

Ejemplos de Estimación de Estado

8 de septiembre de 2025

1. Introuducción

En este documento se explican los ejemplos de EE sobre redes pequeñas. En el Github https://github.com/SENSEI-Project/SENSEI_Software, se encuentra la carpeta *SE_Examples*, en la que se encuentra el `.inp` de cada red. Ese `.inp` se ha utilizado para simular unas medidas (en algunos casos, añadiendo alguna característica a la red en mitad de la simulación, para simular que ocurre algún problema). A cada una de estas medidas, se le añade un error acorde a una coeficiente de variación CV que representa el error de la medida. O sea, el procedimiento es:

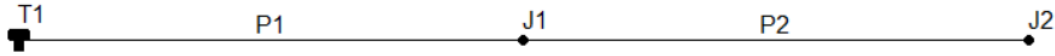
- Simulamos el `.inp` (y en algunos casos forzamos un fallo en la red durante la simulación)
- Simulamos un ruido de acuerdo a una normal basada en el CV definido: $N(\mu = 0, \sigma = CV|z|)$, siendo z la medida. De esta forma, añadiremos más ruido a las medidas que haya predefinido como más imprecisas (siendo más inciertas respecto a la ‘realidad’), y viceversa.
- Si queremos considerar alguna variable de estado como pseudomedida, el enfoque a seguir suele ser poner valores estimados y un CV alto de cara a la EE.

Todos los resultados de la EE vienen en un `.xlsx` (que también se encuentran en la carpeta del Github) con 5 hojas:

1. Medidas SIN ruido: Serían los valores ‘puros’ tras haber resuelto la red. Corresponderían a la *realidad* de algo así como un modelo perfecto.
2. MEDIDAS (propiamente dichas): son o bien los valores anteriores tras haber añadido un error, acorde al CV definido para cada tipo de medida, o bien las pseudomedidas. La EE busca ajustar los valores simulados a estas medidas.
3. Valores ajustados: resultados de la EE; es decir, valores estimados por el algoritmo.
4. Residuos normalizados de los valores ajustados
5. CV de los valores ajustados, tras haber propagado la incertidumbre

Para cada red plantearemos varios casos: otorgar distinto CV para ver cómo influye eso en la EE, simular un fallo en la red, alguna medida defectuosa, etc. Cada caso se describirá brevemente a continuación. Para la EE para la red `Red1.inp` y el caso *1*, el `.xlsx` con los resultados explicados arriba se llamará `Red1_SE1.xlsx`, y análogamente para el resto de redes y casos.

2. Red1



Esta red tiene 1 tanque, 2 tuberías y 2 nodos. Usamos un lapso de 10 horas, con pattern Step de 1h y Hydraulic Step de 10 minutos.

2.1. Caso 1: medimos $q(J1)$, $q(J2)$ y $p(J1)$ pero no el nivel de $T1$

Imaginemos que NO medimos el nivel en el tanque $T1$, pero sí que medimos las demandas en $J1$ y $J2$ y la presión en $J2$. Aun así, como el nivel del tanque es una variable de estado, debemos facilitar valores para que la EE se pueda ejecutar. Usamos:

- $CV = 0,01$ para las 2 demandas. Añadimos ruido a las demandas ‘reales’
- $CV = 0,15$ para el nivel del tanque. Lo consideramos *pseudomedida*, por lo que ponemos todos los valores como 9,5, constantes a lo largo del tiempo, pero sujetos a una incertidumbre alta.
- $CV = 0,015$ para la presión en $J1$. Igual que para las demandas, añadimos ruido a los valores ‘reales’.

→ Los resultados están en `Red1_SE1.xlsx`. **Las medidas de demanda y la medida de presión corrigen bastante bien las pseudomedidas para el nivel del tanque.**

2.2. Caso 2: medimos $q(J1)$, $q(J2)$, $p(T1)$ y $p(J1)$

Relacionado con lo anterior, supongamos que medimos:

- Las demandas, pero esta vez con menor precisión (usando $CV = 0,05$, por lo que el ruido añadido será mayor, y la medida no tan precisa como antes)
- El nivel del tanque, y usamos $CV = 0,02$, por las medidas para el nivel son bastante precisas
- La presión en $J1$, con $CV = 0,015$ igual que antes.

→ Los valores ‘reales’ son iguales que antes, pero cambia la información que tenemos sobre esa realidad (más incertidumbre en las demandas pero menos en el nivel).

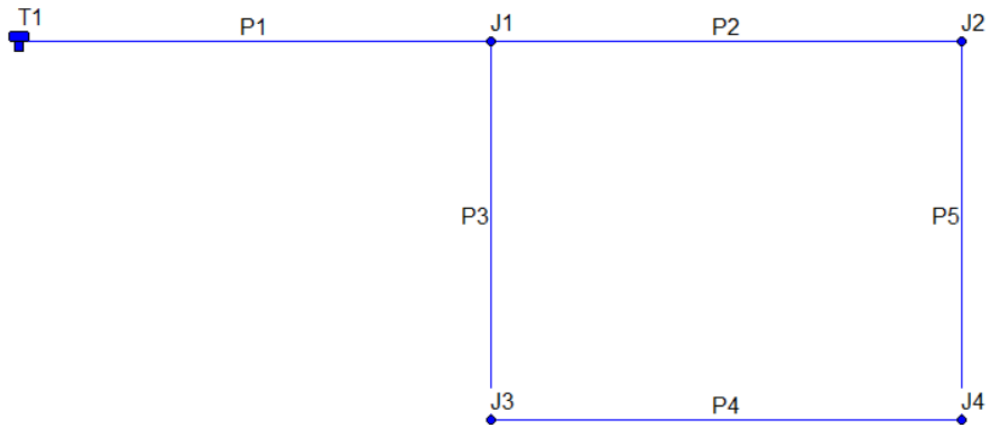
→ Los resultados están en `Red2_SE2.xlsx`. **Tenemos varias medidas más o menos precisas y lo que hace la EE es ponerlo todo de acuerdo.**

2.3. Caso 3: Igual que el caso 2, pero simulamos fallo en el sensor del nivel del tanque a partir de $t=5$

Usamos exactamente las mismas medidas que antes, pero suponemos que desde las 5:00 hasta las 10:00 (en cada hora en punto), el sensor de nivel en $T1$ envía un dato de $15m$ de nivel, algo muy inverosímil para este caso. Este caso sirve para ver qué ocurre cuando suponemos que una medida precisa (a la que otorgamos incertidumbre baja) es errónea.

→ Los resultados están en `Red1_SE3.xlsx`. Se puede ver como los resultados para los 5 primeros periodos son calcados al caso 2 (hasta ahí nada cambia), **pero a partir de ahí los residuos normalizados empiezan a sugerir alguna incongruencia (sobre todo en el nivel del tanque), aunque la EE es capaz de corregir algo los valores del nivel del tanque y llevarlos a valores de 10 u 11 metros de nivel.**

3. Red2



Hemos añadido dos nodos y tres tuberías a `Red1` para formar una malla. Igual que antes, usamos un lapso de 10 horas, con pattern Step de 1h y Hydraulic Step de 10 minutos.

3.1. Caso 1: Medimos demandas, $p(J1)$, $Q(P3)$ y $Q(P5)$ pero no el nivel del tanque

Caso análogo al caso 1 de la Red 1. Usamos:

- $CV = 0,02$ para las demandas
- $CV = 0,15$ para el nivel de $T1$, que pondremos constante como $9,5m$ al tratarse de una pseudomedida.
- $CV = 0,015$ para la presión en $J1$
- $CV = 0,015$ para el flujo en $P3$ y $P5$

→ Resultados en `Red2_SE1.xlsx`. Las medidas precisas disponibles ayudan a guiar la tendencia del nivel del tanque, del que no tenemos medidas.

3.2. Caso 2: Medimos las demandas, nivel en $T1$, $p(J1)$, $Q(P3)$ y $Q(P5)$

Caso análogo al caso 2 de la Red 1. Usamos:

- $CV = 0,05$ para las demandas (un poco más imprecisas que antes)
- $CV = 0,02$ para el nivel de $T1$
- $CV = 0,015$ para la presión en $J1$
- $CV = 0,015$ para el flujo en $P3$ y $P5$

→ Resultados en Red2_SE2.xlsx. **La EE equilibra todas las medidas reduciendo los errores de acuerdo a los pesos generados**

3.3. Caso 3: Rotura repentina en $J4$ a partir de $t=6$ (i)

En este caso, usamos la misma configuración de sensores y CV que en el caso 2, pero durante la simulación, introducimos un coeficiente emisor en el nodo $J4$ de 0,25 al final de la hora 5:00-6:00, que simula una rotura repentina. El agua fugada por $J4$ y su relación con el agua que sale por dicho nodo (fuga + agua consumida) es:

Periodo	Agua fugada por $J4$	Agua total en $J4$	% agua fugada
6:00-7:00	1.07	2.47	43.3
7:00-8:00	0.94	2.74	34.3
8:00-9:00	0.90	2.80	32.1
9:00-10:00	0.81	2.91	27.8

→ Las medidas de demanda son exactamente iguales que en el caso 2. Esto es porque el agua que sale por la rotura no se contabiliza como demanda. Además, los resultados de la EE son iguales que los del caso 2 para las 5 primeras horas, ya que todo es igual.

→ Los resultados están en Red2_SE3.xlsx. **Se detectan residuos normalizados extremos en las tres horas que hay entre las 6:00 y las 9:00, para los valores estimados de demandas en $J3$, $J4$, y caudal en $P5$** , lo que nos hace sospechar de la zona en la que se encuentra la rotura.

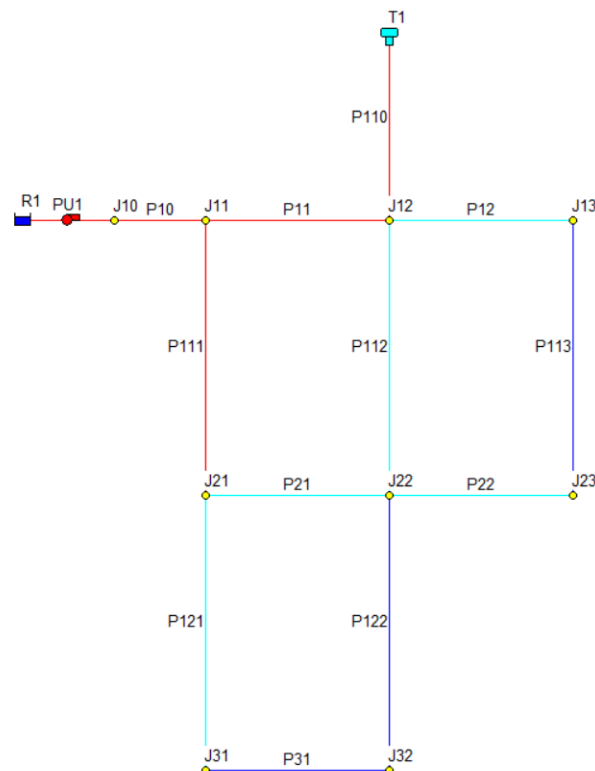
3.4. Caso 4: Rotura repentina en $J4$ a partir de $t=6$ (ii)

Igual que el caso 3, pero aumentando la magnitud de la rotura, al añadir durante la simulación un coeficiente emisor en $J4$ de 0,5 en vez de 0,25. En este caso, la cantidad de agua que se fuga por $J4$ respecto al total de agua que sale por ese nodo (fuga + agua consumida) es:

Periodo	Agua fugada por $J4$	Agua total en $J4$	% agua fugada
6:00-7:00	2.07	3.47	59.7
7:00-8:00	1.80	3.60	50
8:00-9:00	1.71	3.61	47.3
9:00-10:00	1.52	3.62	42

→ Los resultados están en Red2_SE4.xlsx. Como era de esperar, los residuos a partir de las 6:00 son aún más extremos que en el caso 3, dado que la cantidad de agua que sale es mayor.

4. Net1



Hemos realizado los siguientes cambios desde la **Net1** de EPANET:

1. Cambiar unidades de GPM a CMH, con lo que ello conlleva: cambiar unidades de demanda / caudal de GPM a CMH, cambiar unidades de longitud / presión / nivel piezómetro de pies a metros y cambiar unidades de diámetro de tubería de pulgadas a milímetros.
2. Acortar la duración de 24 a 12 horas, el Hydraulic Step de 1 hora a 10 minutos y el Pattern Step de 2 a 1 hora.
3. Aumentar el diámetro del tanque. Al ser más ancho, tarda más en llenarse / vaciarse y como consecuencia, las reglas de control de *PU1* (asociada a *T1*) no se activan tan frecuentemente, facilitándonos reproducir el estado de la bomba *PU1* en cada periodo sin dificultad. De la otra manera, se llenaba / vaciaba muy rápido y no éramos capaces de reproducir bien el estado de la bomba si no disponíamos de medidas extremadamente precisas.

4.1. Caso 1: Medimos demandas, presión en J_{12} y J_{21} y caudal en P_{10} y P_{110} , pero no medimos el nivel de T_1

Usamos:

- $CV = 0,02$ para las demandas
- $CV = 0,1$ para el nivel de $T1$, que pondremos constante como $37m$, al ser una pseudomedida.
- $CV = 0,02$ para la presión en $J12$ y $J21$
- $CV = 0,02$ para el flujo en $P10$ y $P110$

→ Los resultados están en `Net1_SE1.xlsx`. Básicamente, **somos capaces mediante la EE de reproducir las subidas y bajadas del nivel del tanque, haciendo que se parezcan a las medidas ‘reales’ (sin ruido, 1ª hoja)**. Además, el CV de las estimaciones del nivel del tanque (tanto el nivel inicial como el final en cada periodo) es muy bajo, lo que significa que gracias a las otras medidas somos capaces de tener una estimación con bastante confianza.

4.2. Caso 2: Medimos demandas, $p(T1)$, $p(J12)$, $p(J21)$, $Q(P10)$, $Q(P110)$ y simulamos rotura repentina en $J23$ a partir de $t = 7$

- $CV = 0,02$ para las demandas
- $CV = 0,015$ para el nivel de $T1$ (ahora es una medida precisa)
- $CV = 0,02$ para la presión en $J12$ y $J21$
- $CV = 0,02$ para el flujo en $P10$ y $P110$
- Durante la simulación, añadimos un coeficiente emisor de 1,5 en $J23$ al final de la hora 6:00-7:00. Esto produce las siguientes fugas en $J23$:

Periodo	Agua fugada por $J23$	Agua total en $J23$	% agua fugada
7:00-8:00	13.79	41.01	33.6
8:00-9:00	14.29	34.73	41.1
9:00-10:00	13.85	27.48	50.4
10:00-11:00	13.76	34.20	40.2
11:00-12:00	14.18	41.43	34.2

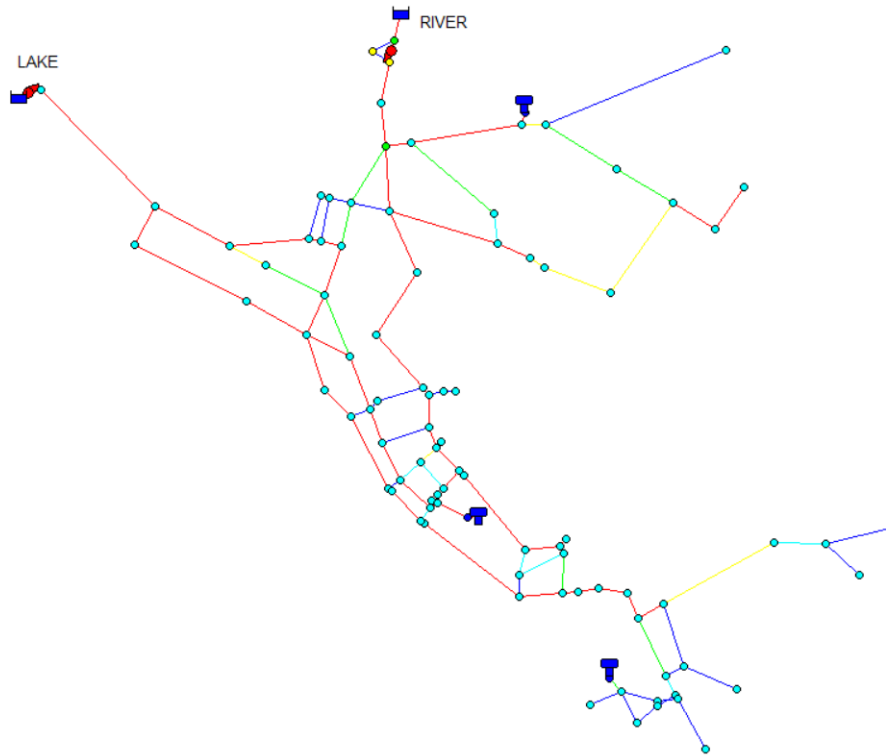
→ Resultados en `Net1_SE2.xlsx`. En las 3 horas que van desde las 7:00 a las 10:00, se aprecian residuos altos en las demandas y en el flujo de $P110$. No obstante, no hay manera de focalizar el problema ya que no hay excesiva diferencia entre los residuos de las demandas. Creo que sería necesario disponer de más medidas (p.ej., de caudales internos) para poder discernir dónde está el problema.

4.3. Caso 3: Añadimos medidas de presión y flujo pero ahora las demandas son pseudomedidas

Además de medir la presión en $J12$ y $J21$ y el flujo en $P10$ y en $P110$; ahora también lo hacemos en $J13$ y en $P112$ y $P121$, respectivamente. Medimos también el nivel de $T1$, pero ahora consideramos que las demandas son pseudomedidas, con $CV = 0,15$ y valores puestos a mano (no muy lejanos de la realidad, ya que las pseudomedidas son estimaciones).

→ Los resultados están en `Net1_SE3.xlsx`. **Aunque no haya medidas fiables para las demandas (que son variables de estado), el resto de medidas guían el ajuste.** Además, se puede ver (en la última hoja, CV posterior) que algunas de las incertidumbres de demanda tienen un CV menor al inicial (especialmente las de $J31$), lo que significa que el resto de medidas hace algo más observables los valores estimados de demandas aunque no las midamos. No obstante, esto dependerá de la configuración de las medidas y de dónde estén.

5. Net3



Se trata de una red con dos fuentes de alimentación (río y lago) y tres depósitos. Los cambios realizados desde la **Net3** de EPANET son los siguientes:

1. Cambiar unidades de GPM a CMH, con todo lo que ello conlleva.
2. Reducir el tamaño de paso hidráulico, Hydraulic Step, de 1 hora a 10 minutos.

En este caso, la simulación es de 24 horas, con registros horarios.

5.1. Caso 1: Medimos demandas, niveles y algunas presiones y flujos estratégicos

Concretamente, medimos las presiones de los nodos 121, 141, 159, 199 y 205 y los caudales de las tuberías 101, 131, 135, 201, 273 y 329. Usamos:

- $CV = 0,05$ para las demandas
- $CV = 0,02$ para el nivel de los tanques
- $CV = 0,025$ para las presión que se miden
- $CV = 0,025$ para los flujos que se miden

→ Resultados en **Net3_SE1.xlsx**. Al tener buenas medidas (sobre todo de caudales en zonas de aportación a la red o tuberías principales), la EE no detecta mayor problema y lo pone todo en equilibrio. Así funcionaría la EE para una red bastante monitorizada en la que no ocurrieran fallos en las 24h consideradas. No se detectan residuos extremos de manera continuada.

5.2. Tomamos medidas en los mismos sitios pero inducimos un descenso brusco en la rugosidad de la tubería 175 a partir de $t = 11$

Medimos demandas, niveles y presiones y flujos en los mismos puntos de la red y usando los mismos CV , pero ahora cambiamos al final de la hora 10:00-11:00 la rugosidad de la tubería 175 (tubería principal) a un valor de 30; por ejemplo, simulando que se ha obstruido o dañado de repente.

→ Los resultados están en `Net3_SE2.xlsx`. A partir de la hora en la que hemos inducido el fallo, los residuos son extremos en muchos lugares.