

## ANÁLISIS DE CIRCUITOS HIDRÁULICOS EN EL ENTORNO DEL SIMUSOL<sup>#</sup>

C. Rodríguez, A. Iriarte<sup>2</sup>, L. Saravia<sup>1, 2</sup>  
INENCO, Catamarca. Facultad de Ciencias Agrarias - UNCa  
M. Quiroga 93 - 4700 Catamarca. crodriguez@pclab.unca.edu.ar

### RESUMEN

La determinación de analogías entre distintos sistemas físicos ha permitido en muchos casos encarar diversos problemas mediante el uso de ecuaciones o programas de simulación que simplifican el tratamiento de los datos y el análisis de los resultados. En los últimos años se han incorporado a las analogías existentes, las establecidas para estudiar los sistemas solares térmicos. En este sentido, el simulador de sistemas solares SIMUSOL, que trabaja conjuntamente con otros programas dentro del entorno LINUX, permite la resolución de problemas de cierta complejidad. Como complemento de este Programa, en el presente trabajo, se estudian las analogías existentes entre los sistemas hidráulicos y eléctricos, buscando ampliar la potencialidad del mismo y extender su aplicación. Se analiza las ecuaciones propuestas y se verifica su validez mediante el planteo de dos ejemplos sencillos. Se muestran los resultados obtenidos por métodos hidráulicos y por el SIMUSOL.

**Palabras clave:** simulación, hidráulico, eléctrico

### INTRODUCCION

Los fenómenos físicos de diferente naturaleza son analógicos si existe similitud entre las expresiones matemáticas que los describen, aunque los símbolos de cada una de ellas tengan diferente significado. Dentro de las analogías más comunes están aquellas que relacionan sistemas mecánicos y térmicos con los eléctricos, como por ejemplo las que establecen la relación existente entre las ecuaciones de fuerza con voltaje en el primero y flujos de calor con corrientes eléctricas para los segundos. En este último caso se destacan los estudios térmicos de los sistemas solares realizados por Saravia y Saravia (2000), Iriarte (2001), y su aplicación a simulaciones mediante el programa Sceptre. En este sentido el desarrollo, bajo el entorno del sistema operativo LINUX, del simulador del estado transitorio de sistemas solares térmicos (Saravia y Saravia, 2001) denominado SIMUSOL, que utiliza como programa base el Sceptre, contribuye significativamente a facilitar el previo tratamiento de los datos, la entrada visual y el tratamiento de los resultados.

El programa Sceptre tiene las siguientes propiedades: a) proporciona una respuesta transitoria, alterna y continua de circuitos eléctricos constituidos por elementos lineales y no lineales (resistencias, condensadores, etc.), lo que permite representar pérdidas hidráulicas lineales (flujos laminares) y no lineales; b) puede resolver circuitos complejos, con varios cientos de nodos, en tiempo razonable; c) permite el uso de variables y ecuaciones representativas de las propiedades de los elementos que sean funciones de dichas variables, dando lugar a una descripción sencilla de elementos no eléctricos; d) dispone de librerías de modelos que pueden ser usados en forma repetitiva en el circuito sin necesidad de volver a describirlos; e) la descripción de los datos que definen el circuito se realiza con un archivo escrito en ASCII de muy sencilla confección, pudiéndose utilizar una interfase para generar el archivo que describa el sistema hidráulico.

Como en los anteriores, también en los sistemas hidráulicos se hace uso de fenómenos análogos para resolver algunas situaciones, ya sea dentro del mismo sistema, como los en casos de: a) analogía entre un flujo a través de medios permeables, con flujo laminar en capas delgadas (modelos de Hele-Shaw); b) analogía entre flujo laminar y flujo turbulento; c) analogía entre un flujo a través de medios permeables y la deformación de una placa elástica bajo carga.

También se puede utilizar el modelo hidráulico para facilitar la comprensión de parámetros eléctricos. Además si aceptamos la existencia de similitudes entre las transmisiones hidráulicas y eléctricas, cuando por ejemplo sustituimos una bomba por un generador, un motor hidráulico por un motor eléctrico, válvulas hidráulicas por electrónicas o transistores y tuberías por cables (Mataix, 1992) y consideramos que los términos circulación, fluido, corriente, y otros similares, han sido utilizados reiteradamente para definir ciertos fenómenos eléctricos, es posible el planteo de analogías entre los conceptos utilizados para ambos sistemas.

En el presente trabajo se realiza un estudio teórico y se proponen analogías entre las ecuaciones más frecuentemente utilizadas en la hidráulica con las del sistema eléctrico, con el objeto de ser incorporadas al programa SIMUSOL, buscando con esto incrementar su potencialidad de resolución a circuitos que involucren líquidos en movimiento.

<sup>#</sup> Convenio Sec. Del Ambiente - INTA - Fac. Ciencias Agrarias

<sup>1</sup> INENCO, U.N. Salta

<sup>2</sup> Investigador del CONICET

## ANÁLISIS TEORICO DE LA ANALOGÍA ELECTRICA - HIDRAULICA

En los líquidos reales la energía total que posee un fluido va disminuyendo debido a que una parte de ella se emplea para vencer las resistencias. La constancia de la suma de las energías cinética, potencial y disipada queda expresada por la ecuación de Bernoulli, que nos permite determinar la caída o variación de presión entre dos secciones de un tramo cualquiera de cañería. Si la escribimos en función del caudal circulante y el área de las secciones transversales, aplicando la ecuación de continuidad tendremos:

$$\Delta P = \gamma (z_2 - z_1) + \frac{\gamma G^2}{2g A_2^2} \left(1 - \frac{A_2^2}{A_1^2}\right) + \gamma H \quad (1)$$

Que permite calcular las variaciones de presión que sufre el fluido en una cañería cuando cambia tanto su energía potencial como la cinética y existen además otras pérdidas por efecto de fricciones o por los diversos accesorios que se intercalan en una instalación (codos, llaves, ampliaciones o reducciones de diámetro).

Si consideramos que:

- el efecto análogo a la caída de presión en el circuito hidráulico corresponde a una variación de potencial en un circuito eléctrico.
- los términos energéticos (potencial y cinética) son producidos por fuentes de energía eléctrica.
- las pérdidas por fricción son equivalentes a las producidas cuando se introduce una resistencia eléctrica.
- existe una analogía entre el caudal circulante por una tubería y la corriente que circula por un conductor

la ecuación (1) puede ser formulada en términos eléctricos:  $\Delta V = EZ + EV + G R$  (2)

### • Resistencias

**Por fricción:** Las pérdidas de carga, ecuación (1), por efecto de la fricción en un conducto circular recto de diámetro D por el cual circula un fluido en régimen turbulento (Darcy- Weisbach) es:

$$H_F = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

La ecuación anterior en función del caudal resulta:  $\Delta P_F = 0,0826 \lambda \gamma \frac{L}{D^5} G^2$  (4)

y la resistencia hidráulica producida por la fricción es:  $RF = \frac{\Delta P_F}{G} = 0,0826 \lambda \gamma \frac{L}{D^5} G$  (5)

donde se advierte similitud con la ley de Ohm:  $\Delta V_F = RF G$  (6)

**Por ensanchamiento:** Cuando existen variaciones en los diámetros de las tuberías se originan pérdidas por Ensanchamiento o por Contracción, todas ellas tienen la forma:  $\Delta P = K \frac{v^2}{2g}$ , siendo K: coeficiente que depende de la relación existente entre

las secciones transversales antes y después del cambio. Reemplazando por el valor determinado por Borda:  $K = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2$  y

operando matemáticamente tenemos:  $RE = \frac{\rho}{2A_1^2} \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 G$  (7)

Cuando el ensanchamiento es gradual el coeficiente K debe ser corregido por un valor que depende del ángulo de transición entre las dos secciones.  $K = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 \text{sen} \alpha$ , esto para valores de  $\alpha < 30^\circ$ ,

**Por contracción o estrechamiento:** En este caso el coeficiente es  $K = \left(\frac{1}{\mu} - 1\right)^2$ , siendo  $\mu$  un coeficiente experimental que depende de la relación existente entre la sección contraída y la sección más estrecha, por lo que resulta una resistencia:

$$RC = \frac{\rho}{2A_2^2} \left(\frac{1}{\mu} - 1\right)^2 G \quad (8)$$

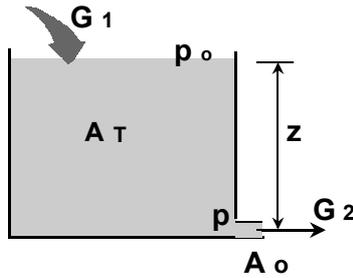
Utilizando los valores experimentales (Mataux,1992), se encuentra la relación entre áreas que nos permite calcular  $\mu$  analíticamente mediante la expresión:

$$\mu = 1,5288 \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^4 - 2,1781 \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^3 + 1,1037 \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2 - 0,0577 \left(\frac{A_2}{A_1}\right) + 0,6026 \quad (9)$$

- **Condensador**

Asumiendo una similitud entre un condensador y un recipiente que puede almacenar líquido (Fig.1). Se plantea la analogía entre presiones y caudal con corriente y potencial eléctrico, por lo que, para un intervalo de tiempo cualquiera tendremos:

$$\frac{d(p - p_0)}{dt} = \gamma \frac{dz}{dt} \quad (10)$$



El volumen de agua acumulada en el tanque puede determinarse como:  $A_T dz = (G_1 - G_2) dt$

Fig. 1. Esquema de tanque con líquido

De donde:

$$\frac{d(p - p_0)}{dt} = \gamma \frac{(G_2 - G_1)}{A_T} \quad (11)$$

La que expresada en términos eléctricos es:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{C} (I_1 - I_2) \quad (12)$$

Por lo tanto la capacidad corresponde al valor:

$$C = \frac{A_T}{\gamma} \quad (13)$$

- **Otras analogías**

En la tabla 1 se muestran las distintas magnitudes eléctricas y sus análogos hidráulicas, como así también la consistencia de las magnitudes y unidades intervinientes.

Magnitudes Eléctricas	Magnitudes Hidráulicas
Potencial Electrico de un nodo	Presion Hidraulica en un Nodo: P [N m <sup>-2</sup> ]
Corriente	Caudal: G [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]
Resistencia electrica	Resistencia Hidraulica: R [kg m <sup>-4</sup> s <sup>-1</sup> ]
Capacidad electrica	Capacidad de acumulacion : C [m <sup>5</sup> N <sup>-1</sup> ]
Diferencia de Potencial	Perdida de carga hidráulica: ΔP [N m <sup>-2</sup> ]
Fuente de Corriente	Fuente de caudal (bomba): JG
Referencia de Potencial	Referencia de Presion
Tension de Referencia	Presion de Referencia: 0 [Pa]

Tabla 1. Elementos eléctricos y sus análogos hidráulicos

En lo que respecta a operaciones con las distintas magnitudes hidráulicas, es importante la elección adecuada de las unidades para los parámetros. El programa (Sceptre) no establece un sistema de unidades para los valores de cada elemento, sino que opera directamente sobre los números asignados por el programador. Por razones numéricas y de operatividad, es conveniente seleccionar un sistema de unidades para V, R y C que satisfagan simultáneamente las siguientes ecuaciones:  $V = I R$  y  $t = R C$ , donde t es el tiempo. También, es necesario elegir una corriente arbitraria en cada elemento del circuito. Indicar la dirección del flujo de corriente positiva, en cada fuente de corriente y en cada fuente de tensión.

## SISTEMAS HIDRÁULICOS

Combinando adecuadamente los diferentes elementos hidráulicos pueden conformarse los sistemas hidráulicos como, los que a su vez pueden unirse para constituir circuitos mas complejos. En Tabla 2 se muestran los sistema hidráulicos utilizados mas frecuentemente.

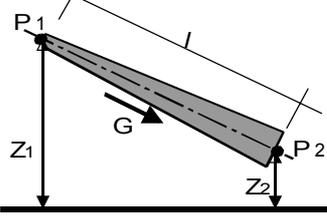
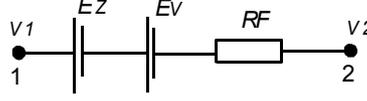
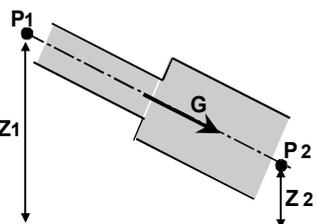
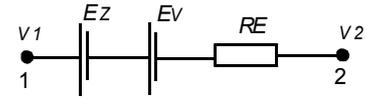
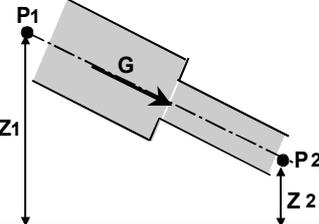
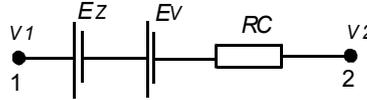
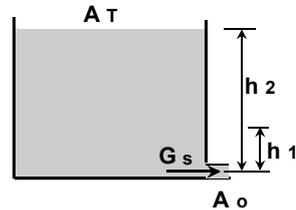
Sistema Hidráulico	Sistema Eléctrico	Equivalencia de variables
<p><b>Tramo de cañería</b></p>  <p><math>\Delta P</math> = caída de presión  <math>\Delta Z</math> = cambio energía potencial  <math>\Delta Ec</math> = cambio energía cinética  <math>\Delta H</math> = pérdidas por fricción  <math>A</math> = área transversal  <math>D</math> = diámetro de cañería  <math>L</math> = longitud de cañería  <math>\rho</math> = densidad del liquido</p>	 <p><math>V1</math> = potencial del nodo 1  <math>RF</math> : resistencia  <math>IR</math>: corriente sobre R  <math>VR</math>: caída de tensión en R  <math>Ez, Ev</math> : Fuentes de tensión.</p>	<p> <math>IR \longrightarrow G</math>  <math>\Delta V \longrightarrow \Delta P</math>  <math>EZ \longrightarrow \Delta Z</math>  <math>EV \longrightarrow \Delta Ec</math>  <math>RF \longrightarrow \Delta H</math> </p> <p>Resistencia por fricción</p> $RF = (0,0826 \lambda \rho g \frac{L}{D^5}) G$ $VR = RF \times G$ $Ez = (Z_2 - Z_1) \rho g$ $Ev = \left[ \left(1 - \frac{A_2^2}{A_1^2}\right) \frac{\rho}{2A_2^2} \right] G^2$
<p><b>Perdida por ensanchamiento</b></p>  <p><math>\Delta P</math> = caída de presión  <math>\Delta Z</math> = cambio energía potencial  <math>\Delta Ec</math> = cambio energía cinética  <math>\Delta H</math> = pérdidas por fricción  <math>A</math> = área transversal  <math>D</math> = diámetro de cañería  <math>L</math> = longitud de cañería  <math>\rho</math> = densidad del liquido  <math>D_1</math> = diámetro menor</p>	 <p><math>V1</math> = potencial del nodo 1  <math>RE</math> : resist. por ensanchamiento.  <math>IR</math>: corriente sobre R  <math>VR</math>: caída de tensión en R  <math>Ez, Ev</math> : Fuentes de tensión</p>	<p> <math>IR \longrightarrow G</math>  <math>\Delta V \longrightarrow \Delta P</math>  <math>EZ \longrightarrow \Delta Z</math>  <math>EV \longrightarrow \Delta Ec</math>  <math>RE \longrightarrow \Delta H</math> </p> $VR = RE \times G$ $Ez = (Z_2 - Z_1) \rho g$ $RE = \left[ \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 \frac{\rho}{2A_1^2} \right] G$ $Ev = \left[ \left(1 - \frac{A_2^2}{A_1^2}\right) \frac{\rho}{2A_2^2} \right] G^2$ <p>Para ensanchamiento gradual</p> $RE = \left[ \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 \frac{\rho \text{ sen} \alpha}{2A_1^2} \right] G$
<p><b>Perdida por contracción</b></p>  <p><math>\Delta P</math> = caída de presión  <math>\Delta Z</math> = cambio energía potencial  <math>\Delta Ec</math> = cambio energía cinética  <math>\Delta H</math> = pérdidas por fricción  <math>A</math> = área transversal  <math>D</math> = diámetro de cañería  <math>L</math> = longitud de cañería  <math>\rho</math> = densidad del liquido</p>	 <p><math>V1</math> = Potencial del nodo 1  <math>RC</math> : Resistencia  <math>IR</math>: corriente sobre R  <math>VR</math>: caída de tensión en R  <math>Ez, Ev</math> : Fuentes de tensión</p>	<p> <math>IR \longrightarrow G</math>  <math>\Delta V \longrightarrow \Delta P</math>  <math>EZ \longrightarrow \Delta Z</math>  <math>EV \longrightarrow \Delta Ec</math>  <math>RC \longrightarrow \Delta H</math> </p> $VR = RC \times G$ $Ez = (Z_2 - Z_1) \rho g$ $Ev = \left[ \left(1 - \frac{A_2^2}{A_1^2}\right) \frac{\rho}{2A_2^2} \right] G^2$ $RC = \left[ \left(\frac{1}{\mu} - 1\right)^2 \frac{\rho}{2A_2^2} \right] G$

Tabla 2. Equivalencia entre sistemas hidraulicos simples con electricos.

## SIMULACION DE SISTEMAS HIDRAULICOS

Se eligió para realizar una simulación dos sistemas compuestos por un tanque de reserva de agua con una descarga lateral ubicada en el fondo del mismo. El primero (Fig. 2) se encuentra totalmente lleno inicialmente y se descarga hasta quedar completamente vacío. Un capacitor representa el tanque (Fig. 3), el que tiene en su salida un pequeño conducto horizontal, cuyo análogo es una fuente de tensión y una resistencia variable con el caudal (perdida por contracción). Como los circuitos eléctricos son cerrados y los hidráulicos son abiertos, se conectan los puntos de comienzo y final a tierra.



AT= Secc. transv. tanque  
Ao = Secc. Transv. Orificio  $h_2$  = altura de inicial  
Gs = Caudal de salida  $h_1$  = altura de final

Fig. 2. Tanque con descarga de fondo sin recarga.

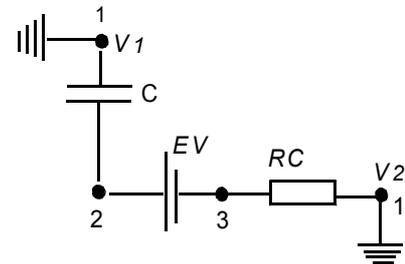


Fig. 3. Circuito eléctrico equivalente caso 1.

A continuación se muestra el programa en ASCII del SCEPTRE para simular el ejemplo 1:

```

CIRCUIT DESCRIPTION
;Ejemplo de tanque descargando sin recarga, abierto
VC1= 31195.8

ELEMENTS
C1, 2-1= 0.00032
RC1, 3-1= X1(8506/Q1(VC1))
EV1, 3-2= X2(124999949.3*(Q1(VC1)**2))

OUTPUTS
IRC1, IC1, VC1, EQ1

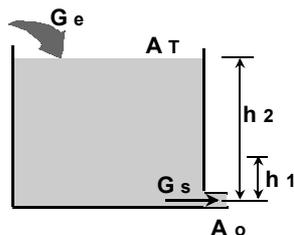
INITIAL CONDITIONS
VC1= 31195.8

FUNCTIONS
Q1(A)= (0.002*((0.002*A)/(1+0.3756))**0.5)

RUN CONTROLS
X PLOT DIMENSION = 0
MAXIMUM PRINT POINTS = 0
INTEGRATION ROUTINE = TRAP

STOP TIME = 3700
END
    
```

En el segundo caso (Fig. 4), simultáneamente con la descarga existe una recarga por la parte superior, con un caudal de entrada menor al de salida. Al circuito eléctrico anterior se le agrega una fuente de corriente constante (Fig. 5) para simular el caudal de entrada.



AT= Sección transversal del tanque  
Ao = Sección transversal del orificio  
Ge = Caudal de entrada  $h_1$  = altura de carga inicial  
Gs = Caudal de salida  $h_2$  = altura de carga final

Fig. 4. Tanque con descarga de fondo con recarga.

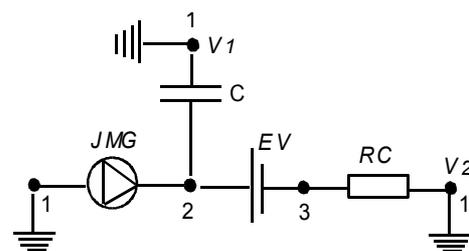


Fig. 5. Circuito eléctrico equivalente caso 2.

## RESULTADOS

La simulación se llevó a cabo incorporando al circuito eléctrico, en el programa SIMUSOL, los elementos correspondientes para las siguientes parámetros: a) Volumen del Tanque:  $10 \text{ m}^3$ ; b) Diámetro Tanque: 2m; c) Diámetro salida: 2"; y d)  $\mu = 0,62$ . Se obtuvo un comportamiento análogo al de un condensador descargando, con una carga inicial  $C = A_T / \gamma$ . En las Fig. 6 y Fig. 7 se muestran las variaciones de los presiones  $[\text{N m}^{-2}]$  (potenciales) y caudales  $[\text{m}^3 \text{ s}^{-1}]$  (corrientes) para los dos casos seleccionados, en función del tiempo. En ambos casos existe correspondencia con los valores obtenidos mediante cálculos hidráulicos.

Cuando no ingresa liquido (sin recarga) el tanque se descarga completamente, por lo tanto la presión y la corriente llegan a cero. En cambio cuando esta ingresando liquido (con recarga) simultáneamente con la descarga, la presión cae hasta un valor que se hace constante, correspondiendo al nivel del liquido dentro del tanque cuando se llega a un equilibrio entre el caudal que esta entrando y el que esta saliendo.

Se realizaron diferentes pruebas cambiando datos y eligiendo otras configuraciones o combinaciones de elementos, verificando la validez de las analogías planteadas mediante la ecuación (14) cuando no existe recarga. Si durante el proceso de vaciado, en forma simultánea va entrando un caudal de agua de  $0,005 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , mediante las ecuaciones (15) y (16) se determina el tiempo de vaciado, hasta que el nivel se mantiene constante.

$$t = \frac{2 A_T}{\mu A_0 \sqrt{2g}} (\sqrt{h_2} - \sqrt{h_1}) \quad (14)$$

$$t = \frac{2 A_T}{\mu A_0 \sqrt{2g}} \left[ (\sqrt{h_2} - \sqrt{h_1}) + \frac{G_e}{\mu A_0 \sqrt{2g}} \ln \frac{\mu A_0 \sqrt{2g h_2} - G_e}{\mu A_0 \sqrt{2g h_1} - G_e} \right] \quad (15)$$

$$h_{\min} = \frac{1}{2g} \left( \frac{G_e}{\mu A_0} \right)^2 \quad (16)$$

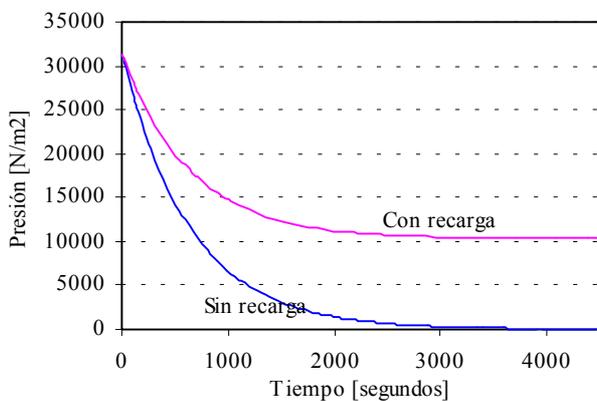


Fig. 6. Variación de la presión con y sin recarga del tanque

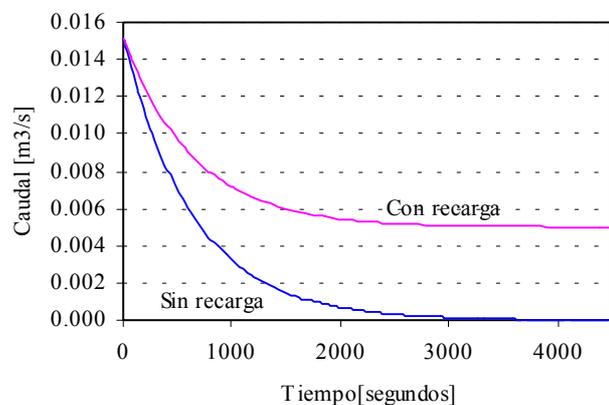


Fig. 7. Variación del caudal con y sin recarga del tanque

## CONCLUSIONES

La comprobación que existe una relación no solamente conceptual sino también simbólica y matemática entre los sistemas hidráulicos y eléctricos nos permiten, mediante el uso de un programa concebido para el estudio de sistemas térmicos solares SIMUSOL, resolver problemas que involucren diferentes tipos de fluidos y utilizarlo como una herramienta mas de diseño de instalaciones solares minimizando los costos de ejecución.

## REFERENCIAS

- Mataix, C. (1992) - *Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas*- 2º Edición. Ed. Harla - México.
- Iriarte A. (2001). Acondicionamiento término solar de invernaderos para la producción agrícola intensiva. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Salta.
- Saravia, L.R. y Saravia, D. (2000) Simulación de sistemas solares térmicos con un programa de cálculo de circuitos eléctricos de libre disponibilidad. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, ASADES, Vol. 4, N° 4, pp.8.17-8.22, Argentina.
- SCEPTRE (2001), Programa de resolución de circuitos, <ftp://novilux.fh-friendberg.de/pub/sceptre>
- Saravia, L.R. y Saravia, D. (2001) SIMUTERM: un simulador de sistemas solares térmicos. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, ASADES, Vol. 5, pp.8.07-8.12, Argentina.

**ABSTRACT-** Analogies between different physic processes have permitted to encourage several problems by means of simulation programs in order to simplify data treatment and results analyses. In the last years some of these analogies have been incorporated to study solar systems. In this sense the Solar System Simulator, SIMUSOL, which works under LINUX, allows to resolve solar problems more easily than using thermal methods. In the present work, an analogy between hydraulic and electric processes is study in order to widen the range of application of this simulator. Equations are proposed and validated through two simple examples.