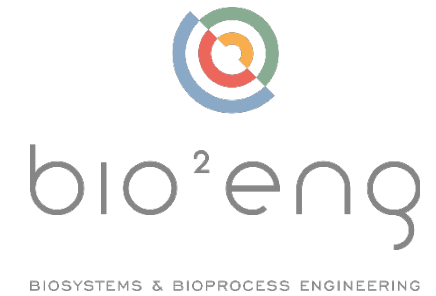




**Universidad
de Valladolid**



Integrated plant-wide control and
optimization for industry4.0



Scheduling de crudos con incertidumbre en una refinería de petróleo

Tomás García, Gloria Gutiérrez, Carlos Méndez, Carlos Gómez Palacín, César de Prada
[Universidad de Valladolid](#)

**Workshop final
20-21 junio, 2022**

Formulación y resolución del scheduling de crudos y gestión de inventario de una refinería de petróleo

Programación estocástica de operaciones de crudos y gestión de riesgo

Formulación y resolución del scheduling de crudos y gestión de inventario de una refinería de petróleo

Programación estocástica de operaciones de crudos y gestión de riesgo

Operaciones de crudos en refinería



Abastecimiento



Almacenamiento



Refinación

Programación de las operaciones o *scheduling*

Asignar recursos a las operaciones y **secuenciar** la ejecución de las mismas de manera de cumplir con el plan de producción elaborado. Por ejemplo, asignar un tanque para alimentar una unidad de destilación.

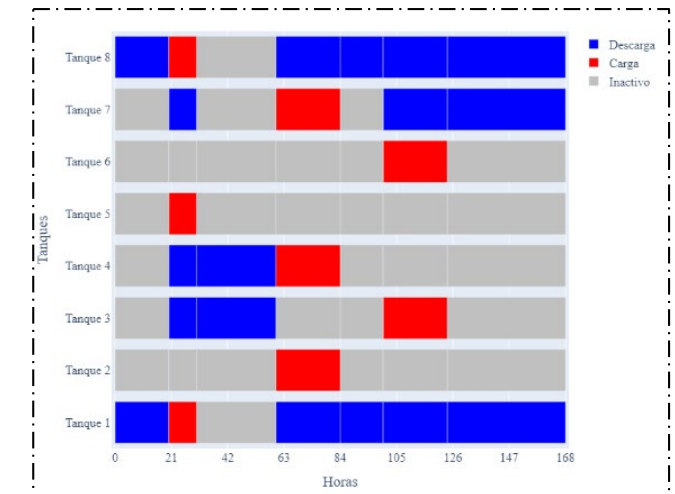


Diagrama de Gantt de tanques

Formulación y resolución del scheduling de crudos y gestión de inventario de una refinería de petróleo

Objetivo

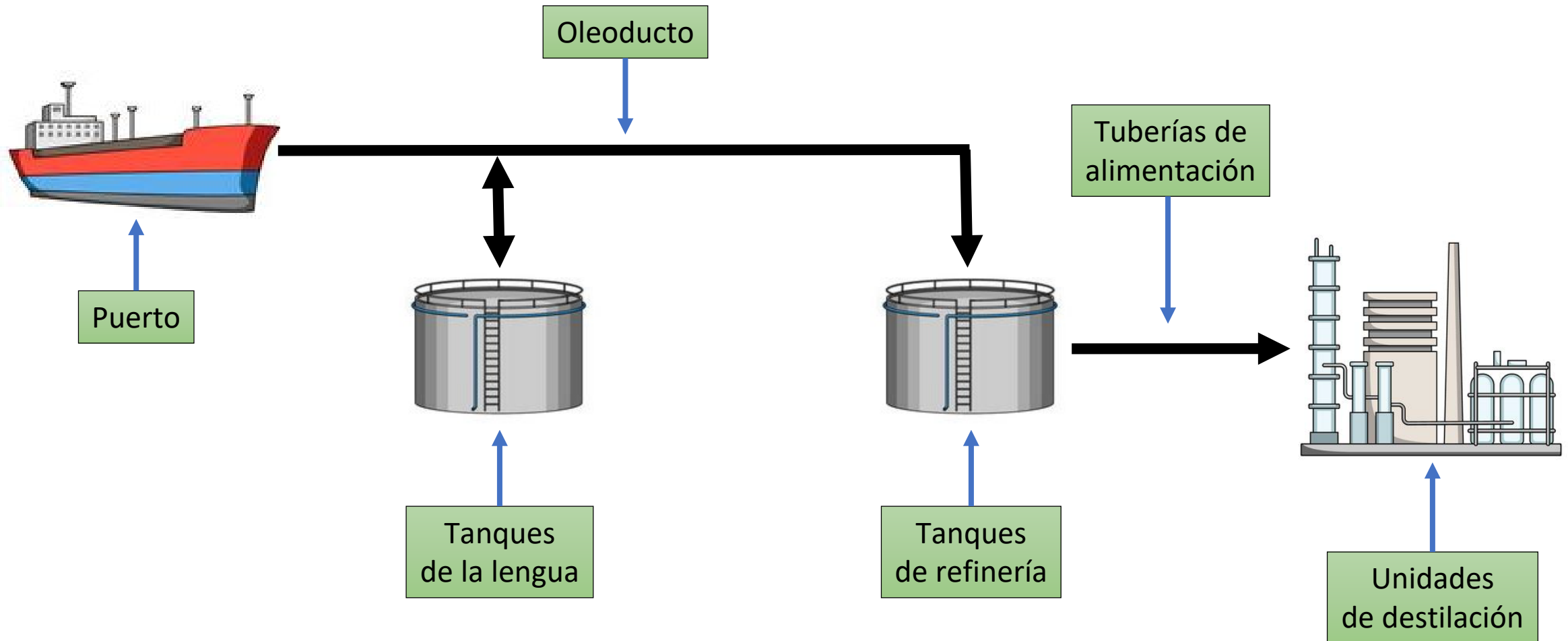
El presente trabajo se centra en formular y resolver la **optimización de la programación de la operación de crudos** en una refinería de petróleo.

¿En qué consiste?

Decidir la mejor manera de operar el área de crudos, teniendo en cuenta la gestión de:

1. Llegada y descarga de barcos: orden y fechas de descarga, **asignación de barcos a tanques** y volúmenes descargados.
2. Inventario de crudos en tanques: volúmenes y tipos de crudos almacenados en cada tanque a lo largo del horizonte.
3. Carga de unidades de destilación atmosférica: asignación de tanques a unidades, mezcla de caudales para **cumplimiento de propiedades** (valor dentro de límites de especificación).





- La refinería debe cumplir con un **objetivo de producción mensual**.
- Los **procesos de crudos deben durar un mínimo de horas** para evitar continuos cambios de crudo que ocasionen ineficiencias.
- Cumplimiento de especificaciones de calidad en las mezclas de alimentación: **concentraciones de propiedades en las mezclas deben mantenerse dentro de rangos establecidos**.
- Se deben respetar en todo momento las **cargas mínimas y máximas de las unidades** objeto de optimización.
- Las fechas de la **campana de asfalto** están establecidas desde el inicio y deben respetarse.
- Debe transcurrir un mínimo de horas entre el fin de la descarga de un crudo en un tanque y su entrada en proceso.
- Se permite la descarga de un barco a la vez.
- **Descarga de barcos y tanques de la lengua no pueden llevarse a cabo simultáneamente** ya que ambas utilizan el mismo oleoducto.

Optimización de programación de la operación de crudos

Formulación de modelo

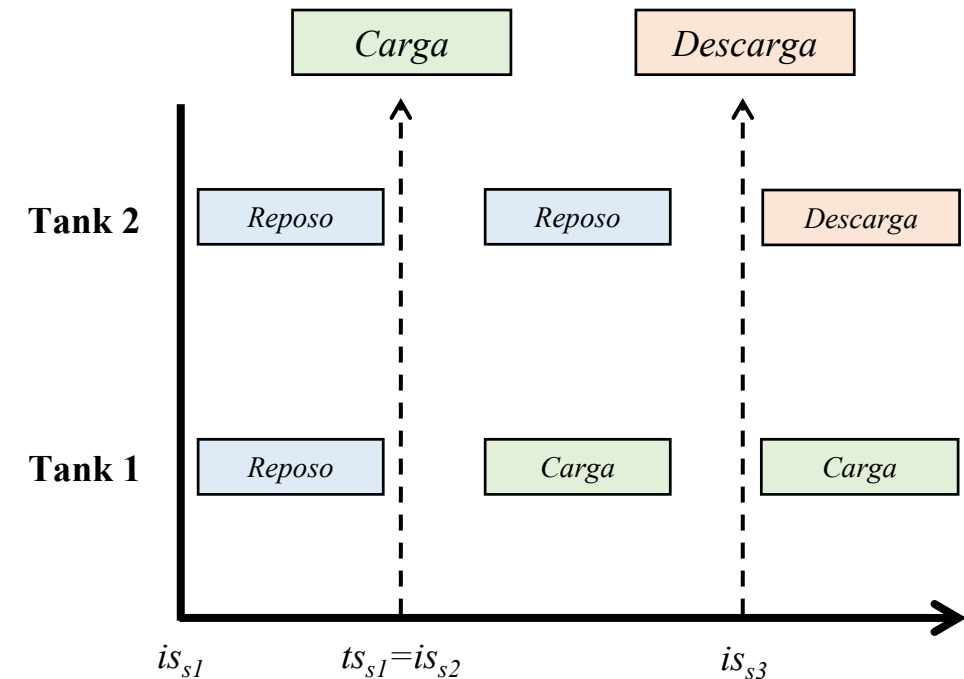
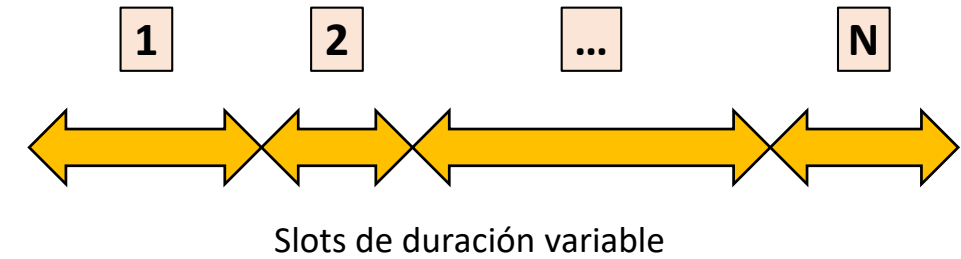
¿Cómo se aborda el problema?

Formulación de **modelo de programación matemática** que combina balances, propiedades y lógica de operación.

- Mixto entero no lineal.
- **Representación continua del tiempo.**

¿Cómo se realiza la formulación de tiempo continuo?

- El horizonte de programación se divide en fragmentos, llamados slots (s), de duración variable que se sincronizan a lo largo de todos los recursos.
- Se definen tres estados mutuamente excluyentes para los tanques: carga, descarga y reposo.
- Se activa un nuevo slot siempre que ocurra un cambio de estado en alguno de los tanques.
- No obstante, un tanque puede mantener el mismo estado a lo largo de slots consecutivos.



Optimización de programación de la operación de crudos

Variables, restricciones y objetivo

Variables

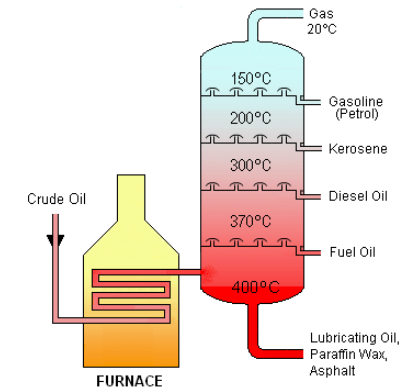
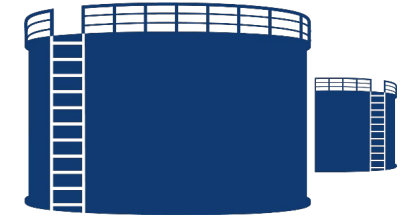
- **Reales:** nivel de inventario en tanques, volúmenes transferidos, duración de operaciones, entre otros. **Se definen variables de holgura para propiedades.**
- **Binarias:** representan decisiones lógicas y asignaciones.

Restricciones

- **Físicas:** balances de materia, **cálculo de concentración de propiedades en mezclas**, capacidades de almacenamiento, entre otros.
- **Operativas:** cumplimiento de tiempo de reposo luego de una carga, cotas mínimas y máximas en caudales, número de tanques que operan en paralelo, entre otros.

Función objetivo

Minimización de costes operativos, de holguras y maximización de carga de crudos en tanques según calidad: costos por diferencia entre volumen procesado y demanda requerida en cada unidad, por demora en inicio de descarga, y por partida tardía de barcos.

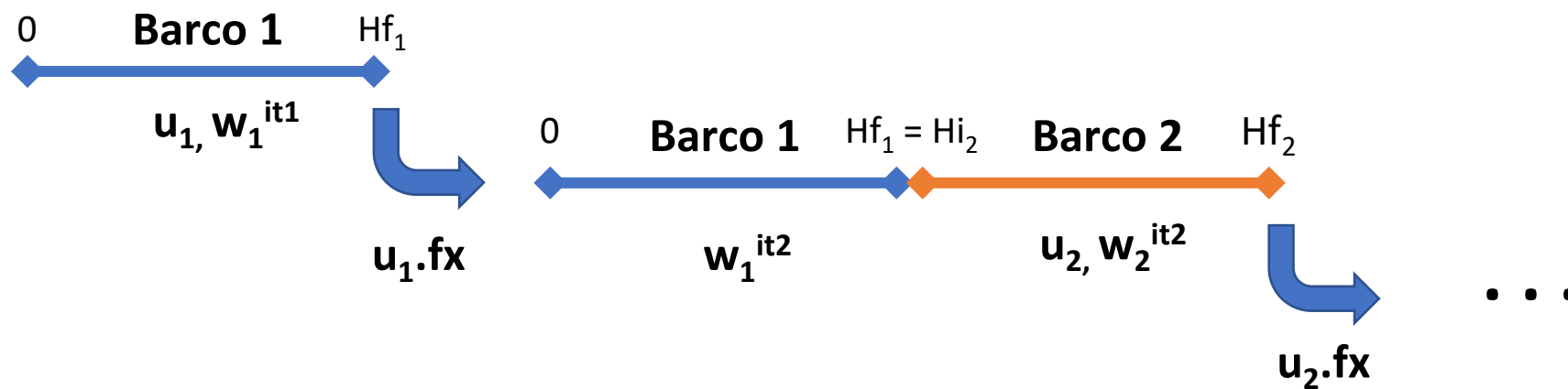


Motivación

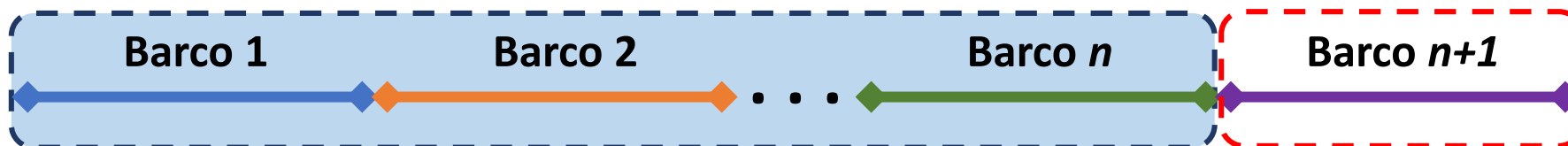
Debido a que no es posible resolver el modelo monolítico y **obtener una solución de la programación de operaciones de crudos para un horizonte de 30 días**, se ha desarrollado un método de descomposición capaz de conseguir este objetivo. Si bien no garantiza que la solución sea óptima, permite obtener una **solución factible en un tiempo razonable**.

Resumen

- Se resuelve el horizonte de forma gradual.
- Se itera sobre los barcos programados respetando el orden de llegada.
- Cada uno define un “subhorizonte” a optimizar.



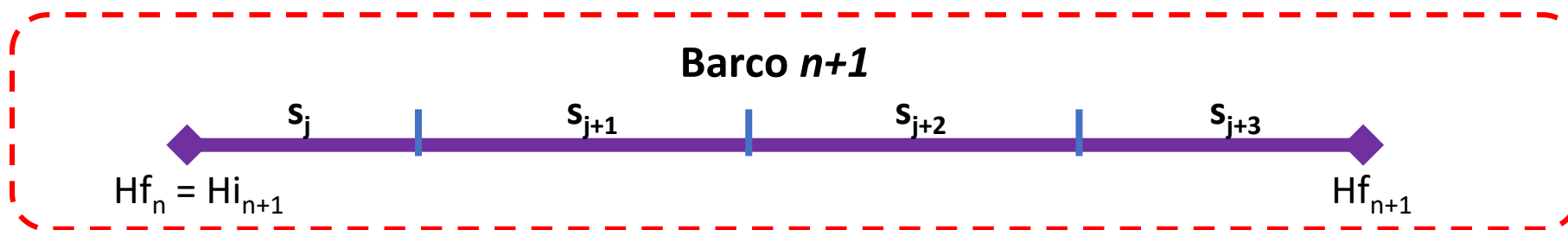
- Se selecciona el barco (subhorizonte) a optimizar.
- Se establece el inicio del subhorizonte, que es igual a la fecha de partida del barco anterior.
- Se establece la fecha final (prevista) del subhorizonte actual.
- Se definen los volúmenes demandados, de cada unidad para cada proceso, proporcional a la duración del horizonte completo.



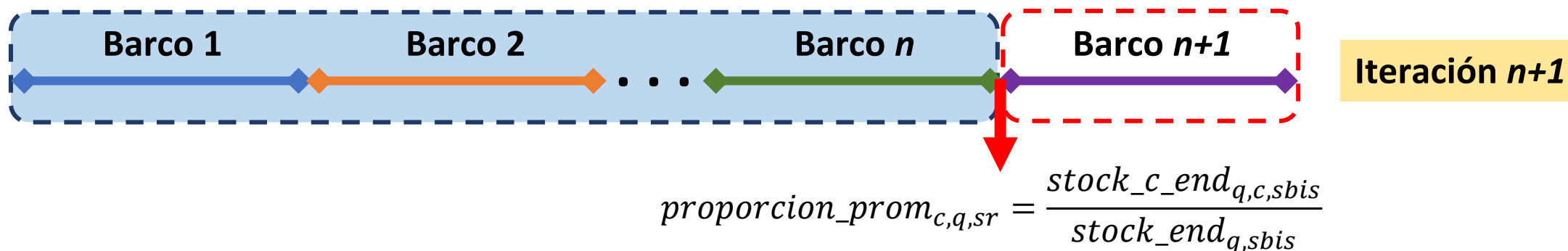
$$Hf_{n+1} = partida_esperada_{n+1} + 24$$

$$dparc_{u,p} = dtotal_{u,p} * Hf_{n+1} / Hfin$$

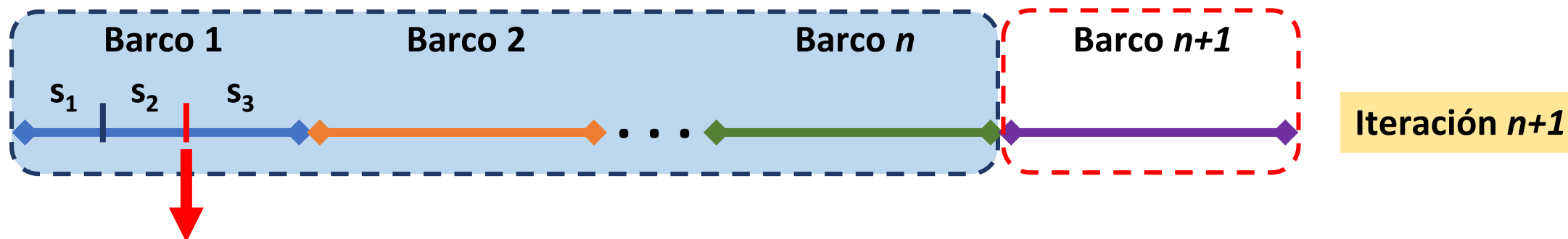
- Se configura el parámetro *relb* que indica el barco que se va a optimizar en la iteración actual.
- Se asignan slots al subhorizonte y se configura el parámetro *rels* para esos slots.
- Se configura el parámetro *Casf* para los nuevos slots, el cual indica si se debe llevar a cabo la campaña de asfaltos en la iteración actual.



- Para los slots asignados al subhorizonte de la iteración actual, se establecen los valores de concentración en los tanques iguales a los valores obtenidos al final del subhorizonte anterior.



- Para los slots asignados a los subhorizontes previos:
 - Se calculan los valores de concentración obtenidos a partir de la última solución.
 - Se calcula un valor promedio considerando las concentraciones obtenidas en todas las iteraciones previas.



$$proporcion_{it_{c,q,s3,n+1}} = \frac{stock_c_end_{q,c,s2}}{stock_end_{q,s2}}$$

$$proporcion_prom_{c,q,s3} = \frac{\sum_{bit \leq posb} proporcion_{it_{c,q,s3,bit}}}{posb - ord_br_sr_{s3}}$$

ord_br_sr_s: indica orden del barco/subhorizonte al cual fue asignado el slot *sr*.

posb: indica orden del barco/subhorizonte actual.

- Se resuelve el modelo y a partir de la solución obtenida:
 - Se fija como final del subhorizonte la fecha de partida del barco. (Nuevo valor de Hf_{n+1})



$$Hf'_{n+1} = \sum_{sr \text{ } rels_{sr}=1} tS_{sr} * xfd_{br, sr}$$

$Hf'_{n+1} : partida_{n+1}$

- Se configura el parámetro *rels2* (indica slots ya optimizados) para todos los slots del subhorizonte actual comprendidos entre el inicial y el slot correspondiente a la partida del barco.
- Se fijan para este subhorizonte los valores de las siguientes variables:
 - Inicio, fin y duración de slots.
 - Binarias de descarga de barcos.
 - Tiempos de espera y tardanza.
 - Binarias de carga y descarga de tanques.
- Se repite el procedimiento hasta cubrir la totalidad de los barcos.

Resultados: Inventario y clases de tanques

Software

GAMS 39.

OsiGurobi

Hardware

Intel(R) Core(TM) i7-10510U

2.30 GHz, 16 GB RAM.

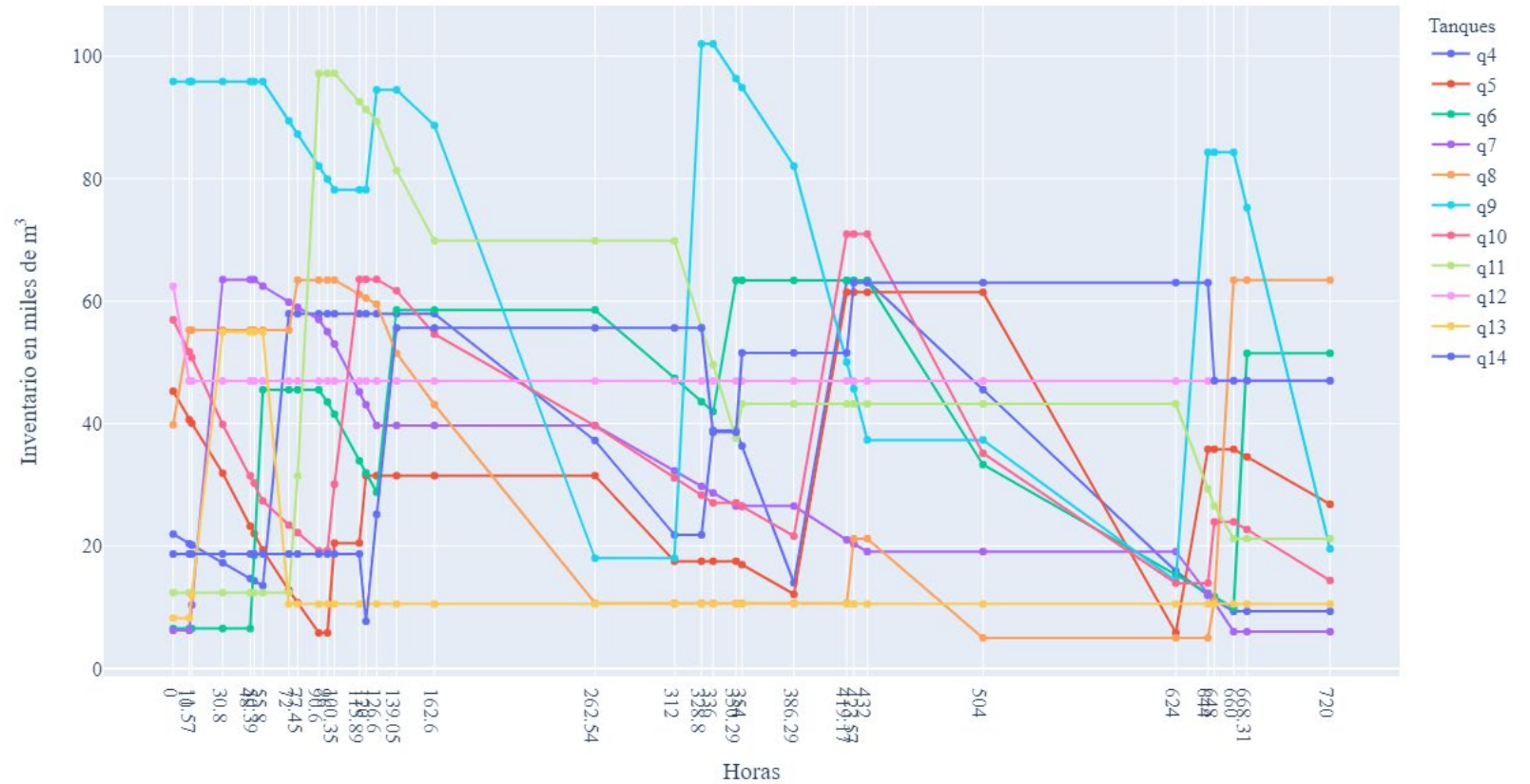
Restricciones: 611.880.

Variables continuas: 352.386.

Variables binarias: 9.979.

Tiempo de cómputo: 9:15 min

Inventario en tanques



Resultados: Inventario y clases de tanques

Software

GAMS 39.

OsiGurobi

Hardware

Intel(R) Core(TM) i7-10510U

2.30 GHz, 16 GB RAM.

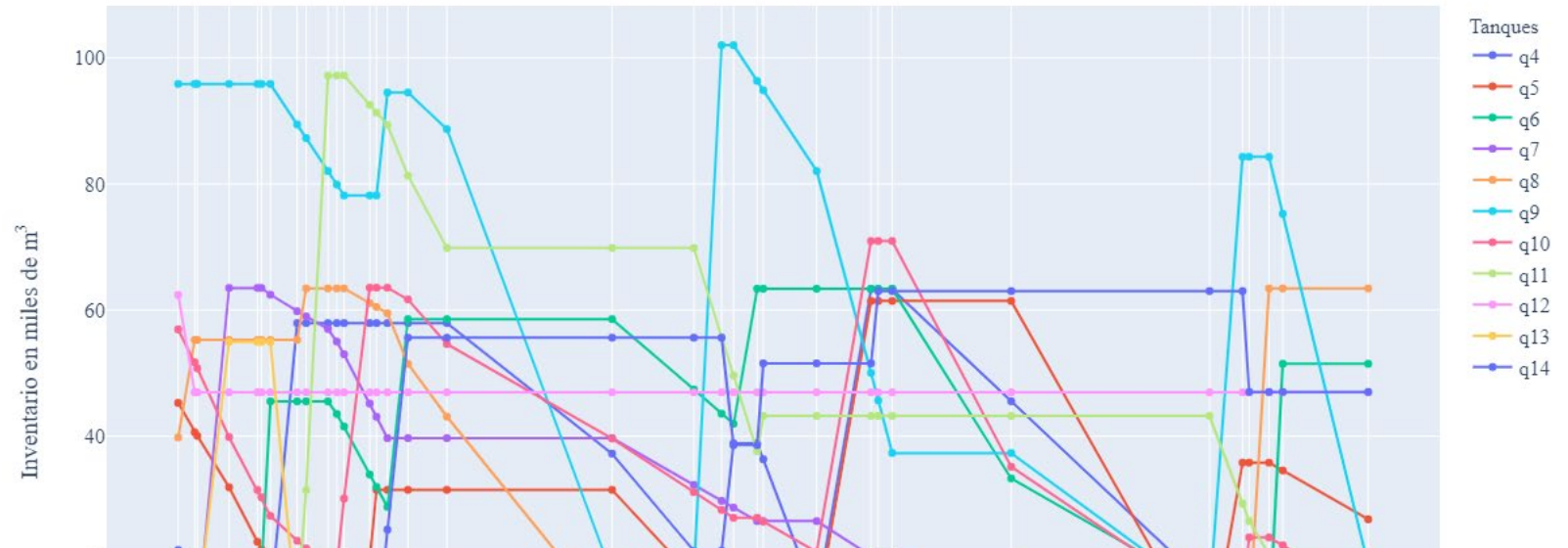
Restricciones: 611.880.

Variables continuas: 352.386.

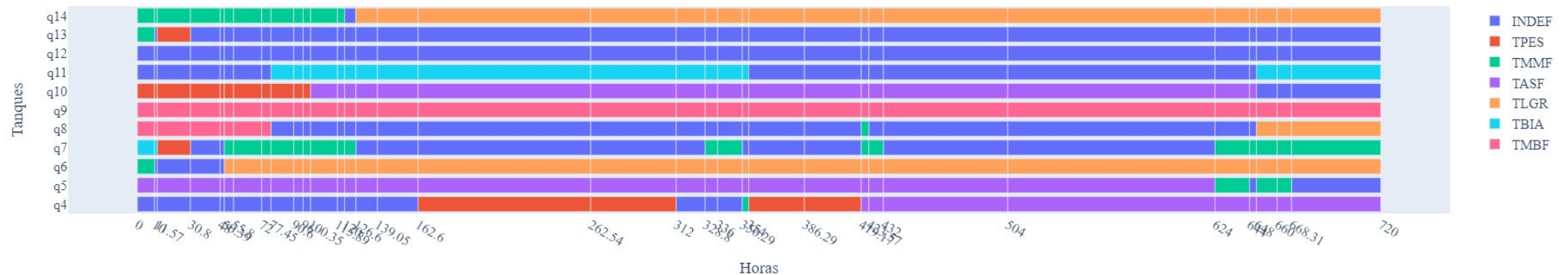
Variables binarias: 9.979.

Tiempo de cómputo: 9:15 min

Inventario en tanques

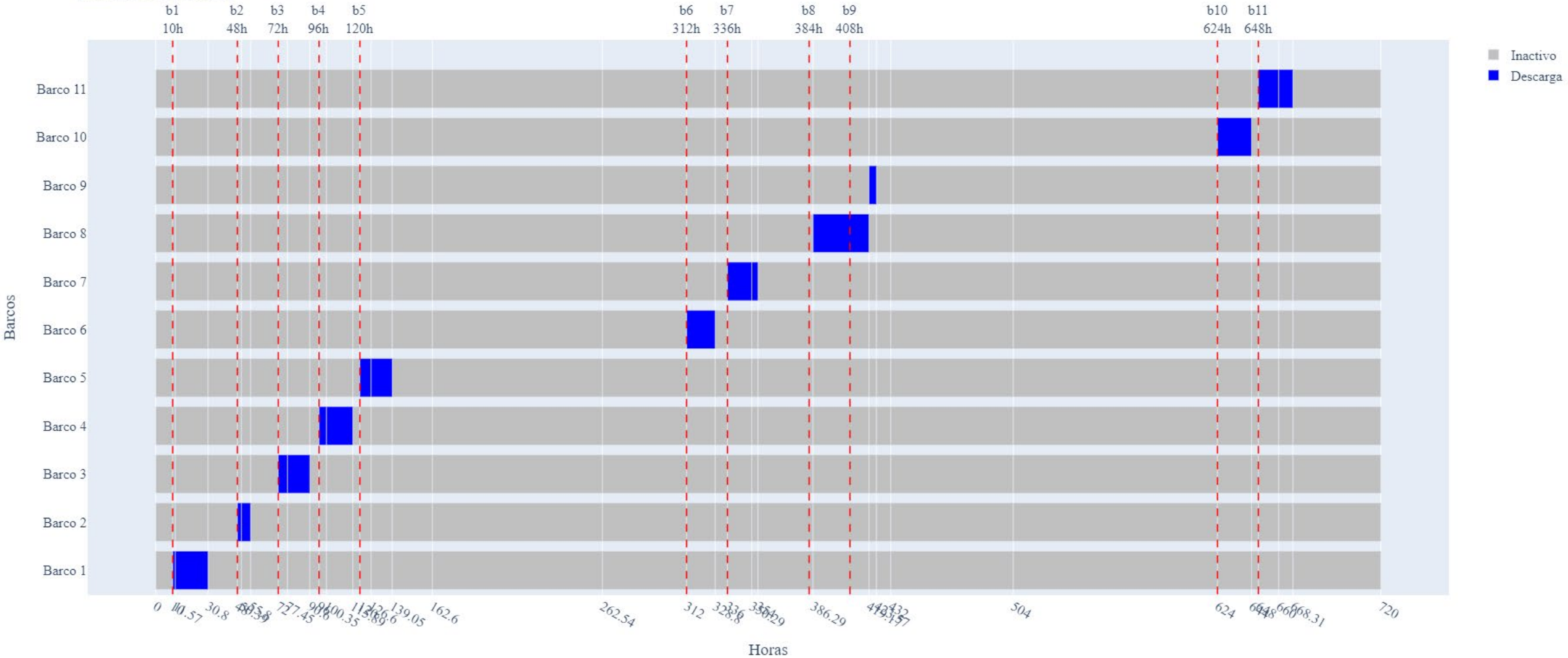


Clases de tanques



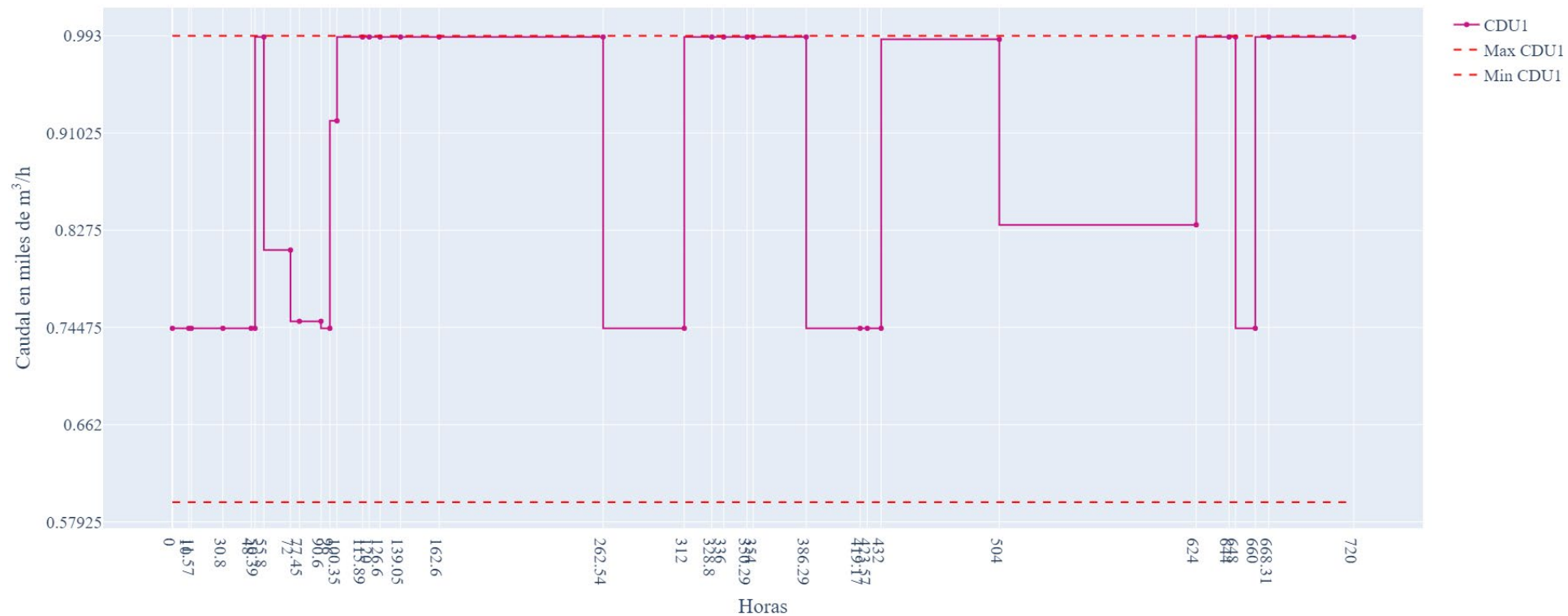
Resultados: Diagrama de Gantt de barcos

Estado de los barcos



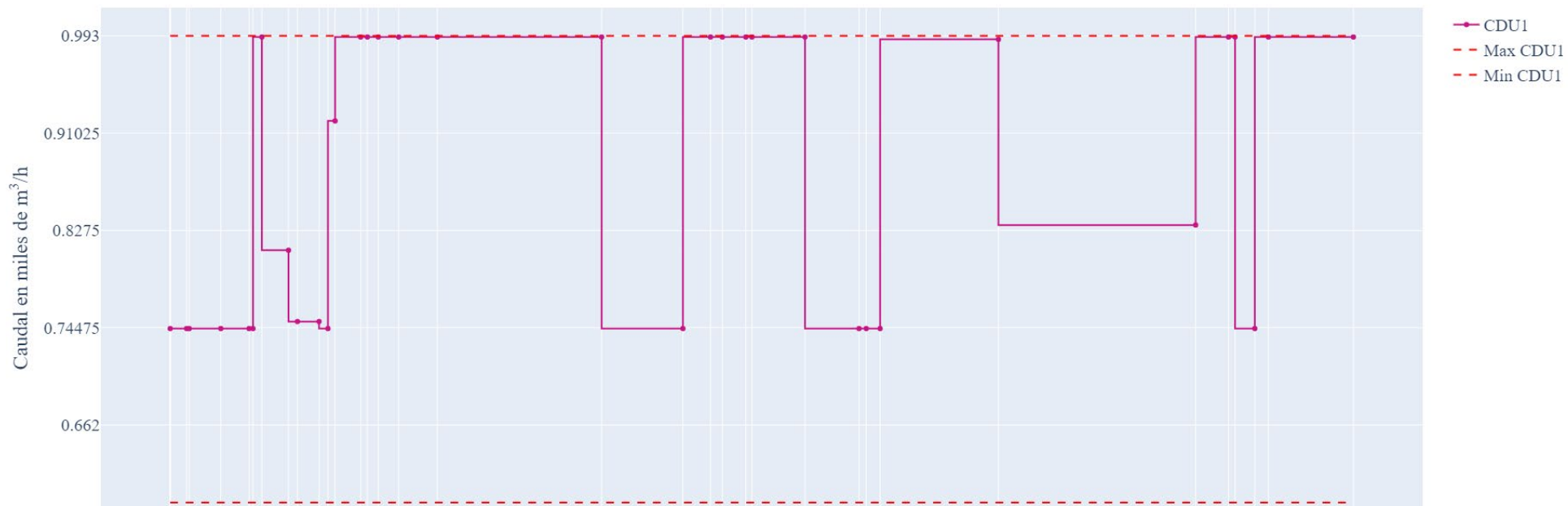
Resultados: Caudales y procesos en CDU 1

Valor del caudal de alimentación a CDU1

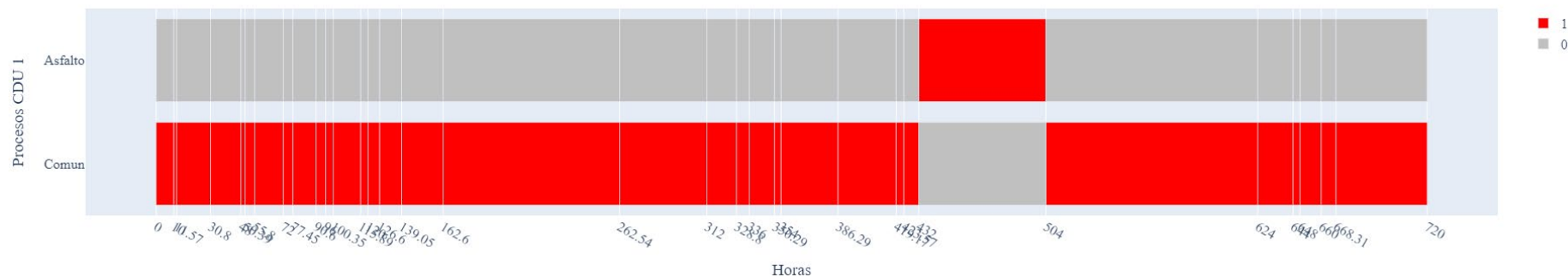


Resultados: Caudales y procesos en CDU 1

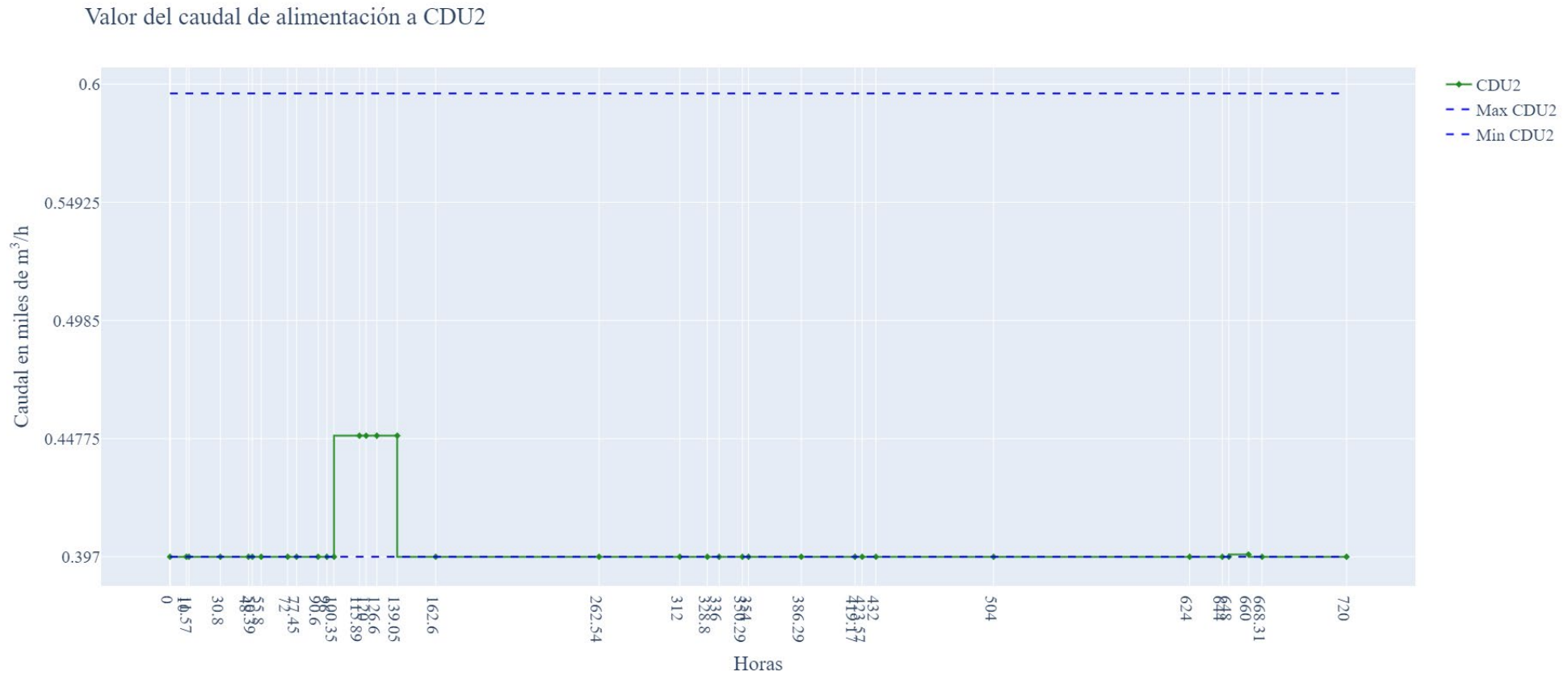
Valor del caudal de alimentación a CDU1



Estado de los procesos

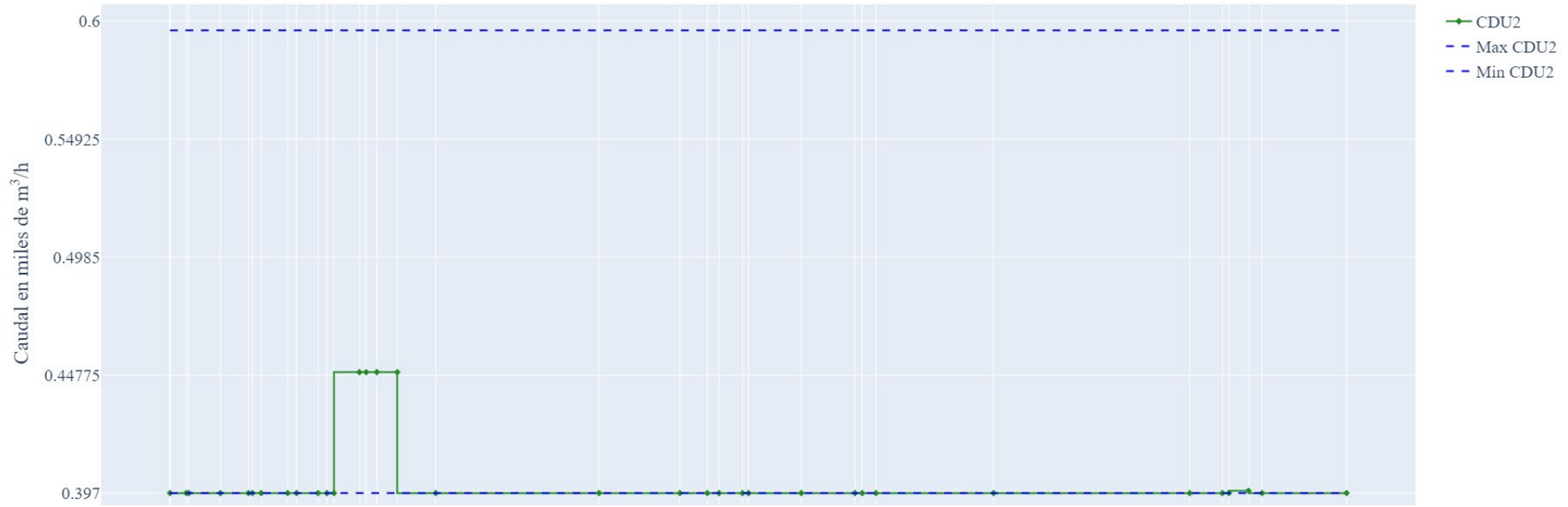


Resultados: Caudales y procesos en CDU 2

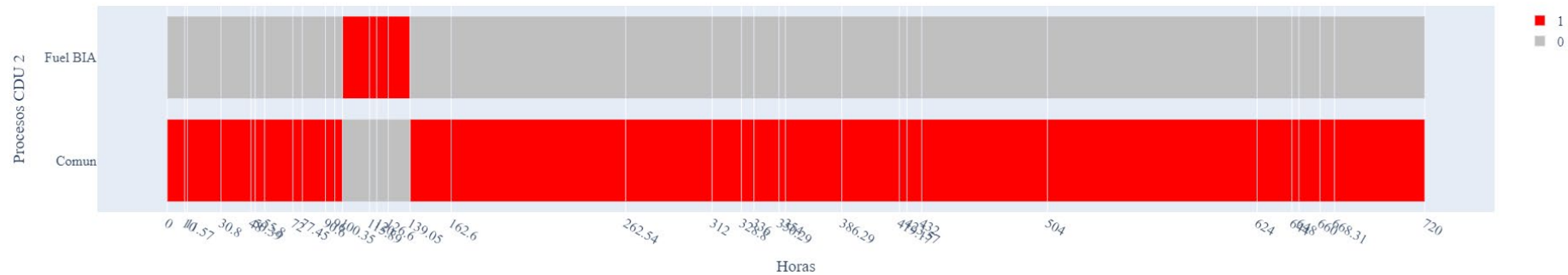


Resultados: Caudales y procesos en CDU 2

Valor del caudal de alimentación a CDU2



Estado de los procesos



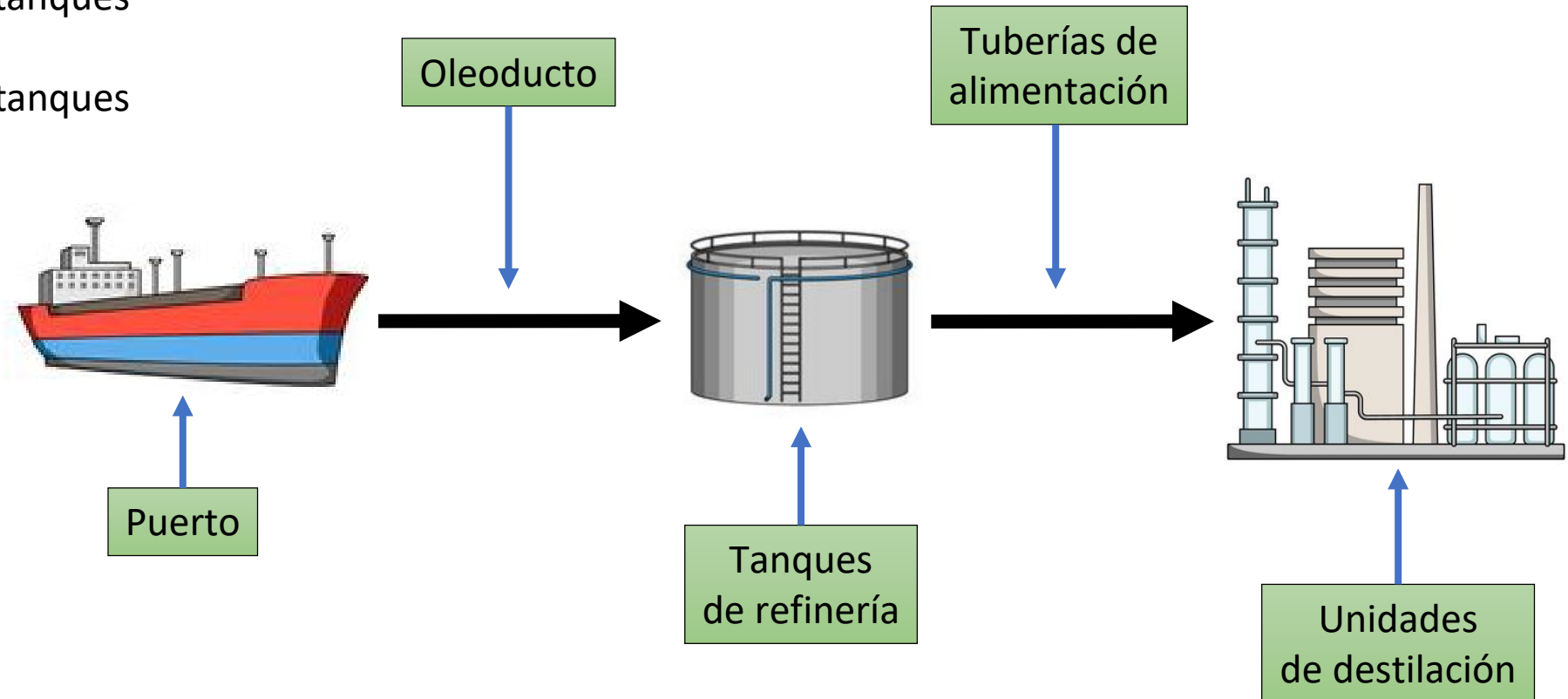
Formulación y resolución del scheduling de crudos y gestión de inventario de una refinería de petróleo

Programación estocástica de operaciones de crudos y gestión de riesgo

Consideraciones

Se desarrolló el modelo para un sistema más simplificado que el descrito anteriormente:

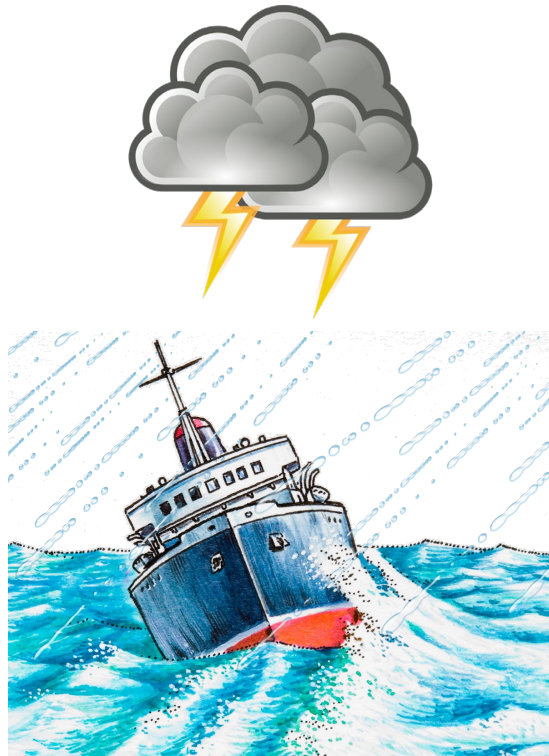
- No están presentes los tanques de la lengua.
- No se clasifican los tanques según su composición.



Programación estocástica de operaciones de crudos

Motivación

Las incertidumbres son inherentes al proceso. Las condiciones climáticas influyen en la fecha de llegada de los barcos y, por ende, en el inicio de las actividades de descarga y en el resto de decisiones que deben tomarse aguas abajo.



Motivación

Las incertidumbres son inherentes al proceso. Las condiciones climáticas influyen en la fecha de llegada de los barcos y, por ende, en el inicio de las actividades de descarga y en el resto de decisiones que deben tomarse aguas abajo.

Solución propuesta

Se adopta el enfoque de **programación estocástica de dos etapas** con recurso. Se definen:

- **Variables de primera etapa** (“aquí y ahora”)

Asignación tanques-unidades y volúmenes totales transferidos.

Inicio, fin y duración de slots.

- **Variables de segunda etapa** (variables de recurso, “esperar y ver”).

Aquellas relacionadas con las actividades desarrolladas en la terminal marítima.

Nivel de inventario en los tanques.

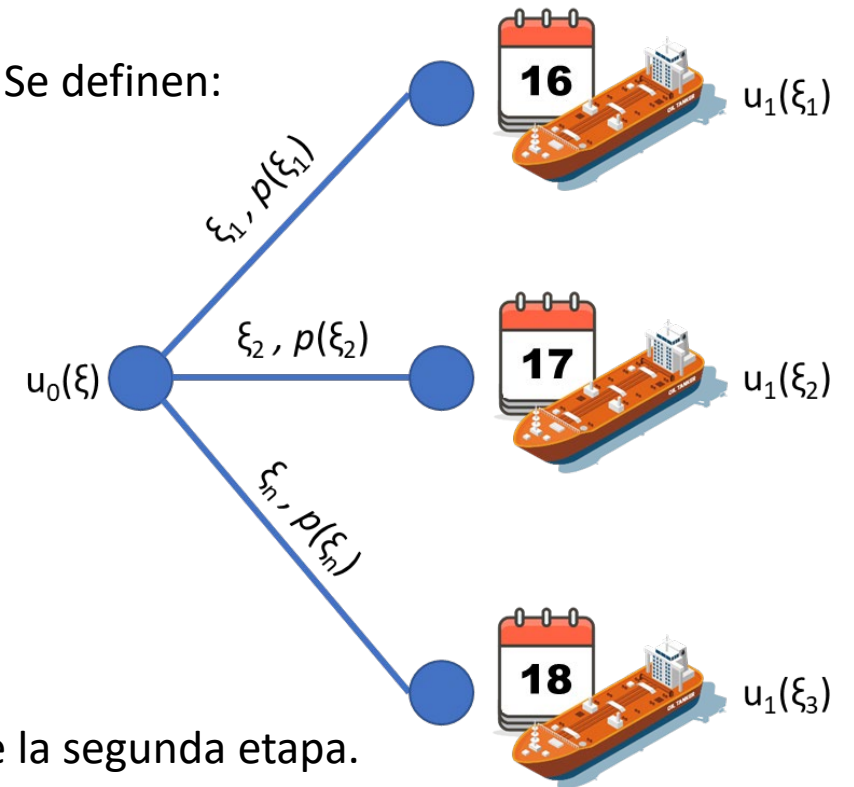
Composición de las mezclas de alimentación.

- **Conjunto discreto de escenarios** con diferentes fechas de arribo.

Función objetivo

Minimizar la suma del costo asociado a la primera etapa y el costo esperado de la segunda etapa.

$$\text{MIN} \sum_u (COP_u * op_u + CSP_u * sp_u) + \sum_e \sum_b \pi_e * (CDMG_b * dmg_{b,e} + CTDN_b * tdn_{b,e})$$



Motivación

No siempre es conveniente considerar, exclusivamente, el valor esperado de la función de costo (J), sino también su distribución y el riesgo de tener valores (costos) elevados en la cola superior.

Medidas de riesgo

- **$VaR_{1-\alpha}$ (Value at Risk)**: valor en riesgo con nivel de confianza $1-\alpha$, determina el mínimo valor ω^* tal que la probabilidad de que J adopte un valor (costo) menor a ω^* es mayor a $1-\alpha$.

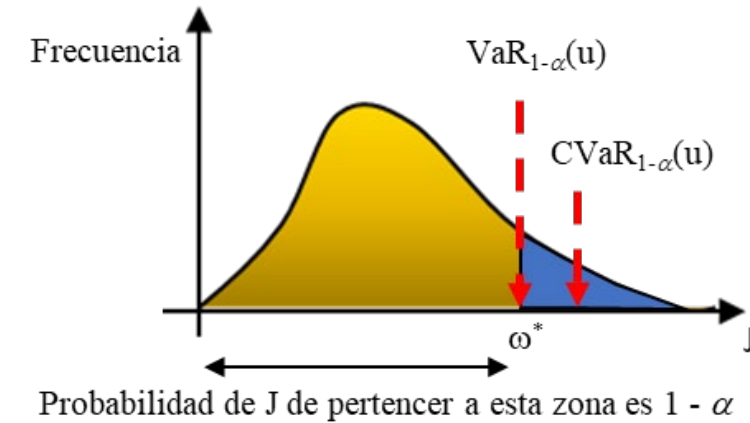
$$ze_e - var \leq \phi_e \quad \forall e \in E$$

- **$CVaR_{1-\alpha}$ (Conditional Value at Risk)**: valor en riesgo condicional con nivel de confianza $1-\alpha$, representa el valor promedio de la cola de la distribución, por encima del valor $VaR_{1-\alpha}$.

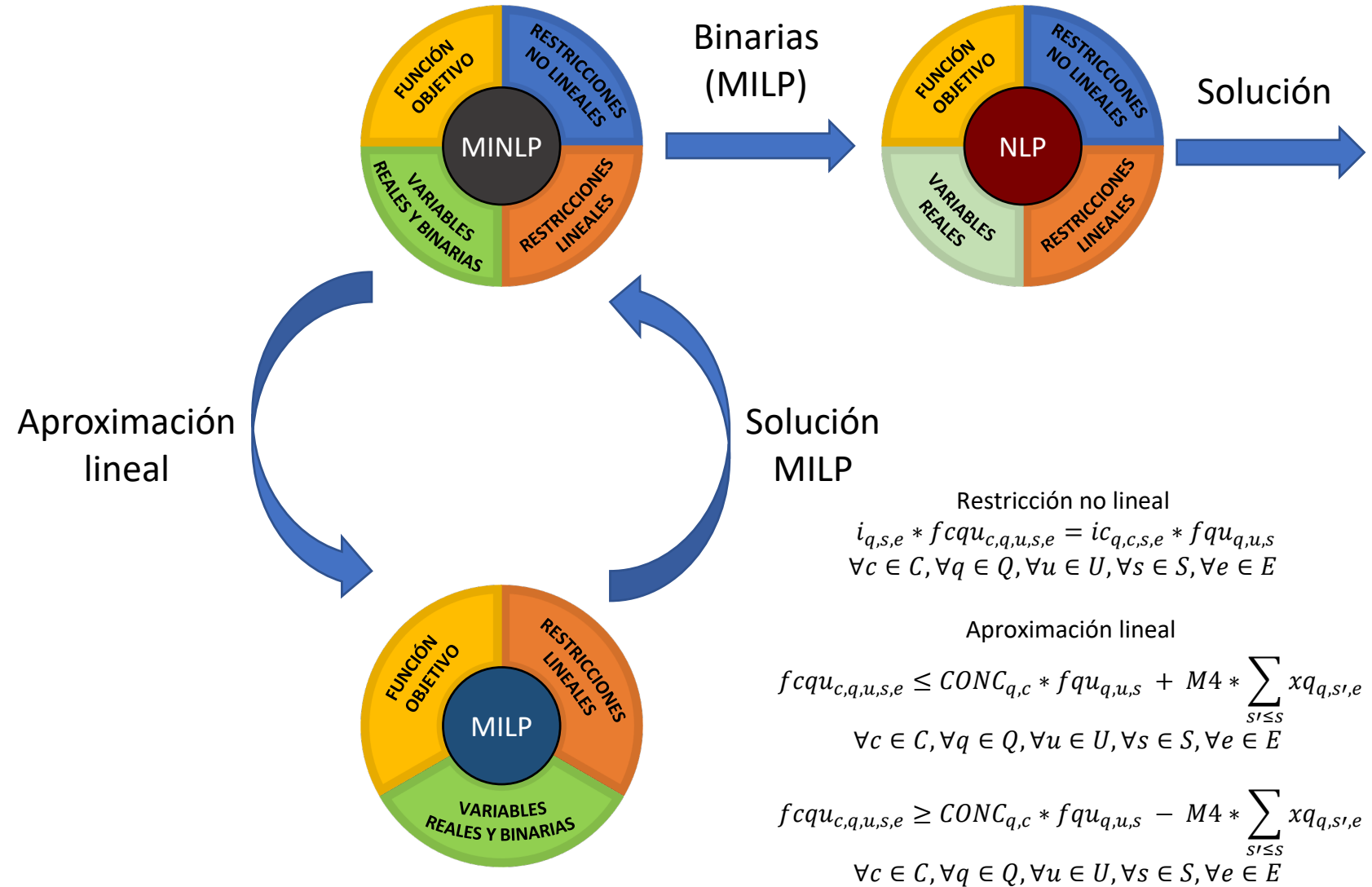
$$cvar = var + (1/\alpha) * \left(\sum_e \pi_e * \phi_e \right)$$

Función objetivo

$$MIN \sum_u (COP_u * op_u + CSP_u * sp_u) + \sum_e \sum_b \pi_e * (CDMG_b * dmg_{b,e} + CTDN_b * tdn_{b,e}) + \lambda * cvar$$



1. Se resuelve un modelo *MILP* que es una aproximación del *MINLP* original.
2. Se fijan los valores de las variables binarias en el *MINLP* según la solución obtenida para el *MILP*
3. Se resuelve el modelo no lineal (*NLP*) resultante.
4. En caso de no obtener una solución factible, se resuelve el *MINLP* utilizando el *solver DICOPT*.



Información

- Horizonte: 120 h
- Tanques: 5
- Unidades de destilación: 2
- Tipos de crudos: 5
- Propiedad: 1
- Barcos*: 2

*Partida prevista 12 h posteriores a llegada.

- Demanda (m³)
Unidad 1: 100.000
Unidad 2: 65.000

Escenarios	Probabilidades	Fecha de llegada (h)	
		Barco 1	Barco 2
1	0.01	10	40
2	0.05	50	40
3	0.01	90	40
4	0.18	10	70
5	0.5	50	70
6	0.18	90	70
7	0.01	10	100
8	0.05	50	100
9	0.01	90	100

Escenarios con tiempos de llegada de barcos y probabilidades de ocurrencia.

Software

GAMS 39.

CPLEX (MILPs).

CONOPT 4.19 (NLPs).

Hardware

HPE server, Proliant DL380,
32GB RAM.

Restricciones: 19.729.

Variables continuas: 9.501.

Variables binarias: 1.272.

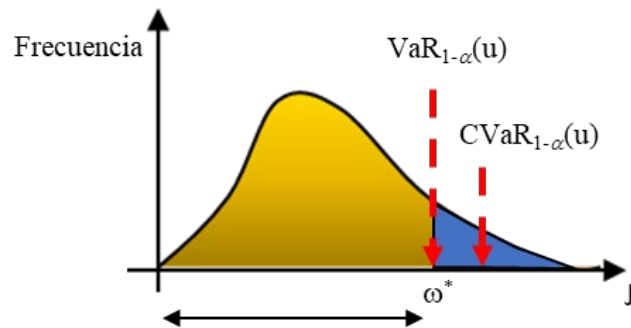
Tiempo de cómputo: 10 min
(para cada combinación α - λ).

FO (x10 ³ \$)	α			
λ	0.3	0.2	0.1	0.05
0	24.42	24.42	24.42	24.42
0.1	29.84	31.35	35.28	40.32
1	76.04	82.29	96.8	97.53

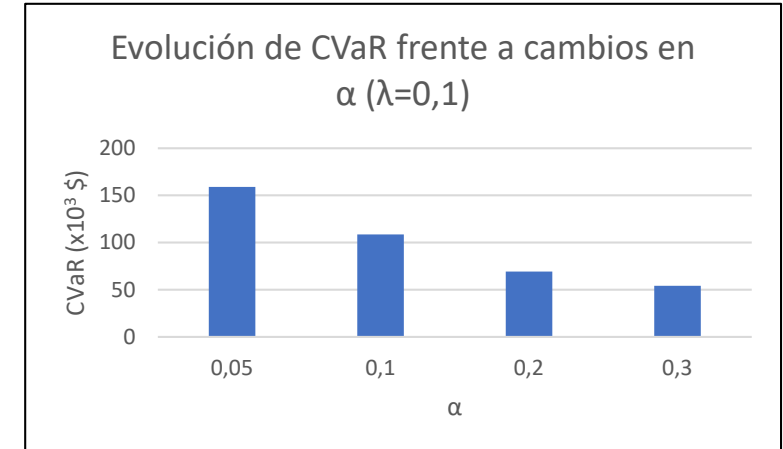
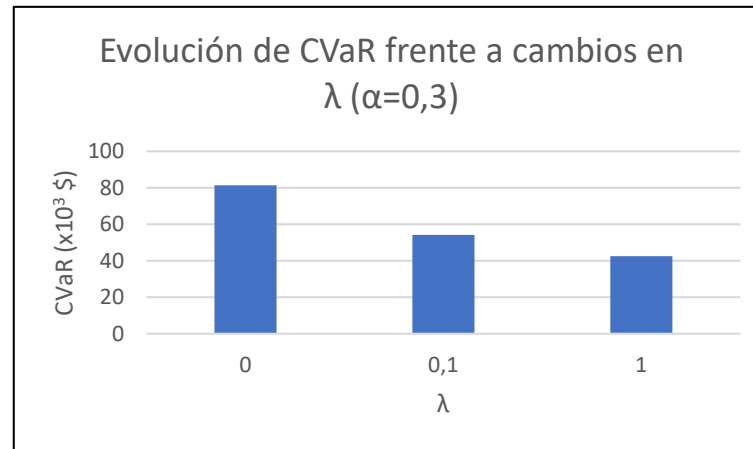
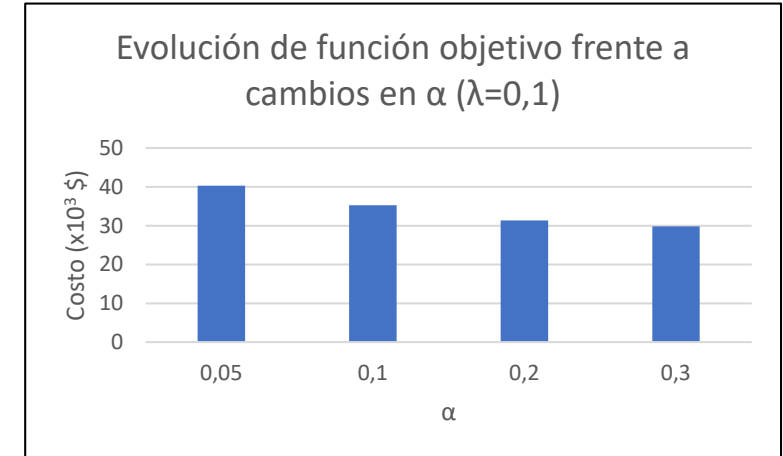
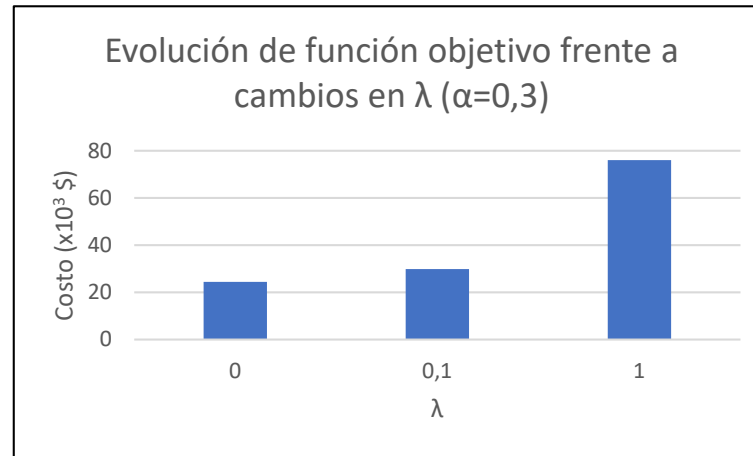
Valores de la función objetivo.

CVaR (x10 ³ \$)	α			
λ	0.3	0.2	0.1	0.05
0	81.4	122.1	244.2	488.4
0.1	54.2	69.3	108.6	159
1	42.5	48.75	55.9	57

Valores CVaR.



Probabilidad de J de pertenecer a esta zona es $1 - \alpha$



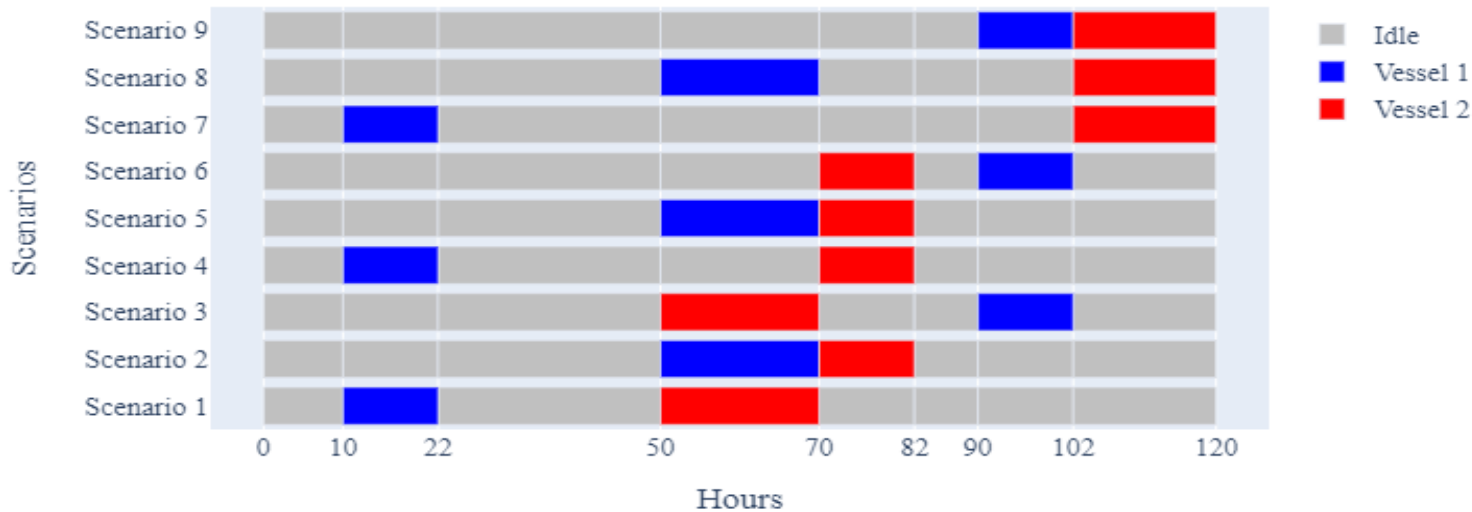


Diagrama de Gantt ($\alpha = 0.3, \lambda = 0.1$)

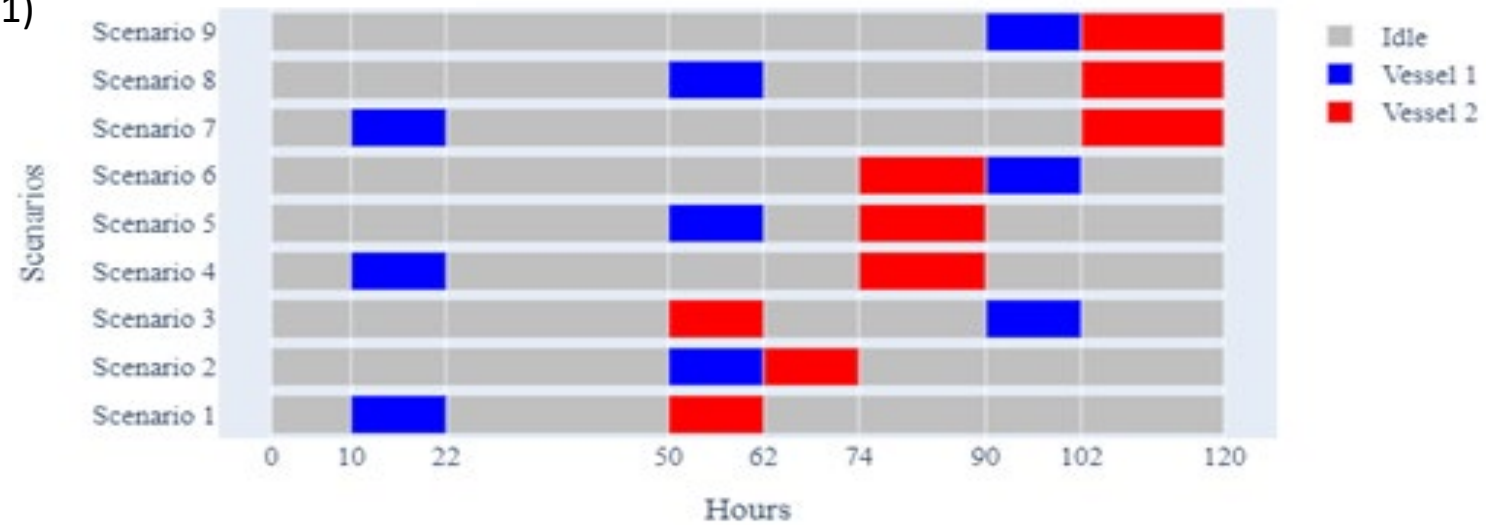
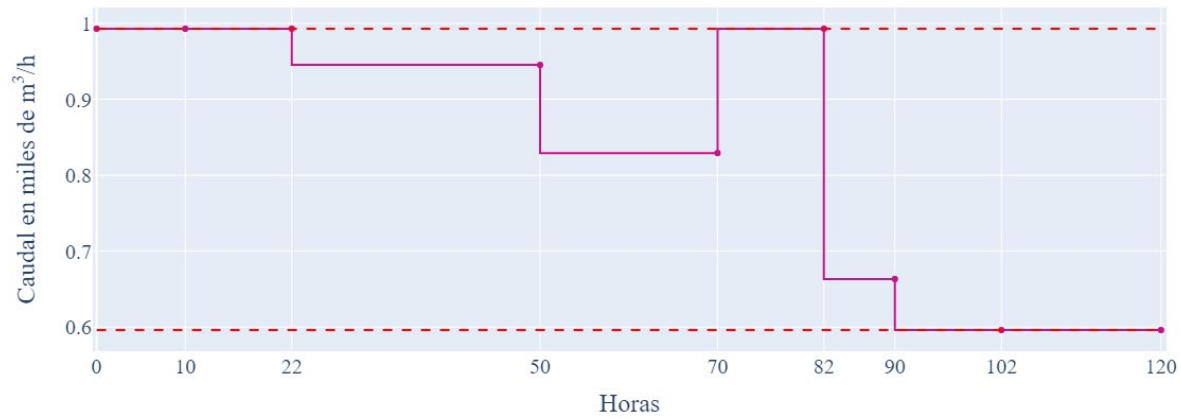
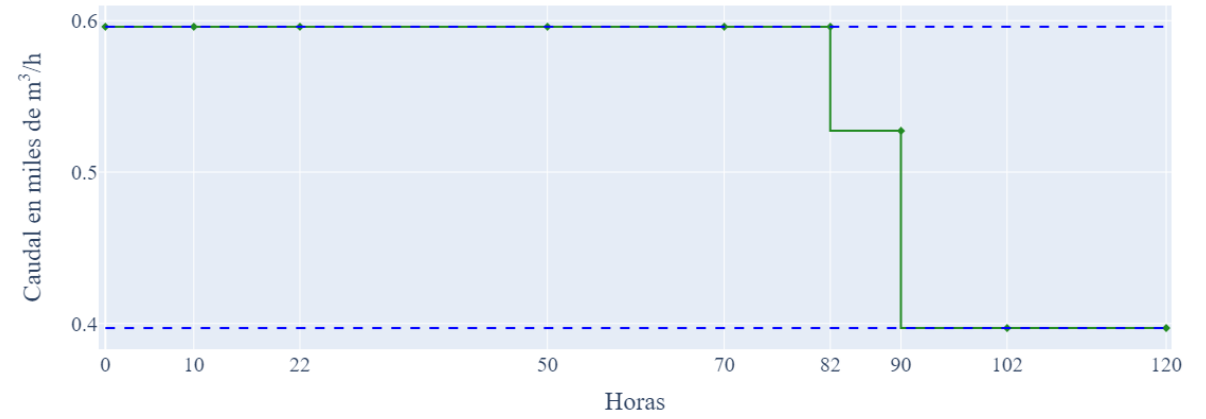


Diagrama de Gantt ($\alpha = 0.3, \lambda = 1$)

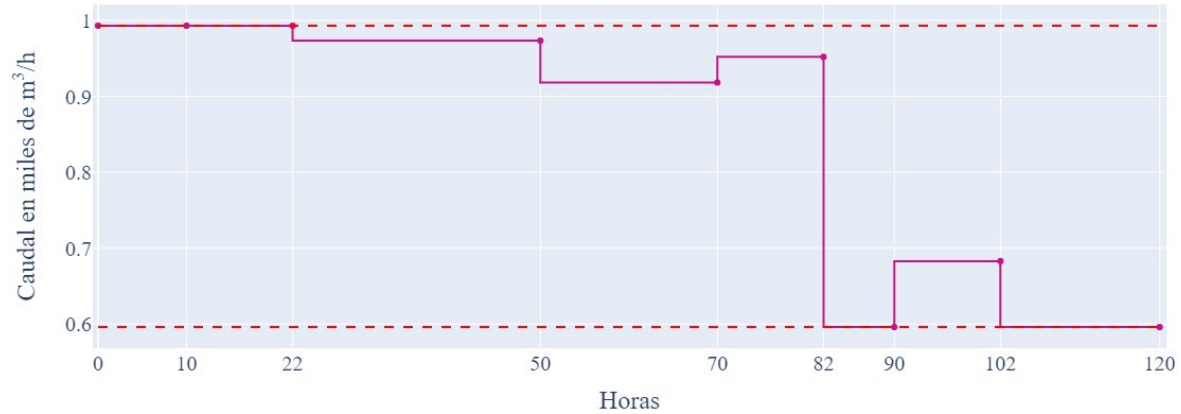
Ejemplo y resultados



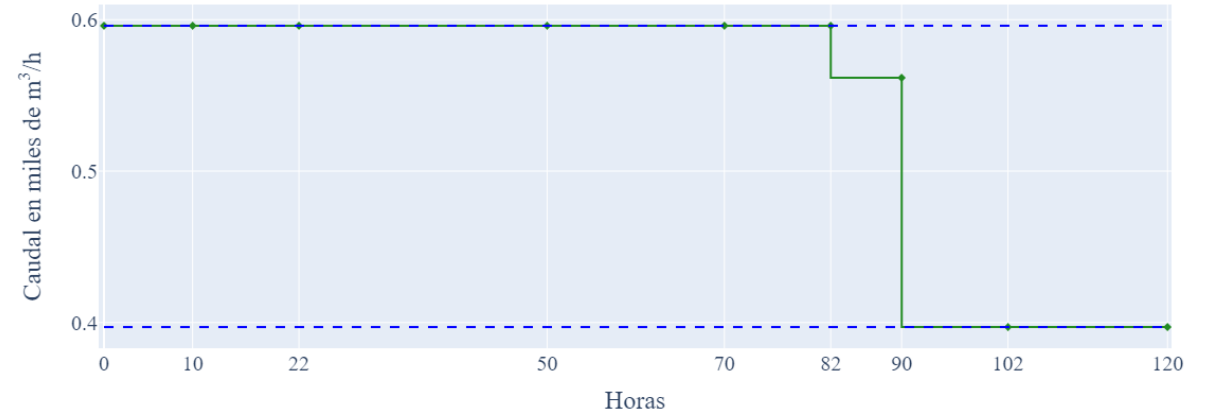
Caudal CDU 1 ($\alpha = 0.3, \lambda = 0.1$)



Caudal CDU 2 ($\alpha = 0.3, \lambda = 0.1$)

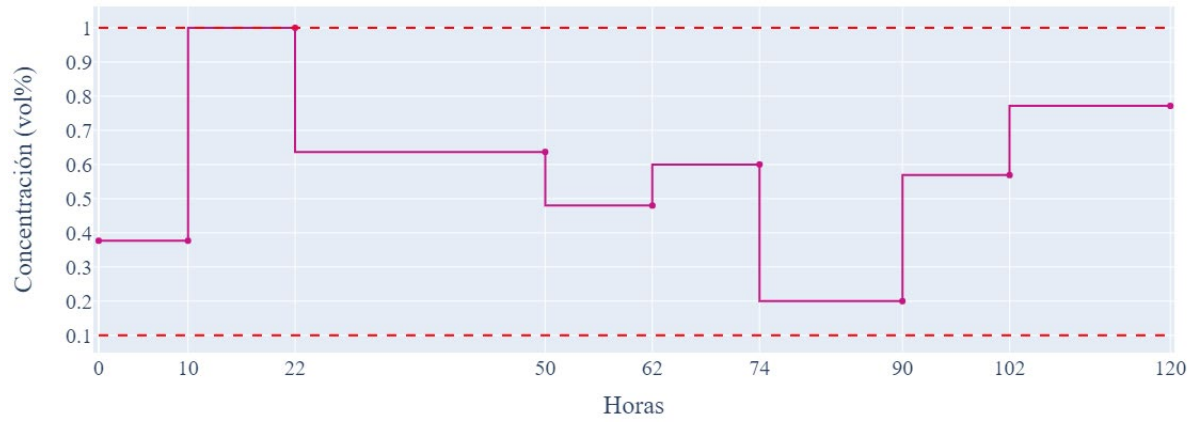


Caudal CDU 1 ($\alpha = 0.3, \lambda = 1$)

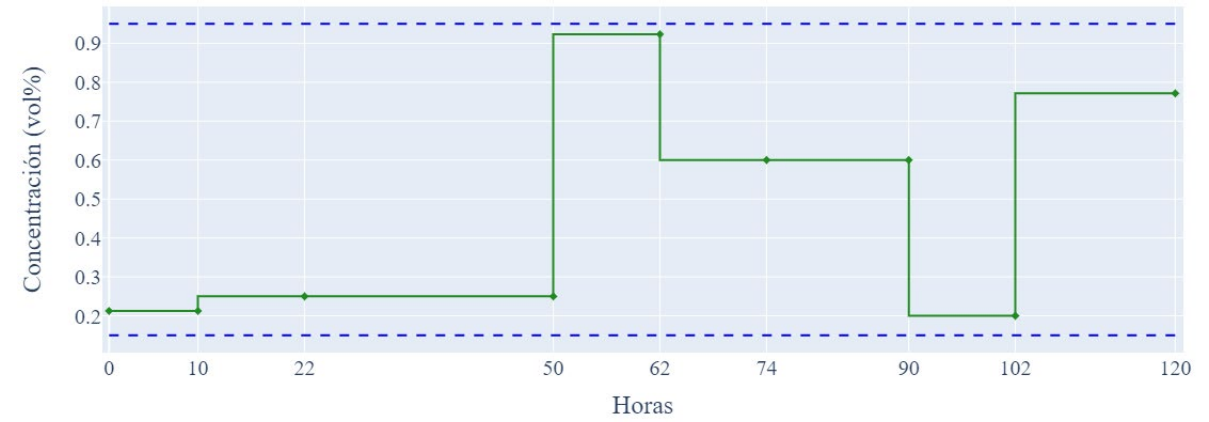


Caudal CDU 2 ($\alpha = 0.3, \lambda = 1$)

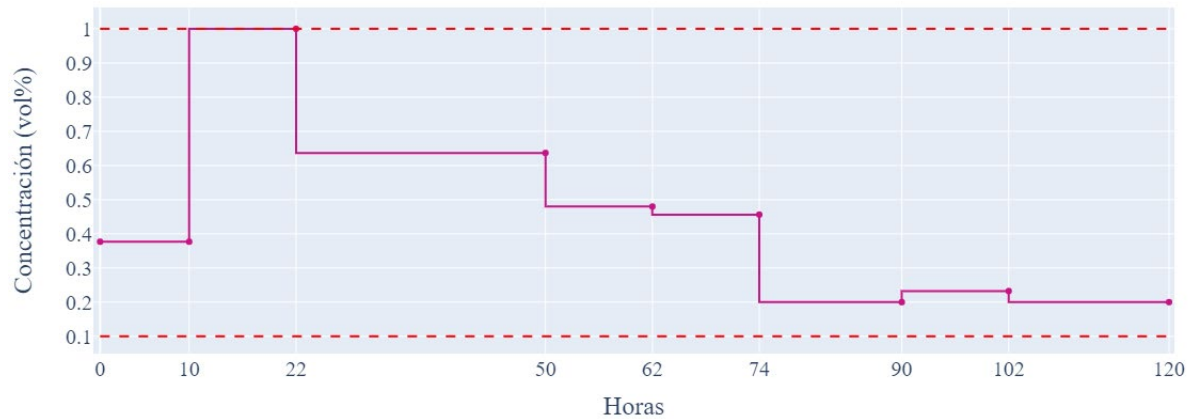
Ejemplo y resultados



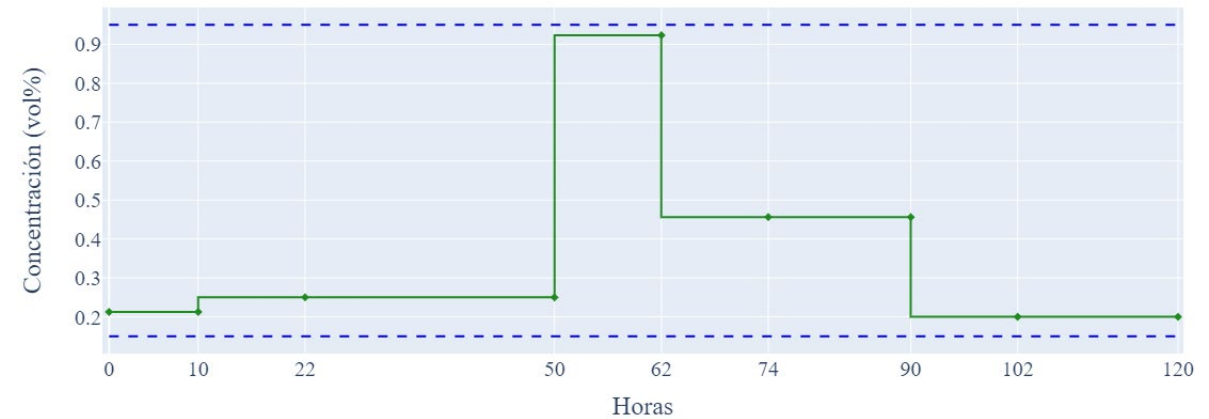
Valor propiedad CDU 1 ($\alpha = 0.3$, $\lambda = 1$, escenario 2)



Valor propiedad CDU 2 ($\alpha = 0.3$, $\lambda = 1$, escenario 2)

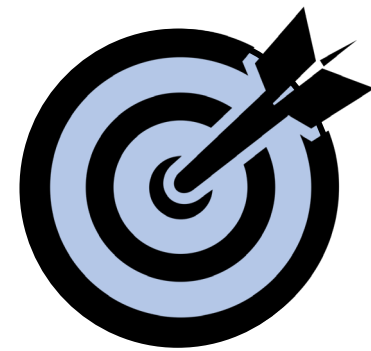


Valor propiedad CDU 1 ($\alpha = 0.3$, $\lambda = 1$, escenario 7)

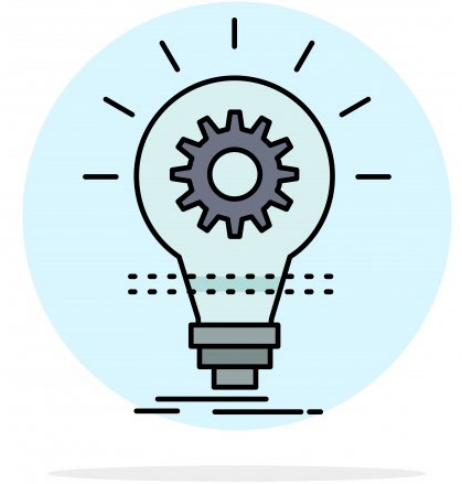


Valor propiedad CDU 2 ($\alpha = 0.3$, $\lambda = 1$, escenario 7)

- Posibilidad de tener una solución factible en un tiempo acorde para el horizonte de 30 días.
- Gracias a la formulación en dos etapas se obtiene una **solución más robusta** ya que este enfoque **permite corregir las consecuencias de las decisiones tomadas ahora, en función de las condiciones del futuro.**
- La incorporación del CVaR permite penalizar los valores extremos y, por ende, **minimizar el riesgo.**
- Aunque la formulación de tiempo continuo suele ser más complicada de desarrollar en comparación con su contraparte discreta, la misma permite **representar las operaciones con un mayor grado de precisión** y con un menor número de elementos y variables.
- Si bien la solución de la aproximación MILP puede que no sea óptima para el MINLP, permite obtener buenas **soluciones (factibles) de acuerdo al nivel de riesgo que el usuario está dispuesto a asumir.**



- Desarrollar nuevas aproximaciones y estrategias de solución.
- Programación para casos con horizontes más extensos y sistemas más complejos.
- Resolver problemas de convergencia y no factibilidades en problemas de mayores dimensiones.
- Reducción de tiempos de cálculos.
- Incorporar resto de unidades de destilación.
- Implementar enfoque estocástico en modelo detallado de la refinería.

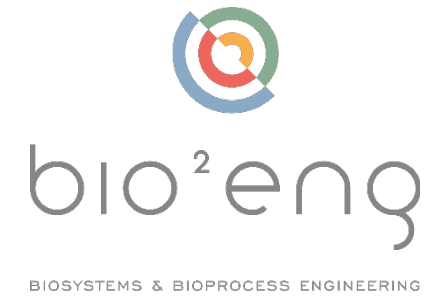




**Universidad
de Valladolid**



Integrated plant-wide control and
optimization for industry4.0



Gracias por vuestra atención

**Workshop final
20-21 junio, 2022**