# Proyecto Final. Sistema Urinario Masculino

Delgado Soto José Sebastián, Escalante Esquivel Diana Ivana, Gil Garate Carlos Andrés.

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Tijuana.

### December 12, 2024

Palabras clave: Sistema urinario; Controlador PID; Función de transferencia;

Circuito RLC; Hiperplasia prostática benigna.

Correos: {120212281; 121212151; 121212743}@tectijuana.edu.mx

Carrera: Ingeniería Biomédica

Asignatura: Modelado de Sistemas Fisiológicos

Profesor: Dr. Paul Antonio Valle Trujillo (paul.valle@tectijuana.edu.mx)

# 1. Objetivos

El objetivo de la práctica consiste en diseñar y desarrollar un gemelo digital de un sistema fisiológico que permita identificar de manera precisa las diferencias entre un paciente afectado por una enfermedad y un individuo saludable. Este modelo digital buscará reproducir fielmente las dinámicas fisiológicas del sistema, simulando tanto las condiciones patológicas como las normales para facilitar la comparación entre ambos casos. A través de esta herramienta, se podrán analizar las alteraciones clave en el sistema afectado y diseñar un protocolo de tratamiento optimizado mediante la implementación de un sistema de control. Dicho sistema deberá regular las variables fisiológicas alteradas, compensando las disfunciones identificadas en el paciente enfermo y restaurando su comportamiento hacia rangos más cercanos a los de un individuo sano. Este enfoque tiene como fin contribuir al desarrollo de tratamientos personalizados, mejorando la precisión en

la intervención clínica y promoviendo una gestión más efectiva y segura de las enfermedades fisiológicas.

## 2. Descripción del Sistema

El sistema urinario masculino puede representarse de manera simplificada mediante un modelo que simule el flujo urinario a través de sus diferentes estructuras anatómicas, como los riñones, los uréteres, la vejiga y la uretra. Este enfoque facilita el análisis de su funcionamiento desde una perspectiva física y matemática, permitiendo crear equivalentes en términos de circuitos eléctricos (Figura 2.1). La representación eléctrica del sistema urinario permite modelar y estudiar fenómenos fisiológicos clave, identificando componentes que simulan la dinámica del flujo urinario y sus interacciones [1]. En este modelo, el circuito comienza con una fuente de voltaje de entrada [P<sub>r</sub>(t)], que representa la presión generada por los riñones para filtrar y enviar la orina al resto del sistema urinario. Cada elemento anatómico se asocia con un componente que representa un fenómeno particular.

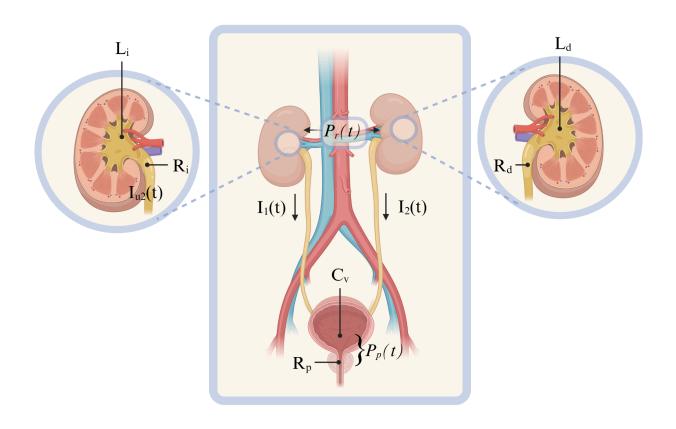


Figura 2.1. Modelo fisiológico del sistema urinario.

Estableciendo la perspectiva, las resistencias al flujo urinario en los uréteres izquierdo y derecho (designadas como  $R_i$  y  $R_d$ , respectivamente) reflejan las obstrucciones o restricciones que pueden dificultar el paso de la orina, mientras que la inercia al flujo urinario, que se opone a cambios rápidos en el flujo, se modela mediante inductores en los uréteres izquierdo ( $L_i$ ) y derecho ( $L_d$ ). La vejiga, que funciona como un reservorio de orina, se modela como un capacitor ( $C_v$ ), ya que su capacidad de almacenamiento puede interpretarse como una propiedad de acumulación de carga en términos eléctricos. La corriente de la rama principal [ $I_u(t)$ ] representa el flujo urinario que entra a la vejiga, mientras que las corrientes de las ramas secundarias [ $I_{ul}(t)$ ] y [ $I_{u2}(t)$ ] representan el flujo urinario que proviene de los uréteres izquierdo y derecho, respectivamente, transportando la orina hacia la vejiga. Finalmente, la resistencia al flujo de orina a través de la uretra ( $R_u$ ) representa

la oposición al paso del líquido en este segmento del sistema urinario, influenciada tanto por factores anatómicos como fisiológicos. Además, la obstrucción causada por la próstata aumenta la resistencia mecánica al paso de la orina, lo que tiene un impacto significativo en la dinámica del sistema [2, 3]. El voltaje de salida [ $P_p(t)$ ] representa la presión generada por la orina almacenada en la vejiga y que es expulsada al exterior del organismo a través de la uretra. Este modelo de circuito eléctrico es particularmente útil para estudiar parámetros como el flujo urinario, las obstrucciones o resistencias, y las alteraciones en la dinámica del sistema debido a condiciones fisiológicas o patológicas. Por ejemplo, mediante el análisis del flujo a través de las resistencias  $R_i$ ,  $R_d$  y  $R_p$ , se pueden evaluar los efectos de condiciones como obstrucciones ureterales o hiperplasia prostática benigna. Además, la combinación de inductores ( $L_i$ ,  $L_d$ ) y el capacitor ( $C_v$ ) permite explorar la respuesta transitoria del sistema urinario ante cambios rápidos en la producción o evacuación de orina, proporcionando una herramienta valiosa para el estudio y simulación de su comportamiento bajo distintas condiciones clínicas.

#### 3. Modelado del Sistema

El modelado del sistema urinario masculino como un circuito eléctrico se fundamenta en la analogía entre los procesos fisiológicos y los componentes eléctricos, permitiendo un análisis detallado de la dinámica del flujo urinario. Este enfoque asigna componentes eléctricos para representar características clave del sistema, como la resistencia al flujo, la inercia, la capacidad de almacenamiento y las variaciones de presión. La fuente de voltaje de entrada  $[P_r(t)]$  corresponde a la presión generada por los riñones para impulsar la orina a través de los uréteres hacia la vejiga, tal como se demuestra en la Figura 3.1.

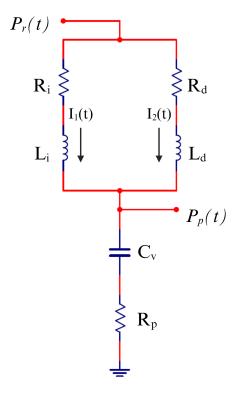


Figura 3.1. Modelizado del sistema respiratorio mediante un circuito RLC de tercer orden.

Las resistencias Ri y Rd reflejan las restricciones al flujo en los uréteres izquierdo y derecho, respectivamente, mientras que los inductores Li y Ld modelan la inercia al flujo urinario, representando la oposición a cambios bruscos en el flujo que caracterizan las contracciones peristálticas. La vejiga, como reservorio de orina, se modela como un capacitor (Cv), simbolizando su capacidad de almacenamiento y su respuesta al llenado y vaciado. En términos eléctricos, la corriente principal [Iu(t)] representa el flujo total que entra a la vejiga, mientras que [ $Iu_1(t)$ ] y [ $Iu_2(t)$ ] representan los flujos urinarios provenientes de los uréteres izquierdo y derecho, respectivamente. El segmento final del modelo, la uretra, incluye una resistencia Rp que representa la oposición al flujo urinario en esta región, influida por factores como la anatomía o la presencia de obstrucciones, como la hipertrofia prostática. El voltaje de salida [ $P_p(t)$ ] simboliza la presión de la orina acumulada en la vejiga que es expulsada a través de la uretra, completando el circuito fisiológico. Este modelo

eléctrico facilita el estudio de dinámicas normales y patológicas, como obstrucciones ureterales o alteraciones en la capacidad de la vejiga. La interacción entre los inductores (*Li*, *Ld*) y el capacitor (*Cv*) permite analizar la respuesta transitoria del sistema urinario ante cambios en la producción o evacuación de orina, mientras que la evaluación de las resistencias *Ri*, *Rd* y *Rp* ofrece información sobre los efectos de condiciones obstructivas en el flujo urinario. En conjunto, este modelo provee una herramienta eficaz para simular, estudiar y entender el comportamiento del sistema urinario bajo diversas condiciones clínicas, contribuyendo al desarrollo de tratamientos personalizados y estrategias de manejo basadas en principios físicos y matemáticos [4].

### 4. Referencias

- [1] P. A. Valle, Syllabus para Modelado de Sistemas FisiolÛgicos, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tijuana, Tijuana, B.C., México, 2023.
- [2] H. Bushnell, "Modeling Neural Circuit of Lower Urinary Tract", International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS), vol. 52, num. 4, pp. 122–126, 2024.
- [3] S. Zheng et al., "Fluid mechanical modeling of the upper urinary tract", WIREs Mech. Dis., vol. 13, núm. 6, 2021.

[4] A. S. Paya, D. R. Fernández, D. Gil, J. M. Garcia Chamizo, y F. M. Perez, "Mathematical modelling of the lower urinary tract", Comput. Methods Programs Biomed., vol. 109, núm. 3, pp. 323–338, 2013.