERATIVO       |                 |            | CPS - 7 NO OPERATIVO    |                 |            | Adicional                 |      |  |
|-------------------------|-----------------|------------|-------------------------|-----------------|------------|-------------------------|-----------------|------------|-------------------------|-----------------|------------|---------------------------|------|--|
|                         | Soplado Escoria | Soplado Cu |                         | Soplado Escoria | Soplado Cu |                         | Soplado Escoria | Soplado Cu |                         | Soplado Escoria | Soplado Cu |                           |      |  |
| Flujo de Aire [Nm3/min] | 700             | 700        | Flujo de Aire [Nm3/min] | 670             | 690        | Flujo de Aire [Nm3/min] | 720             | 720        | Flujo de Aire [Nm3/min] | 750             | 820        | Eficiencia (%)            | 95   |  |
| Enriquecimiento O2 (%)  | 21              | 23         | Enriquecimiento O2 (%)  | 21              | 23         | Enriquecimiento O2 (%)  | 21              | 22         | Enriquecimiento O2 (%)  | 21              | 24         | Ley de eje (%)            | 62   |  |
| Temperatura (°C)        | 1230            |            | Temperatura (°C)        | 1230            |            | Temperatura (°C)        | 1230            |            | Temperatura (°C)        | 1230            |            | Ley metal blanco (%)      | 72   |  |
|                         |                 |            |                         |                 |            |                         |                 |            |                         |                 |            | Ley de Concentrado Cu (%) | 33   |  |
|                         |                 |            |                         |                 |            |                         |                 |            |                         |                 |            | Alimentación HF (TPD)     | 2800 |  |
|                         |                 |            |                         |                 |            |                         |                 |            |                         |                 |            | Alimentación CT (TPD)     | 2200 |  |

Ingreso de Datos

← CPS al inicio PI-SYSTEM Manual Restaurar Valores Ideales Limpiar → Aceptar

Desea modificar  
Situación Inicial

Finalmente:  
Aplicar Parámetros  
Operativos

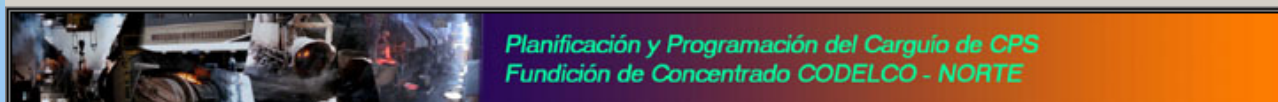
# Programando operaciones de F-C. Resultados

## 3) Ejecución de Programación.



### Planificación y Programación del Carguio de CPS (PPCO)

Archivo Ingreso de Datos Datos en línea Mostrar Resultados Cartas Gantt Opciones Ayuda



Ingreso de Datos

16/01/2003

Datos de ingreso Balance de Masa | Información de Ciclos

#### Tiempos de Ciclo

| Ciclo 4 - 5            | CPS 3 | CPS 5 | CPS 6 | CPS 7 |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Tiempo Soplado Escoria | 67    | 67    | 67    | 0     |
| Tiempo Soplado Cobre   | 267   | 267   | 267   | 0     |

| Ciclo 5 - 4            | CPS 3 | CPS 5 | CPS 6 | CPS 7 |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Tiempo Soplado Escoria | 84    | 84    | 84    | 0     |
| Tiempo Soplado Cobre   | 252   | 252   | 252   | 0     |

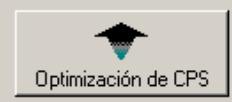
  

| Ciclo 6 - 3            | CPS 3 | CPS 5 | CPS 6 | CPS 7 |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Tiempo Soplado Escoria | 101   | 101   | 101   | 0     |
| Tiempo Soplado Cobre   | 238   | 238   | 238   | 0     |

Ingresar tiempo en:  Minutos  Horas



#### Generación de Carta Gantt



Existen 2 modalidades:

A) Programación con Generación de Ollas

B) Programación con Generación de Ciclos

Dra. Lorena Pradenas, UDEC

# Programando operaciones de F-C. Resultados

## 3. Ejecución de Programación.



### Planificación y Programación del Carguío de CPS (PPCO)

Archivo Ingreso de Datos Datos en línea Mostrar Resultados Cartas Gantt Opciones Ayuda



Planificación y Programación del Carguío de CPS  
Fundición de Concentrado CODELCO - NORTE

Ingreso de Datos

16/01/2003

Datos de ingreso Balance de Masa Información de Ciclos

Tiempos de Ciclo

Ciclo 4 - 5

|                        | CPS 3 | CPS 5 | CPS 6 | CPS 7 |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Tiempo Soplado Escoria | 67    | 67    | 67    | 0     |
| Tiempo Soplado Cobre   | 267   | 267   | 267   | 0     |

Ciclo 5 - 4

|                        |     |     |     |   |
|------------------------|-----|-----|-----|---|
| Tiempo Soplado Escoria | 84  | 84  | 84  | 0 |
| Tiempo Soplado Cobre   | 252 | 252 | 252 | 0 |

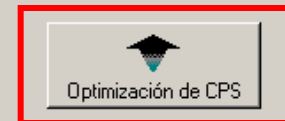
Ciclo 6 - 3

|                        |     |     |     |   |
|------------------------|-----|-----|-----|---|
| Tiempo Soplado Escoria | 101 | 101 | 101 | 0 |
| Tiempo Soplado Cobre   | 238 | 238 | 238 | 0 |

Ingresar tiempo en:  Minutos  Horas



Generación de Carta Gantt



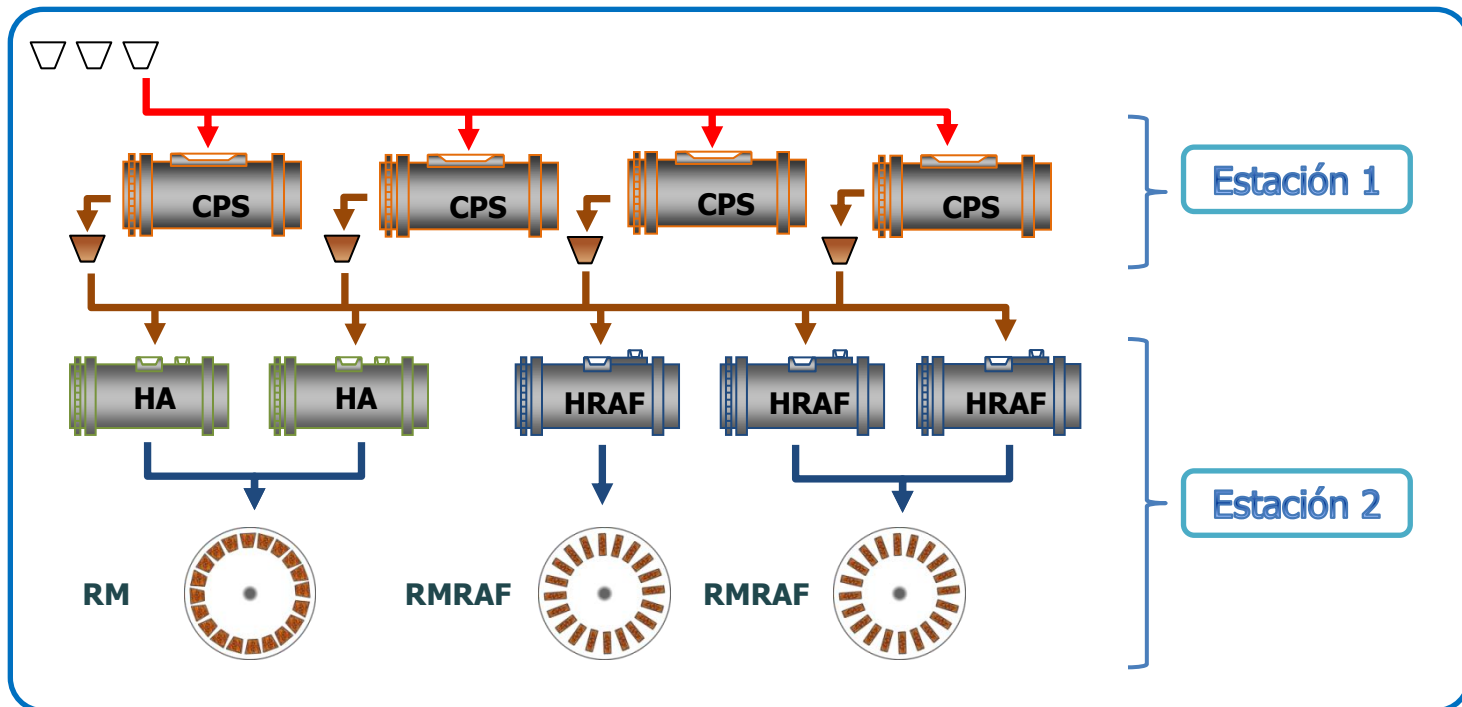
Existen 2 modalidades:

A) Programación con  
Generación de Ollas  
Dra. Lorena Pradenas, UDEC

B) Programación con  
Generación de Ciclos

# Programando operaciones de R-M

Una fundición de Concentrado de Cobre como un *flexible flow shop* con dos estaciones de trabajo.



# Programando operaciones de R-M. Mathematical model



(1) Min  $Z = \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^m x_{ij}^k (t_j^k + p_i + c_i - r_i)$

S.t.:

(2)  $t_j^k - \sum_{i=1}^m x_{ij}^k r_i \geq 0$  ( $j = 1, \dots, m; k = 1, \dots, n$ )

(3)  $\sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij}^k = 1$  ( $i = 1, \dots, m$ )

(8)  $\sum_{i=1}^m x_{ij}^k \leq 1$  ( $i = 1, \dots, m$ )

(5)  $t_j^k + \sum_{i=1}^m x_{ij}^k (p_i + c_i + A) \leq t_{j+1}^k$  ( $j = 1, \dots, m-1; k = 1, \dots, n$ )

(6)  $t_j^k - t_l^{k+1} \geq S + \sum_{i=1}^m x_{ij}^k c_i - H(1 - y_{jl})$  ( $k = 1, 3, 5, \dots, n-1; j = 1, \dots, m; l = 1, \dots, m$ )

(7)  $t_l^{k+1} - t_j^k \geq S + \sum_{i=1}^m x_{il}^{k+1} c_i - H y_{jl}$  ( $k = 1, 3, 5, \dots, n-1; j = 1, \dots, m; l = 1, \dots, m$ )

(4)  $\sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij}^k \leq \left( p_i - \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij}^k f_k \right) H$  ( $j = 1, \dots, m; k = 1, \dots, n$ )

(9)  $\sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij}^k \leq \left( \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij}^k g_k - p_i \right) H$  ( $i = 1, \dots, m$ )

(10)  $y_{jl} \in \{0,1\} \quad t_j^k \geq 0 \quad x_{ij}^k \in \{0,1\}$  ( $i = 1, \dots, m; k = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m; l = 1, \dots, m$ )

## Programando operaciones de R-M. Revisión Bibliográfica

Pradenas et al. (2005,  
2006)

Méndez et al. (2006)

Damodaran et al. (2007)

Revisión  
Bibliográfica

Manjeshwar et al. (2009)

Tang y Liu (2009)

El método de solución seleccionado para resolver el problema en este estudio corresponde a la metaheurística *Simulated Annealing*, debido a que:

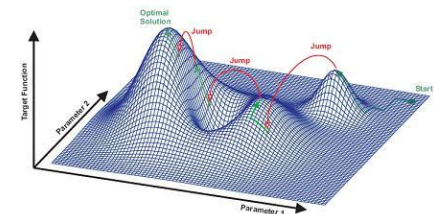
**Evita caer en óptimos locales**

**Peña (2005)**

**Campos (2008)**

**Fácil Implementación**

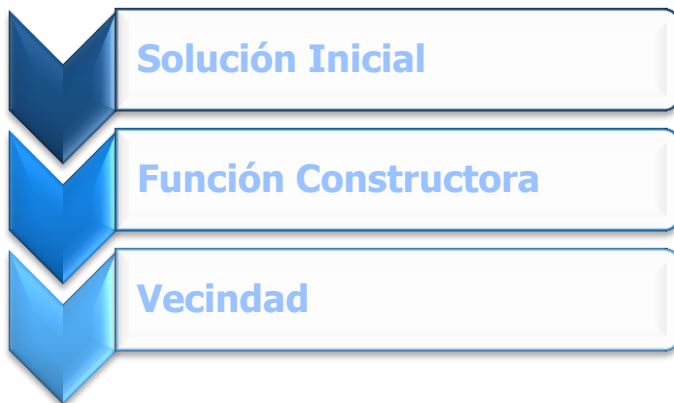
**Simulated Annealing**



### Decisiones Genéricas:



### Decisiones Específicas:



### Descripción *Simulated Annealing*

#### Seudocódigo

```
 $it \leftarrow 1$   
 $T \leftarrow T_i$   
Mientras ( $T > T_f$ ) hacer  
    Mientras ( $it \leq N_{it}$ ) hacer  
         $S' \leftarrow V(S)$   
        Si ( $Cmax_{S'} \leq Cmax_S$ ) entonces  
             $S \leftarrow S'$   
        Si no, entonces  
             $r \leftarrow$  número aleatorio  $\sim U[0,1]$   
             $\Delta C \leftarrow Cmax_S - Cmax_{S'}$   
            Si ( $r < \frac{\Delta C}{e^T}$ ) entonces  
                 $S \leftarrow S'$   
            Fin si  
        Fin si  
    Fin mientras  
     $it \leftarrow it + 1$   
Fin mientras  
 $T \leftarrow \alpha \cdot T$   
Fin mientras
```



## **Solución Inicial**

**Agrupar los *batches* según su orden de arribo al sistema.**

**Las decisiones productivas son tomadas de una fundición real.**

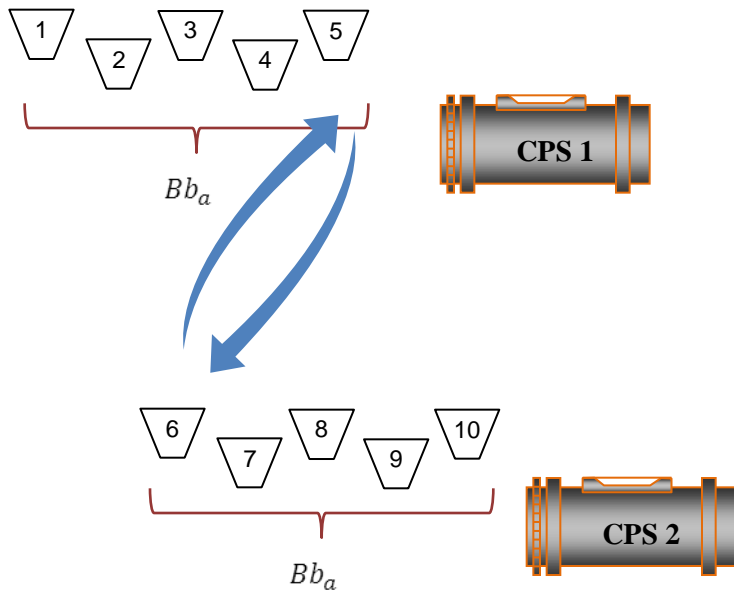
**Se caracteriza la solución encontrada.**



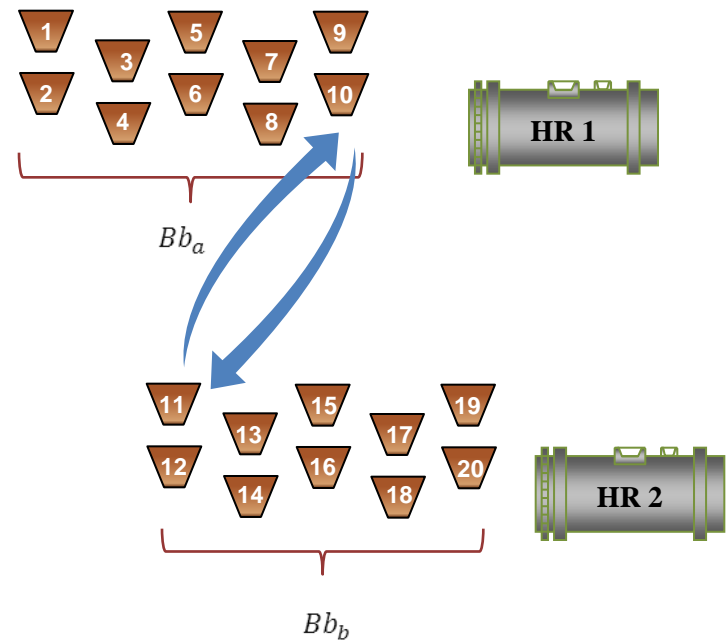
***Destinos de cada taza***

## Tipos de Vecindades

### Vecindad Tipo 1

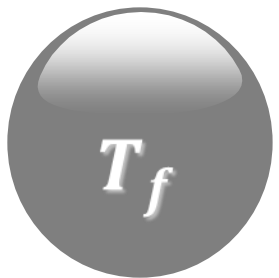


### Vecindad Tipo 2



Obtiene los "mejores valores"

Software CALIBRA  
(Adenso-Díaz y Laguna, 2006)



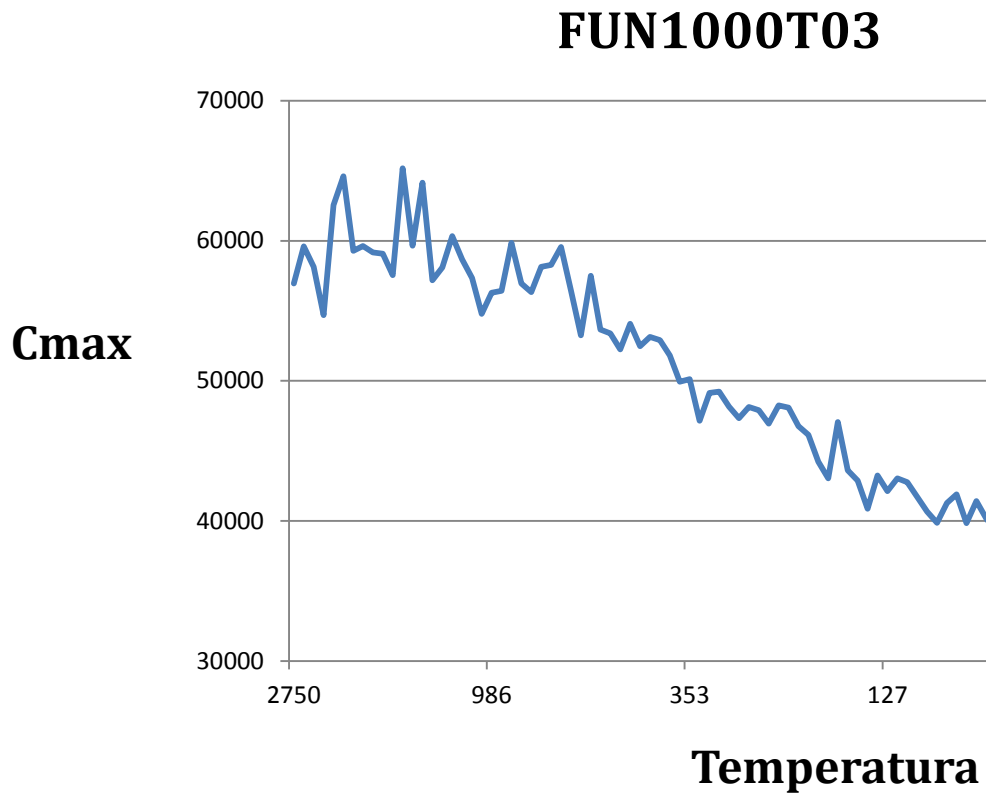
## Programando operaciones de R-M. Resultados

|                     | <b>FUN100T</b> | <b>FUN500T</b> | <b>FUN1000T</b> |
|---------------------|----------------|----------------|-----------------|
| <b>Instancia 01</b> | 6,821 %        | 0,238 %        | 0,768 %         |
| <b>Instancia 02</b> | 0,085 %        | 0,355 %        | 1,422 %         |
| <b>Instancia 03</b> | 5,090 %        | 0,507 %        | 0,925 %         |
| <b>Instancia 04</b> | 5,607 %        | 0,053 %        | 0,710 %         |
| <b>Instancia 05</b> | 5,456 %        | 0,037 %        | 1,337 %         |
| <b>Instancia 06</b> | 0,242 %        | 0,042 %        | 1,428 %         |
| <b>Instancia 07</b> | 9,610 %        | 0,005 %        | 1,304 %         |
| <b>Instancia 08</b> | 11, 26 %       | 0,067 %        | 0,866 %         |
| <b>Instancia 09</b> | 1,008 %        | 0,971 %        | 0,092 %         |
| <b>Instancia 10</b> | 1,092 %        | 0,735 %        | 0,746 %         |
| <b>Promedio</b>     | 3,890 %        | 0,301 %        | 0,960 %         |

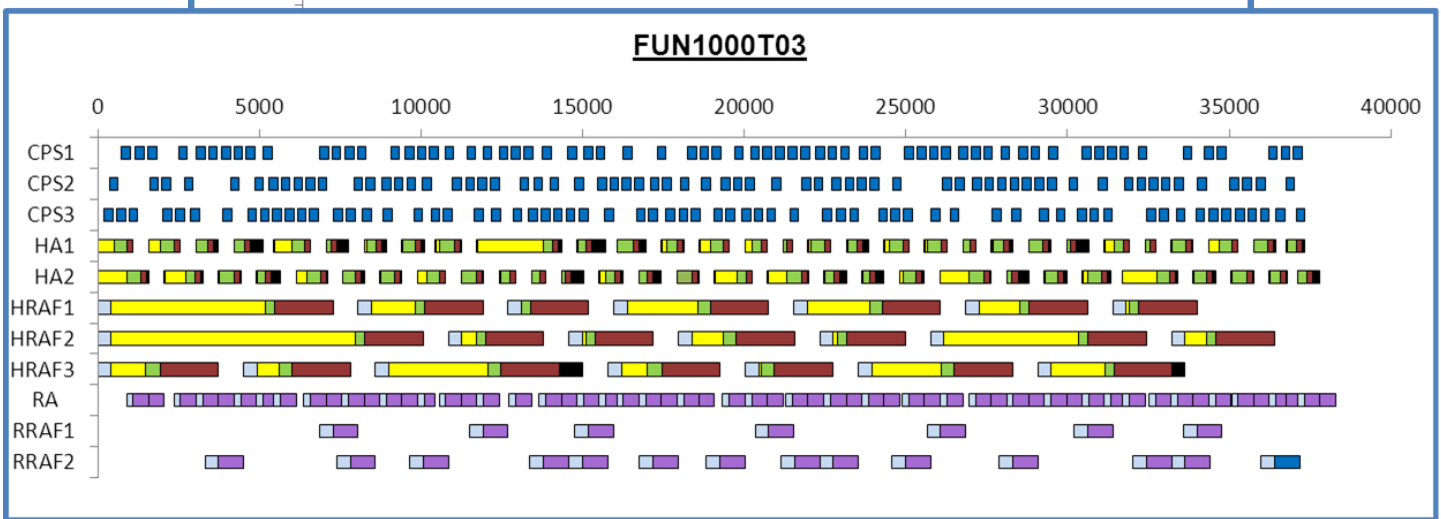
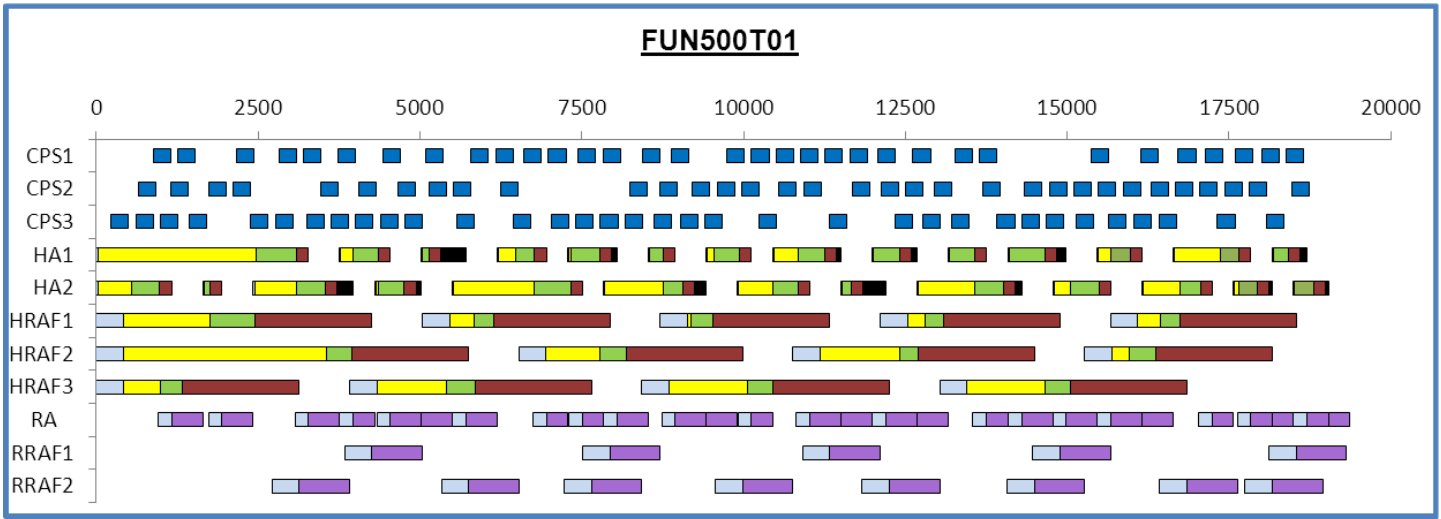
## Programando operaciones de R-M. Resultados (Tiempos Computacionales)

|                     | <b>FUN100T</b> | <b>FUN500T</b> | <b>FUN1000T</b> |
|---------------------|----------------|----------------|-----------------|
| <b>Instancia 01</b> | 40''           | 303''          | 980''           |
| <b>Instancia 02</b> | 37''           | 306''          | 983''           |
| <b>Instancia 03</b> | 38''           | 306''          | 981''           |
| <b>Instancia 04</b> | 39''           | 305''          | 976''           |
| <b>Instancia 05</b> | 39''           | 308''          | 971''           |
| <b>Instancia 06</b> | 38''           | 308''          | 975''           |
| <b>Instancia 07</b> | 39''           | 311''          | 968''           |
| <b>Instancia 08</b> | 38''           | 307''          | 973''           |
| <b>Instancia 09</b> | 39''           | 309''          | 976''           |
| <b>Instancia 10</b> | 39''           | 305''          | 979''           |

# Programando operaciones de R-M. Resultados (Convergencia SA)



# Programando operaciones de R-M. Resultados (Cartas Gantt)



# Conclusiones

La automatización del "*scheduling*" en los procesos productivos es una tarea compleja y multidisciplinaria. Requiere competencias en:

- Optimización combinatoria
- Investigación de operaciones
- Gestión de operaciones
- Gestión de recursos
- Ingeniería de software
- etc.

Las competencias anteriores no las disponen los Ingenieros de Procesos, son propias de los Ingenieros Industriales e Informáticos. (*mix*).

Cada problema de Gestión de Recursos (Optimización), requiere un tratamiento "personalizado".



# Algunas Referencias

1. Adenso-Díaz, B y Laguna, M. 2006. Fine-Tuning of Algorithms Using Fractional Experimental Designs and Local Search. *Operations Research*, 54, 99–114.
2. Azizoglu, M., Cakmak, E. y Kondakci, S. 2001. A flexible flow shop problem with total flow time minimization. *European Journal of Operation Research* 132, 528-538.
3. Balas, E. 1969. Machine sequencing via disjunctive graphs: An implicit enumeration algorithm. *Operations Research* 17, 941-957.
4. Campbell, H., Dudek, R. y Smith, M. 1970. A Heuristic Algorithm for the n Job, m Machine Sequencing Problem. *Management Science* 16B, 630-637.
5. Campos, A. 2008. Un modelamiento tipo Flow Shop Flexible para el proceso de refinado y moldeo de cobre. Tesis para optar al grado de magister en Ingeniería Industrial. Universidad de Concepción, Chile.
6. Carrasco, D. 2010. Problema del árbol de cobertura mínimo generalizado, mediante simulated annealing. Memoria de Título para optar al título de Ingeniero Civil Industrial. Universidad de Concepción, Chile.
7. Damodaran, P., Srihari, K. y Lam, S. 2007. Scheduling a capacitated batch-processing machine to minimize makespan. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 23, 208-216.
8. Davoudpour, H. y Ashrafi, M. 2009. Solving multi-objective SDST flexible flow shop using GRASP algorithm. *Int J Adv Manuf Technol* 44, 737–747.
9. Graham, R.L., Lawler, E.L., Lenstra, J.K. y Rinnooy Kan, A.H.G. 1979. Optimization and approximation in deterministic sequencing and Scheduling theory: *Annals of Discrete Mathematics* 5,287-326.
10. Gupta JND. 1988. Two-stage, hybrid flowshop scheduling problem. *Journal of the Operational Research Society* 39 (4), 359–64.
11. Feo, T y Resende, M. 1989. A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problema. *Operations Research Letters* 8, 67-71.
12. Festa, P. y Resende, M. 2004. GRASP: An annotated bibliography of grasp. <http://www.graspheuristic.org>.
13. Haupt, 1989. A survey of priority rule-based scheduling, *OR Spektrum* 11, 1989.
14. Hong, T., Huang, P., Horng, G. y Wang, C. 2007. Three Algorithms for Flexible Flow-shop Scheduling. *American Journal of Applied Sciences* 4 (11): 889-896.
15. Johnson, S. M., 1954. "Optimal two- and three-stage production schedules with set-up time included", *Naval Research Logistics Quarterly* 1, 61-68.
16. Jungwattanakita, J., Reodechaa, M., Chaovalitwongsea, P. y Werner, F. 2009. A comparison of scheduling algorithms for flexible flow shop problems with unrelated parallel machines, setup times, and dual criteria. *Computers & Operations Research* 36, 358 – 378.
17. Kirkpatrick S, Gelatt Jr CD, Vecchi MP. 1983. Optimization by simulated annealing. *Science* 220, 671–80.
18. Lei, D., Zhang, Q., Cheng, W., Wang, T. y Guo, X. 2010. Genetic algorithm based multi-objective scheduling in a flow shop with batch processing machines. *Sch. of Autom., Wuhan Univ. of Technol. Univ. of Springfield, Wuhan, China*, 694 – 699.
19. Manjeshwar, P., Damodaran, P. y Srihari, K. 2009. Minimizing makespan in a flow shop with two batch-processing machines using simulated annealing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 25, 667– 679.
20. Méndez, C., Cerdá, J., Grossmann, I., Harjunkoski, I. y Fahl, M. 2006. State-of- art review of optimization methods for short-term scheduling of batch processes. *Computer and Chemical Engineering* 30, 913-946.
21. Nowicki, E. y Smutnicki, C. 1998. The flow shop with parallel machines: A tabu search approach. *European Journal of Operations Research* 106, 226-253.
22. Paternina, C., Montoya, J., Acero, M. y Herrera, M. 2008. Scheduling jobs on a k-stage flexible flow-shop. *Ann Oper Res* 164: 29–40.
23. Peña, R. 2005. El problema de secuenciamiento de operaciones en la fusión y conversión de la fundición de concentrados de cobre de Chuquicamata. Uso de algoritmos metaheurísticos. Memoria de título para optar al título de Ingeniero Civil Industrial. Universidad de Concepción, Chile.
24. Pinedo, M. 2008. *Scheduling Theory, Algorithms and Systems*. Springer; 3rd edition.
25. PRADENAS L., PARADA V., And ZUÑIGA J (2006). Copper Smelting Operations Programming, *INTERFACES*, 296-301.
26. PRADENAS L., NUÑEZ G., PARADA V. y FERLAND J (2005). Gestión de operaciones de refinado y moldeo en la producción de cobre, *Revista Ingeniería de Sistemas-U de Chile*, vol. XIX, pág 19-28, Universidad de Chile.
27. Quadt, D. y Kuhn, H. 2007. Batch scheduling of jobs with identical process times on flexible flow lines. *Int. J. Production Economics* 105, 385–401.
28. Ruiz, R. Sivrikaya, F. y Urlings, T. 2008. Modeling realistic hybrid flexible flowshop scheduling problems. *Computers & Operations Research* 35, 1151 – 1175.
29. Shiau, D., Cheng, S. y Huang, Y. 2008. Proportionate flexible flow shop scheduling via a hybrid constructive genetic algorithm. *Expert Systems with Applications* 34, 1133–1143.
30. Sundaramoorthy, A. y Maravelias, C. 2008. Simultaneous Batching and Scheduling in Multistage Multiproduct Processes. *Ind. Eng. Chem. Res.* 47, 1546-1555.
31. Tang, L. y Liu, B. 2009. Minimizing makespan in a two-machine flowshop scheduling with batching and release time. *Mathematical and Computer Modelling* 49, 1071-1077.



**Universidad de  
Concepción**

# **PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN EN FUNDICIONES DE COBRE**

Lorena Pradenas, DII-UDEC  
Víctor Parada, DIINF-USACH

6° SAT, Calama-Chile, Julio de 2012