

# - Laboratori 03 -

Modelització del cicle de l'aigua  
durant Episodis de Sequera

**Simulació**

Q1 2025/2026

Javier Zhangpan

Laura Adell Caballero

# 1. Index

<b>1. Index</b>	<b>2</b>
<b>2. Objectius</b>	<b>3</b>
<b>3. Assumpcions del model inicial</b>	<b>4</b>
<b>4. Característiques del model</b>	<b>6</b>
<b>5. Mètriques d'avaluació</b>	<b>18</b>
<b>6. Millores del model</b>	<b>23</b>
<b>7. Referències</b>	<b>38</b>

## 2. Objectius

En aquest apartat expliquem els objectius principals d'aquest projecte que esperem assolir mitjançant la simulació contínua d'un sistema basat en el cicle d'aigua en condicions de sequera:

- Reduir un 10% dels costos operatius dels processos que gestionen les sequeres mitjançant l'optimització dels diferents paràmetres d'aquests processos.
- Reduir un 30% el nombre de setmanes totals en estat d'alerta d'acord amb els llindars oficial, també amb modificacions als paràmetres dels processos que gestionen les sequeres.
- Reduir un 30% el nombre de setmanes consecutives en estat d'alerta d'acord amb els llindars oficial, també amb modificacions als paràmetres dels processos que gestionen les sequeres.

### 3. Assumpcions del model inicial

En aquest apartat expliquem les assumpcions que hem fet a l'hora de construir el model inicial. Farem servir la taxonomia d'assumpcions següent: Assumpcions sistèmiques de dades (SD) que, com bé el seu nom indica, tracten sobre les dades; assumpcions sistèmiques estructurals (SE), que descriuen les relacions entre elements del sistema; i assumpcions simplificadores (S) que redueixen la complexitat del model.

Cal destacar que en alguns casos, les assumpcions venen donades per l'enunciat de la pràctica i, per tant, no tenen font com a tal ni tan poc manera de ser validada. La part de condició de revisió de la taula, però, s'emplena suposant que es desitja validar l'assumpció. El criteri que se segueix és el següent: si considerem que una assumpció és important que sigui certa, la seva condició de revisió és més freqüent.

ID	Descripció	Font	Condició de Revisió	Validada
S_01	El sistema està format per un sol riu.	-	Anual	No
S_02	El consum d'aigua de la xarxa és constant i no es diferencia en el seu ús.	-	Mensual	No
S_03	Les restriccions de consum de caràcter forçat es compleixen sempre, de manera incondicional.	-	Trimestral	No
S_04	Tant el desembocament del riu com les aigües residuals de la xarxa no formen part de cap cicle del sistema.	-	Anual	No
S_05	Els canvis en polítiques de restriccions d'ús d'aigua i desembassament es poden dur a terme en setmanes.	-	Trimestral	No
S_06	L'evaporació de l'aigua a causa de les	-	Anual	No

	temperatures és negligible.			
SD_01	Les aportacions naturals d'aigua segueixen una distribució idèntica a la històrica	Dades adjuntes a la pràctica	Anual	No
SE_01	L'embassament només rep aigua de les aportacions naturals	Dades adjuntes a la pràctica	Anual	No
SE_02	L'aigua de l'embassament només té com a destí el riu	Dades adjuntes a la pràctica	Anual	No
SE_03	El riu només rep aigua a través dels desembassaments de l'embassament i de les dessalinitzadores.	Dades adjuntes a la pràctica	Anual	No
SE_04	L'aigua del riu només té com a destí la xarxa o el dessembocament	Dades adjuntes a la pràctica	Anual	No
SE_05	La xarxa només rep aigua del riu	Dades adjuntes a la pràctica	Anual	No
SE_06	L'aigua de la xarxa només té com a destí les dessalinitzadores o les aigües residuals.	Dades adjuntes a la pràctica	Anual	No

Un cop tenim les assumpcions fetes, podem començar a entendre el model delimitat per aquestes.

## 4. Característiques del model

Hem fet servir l'eina de simulació *Insight Maker* per elaborar el model. En el cas del model inicial, aquest consta de 3 *stocks*: Embassaments, Riu i Xarxa; i 7 *flows*: Aportacions naturals, Dessalinització, Desembassament, Consum, Desembocament, Aigües residuals. A continuació es mostra el diagrama conceptual del model:

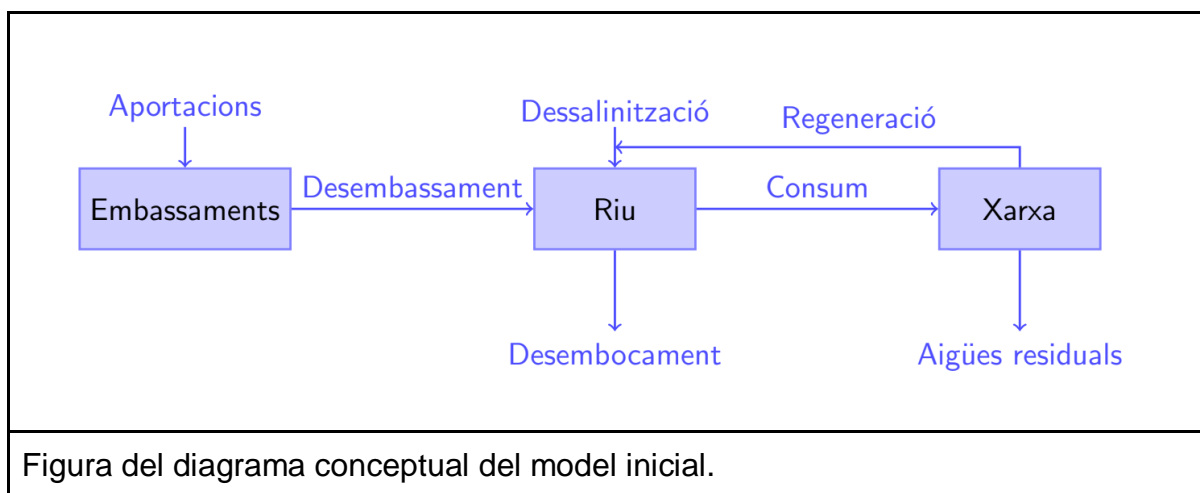


Figura del diagrama conceptual del model inicial.

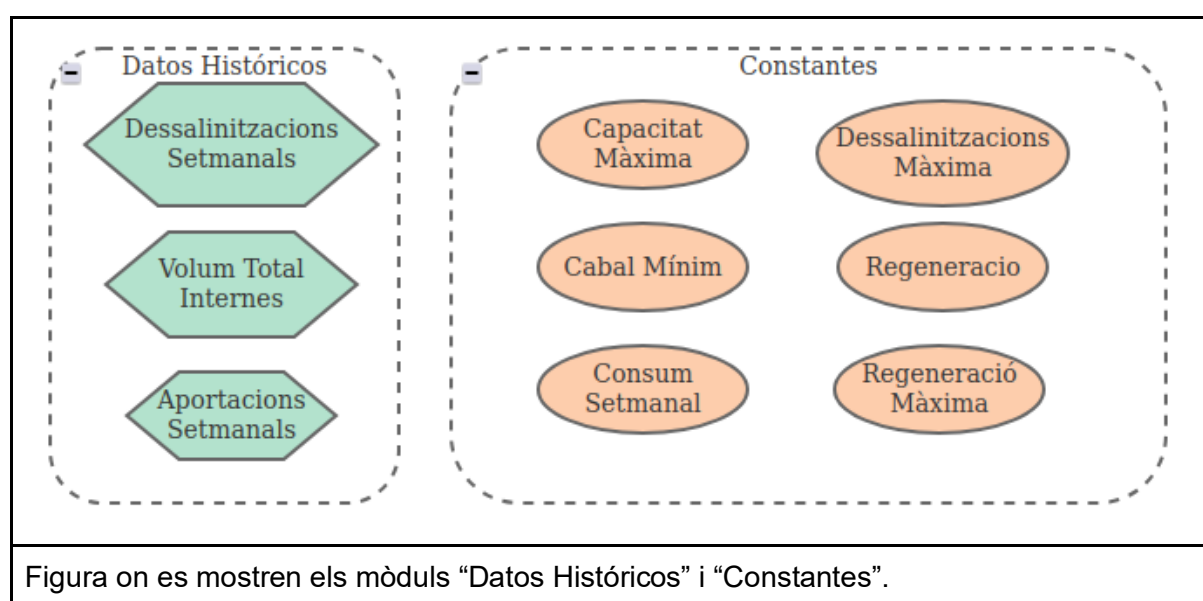
On podem destacar la presència de 3 bucles de retroalimentació negatius que estableixen el sistema:

- **Embassaments -> Dessalinització -> Desembassament** (on tenim 3 relacions negatives, un increment en **embassaments** causa un decrement en **dessalinització**, un increment en **dessalinització** causa un decrement en **desembassament**, un increment en **desembassament** causa un decrement en **embassaments**).
- **Embassaments -> Restriccions -> Consum** (on tenim 3 relacions negatives, un increment en **embassaments** causa un decrement en **restriccions**, un increment en **restriccions** causa un decrement en **consum**, un increment en **consum** causa un decrement en **embassaments**).
- **Embassaments -> Vessaments -> Desembassament** (on tenim 1 relació negativa i 2 de positives, un increment en **embassaments** causa un increment en **vessaments**, un increment en **vessaments** causa un increment en **desembassament**, un increment en **desembassament** causa un decrement en **embassaments**).

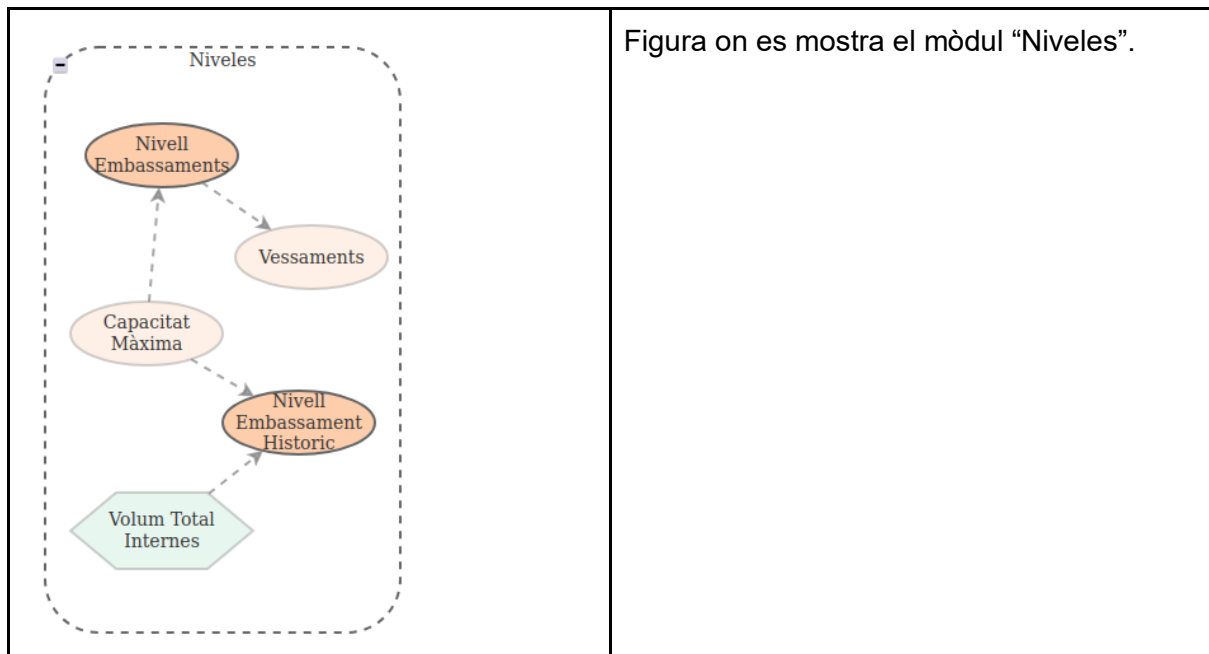
El nostre model està dividit en mòduls per facilitar la llegibilitat i interpretabilitat d'aquest. Això ha estat possible amb l'ús de *folders* i *ghost primitives* que proporciona *Insight Maker*. Els *folders* permeten crear compartiments d'elements i col·lapsar-los per tal de crear caixes negres, mentre que els *ghost primitives* són referències a altres elements, de manera que una modificació a l'element es veu reflexat en els seus *ghost primitives* i vice versa.

Primerament comencem amb els mòduls que no depenen de cap altre: les dades històriques i les constants de l'escenari. Les dades històriques simplement són *converters* que carreguen les dades proporcionades per la pràctica. Cal remarcar que Dessalinitzacions Setmanals i Volum Total Internes només es fan servir per calibrar el model inicial i calcular les mètriques segons les dades històriques, mentre que Aportacions Setmanals és la font d'aigua del sistema.

Pel que fa a les constants, tenim: Capacitat Màxima (693 hm<sup>3</sup>), Cabal Mínim (3 hm<sup>3</sup>/setmana), Consum Setmanal (15 hm<sup>3</sup>/setmana), Dessalinitzacions Màxima (1.5 hm<sup>3</sup>/setmana), Regeneració (1 hm<sup>3</sup>/setmana) i Regeneració Màxima (1 hm<sup>3</sup>/setmana). Aquestes formen part de l'especificació de l'enunciat i no les canviem. A continuació es mostra en una figura com queden al model.

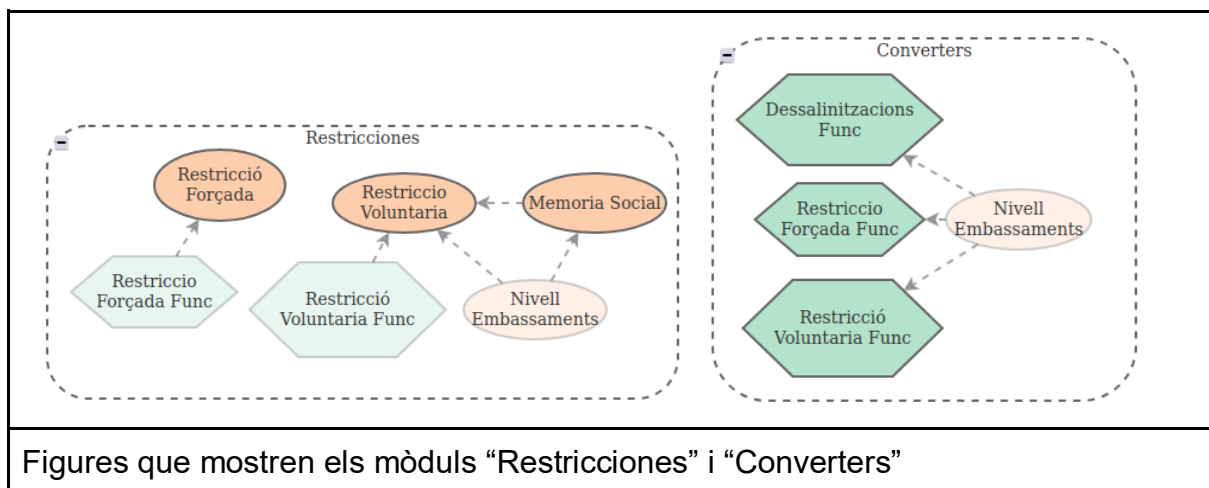


A continuació passem a descriure els mòduls que tracten els nivells de l'embassament i les restriccions tant forçades com voluntàries que depenen d'aquests.



La variable Nivell Embassaments es calcula com la quantitat d'aigua que té l'Stock Embassament dividit per la Capacitat Màxima. Nivell Embassament Històric es calcula de forma anàloga però fent servir les quantitats històriques. Cal Destacar que el *link* que conté la referència d'Embassament es troba en un altre mòdul connectat a un *ghost primitive* de Nivell Embassaments. Aquest mòdul es fa servir addicionalment per calcular el llindar pel qual es fan vessaments.

Els mòduls que calculen les restricciones a imposar es mostren a continuació:

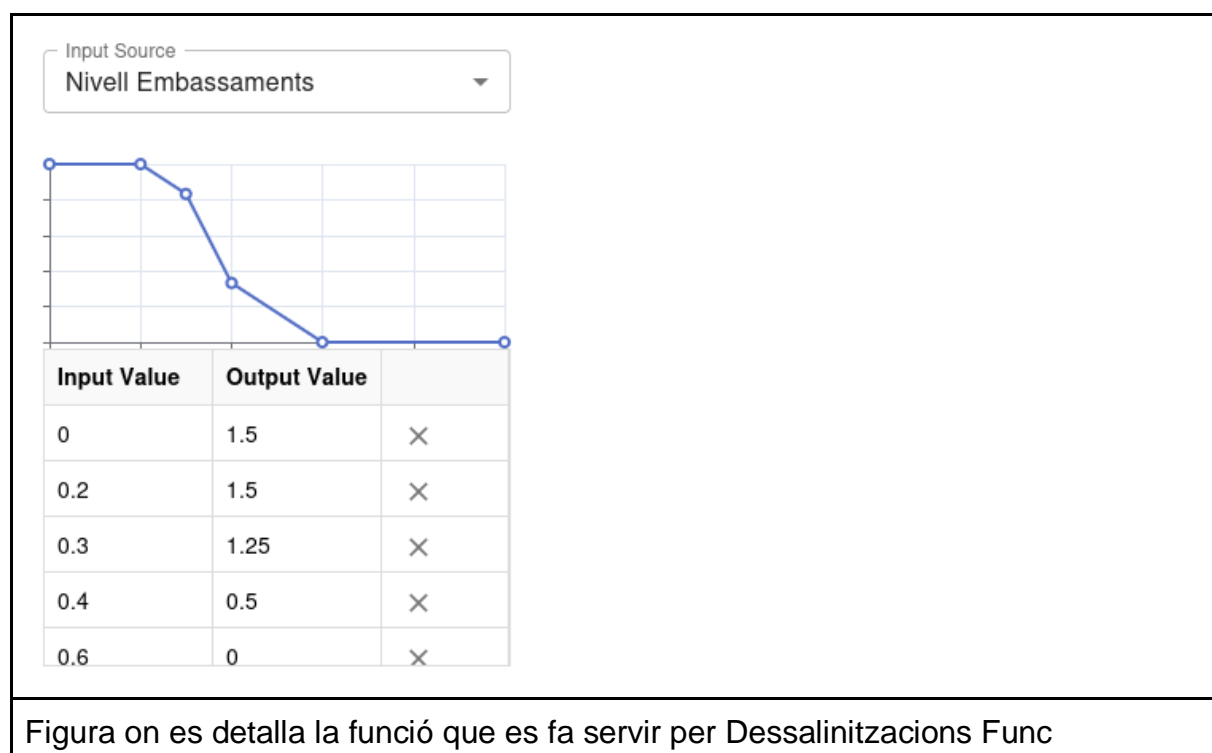




Cal remarcar que hem fet servir converters amb interpolació lineal per tal de facilitar la creació de funcions que permeten passar d'un nivell d'embassament a una restricció que siguin contínues.

Més concretament, Dessalinitzacions Func fa servir una funció tal que per nivells per sobre de 0.6, el seu output és 0. Entre 0.6 i 0.4 creix de forma moderada, entre 0.4 i 0.3 creix ràpidament i entre 0.3 fins a 0 torna a créixer de forma moderada fins arribar al límit. Em arribat a aquesta configuració a través d'experimentació amb diferents valors i llindars centrant-nos sobretot en la funció de cost econòmic.

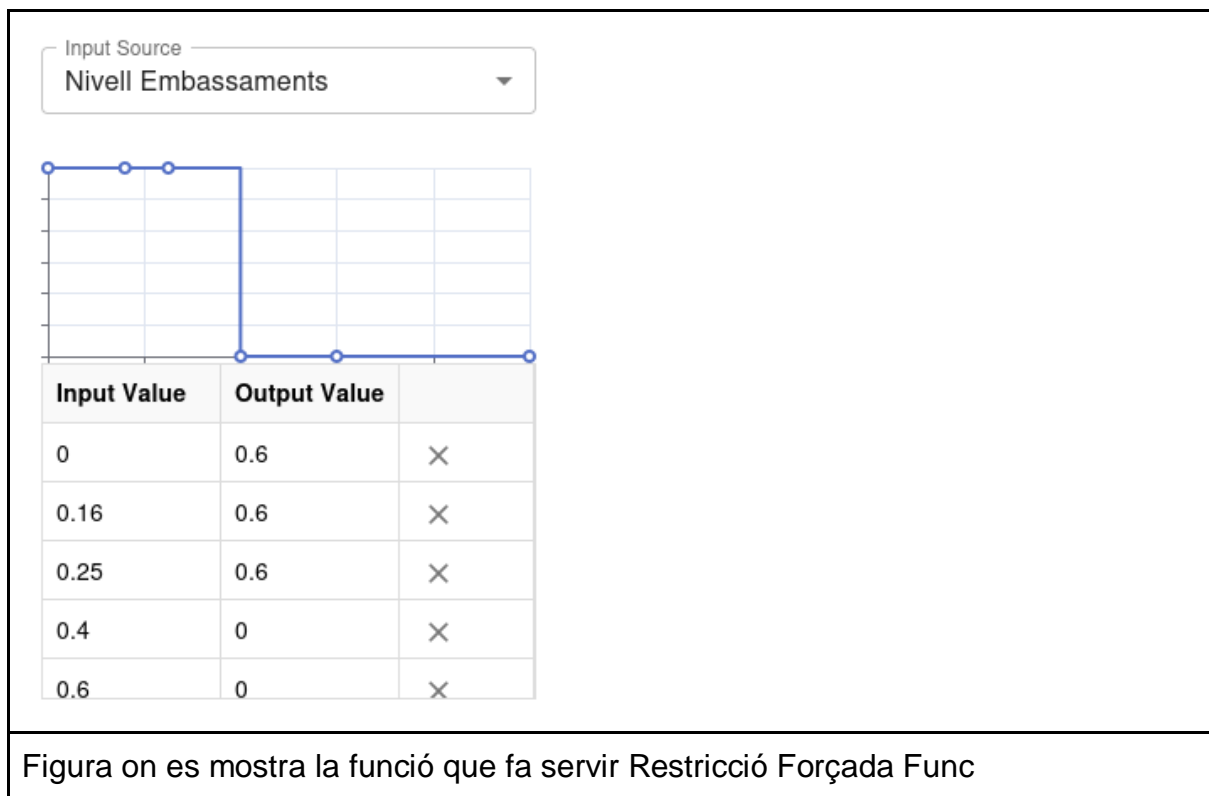
El raonament per aquesta corba final és el següent: per nivells de prealerta cal començar a dessalinitzar un petit volum d'aigua en cas de sequera posterior, no obstant això, convé no dessalinitzar massa per reduir costos en el cas que no hi hagués sequera posterior. Quan entrem en estat d'alerta, volem sortir d'aquest el més ràpid possible per tal d'evitar els efectes negatius sobre la població i la necessitat d'imposar restriccions forçades, ja que són força costoses. Finalment, la funció creix de forma més suau entre 0.3 i 0 perquè en aquest cas, considerem que les dessalinitzadores no són prou rellevants per combatre la sequera i simplement busquem reduir els costos.



Pel que fa a Restricció Forçada Func, aquesta és força interessant perquè hem canviat considerablement els llindars i intensitats de les restriccions respecte als oficials que proporciona l'enunciat de la pràctica.

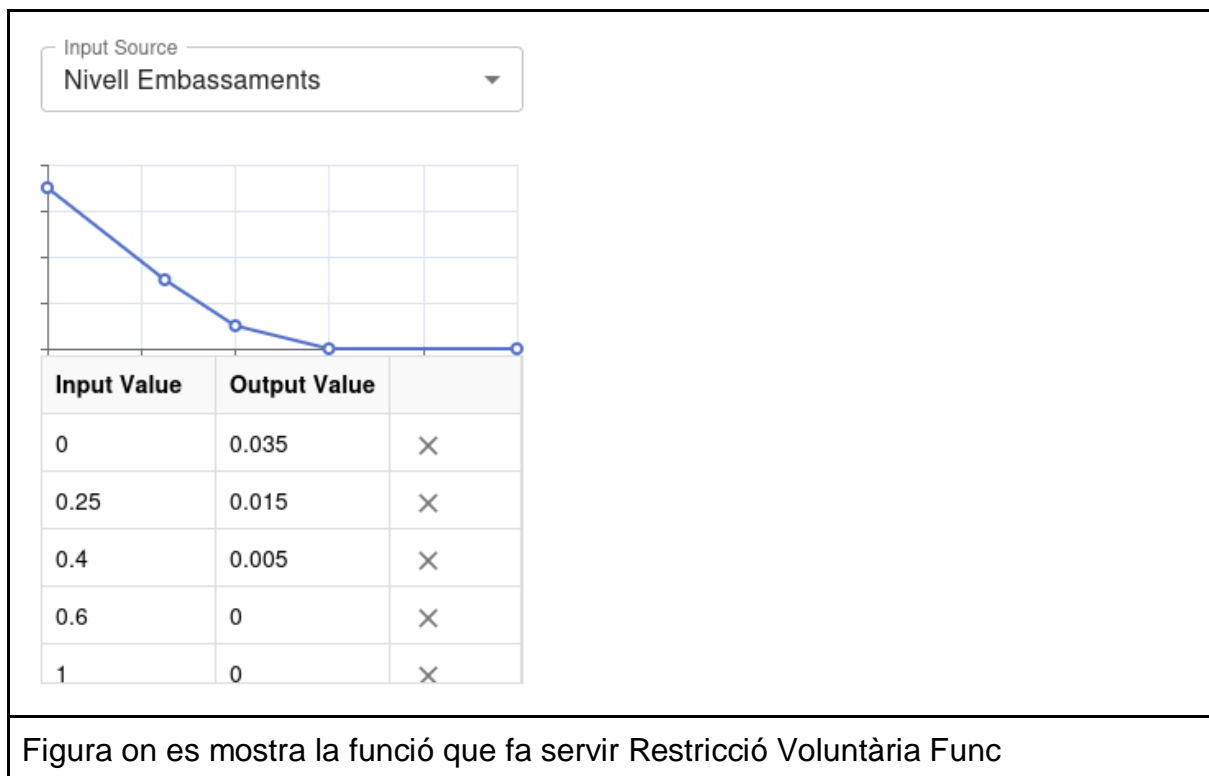
En el nostre cas, hem trobat que un salt absolut de restricció de 0 a restricció de 0.6 a partir de l'estat d'alerta (nivell embassament  $< 40\%$ ) produeix els millors resultats per les nostres mètriques d'avaluació que s'explicaran en més detall en un apartat posterior. De fet, aquesta configuració el que causa són salts constants però no consecutius al nivell d'embassament de forma que sempre surt ràpidament de l'estat d'alerta, a diferència de les dades històriques.

El raonament per decidir aquesta funció ha estat el següent: pels nivells d'embassament  $> 0.4$ , suposem que les dessalinitzadores ja són suficients per combatre la prealerta. D'aquesta forma minimitzen les setmanes amb restriccions forçades que considerem innecessàries. D'altra banda, fem un salt extrem quan entrem a l'estat d'alerta per sortir el més ràpid possible i tornar a fer servir les dessalinitzadores. De fet, experimentalment hem vist que les intensitats més efectives són al voltant del 80%, no obstant això, considerem aquesta opció poc realista i, per tant, ens quedem amb només 60%.



Finalment, la funció que modela les restriccions voluntàries és una corba tal que d'1 fins a 0.6 es manté a 0, de 0.6 fins a 0.4 creix fins a 0.005, de 0.4 fins a 0.25 creix fins a 0.015 i de 0.25 fins a 0 creix fins a 0.035.

La forma que dibuixa és una corba que creix lentament al principi i per cada llinar creix més ràpid. El raonament que hem fet servir per ajustar les intensitats i llinars és similar al de les restriccions forçades. És a dir, ens interessa que al principi sigui més baix i a mesura que la situació de la sequera empitjora, considerem més necessàries les restriccions. Addicionalment, creiem que aquest modelatge s'ajusta força bé al comportament humà on la prioritat que li donem a les restriccions voluntàries no creixen de forma lineal respecte la gravetat de la situació.



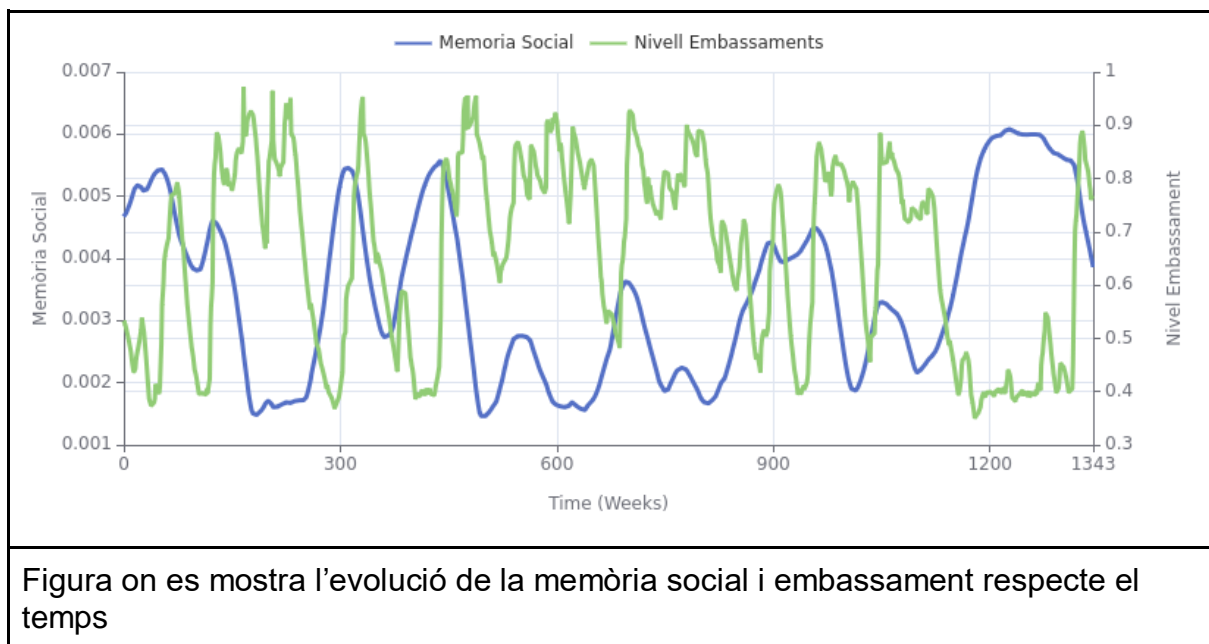
Pel que fa a la variable Restricció Forçada, aquesta simplement pren els valors del seu *converter* corresponent. Mentre que la variable Restricció Voluntària fa servir el mínim entre el seu *converter* corresponent i la memòria social. Com la memòria social té un màxim d'1%, llavors això provoca que la Restricció Voluntària també tingui com a màxim un 1%. Aquesta interpretació ve donada per la descripció de la restricció voluntària present a l'enunciat, encara que és força fàcil rectificar el càlcul d'aquesta variable si fos necessari.

La memòria social es calcula de la següent forma:

$$MemSocial = (1 - Mean(PastValues([Nivell Embassaments], \{1 Years\}))) / 100$$

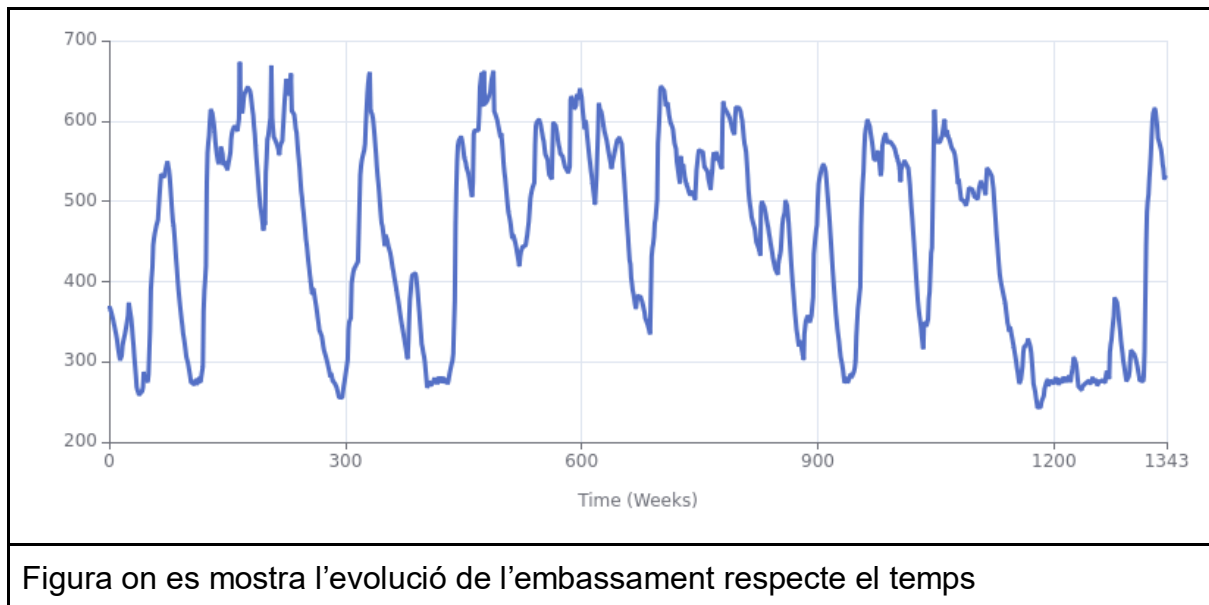
Bàsicament, el seu funcionament és el següent: agafa els valors del nivell de l'embassament durant l'últim any, calcula la mitjana aritmètica, calcula el seu complementari respecte 1 i divideix entre 100. Com Nivell Embassaments té valors entre [0,1], MemSocial doncs pren valors entre [0,0.01]. D'aquesta manera modelem que si durant l'últim any no han hagut seques, llavors el promig de Nivell Embassaments serà alt i, per tant, la memòria social serà baixa. Hem decidit limitar la

memòria social a 1 any per obtenir una funció més suau (intervals de temps més petits resulten en més moviment), però a la vegada considerem que té sentit que la gent s'oblidi passat un any. Una possible millora seria introduir un altre factor de *decay* si els nivells de l'embassament es mantenen baixos durant l'any sencer, ja que la gent s'acabaria acostumant i perdent la sensació d'urgència. Observem que la memòria social, òbviament, presenta una forta correlació negativa amb el nivell de l'embassament. No obstant això, també trobem un detall i és que la memòria social també presenta una certa demora respecte al nivell de l'embassament. Això es pot veure de forma evident entre les setmanes 0 i 150. On veiem com encara que el nivell de l'embassament cau fins al 0.4, la memòria social està baixant i només puja una vegada l'embassament ja s'ha recuperat, i per tant, torna a baixar.



Finalment, passem a explicar el mòdul que representa el sistema com a tal, a continuació es mostra una figura d'aquest:





Podem observar a la figura que la quantitat d'aigua es manté estable i entre els límits permesos per la viabilitat de la simulació.

El Flow de Dessalinitzacions simplement pren el màxim entre la variable dessalinitzacions i la variable constant Dessalinitzacions Màxima.

L'Stock Riu és un contenidor intermedi de l'aigua entre Embassament i la Xarxa. Aquest té un Flow Desembocament associat que simplement allibera l'aigua del Riu. Notem, però, que la configuració actual provoca certs pics en la quantitat d'aigua al Riu en cas de vessament per part d'Embassament. El nostre model no té com a objectiu modelar les inundacions resultants i, a més, considerem que a part d'aquest detall, els nivells del Riu es mantenen estables. Justifiquem aquests pics amb la noció que són temporals i explicables pels vessaments.

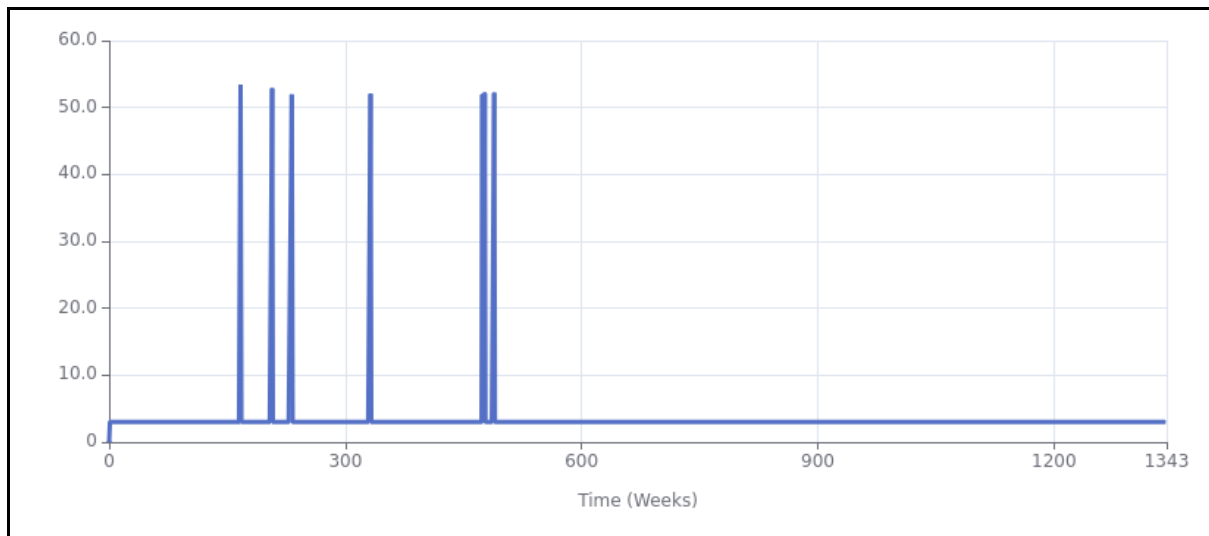


Figura on es mostra l'evolució del Riu en funció del temps.

El Flow Regeneració simplement pren com a valor la variable Regeneració i el Flow Aigües Residuals allibera l'aigua de la Xarxa de forma anàloga al Desembocament de Riu.

El Flow Consum es calcula amb la següent equació:

$$[\text{Consum setmanal}] * (1 - [\text{Restricció Forçada}]) * (1 - [\text{Restricció Voluntaria}])$$

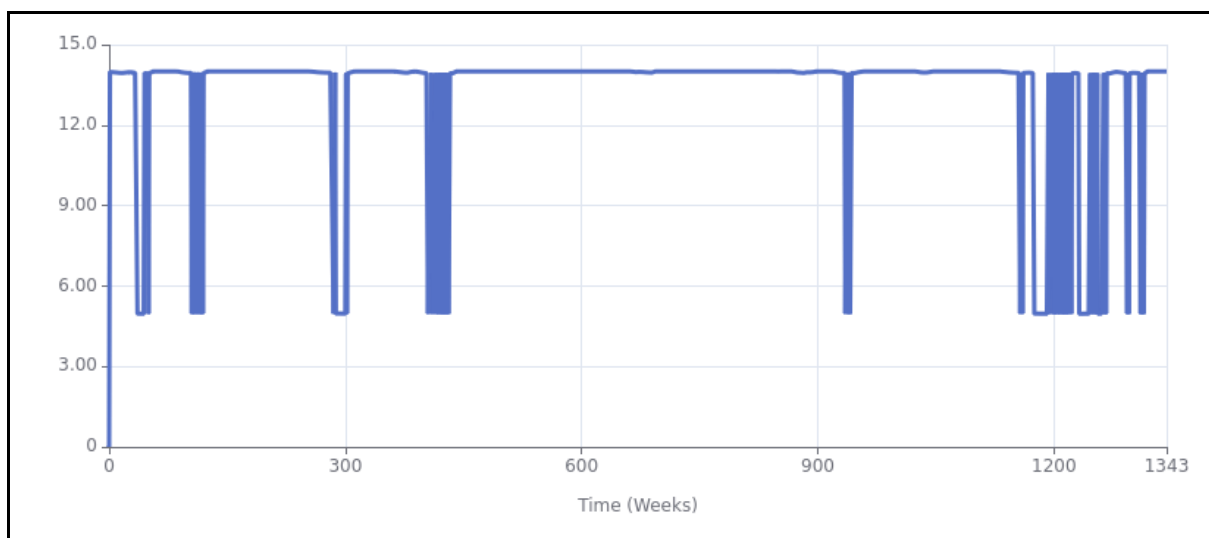


Figura on es mostra l'evolució de Xarxa al llarg del temps de simulació.



Podem observar clarament les valls resultants d'aplicar les restriccions sobre el consum en període de sequera. Això s'explica com el fet que el Flow Consum es disminueix durant aquest període.

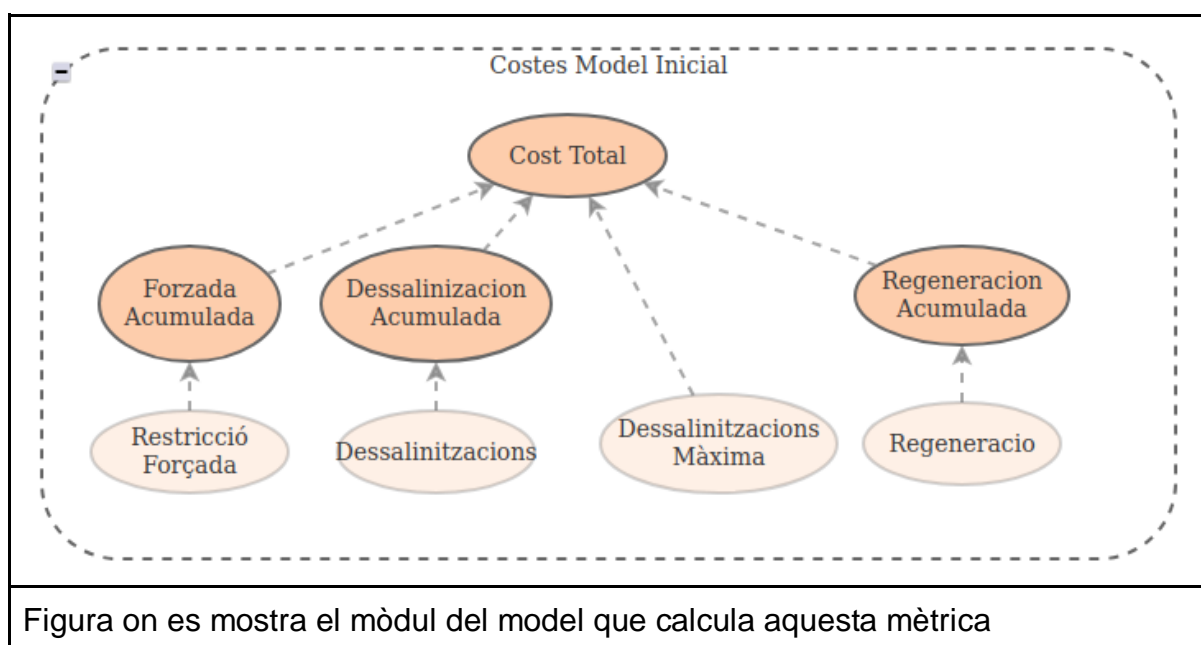
Finalment, adjuntem el link del model aquí:  
<https://insightmaker.com/insight/5bLL0ExX8kX7pVDGeV3Vzg>

## 5. Mètriques d'avaluació

Amb el model ja creat i descrit, ens falta veure si aquest aconsegueix complir els objectius que ens havíem proposat a l'inici. Per poder fer això, necessitarem d'unes mètriques d'avaluació concretes que ens ajudin a determinar si el model cau dins dels paràmetres vàlids descrits en els objectius o no hi arriba:

→ Mètrica d'avaluació per l'objectiu 1

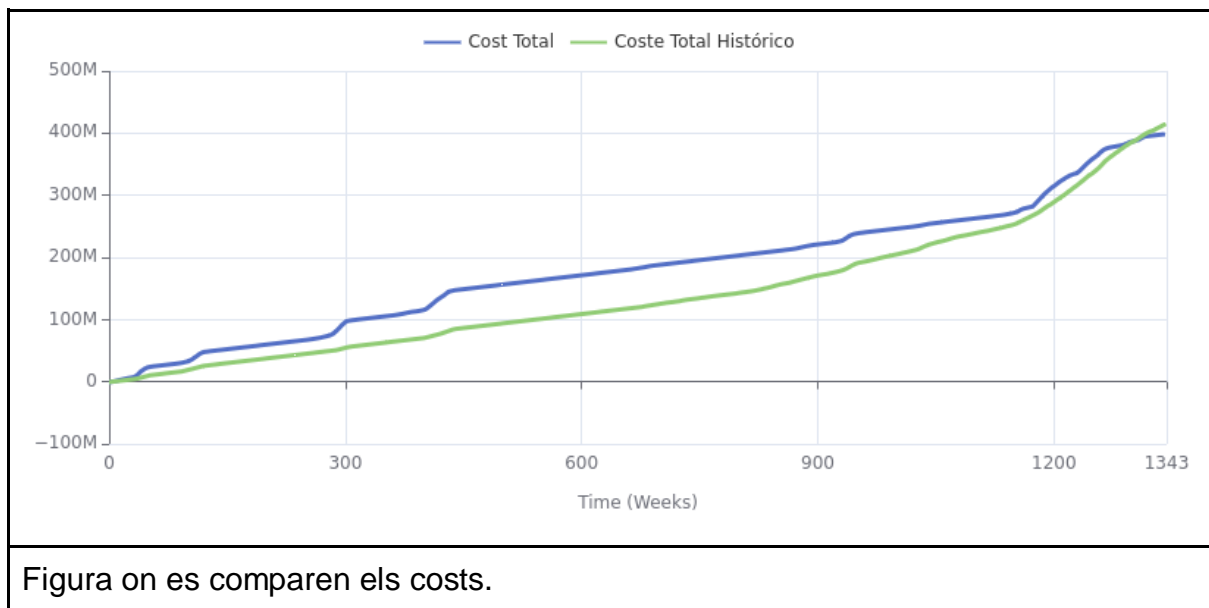
$$\begin{aligned} \text{CostTotal} = & \text{EstalviForçat} \cdot 1\,500\,000 + \text{Dessal.} \cdot 400\,000 + \dots \\ & \dots + \text{Regen.} \cdot 150\,000 + (\text{Desal. Max} - 1.5) \cdot 2\,000\,000 \end{aligned}$$



Aquesta mètrica ens permet observar l'impacte econòmic dels paràmetres del nostre sistema i serveix com a contrast per les altres mètriques. Més concretament, és evident que reduint els paràmetres, encara que segueixi sent una solució vàlida (riu/xarxes estables, embassament entre 0-100%, ...), pot provocar efectes negatius que el cost econòmic no pot capturar.

El nostre objectiu plantejat al principi del projecte era de reduir el cost econòmic respecte l'històric en un 10%. No obstant això, com es pot veure en la gràfica següent,

no hem pogut assolir aquest objectiu. Més concretament, el cost històric és de 415M mentre que el nostre model només ha pogut baixar-lo a 398M, un 4%.



Hi ha certs detalls que volem destacar sobre aquesta mètrica d'avaluació. En primer lloc, ens sembla força raonable aquest resultat, tenint en compte que les dades històriques sobre l'ús de les dessalinitzadores no sembla seguir una lògica consistent.

Més concretament, i a diferència del nostre model, hi ha un període de temps on no es fan servir les dessalinitzadores quan es veu clarament que el nivell de l'embassament és inferior al 40%, però en un període posterior s'activen en aquest umbral.

Això ens fa pensar que abans d'una certa data, històricament, no disposaven de dessalinitzadores. Per aquest motiu, hi ha una despesa econòmica que no és present a les dades històriques que causa una deflació del seu cost real. Aquesta diferència es pot observar clarament a les primeres 600 setmanes, encara que una vegada s'instal·len les dessalinitzadores podem destacar que la pendent del nostre model és inferior a la de les dades històriques.

→ Mètrica d'avaluació per l'objectiu 2

$$SetmanesTotalsEnAlerta = \sum_{i=1}^{1343} f(i)$$

on “ i ” representa la i-èsima setmana i “ f ” és una funció que retorna 1 si durant aquella setmana el sistema està en estat d’alerta (nivell de l’embassament inferior a 40%), i retorna 0 en cas contrari.

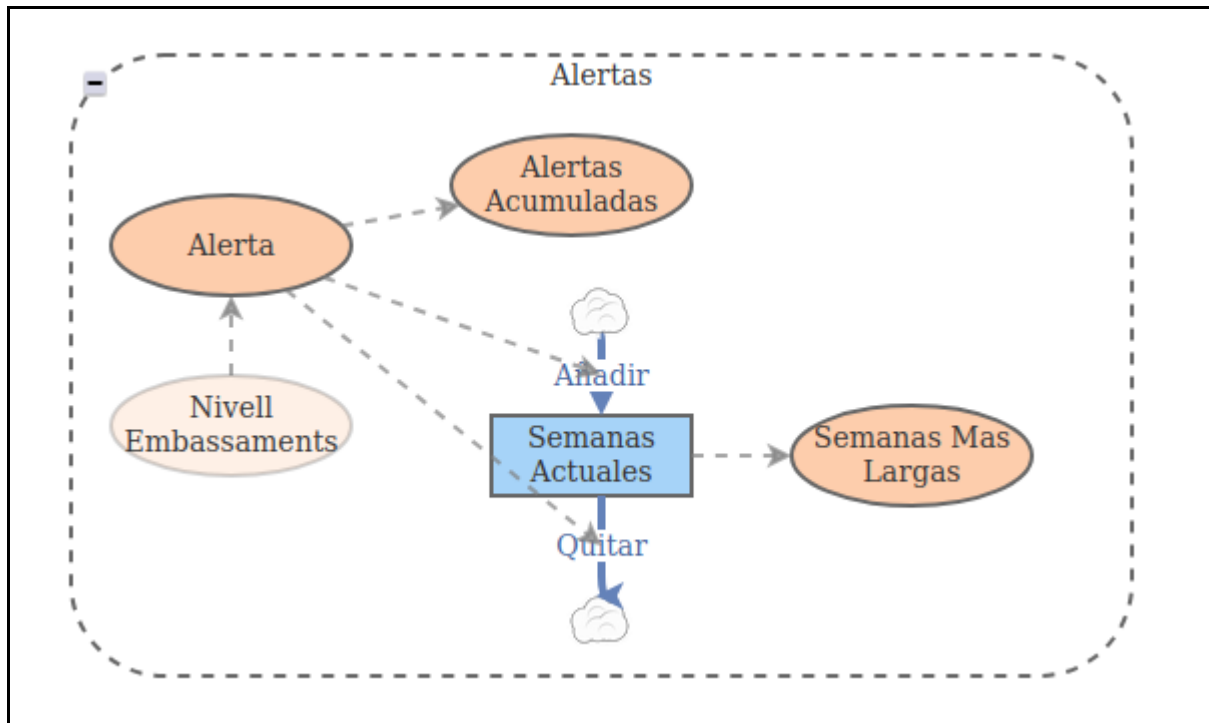


Figura que mostra el mòdul al model que calcula les mètriques 2 i 3



Figura on es compara el nombre de setmanes en alerta.

Podem observar que el nostre model aconsegueix reduir el nombre de setmanes en estat d'alerta un 42%, per tant, hem assolit l'objectiu 2 de manera satisfactòria. Aquesta diferència es pot veure de manera més òbvia entre les setmanes 1200 i 1343, on a causa dels canvis que hem fet a les intensitats i llindars de les restriccions forçades, es redueix dràsticament el nombre total de setmanes.

→ Mètrica d'avaluació per l'objectiu 3

$$\text{SetmanesConsecutivesMàximesEnAlerta} = L_{1443}$$

$$\text{on } L_i = \max\{L_{i-1}, S_i\}$$

$$\text{on if } f(i) == 1 \{S_i = S_{i-1} + 1\}, \text{ else } S_i = 0$$

Aquesta mètrica, encara que sembla complexa a causa de l'ús de recurrències per expressar formalment el seu significat, bàsicament calcula el nombre màxim de setmanes consecutives en estat d'alerta. Considerem que aquesta mètrica és rellevant d'investigar perquè encara que el nombre total de setmanes és força informatiu, la llargada d'aquests estats d'alerta també és clau pel benestar dels habitants.

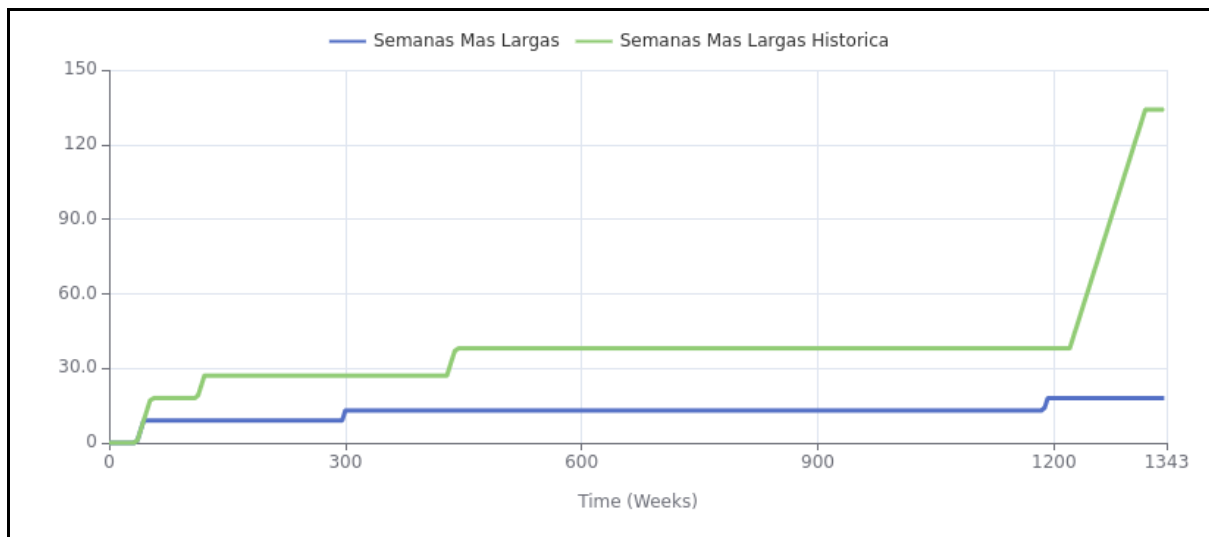


Figura on es compara el nombre màxim de setmanes consecutives en alerta.

A l'igual que en el cas del nombre total de setmanes, podem veure la diferència en gestió de les intensitats i llindars de les restriccions forçades de forma més evident durant les setmanes 1200 fins 1343, on es pot observar que el màxim creix

contínuament, fet que indica que durant aquest període l'estat d'alerta es va mantenir constantment, mentre que en el nostre model el nombre de setmanes consecutives no sobrepassa els 30.

De fet, l'objectiu que ens vam proposar a l'inici del projecte era reduir un 30% aquest nombre. Afortunadament, hem aconseguit assolir aquest objectiu de manera excel·lent, amb una reducció del 86%. Per tant, podem deduir que una millora significativa respecte les dades històriques és que hem reduït el nombre de setmanes consecutives bastant més que el nombre total.

## 6. Millores del model

Ara que ja tenim el sistema bàsic, podem aplicar-ho a un sistema més semblant a la vida real i veure així quines possibles millores necessitaríem si volguessin fer una mica més prim.

Per fer això, al igual que en l'anterior, haurem de determinar unes assumpcions sobre el sistema per poder veure que tot funciona com volem. Farem servir la mateixa taxonomia d'assumpcions que en l'apartat 2: Assumpcions sistèmiques de dades (SD) que, com bé el seu nom indica, tracten sobre les dades; assumpcions sistèmiques estructurals (SE), que descriuen les relacions entre elements del sistema; i assumpcions simplificadores (S) que redueixen la complexitat del model.

Cal destacar que en la següent taula podem trobar assumpcions repetides del model anterior, ja que es una millora i moltes de les assumpcions segueixen sent certes, i, en alguns casos, les assumpcions vindran donades per l'enunciat de la pràctica i, per tant, no tenen font com a tal ni tan poc manera de ser validada. La part de condició de revisió de la taula, però, s'emplena suposant que es desitja validar l'assumpció.

ID	Descripció	Font	Condició de Revisió	Validada
S_01	El sistema està format per tres rius: Ter, Llobregat i Mur.	-	-	No
S_02	El sistema està format per sis embassaments: Sau, Susqueda, La Baells, Sant Ponç, La Llosa del Cavall i Darnius-Boadella.	-	-	No
S_03	El consum d'aigua de la xarxa és constant i no es diferencia en el seu ús.	-	Mensual	No
S_04	Les restriccions de consum de caràcter forçat es compleixen sempre.	-	Trimestral	No

S_05	Tant el desembocament dels rius com les aigües residuals de la xarxa no formen part de cap cicle del sistema.	-	Anual	No
S_06	Els canvis en polítiques de restriccions d'ús d'aigua i desembassament es poden dur a terme en setmanes.	-	Trimestral	No
S_05	L'evaporació de l'aigua a causa de les temperatures és negligible.	-	Anual	No
SD_01	Les aportacions naturals d'aigua segueixen una distribució idèntica a la històrica.	Dades adjuntes a la pràctica	Anual	No
SE_01	Els embassaments només reben aigua de les aportacions naturals. Sau i Susqueda reben un 25% cadascun; La Baells, Sant Ponç i La Llosa del Cavall reben cadascun un 13% i; Darnius-Boadella rep un 10%	Dades adjuntes a la pràctica	Anual	No
SE_02	L'aigua dels embassaments Sau i Susqueda només tenen com a destí el riu Ter; La Baells, Sant Ponç i La Llosa del Cavall acaben en el riu Llobregat sols i; Darnius-Boadella té com a destí únic el riu Mur.	Dades adjuntes a la pràctica	Anual	No
SE_03	Els rius només reben aigua a través dels desembassaments del seus embassament i de les seves dessalinitzadores.	Dades adjuntes a la pràctica	Anual	No
SE_04	L'aigua dels rius Mur i Llobregat només té com a destí la xarxa o el	Dades adjuntes a la pràctica	Anual	No



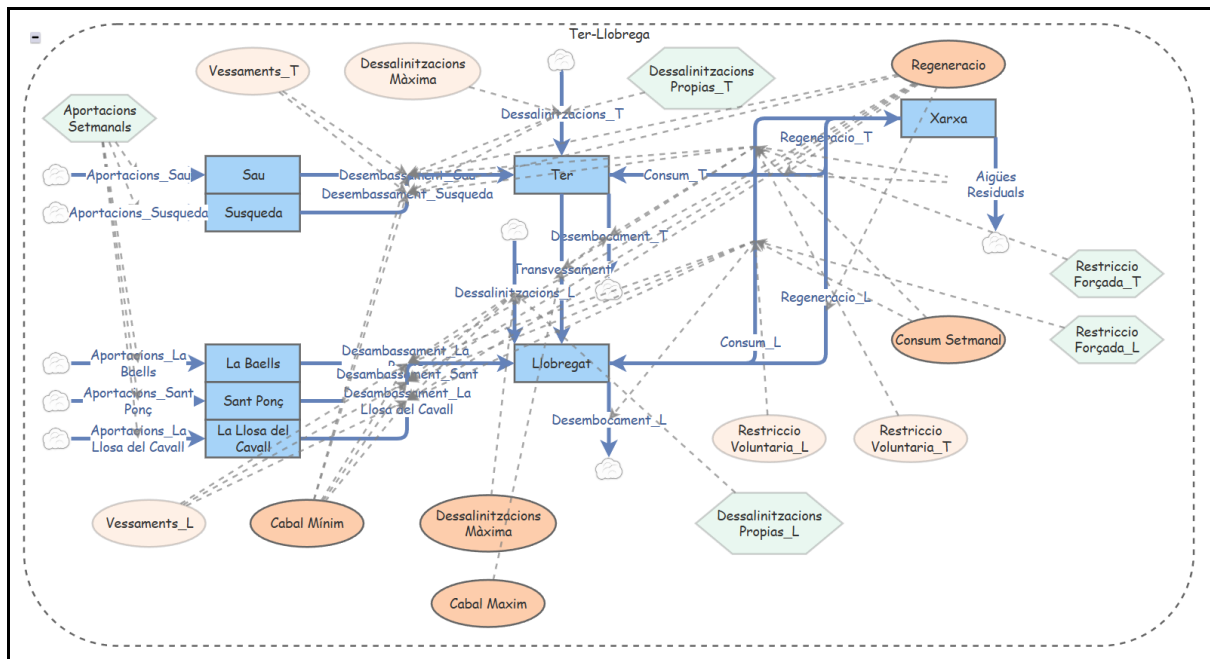
	dessembocament. Mentre que l'aigua del riu Ter pot anar a la xarxa, dessembocament o al riu Llobregat a través del transvasament.			
SE_05	La xarxa només rep aigua dels rius.	Dades adjuntes a la pràctica	Anual	No
SE_06	L'aigua de la xarxa només té com a destí les dessalinitzadores o les aigües residuals.	Dades adjuntes a la pràctica	Anual	No

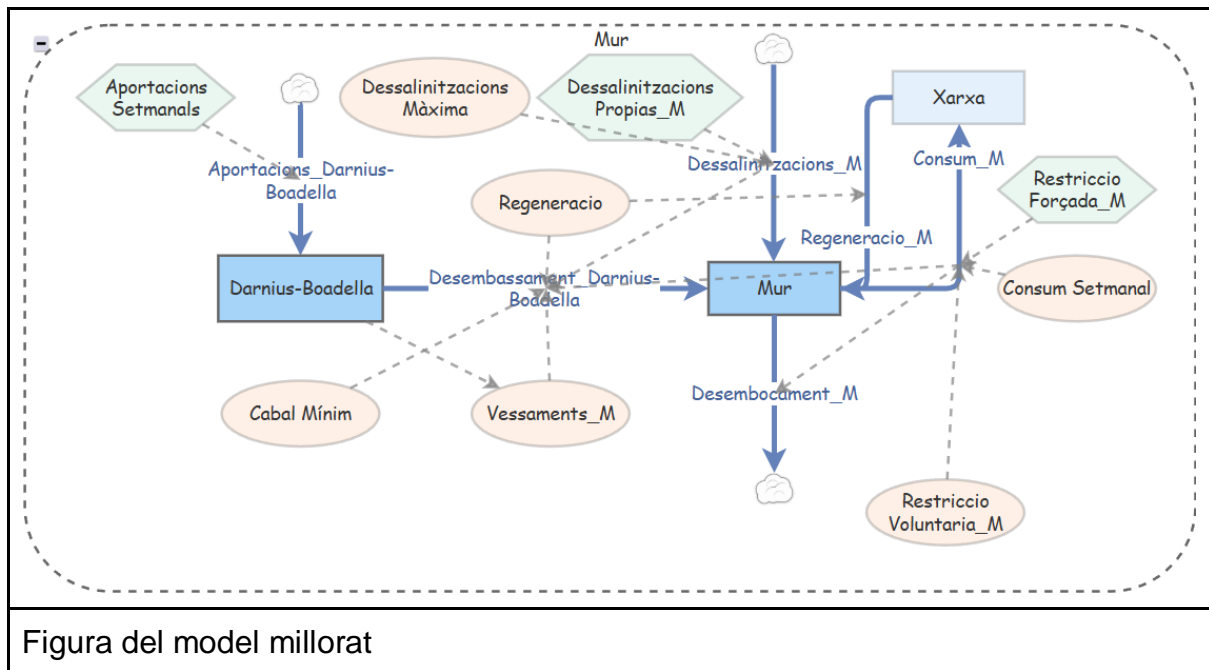
Un cop ja sabem el que ens podem esperar del model i les seves delimitacions seguint les assumpcions anteriors, podem començar a veure les característiques d'aquest i com aquestes han millorat des del apartat 3:

- Consta de 10 *stocks*:
  - Sau (Embassament de Ter)
  - Susqueda (Embassament de Ter)
  - La Baells (Embassament de Llobregat)
  - Sant Ponç (Embassament de Llobregat)
  - La Llosa del Cavall (Embassament de Llobregat)
  - Darnius-Boadella (Embassament de Mur)
  - Ter (Riu)
  - Llobregat (Riu)
  - Mur (Riu)
  - Xarxa
- I 21 *flows*:
  - Aportacions naturals
  - Dessalinitzacions\_T
  - Dessalinitzacions\_L
  - Dessalinitzacions\_M
  - Desembassament\_Sau
  - Desembassament\_Susqueda

- Desembassament\_La Baells
- Desembassament\_Sant Ponç
- Desembassament\_La Llosa del Cavall
- Desembassament\_Darnius-Boadella
- Desembocament\_T
- Desembocament\_L
- Desembocament\_M
- Transvessament
- Consum\_T
- Consum\_L
- Consum\_M
- Regeneracio\_T
- Regeneracio\_L
- Regeneracio\_M
- Aigües residuals

Mirant el model a Insight Maker, podem destacar la presència de 12 bucles de retroalimentació negatius que estableixen el sistema:





- **Sau** -> **Dessalinització\_T** -> **Desembassament\_Sau** (on tenim 3 relacions negatives, un increment en **Sau** causa un decrement en **Dessalinització\_T** , un increment en **Dessalinització\_T** causa un decrement en **Desembassament\_Sau** , un increment en **Desembassament\_Sau** causa un decrement en **Sau**).
- **Susqueda** -> **Dessalinització\_T** -> **Desembassament\_Susqueda** (on tenim 3 relacions negatives, un increment en **Susqueda** causa un decrement en **Dessalinització\_T** , un increment en **Dessalinització\_T** causa un decrement en **Desembassament\_Susqueda**, un increment en **Desembassament\_Susqueda** causa un decrement en **Susqueda**).
- **La Baells** -> **Dessalinització\_T** -> **Desembassament\_La Baells** (on tenim 3 relacions negatives, un increment en **La Baells** causa un decrement en **Dessalinització\_T** , un increment en **Dessalinització\_T** causa un decrement en **Desembassament\_La Baells**, un increment en **Desembassament\_La Baells** causa un decrement en **La Baells**).
- **Sant Ponç** -> **Dessalinització\_T** -> **Desembassament\_Sant Ponç** (on tenim 3 relacions negatives, un increment en **Sant Ponç** causa un decrement en **Dessalinització\_T** , un increment en **Dessalinització\_T** causa un decrement en **Desembassament\_Sant Ponç**, un increment en **Desembassament\_Sant Ponç** causa un decrement en **Sant Ponç**).

- **La Llosa del Cavall -> Dessalinització\_T -> Desembassament\_La Llosa del Cavall** (on tenim 3 relacions negatives, un increment en **La Llosa del Cavall** causa un decrement en **Dessalinització\_T** , un increment en **Dessalinització\_T** causa un decrement en **Desembassament\_La Llosa del Cavall**, un increment en **Desembassament\_La Llosa del Cavall** causa un decrement en **La Llosa del Cavall**).
- **Darnius-Boadella -> Dessalinització\_T -> Desembassament\_Darnius-Boadella** (on tenim 3 relacions negatives, un increment en **Darnius-Boadella** causa un decrement en **Dessalinització\_T** , un increment en **Dessalinització\_T** causa un decrement en **Desembassament\_Darnius-Boadella**, un increment en **Desembassament\_Darnius-Boadella** causa un decrement en **Darnius-Boadella**).
- **Sau/Susqueda -> Restriccions del Ter -> Consum\_T** (on tenim 3 relacions negatives, un increment en **Sau/Susqueda** causa un decrement en **Restriccions del Ter**, un increment en **Restriccions del Ter** causa un decrement en **Consum\_T**, un increment en **Consum\_M** causa un decrement en **Sau/Susqueda**).
- **La Baells/Sant Ponç/La Llosa del Cavall -> Restriccions del Llobregat -> Consum\_L** (on tenim 3 relacions negatives, un increment en **La Baells/Sant Ponç/La Llosa del Cavall** causa un decrement en **Restriccions del Llobregat**, un increment en **Restriccions del Ter** causa un decrement en **Consum\_L**, un increment en **consum** causa un decrement en **La Baells/Sant Ponç/La Llosa del Cavall**).
- **Darnius-Boadella -> Restriccions del Mur -> Consum\_M** (on tenim 3 relacions negatives, un increment en **Darnius-Boadella** causa un decrement en **Restriccions del Mur**, un increment en **Restriccions del Mur** causa un decrement en **Consum\_M**, un increment en **Consum\_M** causa un decrement en **Darnius-Boadella**).
- **Sau/Susqueda -> Vessaments\_T -> Desembassament\_Sau/Desembassament\_Susqueda** (on tenim 1 relació negativa i 2 de positives, un increment en **Sau/Susqueda** causa un increment en **Vessaments\_T**, un increment en **Vessaments\_T** causa un increment en **Desembassament\_Sau/Desembassament\_Susqueda**, un increment en

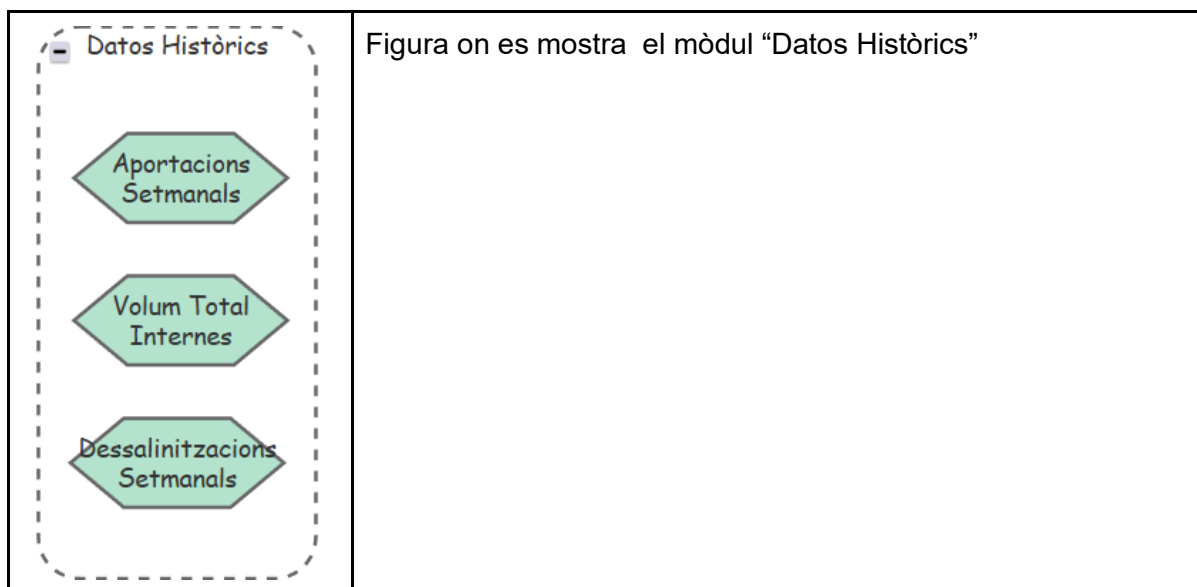
**Desembassament\_Sau/Desembassament\_Susqueda** causa un decrement en **Sau/Susqueda**).

- **La Baells/Sant Ponç/La Llosa del Cavall** -> **Vessaments\_L** -> **Desembassament\_La Baells/Desembassament\_Sant Ponç/Desembassament\_La Llosa del Cavall** (on tenim 1 relació negativa i 2 de positives, un increment en **La Baells/Sant Ponç/La Llosa del Cavall** causa un increment en **Vessaments\_L**, un increment en **Vessaments\_L** causa un increment en **Desembassament\_La Baells/Desembassament\_Sant Ponç/Desembassament\_La Llosa del Cavall**, un increment en **Desembassament\_La Baells/Desembassament\_Sant Ponç/Desembassament\_La Llosa del Cavall** causa un decrement en **La Baells/Sant Ponç/La Llosa del Cavall**).
- **Darnius-Boadella** -> **Vessaments\_M** -> **Desembassament\_Darnius-Boadella** (on tenim 1 relació negativa i 2 de positives, un increment en **Darnius-Boadella** causa un increment en **Vessaments\_M**, un increment en **Vessaments\_M** causa un increment en **Desembassament\_Darnius-Boadella**, un increment en **Desembassament\_Darnius-Boadella** causa un decrement en **Darnius-Boadella**).

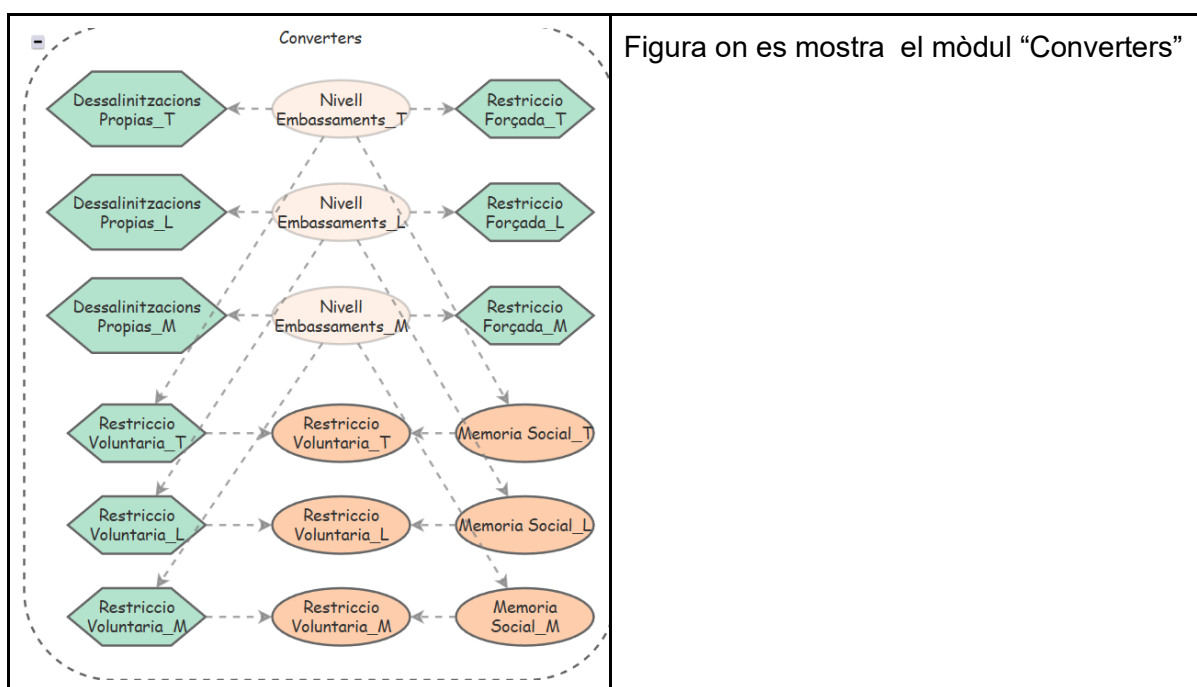
Al igual que en el model anterior, hem dividit tot en mòduls, per facilitar la llegibilitat i interpretabilitat d'aquest, utilitzant *folders* i *ghost primitives*.

Primerament comencem amb els mòduls que no depenen de cap altre: les dades històriques. Les dades històriques simplement són *converters* que carreguen les dades proporcionades per la pràctica. Cal remarcar que Dessalinitzacions Setmanals i Volum Total Internes només es fan servir per calibrar el model inicial i calcular les mètriques segons les dades històriques, mentre que Aportacions Setmanals és la font d'aigua del sistema.

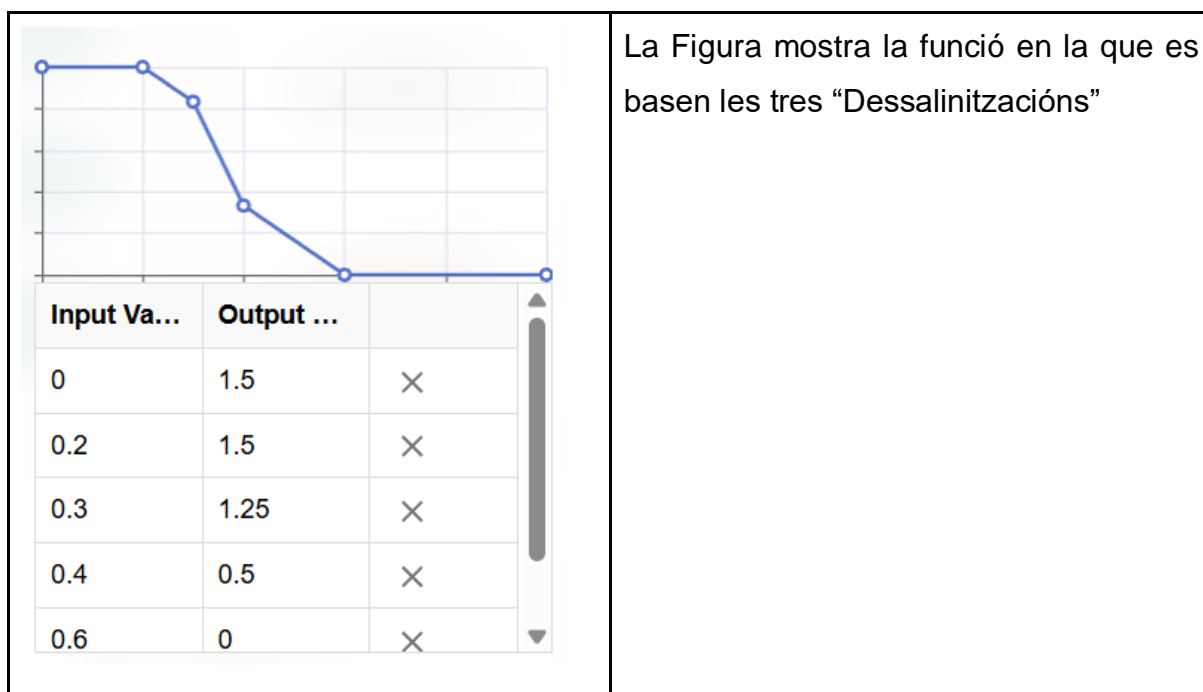
Pel que fa a les constants, aquestes estan repartides pels diferents mòduls del sistema i tenim: Capacitat Màxima (693 hm<sup>3</sup>), Cabal Mínim (3 hm<sup>3</sup>/setmana), Consum Setmanal (15 hm<sup>3</sup>/setmana), Dessalinitzacions Màxima (1.5 hm<sup>3</sup>/setmana), Regeneració (1 hm<sup>3</sup>/setmana). Aquestes formen part de l'especificació de l'enunciat i no les canviem.



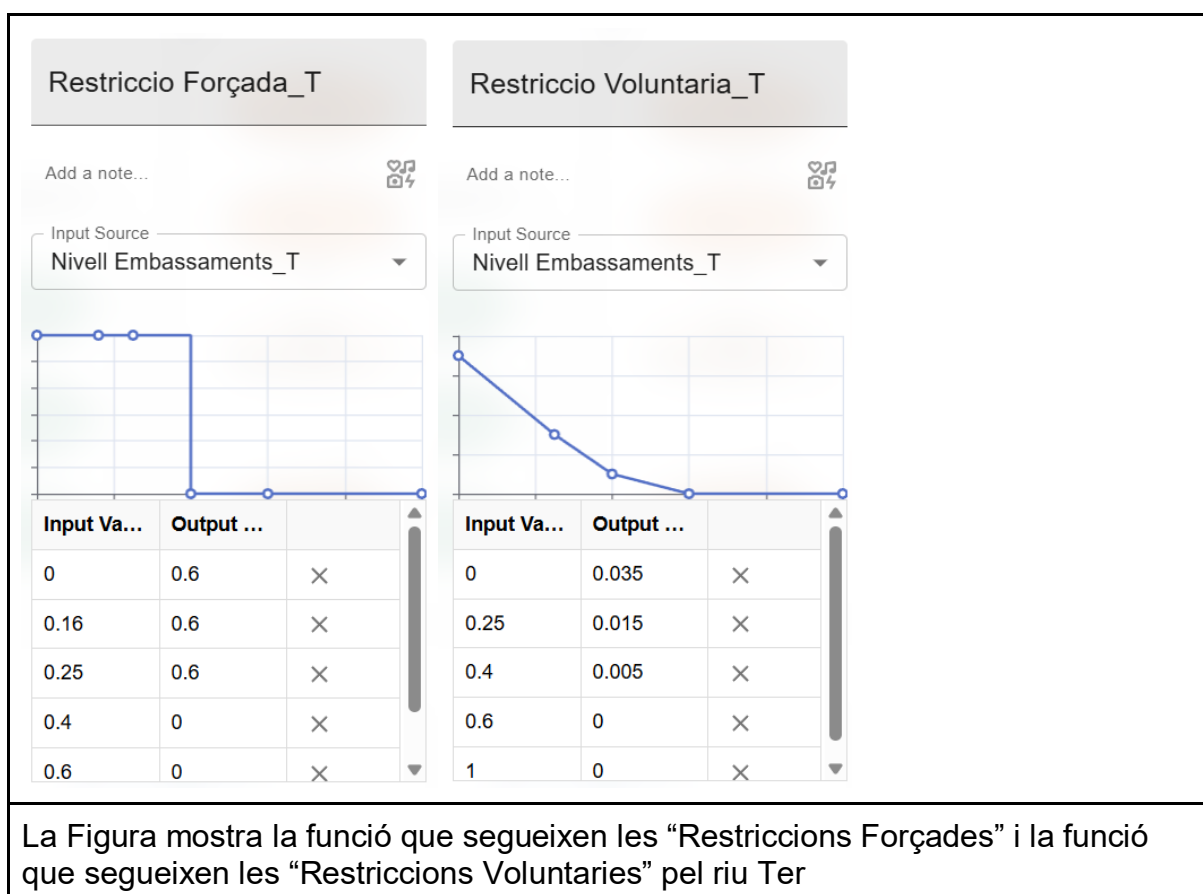
Passant als mòduls que depenen d'altres, comencem amb els converters:



En el cas de les dessalinitzacions, en comparació al anterior model, les hem separat per cada riu individualment, basant-se així cadascuna d'ella en el nivell d'embassament del seu riu corresponent segons la funció mostrada a continuació.



Passant a les restriccions, passa el mateix, s’han separat en tres per a servir a cada riu de manera individual. Si mirem les forçades, aquestes es basen en el nivell d’embassament pertanyent al seu riu corresponent i segueixen les funcions següents:



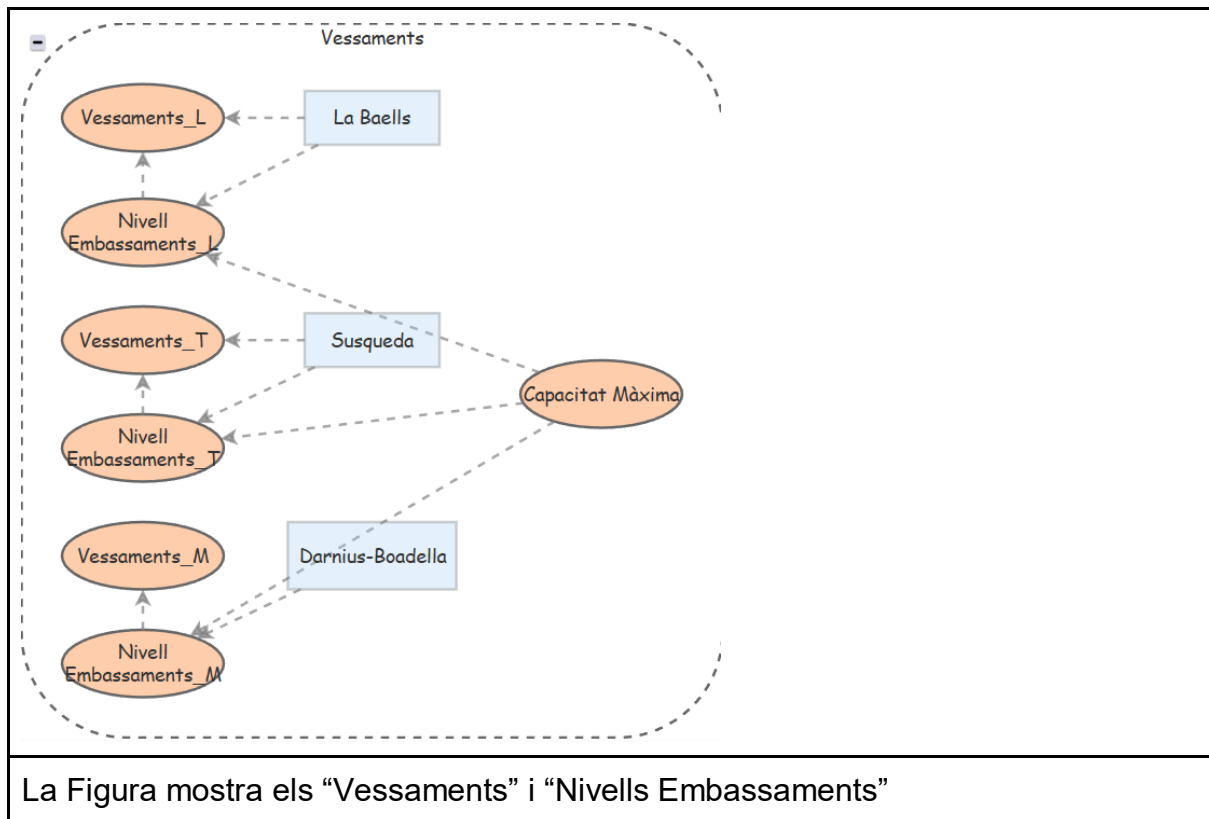
Però, per poder utilitzar les restriccions voluntàries no ens queden aquí, sino que necessitem una memoria social per a cada una, d'un màxim de 1%, que podem calcular a partir de restar a 1 la mitjana, dividida entre 100, dels valors passats dels nivells dels embassaments corresponents en 1 any i, haurem de passar la variable de la restricció voluntaria per poder agafar el valor mínim entre aquest i la funció mostrada abans i, d'això agafar el mínim entre el valor resultant i 35%.

Com en els casos anteriors, hem dividit els Vessaments i Nivells d'Embassament en 3 per a servir a cada riu de manera individual. En el cas dels Nivells d'Embassaments, aquests es basen en un dels embassaments corresponents al riu al que pertanyen entre la capacitat màxima multiplicada per 0,25 en el cas del Ter, 0,13 en el cas del Llobregat i 0,1 en el cas del Mur, ja que és el percentatge de la quantitat d'aigua del total de les aportacions que va cap a cada embassament. D'aquesta forma si sumem tots aquests percentatges obtenim 1.

Solament necessitem fer-ho amb un dels embassaments i no tots ja que els embassaments d'un mateix riu tenen el mateix nivell d'embassament.

Passant als vessaments, mirarem si el nivell de l'embassament corresponent es superior a 0,95 en el cas del Llobregat i 0,8 en el Ter i Mur i, si ho és, el vessament passarà a ser la quantitat actual d'un dels embassaments corresponents al sistema del riu corresponent a aquest vessament dividida per 9 en el cas del Llobregat i 15 en el Ter i Mur.





Cal destacar que el comportaments dels Stocks que representen els rius, els embassaments i la xarxa es comporten de forma similar al del model inicial. És a dir, són estables i es mantenen entre 0-100% al llarg del temps. No creiem convenient adjuntar més gràfics sobre aquests per manca de temps i perquè són força semblants als del model inicial.

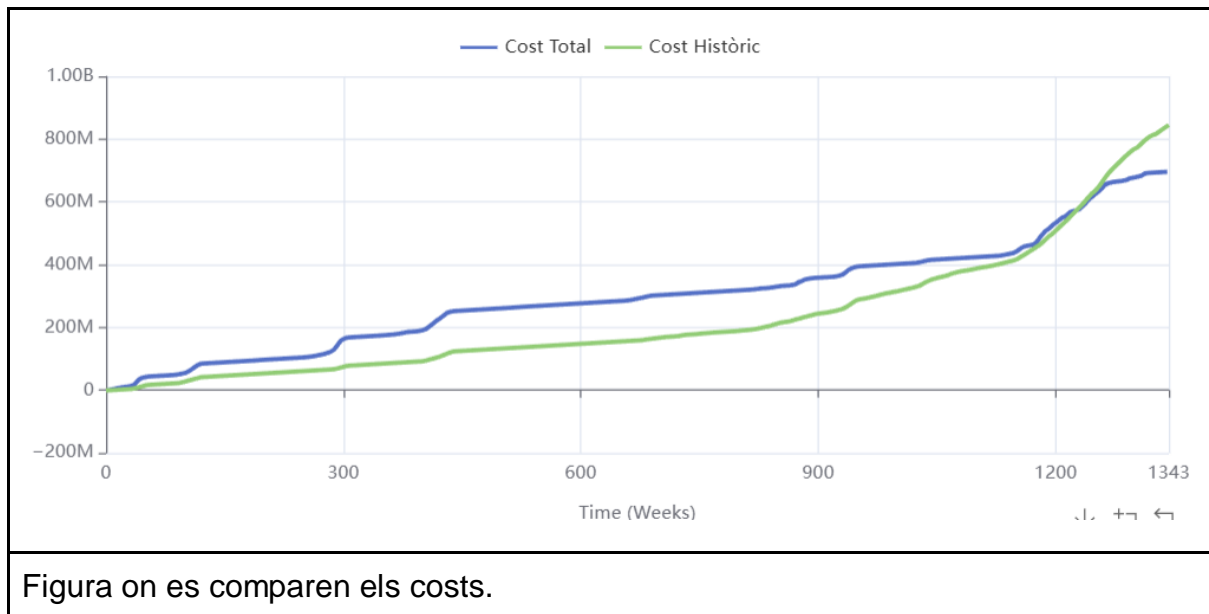
Amb el model ja creat i descrit, ens falta veure si aquest segueix complir els objectius que ens havíem proposat a l'inici o si aconseguim complir algun que al model anterior no pogues. Per poder fer això, agafarem les mètriques d'avaluació equivalents a les que hem fet servir per comprovar si el model anterior feia el que havia de fer. No podem agafar les mateixes exactament degut a que el sistema, en resum, ha estat dividit en tres en la millora, per tant, les mètriques anteriors també s'hauran separat per ser independents cada sistema (Ter, Llobregat i Mur), així que ja no podrem agafar una única mètrica total, sino que agafarem totes les parts que abans conformaven les mètriques utilitzades anteriorment:

→ Mètrica d'avaluació per l'objectiu 1

$$\begin{aligned}
CostTotal = & SUM(PastValues([Restriccio Forçada\_L]) + \dots) \\
& PastValues([Restriccio Forçada\_T]) + \dots) \\
& PastValues([Restriccio Forçada\_M]) * 1500000 + \dots) \\
& SUM(PastValues([Dessalinitzacions Propias\_T]) + \dots) \\
& (PastValues([Dessalinitzacions Propias\_L]) + \dots) \\
& (PastValues([Dessalinitzacions Propias\_M]) * 400000 + \dots) \\
& SUM(PastValues([Regeneracio]) * 150000 + \dots) \\
& (1 - [Dessalinitzacions Màxima]) * 2000000
\end{aligned}$$

Aquesta mètrica ens permet observar l'impacte econòmic dels paràmetres del nostre sistema i serveix com a contrast per les altres mètriques. Més concretament, és evident que reduint els paràmetres, encara que segueixi sent una solució vàlida (riu/xarxes estables, embassament entre 0-100%, ...), pot provocar efectes negatius que el cost econòmic no pot capturar.

El nostre objectiu plantejat al principi del projecte era de reduir el cost econòmic respecte l'històric en un 10%. A diferència del anterior model, com es pot veure en la gràfica següent, hem pogut assolir aquest objectiu. Més concretament, el cost històric és de 844.890,613 mentre que el nostre model ha pogut baixar-lo a 696.030,259, un 17,62%.



Degut a que les dades històriques segueixen el mateix patró explican abans, on tenen un període de temps sense dessalinitzadores, sembla força raonable aquest resultat.

Per motiu anterior, hi ha una despesa econòmica que no és present a les dades històriques que causa una deflació del seu cost real. Aquesta diferència es pot observar clarament a les primeres 600 setmanes, encara que una vegada s'instal·len les dessalinitzadores podem destacar que la pendent del nostre model és inferior a la de les dades històriques i millora en comparació al model anterior.

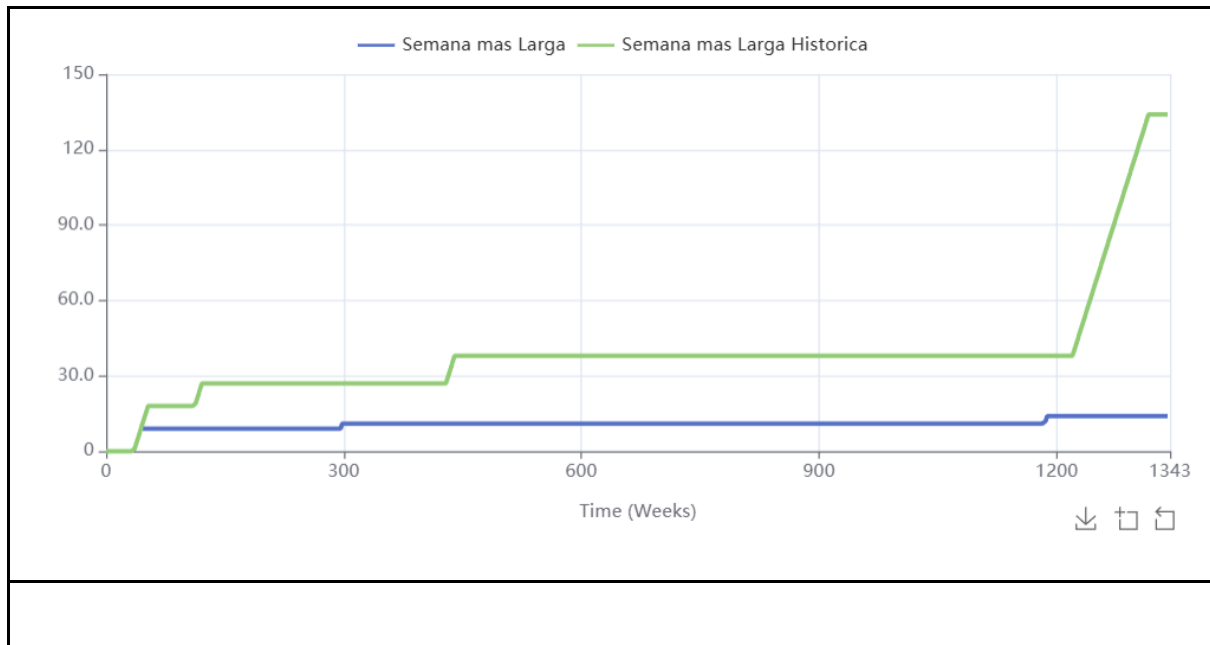
→ Mètrica d'avaluació per l'objectiu 2

*Alertas Acumuladas*

$$= MAX([\sum_{i_{Ter}=1}^{1343} f(i_{Ter})], [\sum_{i_{Llobregat}=1}^{1343} f(i_{Llobregat})], \dots$$

$$[\sum_{i_{Mur}=1}^{1343} f(i_{Mur})])$$

on “ i ” representa la i-èsima setmana i “ f ” és una funció que retorna 1 si durant aquella setmana els embassaments corresponents (Ter -> Sau/Susqueda, Llobregat -> La Baells/Sant Ponç/La Llosa del Cavall, Mur -> Darnius-Boadella) estan en estat d'alerta (nivell dels embassaments es inferior a 40%), i retorna 0 en cas contrari.



Podem observar que el nostre model aconsegueix reduir el nombre de setmanes en estat d'alerta un 89,55%, per tant, hem assolit l'objectiu 2 de manera satisfactòria i reduït en un 47,55% el nombre de setmanes en estat d'alerta en comparació en l'anterior model.

→ Mètrica d'avaluació per l'objectiu 3

$$\text{Semana más Larga} = \text{MAX}(L_{1443_{Ter}}, L_{1443_{Llobregat}}, L_{1443_{Mur}})$$

$$\text{on } L_i = \max\{L_{i-1}, S_i\}$$

$$\text{on if } f(i) == 1 \{S_i = S_{i-1} + 1\}, \text{ else } S_i = 0$$

Aquesta mètrica, encara que sembla complexa a causa de l'ús de recurrències per expressar formalment el seu significat, bàsicament calcula el nombre màxim de setmanes consecutives en estat d'alerta. Considerem que aquesta mètrica és rellevant d'investigar perquè encara que el nombre total de setmanes és força informatiu, la llargada d'aquests estats d'alerta també és clau pel benestar dels habitants.



Encara que hem aconseguit en nostre objectiu principal amb una reducció d'un 44,64%, hem empitjorat en comparació al model anterior on la reducció era del 86%, una millora molt més significativa que l'actual.

Finalment adjuntem el link del model:  
<https://insightmaker.com/insight/2NfXFZl8Y8m65AtawDsDpk>

## 7. Referències

Les referències que hem consultat a l'hora de crear el model de simulació són les següents:

- Documentació de “Insight Maker”. Disponible a: <https://insightmaker.com/help>.  
Data de consulta: [14 de novembre de 2025]