

Desarrollo y utilización de aplicaciones de control de temperatura en el tren de cristalización de la unidad de MEK

Esteban J. Nigro Stefanich, Xavier J. Ruiz Álvarez
Repsol YPF

1. Resumen del trabajo realizado

En la unidad de MEK del Complejo Industrial La Plata (CILP) se ha diseñado y puesto en servicio una estrategia de control de temperaturas en los trenes de cristalización. La misma regula la distribución del fluido de intercambio disponible para lograr iguales temperaturas de salida de los Chillers, optimizando el sistema desde el punto de vista energético y operativo.

2. Introducción y Objetivo :

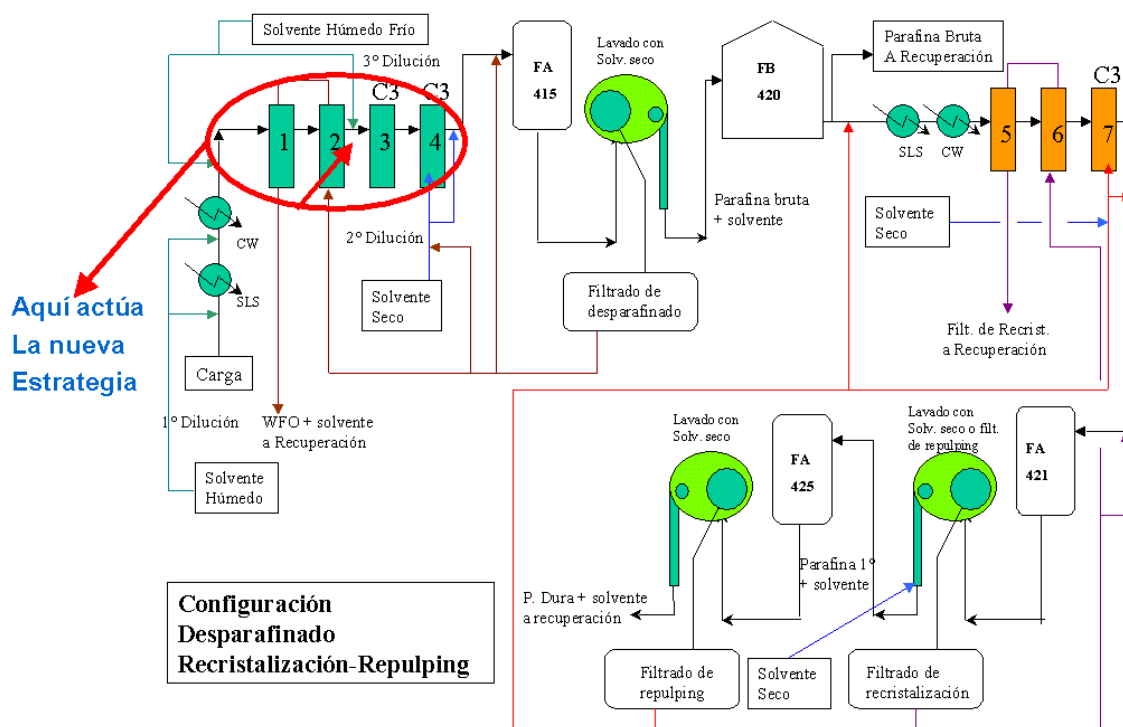
Dentro del proceso de elaboración de aceites lubricantes la unidad de MEK tiene por objetivo refinar las bases para conferirles la capacidad de fluir a bajas temperaturas, ajustando de esta manera el punto de escurrimiento de los aceites terminados.

Este objetivo se logra separando del aceite los componentes parafínicos de alto punto de fusión, a través de un proceso de dilución con solvente y enfriamiento controlados que culmina con una filtración en equipos rotativos al vacío. Este proceso es conocido vulgarmente como “desparafinado”. El aceite así obtenido es denominado usualmente WFO (Wax Free Oil).

Las parafinas separadas, conocidas con el nombre genérico de “parafina bruta” contienen un alto contenido de aceite. A través de sucesivas etapas de enfriamiento, dilución y filtración, se les extrae el aceite ocluido entre los cristales obteniendo otro producto de alto valor comercial llamado “parafina dura”, de alto punto de fusión y bajo contenido de aceite.

Un esquema del proceso se presenta a continuación:

Esquema del proceso



La unidad de MEK cuenta para el proceso de desparafinado con cuatro trenes de cristalización. Cada tren está a su vez conformado por cuatro cristalizadores denominados usualmente “chillers” (Figura N° 1).

Los cristalizadores están formados por series de doce o catorce intercambiadores de doble tubo.

Por el tubo interno de los equipos circula la carga a enfriar (aceite parafinoso y solvente de dilución). Cada tubo interior cuenta con un rascador accionado mecánicamente para evitar la deposición de cristales de parafina sobre la superficie interna del mismo.

El fluido de intercambio que circula por los espacios anulares es filtrado de desparafinado (aceite desparafinado o “WFO” y solvente) en el caso de los dos primeros cristalizadores y propano en el caso de los dos últimos.

Figura N° 1: Vistas de chillers



Durante el proceso de cristalización es importante mantener una diferencia de temperaturas acotada entre la entrada y la salida de cada cristalizador, con el fin de mantener las velocidades de enfriamiento dentro de valores recomendados para asegurar una adecuada

formación de cristales de parafina. Esto se logra controlando las temperaturas de salida de cada uno de los chillers.

En el caso de una distribución de carga adecuada a los trenes de cristalización, las temperaturas de salida de los cuatro cristalizadores ubicados en una posición equivalente dentro de cada tren deben ser iguales entre sí. Con ello se logran velocidades de enfriamiento y cristalización homogéneas en los cuatro ramales.

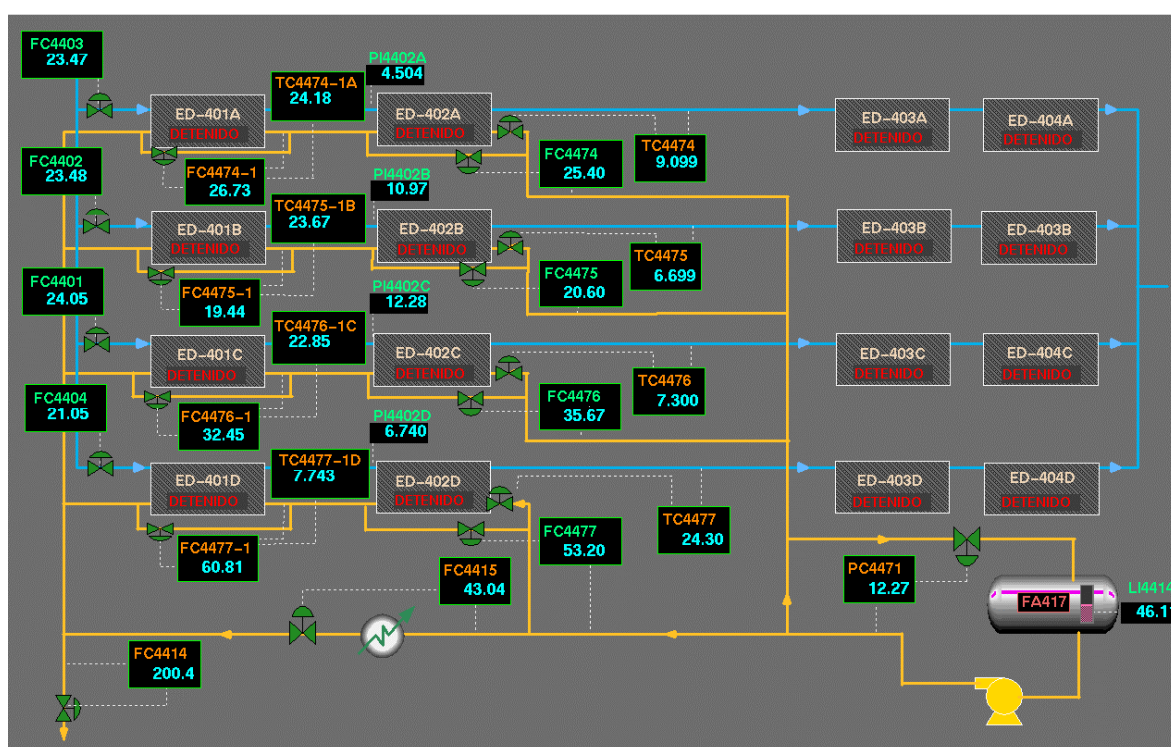
Para lograr estos propósitos se ha desarrollado la presente aplicación de control avanzado, cuyo objetivo final se define como igualar las temperaturas de salida de los cristalizadores que intercambian con filtrado y ajustarlas a una temperatura objetivo definida como óptima para cada corte.

3. Desarrollo

3.1. Estrategia de Control Original

3.1.1. Esquema

En el gráfico a continuación se puede apreciar un esquema del proceso y la estructura de control existente antes de la implementación de la estrategia:



En celeste está diagramado el circuito de carga, mientras que en naranja se pueden observar los circuitos relativos al fluido refrigerante (WFO).

Cada uno de los rectángulos nombrados como ED* representa un Chiller.

El WFO proviene de un acumulador (FA417). El mismo es impulsado por una bomba y forzado a circular a través de los intercambiadores.

El WFO se utiliza también para enfriar solvente. El caudal de WFO que se utiliza con este propósito no intercambia con carga en los chillers y es controlado por el lazo denominado FC4415.

3.1.2. Descripción de la estrategia original

Se puede apreciar que dentro de esta configuración, el control de temperatura de salida de carga de cada ramal es realizado por una válvula que permite el ingreso de WFO a cada equipo (TC4474/5/6/7).

A la vez se realiza un control de caudal individual a cada tren de intercambio a través de sendas válvulas que by pasan cada equipo de intercambio (lazos FC4474/5/6/7).

El caudal de WFO total al Sistema de Recuperación es controlado por el lazo FC4414 ubicado aguas debajo de los trenes de intercambio.

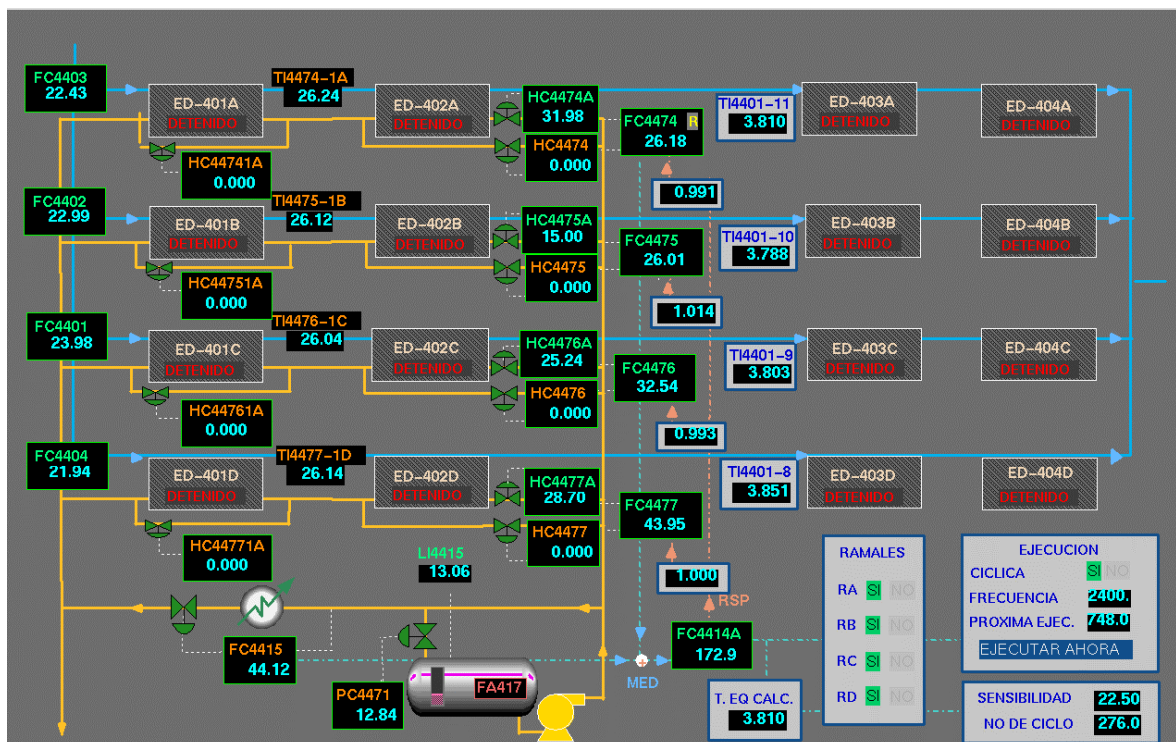
3.1.3. Problemas Observados en la configuración original

- El control de temperatura planteado se realiza desaprovechando capacidad de enfriamiento (se by-pasa WFO a los chillers 2).
- El control de caudal de filtrado a cada Chiller 2 queda en serie con el Control de caudal Total (FC4414), dando lugar a fallas en la controlabilidad del sistema por interferencia o incompatibilidad entre los objetivos de los lazos (aun en el caso de que los SP sean consistentes, las mediciones son multifuente)

3.2. Estrategia de Control Actual

3.2.1. Esquema

En el siguiente gráfico , observamos la estructura incorporada :



La descripción de la estrategia de control asociada a este esquema, así como los objetivos relacionados con el proceso que dieron lugar a esta nueva configuración serán objeto de la exposición que sigue.

3.2.2. Descripción del funcionamiento de la estrategia

La estrategia reparte el filtrado disponible entre los cuatro ramales con el objetivo de ajustar la temperatura de cada ramal a un valor objetivo que es el mismo para todos. Para ello utiliza un **algoritmo** que calcula el set point de caudal de filtrado a intercambiar en cada uno de los ramales:

- A partir de la diferencia entre la temperatura de salida de carga de cada ramal y la temperatura objetivo.
- En función de la distribución de la carga total entre los cuatro ramales.
- Teniendo en cuenta la “historia” de cada ramal, es decir, la evolución del caudal de filtrado desde que la estrategia de control se puso en servicio.

Para el diseño de la estrategia se definieron las siguientes premisas:

- OPTIMIZACION ENERGÉTICA: APROVECHAR TODO EL WFO DISPONIBLE PARA ENFRIAR FLUIDOS
- LOS CHILLERS N° 1 Y 2 FORMAN UN SOLO BLOQUE DESDE EL PUNTO DE VISTA DEL CONTROL DE TEMPERATURA
- NO PERTURBAR EL CAUDAL TOTAL DE WFO AL INTENTAR CONTROLAR LAS TEMPERATURAS.
- NO PERTURBAR EL PROCESO AL MOMENTO DE PONER O SACAR DE SERVICIO LA ESTRATEGIA.

Para aprovechar al máximo la capacidad de refrigeración del sistema, se estableció que el caudal de WFO disponible circularía en su totalidad a través de los equipos de intercambio. Para ello todas las válvulas reguladoras que by-pasan WFO a los chillers normalmente permanecerán en estado Manual cerrado.

En ocasiones es necesario sacar de servicio temporalmente algún Chiller N°2 por problemas mecánicos. En estas circunstancias sigue siendo necesario mantener un caudal de circulación a través del chiller N°1 para evitar sobrecargar las etapas siguientes de enfriamiento (chillers de propano) del tren que no cuenta con el equipo N°2.

Por este motivo se decide dotar a los nuevos FC4474/5/6/7 de la capacidad de controlar caudal de WFO a su respectivo ramal, tanto cuando el fluido pasa a través del equipo N°2 como cuando lo hace por fuera del mismo. Para lograr este propósito se adoptó la configuración de válvulas con alternativa de control seleccionable, denominadas HC (HC4474/A,5/A,6/A,7/A) observada en el esquema. Esta configuración permite direccionar la salida de los nuevos FC4474/5/6/7 hacia una de las dos HC de cada ramal para controlar el caudal de WFO al destino deseado, manteniendo en estado Manual cerrado la HC del destino no seleccionado.

3.2.3. Control del caudal total de WFO al sistema de recuperación

En la estrategia planteada el caudal total de WFO se controla con una configuración tipo cascada en la que las válvulas de los antiguos reguladores de temperatura (TCs 4474/5/6/7)

pasan a ser reguladoras de caudal de WFO a cada ramal (FC4474/5/6/7 del nuevo esquema) , con un maestro de caudal, que fue denominado FC4414A.

El caudal de WFO medido por el FC4414A resulta de la suma del caudal medido por los FC4474/5/6/7 y el FC4415.

El maestro de caudales (FC4414A) genera una señal de salida **igual para todos los lazos esclavos**, que varía para compensar el error total de caudal de WFO del sistema de enfriamiento descrito respecto de su set point de caudal.

Esta señal, que en adelante llamaremos RSP (Remote Set Point), es tomada y escalada a unidades de ingeniería por los esclavos (FC4474/5/6/7) que estén en la estrategia.

3.2.4. Control de temperaturas de salida de carga de los chillers N° 2

3.2.4.1. Cálculo de la temperatura objetivo

Para igualar las temperaturas de salida de los trenes de enfriamiento la estrategia opera distribuyendo el caudal total de WFO disponible entre los ramales incluidos dentro de la misma.

La temperatura objetivo a la deberán aproximarse las salidas de los chillers N° 2 surge del cálculo de la temperatura que el sistema alcanzaría si se mezclasen las corrientes de salida de carga de dichos chillers. La misma será llamada en adelante “Temperatura Promedio Ponderada” (TPP).

La TPP surge del balance de energía en un nudo de corrientes:

$$TPP = \frac{\sum m_i * t_i}{\sum m_i}$$

Donde:

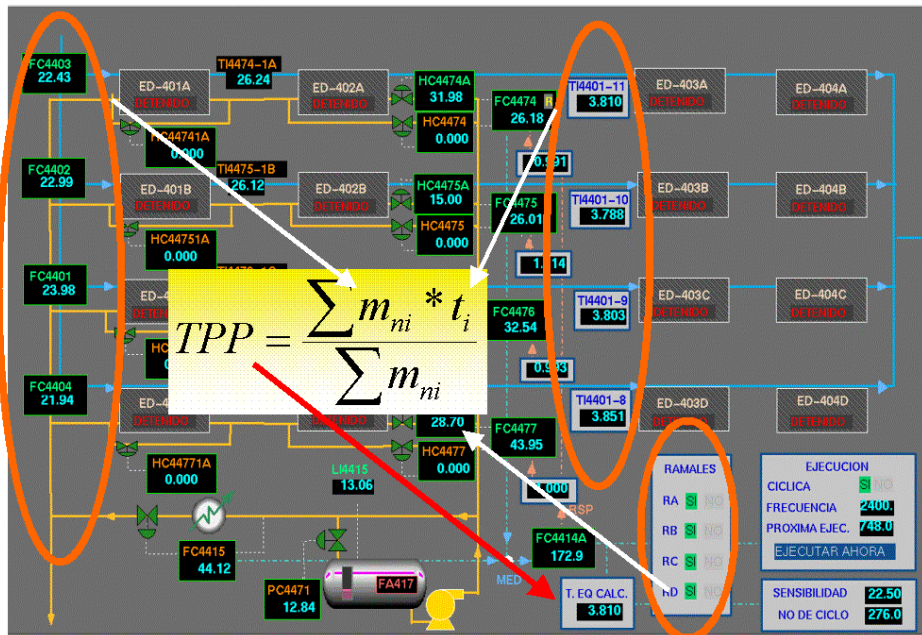
m_i es el caudal de carga a cada tren de enfriamiento

t_i es la temperatura de salida de la carga de cada tren de enfriamiento

Esta temperatura, por la naturaleza de su cálculo, se actualiza permanentemente y de hecho está disponible en pantalla para que el operador conozca el valor al que deben tender las temperaturas de salida de carga de los chillers N° 2 de su sistema.

En el proceso:

Calculo de la Temperatura Promedio Ponderada



3.2.4.2. Cálculo de los Set Points Locales (LSP_i)

Para poder igualar las temperaturas de salida de carga de los ramales a partir de la manipulación de los caudales de WFO, manteniendo a la vez el caudal total de WFO solicitado al lazo maestro (FC4414A) la estrategia opera entre la salida del Maestro de WFO (RSP) y la entrada de Set point a cada lazo esclavo (FC4474/5/6/7).

La estrategia modifica el caudal de WFO a cada ramal, en función de su desvío respecto de la TPP y de la distribución de la carga total entre los ramales incluidos en la misma.

Para cada esclavo controlador de caudal de WFO a un ramal “i” involucrado en la estrategia (FC4474/5/6/7) se define un Set Point Local (LSP_i) que tiene la siguiente forma:

$$LSP_i = RSP * \text{RATIO}_i + \text{BIAS}_i$$

Se observa que la estrategia corrige el RSP enviado por el lazo maestro de caudal a cada esclavo, transformándolo en sendos Set Points locales (LSP_i),

Como es esperable, la sumatoria de los caudales repartidos entre los ramales que se incluyen en la estrategia debe ser igual a la suma de caudales solicitados por el maestro:

$$n * RSP = \sum LSP_i$$

n: número de ramales incluidos en la estrategia (de 2 a 4)

Para corregir el RSP y convertirlo en sendos Set Points locales (LSP_i) la estrategia se vale de dos campos existentes en sus bloques PID, llamados **BIAS** y **RATIO**.

Estos parámetros son calculados y actualizados a cada uno de los lazos “periódicamente” El tiempo transcurrido entre dos de estas operaciones es el “Período de ejecución” que puede observarse en el nuevo esquema de control.

Este período surge a partir del estudio de la propagación de una perturbación en el proceso (cambio de caudal de WFO en un ramal) y el tiempo necesario para que la mayoría de su efecto (cambio de temperatura de la carga a la salida del chiller) se vea trasladado al sistema .

Para el sistema en cuestión este tiempo es de aproximadamente 45 minutos.

3.2.4.3. Cálculo del Ratio

En el parámetro Ratio la estrategia escribe los desbalances de caudal necesarios para ir corrigiendo las diferencias de temperatura detectadas entre la temperatura de salida de carga del ramal “i” y la TPP, teniendo en cuenta la proporción del caudal total de carga que pasa por dicho ramal.

Su expresión matemática es la siguiente:

$$RATIO_i = F(m_i, T_i)$$

Donde:

T_i : Temperatura de salida de carga del ramal “i”

m_i : Medición del caudal de carga al ramal “i”

El algoritmo cumple la condición: $\sum RATIO_i = 1$

3.2.4.4. Cálculo del BIAS

El parámetro $BIAS_i$ representa una memoria en la que se guarda el desfase entre el RSP enviado por el maestro y el caudal del ramal en cuestión antes de que la estrategia se ejecute. Este parámetro permite no incorporar perturbaciones al proceso cuando la estrategia se pone en servicio y además integra ciclo tras ciclo el desvío entre el RSP y el caudal medido en cada ramal justo antes de que un nuevo ciclo se inicie, lo que es equivalente a contar con la “historia de correcciones” realizada por la estrategia.

Su expresión matemática es la siguiente:

$$BIAS_i = F(mf_{isp})$$

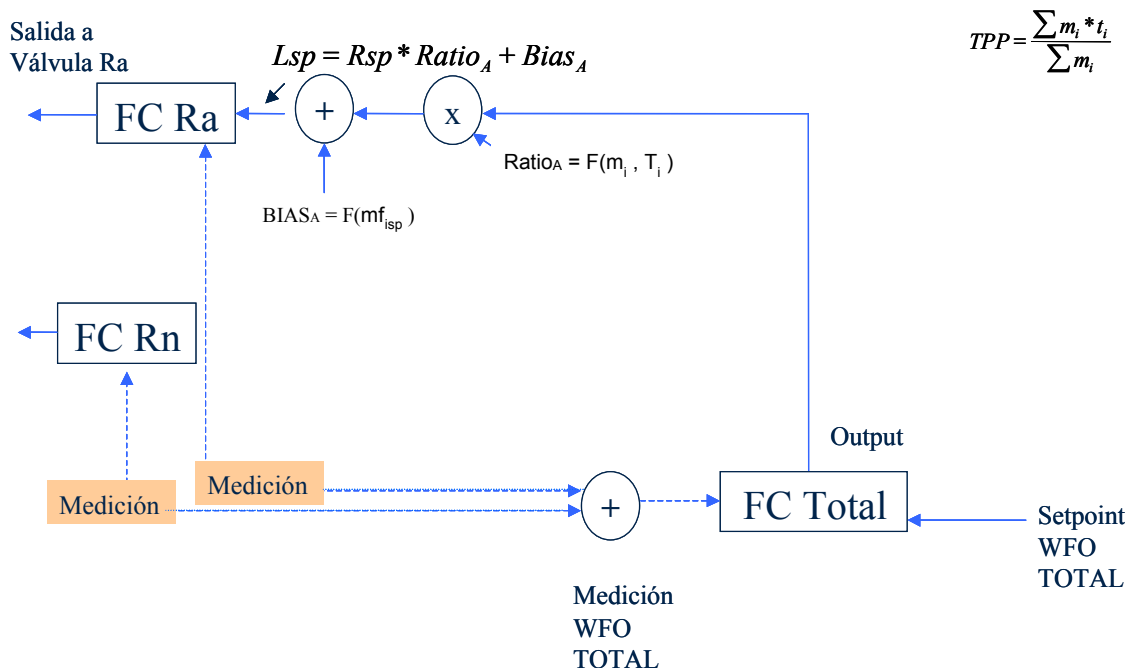
Donde:

mf_{isp} : Set point de caudal de filtrado al ramal “i” al momento de la ejecución de la estrategia

El algoritmo cumple la condición: $\sum BIAS_i = 0$

Un resumen gráfico de la acción de la estrategia de control se puede observar en el esquema siguiente:

Control WFO (Ramal A)



3.2.4.5. Control de la TPP

Recientemente se incorporó el control de la TPP con el objeto de mantenerla en el óptimo para cada corte .

Este control se basa en manipular dentro de límites prefijados el paso de WFO por el circuito de enfriamiento de solvente, controlado por el lazo de caudal FC4415, lo que permite modificar el caudal total de fluido refrigerante a repartir entre los chillers sin alterar la distribución de caudales definida por el resto de la estrategia.

De esta manera, para el FC4414A (control de caudal total de WFO) el FC4415 sigue siendo una variable de perturbación, pero desde el punto de vista del control de temperaturas el FC4415 pasa a ser una variable manipulada.

4. Versatilidad de la estrategia

La estrategia ha sido diseñada con una flexibilidad tal que contempla la posibilidad de operar con ramales completos fuera de servicio, chillers que intercambian con filtrado fuera de servicio, modificaciones de las cargas a los trenes de cristalización, alternativas de operación como inyección de solvente húmedo o by-pass de equipos en el caso de taponamientos, etc.

5. Configuración en el DCS

5.1. Generalidades

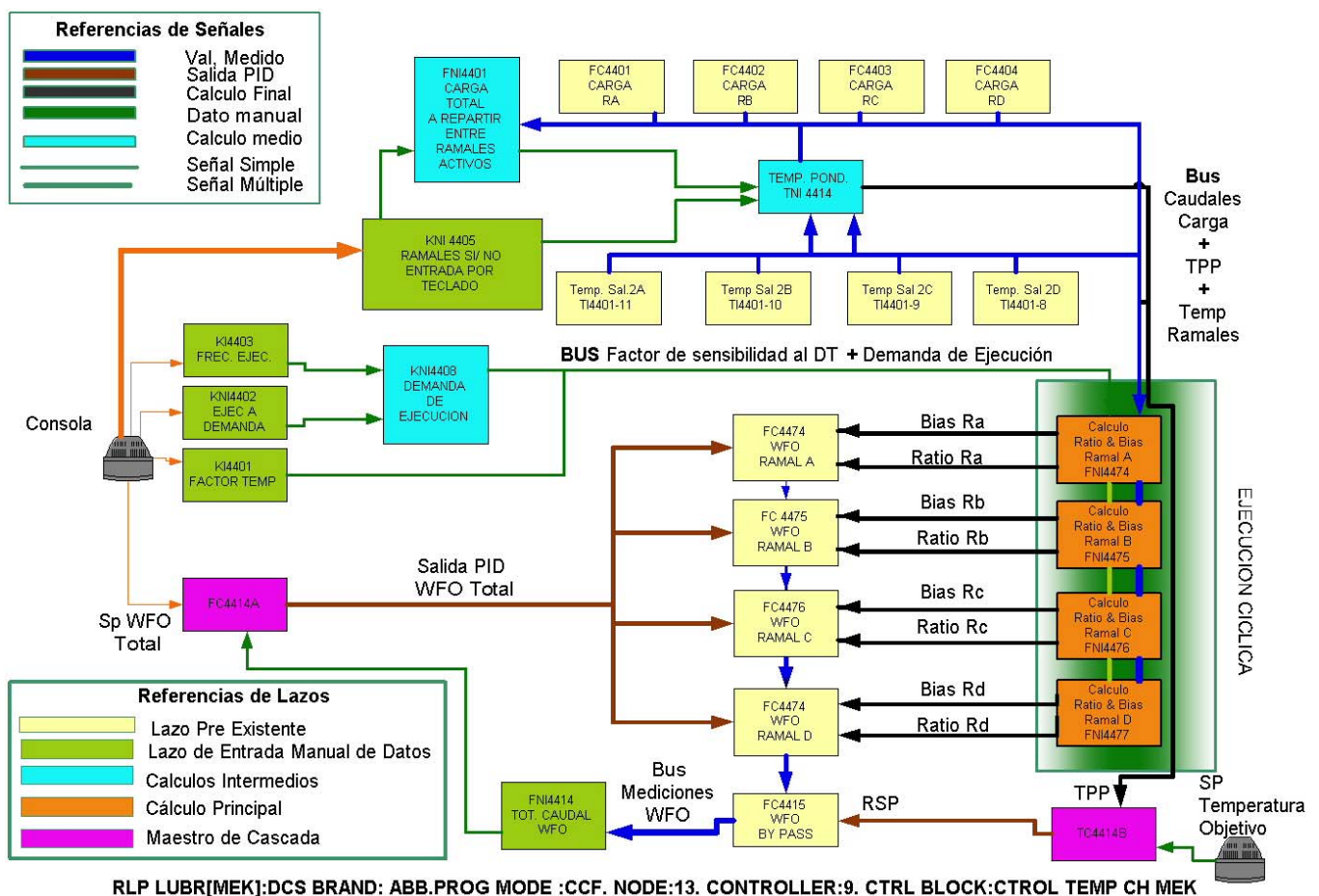
El sistema en el que corre la estrategia es de la línea Advant de ABB. Con consolas de operación basadas en Unix y Controladores tipo AC460 y SC controller.

Las configuraciones se realizaron utilizando CCF (programación en bloques) ya que por tratarse de una estrategia piloto la programación en bloques permitió ir agregando de manera gradual y modular las funcionalidades realizando cambios en cada etapa hasta lograr la configuración final.

Para implementaciones posteriores, parte de la aplicación podría ser programada en lenguaje de secuencias como TCL (Taylor Control Lenguaje).

5.2 Estructura de lazos del esquema de control

Se resume en el diagrama siguiente:

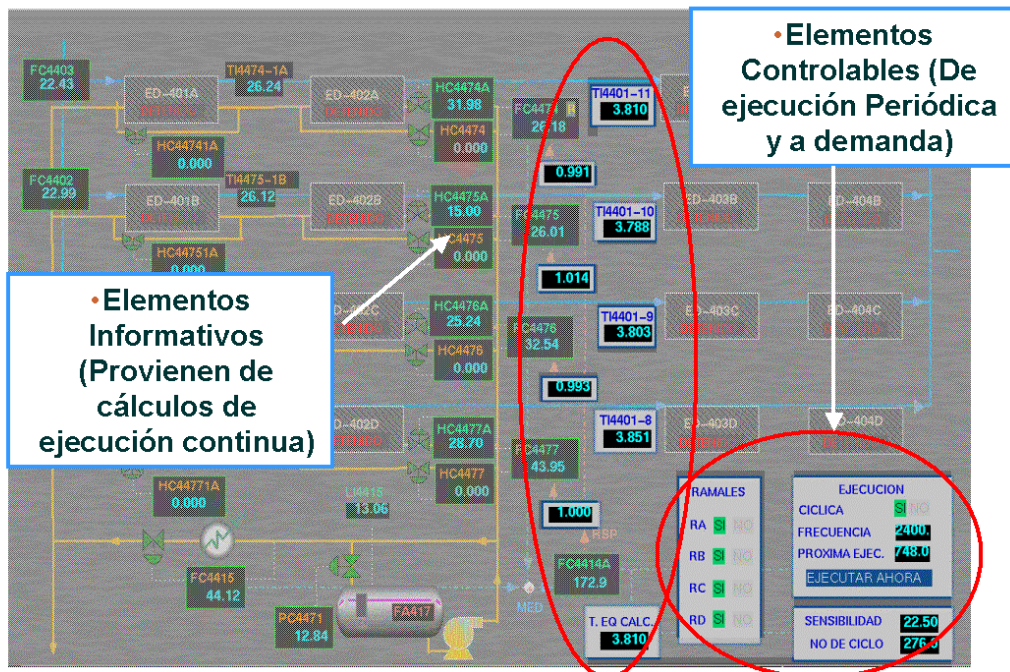


5.3 Interfase de Usuario

- Se configuró en fondo diferenciado de manera de posibilitar información rápida.
- Manejo intuitivo.
- Textos dinámicos apoyados con colores permisivos, prohibitivos o neutros.

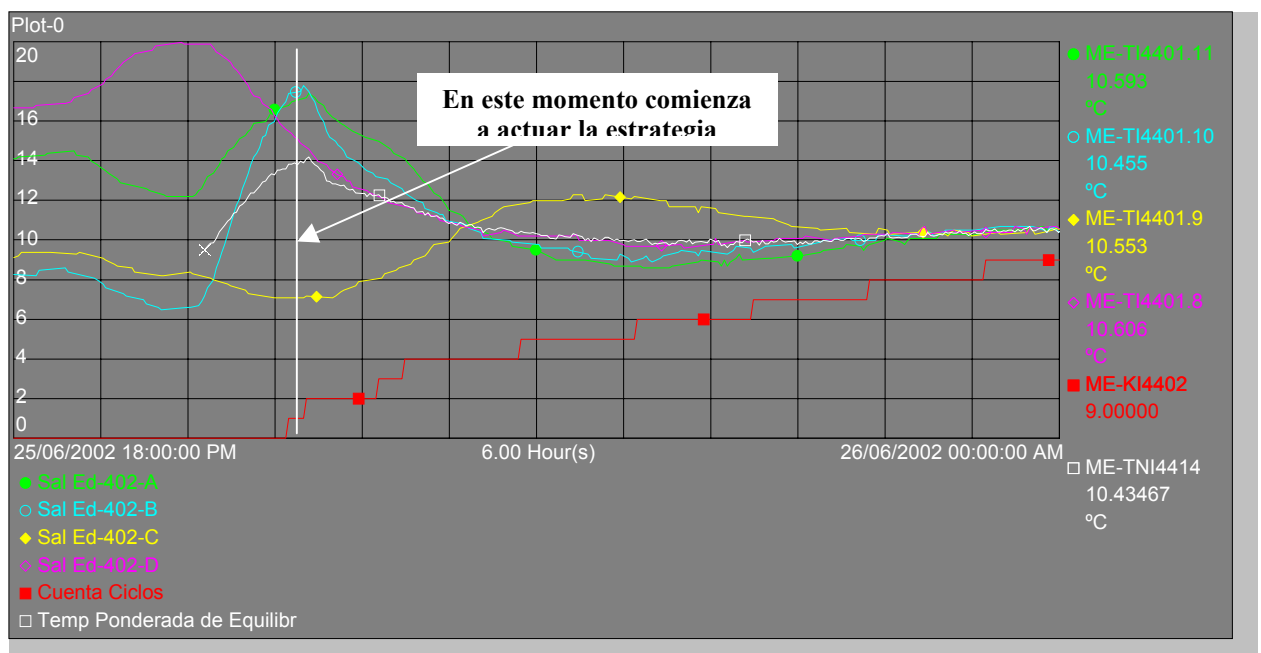
La misma puede observarse en el esquema siguiente:

Interfase de Usuario



6. Resultados obtenidos

A partir de la puesta en servicio de la estrategia de control, se ha logrado mantener la temperatura de salida de los chillers N° 2 de los cuatro trenes de cristalización con una diferencia de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$. La dispersión existente entre estas temperaturas sin la estrategia en servicio, así como la respuesta de las temperaturas una vez que la misma se pone en marcha puede observarse en el gráfico anexo.



De acuerdo a lo comentado en la introducción, este hecho redunda en:

- Incremento aproximado de 1 – 2% en el rendimiento en aceite de la unidad de acuerdo al corte lubricante procesado.

- Mejora en la filtrabilidad de la carga, con el consecuente aumento de capacidad para el caso de los cortes pesados (C-40 y Bright Stock).

- Incremento en la calidad de la parafina bruta. Sobre este punto se ha observado una reducción del contenido de aceite del 3 – 4 %, parcialmente atribuible al efecto del control de temperaturas sobre la cristalización.

7. Autores:

Esteban J. Nigro Stefanich

Es Ingeniero en Electrónica especializado en Control, de la Universidad Nacional de Córdoba (1998). Ingresó a REPSOL-YPF en 1998 para trabajar en Operaciones del Dpto. Lubricantes de CILP. Actualmente se desempeña como Ingeniero en Control y Sistemas del Dpto. de Control Avanzado de CILP.

Xavier J. Ruiz Álvarez

Es Ingeniero Químico de la Universidad Nacional de La Plata (1996). Ingresó a REPSOL-YPF al año siguiente para trabajar en Operaciones del Dpto. Lubricantes de CILP. Actualmente se desempeña como Ingeniero de Procesos del Dpto. Lubricantes.