

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA  
DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA  
VALPARAÍSO - CHILE



“PROPUESTA PARA SIMULACIÓN DE SISTEMAS  
HIDRÁULICOS”

SEBASTIAN IGNACIO GUTIERREZ SANTA ANA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL EN INFORMÁTICA

Profesor Guía: María Cristina Riff  
Profesor Correferente: Diego Yachan

Agosto - 2023

## **DEDICATORIA**

Le dedico este trabajo a la empresa YOY que me acogió como practicante y me propuso la idea de esta memoria.

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer a mi profesora guía María Cristina Riff y a mi supervisor de la empresa YOY Diego Yachan Galarce por ayudarme en el transcurso de este trabajo. También quiero agradecer a mi familia por haberme apoyado a lo largo de mi carrera especialmente a mis padres Mónica Santa Ana y Javier Gutierrez, también a mi abuela Patricia Arancibia que ya no esta con nosotros. Por ultimo agradezco a todos mis amigos que estuvieron conmigo en la carrera de informática, Carlos Rojas, Guillermo Meza, Carlos Jara, Bastian Solar, Esteban Colin, Cesar Paulangelo, Bastian Vivar, Rodrigo Hernandez y muchos otros.

## RESUMEN

**Resumen**— Este trabajo presenta el desarrollo y evaluación de un algoritmo para simular sistemas/circuitos hidráulicos en un simulador de formación y entrenamiento en el área hidráulica. El algoritmo recrea el comportamiento de componentes claves como bombas, tanques, actuadores de cilindro de doble efecto y válvulas direccionales, calculando valores de flujo y presión. Utiliza un enfoque que transforma el problema hidráulico en uno eléctrico y emplea el análisis nodal para generar el sistema de ecuaciones, que luego se resuelve mediante factorización LU combinado con *forward* y *backward substitution*. Las pruebas confirmaron la capacidad del algoritmo para simular los componentes en tiempo real, demostrando su aptitud para la integración en un simulador de aprendizaje hidráulico.

**Palabras Clave**— Simulación; Modelado; Hidráulica.

## ABSTRACT

**Abstract**— This work presents the development and evaluation of an algorithm for simulating hydraulic systems/circuits in a training and educational simulator in the hydraulic field. The algorithm replicates the behavior of key components such as pumps, tanks, double-acting cylinder actuators, and directional valves by calculating flow and pressure values. It employs an approach that transforms the hydraulic problem into an electrical one and utilizes nodal analysis to generate the system of equations, which is then solved using LU factorization combined with *forward* and *backward substitution*. The tests confirmed the algorithm's ability to simulate the components in real-time, demonstrating its suitability for integration into a hydraulic learning simulator.

**Keywords**— Simulation; Modeling; Hydraulics.

## **GLOSARIO**

CA: Corriente Alterna  
CC: Corriente Continua

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN . . . . .	IV
ABSTRACT . . . . .	IV
GLOSARIO . . . . .	V
ÍNDICE DE FIGURAS . . . . .	VIII
ÍNDICE DE TABLAS . . . . .	XI
INTRODUCCIÓN . . . . .	1
<b>CAPÍTULO 1: DEFINICIÓN DEL PROBLEMA . . . . .</b>	<b>2</b>
1.1 Contexto General . . . . .	2
1.2 Contexto Específico . . . . .	2
1.3 Efectos de la problemática . . . . .	4
1.4 Efectos de la solución . . . . .	5
<b>CAPÍTULO 2: MARCO CONCEPTUAL . . . . .</b>	<b>6</b>
2.1 Simulación de Sistemas Electrónicos . . . . .	6
2.1.1 Circuitos lineales invariantes al tiempo . . . . .	7
2.1.2 Proceso de estampado . . . . .	9
2.1.3 Solución del circuito lineal . . . . .	11
2.1.4 Elementos no lineales y los demás modos de análisis . . . . .	11
2.1.5 Newton-Raphson para Circuitos No lineales . . . . .	15
2.2 Simulación de Sistemas Hidráulicos . . . . .	17
2.2.1 Principios de un sistema Hidráulico . . . . .	18
2.2.2 Componentes de un sistema Hidráulico . . . . .	20
2.2.3 Modelo Bomba . . . . .	22
2.2.4 Modelo Volumen . . . . .	23
2.2.5 Modelo Resistor de flujo . . . . .	24
2.2.6 Modelo Actuador . . . . .	25
2.2.7 Diagrama de bloques . . . . .	26
2.2.8 Resultados de otros trabajos . . . . .	29
2.2.9 Comentarios adicionales . . . . .	33
<b>CAPÍTULO 3: PROPUESTA DE SOLUCIÓN . . . . .</b>	<b>36</b>
3.1 El Problema en específico . . . . .	36
3.1.1 Casos de Prueba . . . . .	36
3.1.2 Componentes y sus Modelos . . . . .	42
3.1.3 Bomba . . . . .	42
3.1.4 Tanque . . . . .	43

3.1.5 Actuador . . . . .	46
3.1.6 Válvula . . . . .	49
3.1.7 Discrepancia Bomba Tanque . . . . .	50
3.2 La Propuesta de solución . . . . .	51
3.2.1 Formar el sistema de ecuaciones . . . . .	51
3.2.2 Algoritmo de Simulación . . . . .	55
3.2.3 Tanques con Distintas Presiones . . . . .	58
3.2.4 Métodos <i>startIteration</i> y <i>stepFinished</i> . . . . .	62
3.2.5 Fuga como componente . . . . .	65
<b>CAPÍTULO 4: VALIDACIÓN DE LA SOLUCIÓN . . . . .</b>	<b>67</b>
4.1 Pruebas . . . . .	68
<b>CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES . . . . .</b>	<b>89</b>
<b>ANEXOS . . . . .</b>	<b>95</b>
5.1 Factorización LU . . . . .	95
5.2 <i>Forward Substitution</i> . . . . .	95
5.3 <i>Backward Substitution</i> . . . . .	95
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS . . . . .</b>	<b>96</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

1	Representación de resistor, fuente de corriente y voltaje. . . . .	7
2	Ley de corriente de Kirchhoff ejemplo . . . . .	8
3	Circuito de ejemplo . . . . .	8
4	Lista de red de figura 3 . . . . .	10
5	Ejemplo de estampa de un resistor. . . . .	10
6	Ejemplo de estampa de una fuente de corriente. . . . .	10
7	Estampado de resistor y fuente en práctica. . . . .	11
8	Estampado completo figura 4 . . . . .	11
9	Circuito No lineal. . . . .	12
10	Estampa de elemento No lineal. . . . .	12
11	Transformación del Diodo a elemento lineal. . . . .	13
12	Capacitor. . . . .	13
13	Modelo para un capacitor en el intervalo $t$ y $t + \Delta t$ . . . . .	14
14	Modelo alternativo para un capacitor en el intervalo $t$ y $t + \Delta t$ . . . . .	15
15	Flujo de análisis no lineal transitorio . . . . .	16
16	Gráfico del paso de linearización . . . . .	17
17	3 Tanques en serie . . . . .	21
18	Modelo equivalente para 17 . . . . .	21
19	Diagrama usando Puertos . . . . .	22
20	Modelo Volumen de Tubería corta . . . . .	24
21	Actuador de cilindro doble . . . . .	25
22	Características de diagrama de bloques . . . . .	27
23	Ejemplo Diagrama de bloques . . . . .	28

24	Interfaz de <i>Automation Studio</i>	32
25	Interfaz de <i>FluidSim</i>	33
26	Caso 1	36
27	Caso 2	37
28	Caso 3	37
29	Caso 4	38
30	Caso 5	38
31	Caso 6	39
32	Caso 7	39
33	Caso 8	39
34	Caso 9	40
35	Caso 10	40
36	Caso 11	41
37	Caso 12	41
38	Gráfica de Representación lineal de una bomba	43
39	Gráfica de Representación cuadrática de una bomba	43
40	Dibujo de la forma del tanque	44
41	Actuador de cilindro doble	46
42	Superficie del disco que cubre un líquido con altura $h$	47
43	Actuador Hidráulico Modelo Equivalente	48
44	$T1$ cede flujo a la cabina y $T2$ recibe flujo de la cabina	49
45	Circuito simple con una fuente de corriente y una resistencia	52
46	Circuito simple con una Bomba y un Tanque	53
47	Circuito simple con una Bomba y 3 Tanques	53

48	Diagrama Resumido del algoritmo propuesto . . . . .	66
49	Prueba de $P_L$ sin conexión . . . . .	68
50	Prueba de $P_Q$ sin conexión . . . . .	69
51	Prueba del Flujo de $T_{Hf}$ sin conexión . . . . .	70
52	Prueba de la Presión de $T_{Hf}$ sin conexión . . . . .	70
53	Prueba del Flujo de $T_{Nf}$ sin conexión . . . . .	71
54	Prueba de la Presión de $T_{Nf}$ sin conexión . . . . .	71
55	Prueba del Flujo de $T_{He}$ conectado a $P_L$ . . . . .	72
56	Prueba de la Presión de $T_{He}$ conectado a $P_L$ . . . . .	72
57	Prueba del Flujo de $T_{He}$ conectado a $P_Q$ . . . . .	73
58	Prueba de la Presión de $T_{He}$ conectado a $P_Q$ . . . . .	73
59	Prueba de la bomba $P_L$ deteniéndose . . . . .	73
60	Prueba de la bomba $P_Q$ deteniéndose . . . . .	74
61	Prueba del Flujo del Tanque $T_{Ne}$ conectado a la Bomba $P_L$ . . . . .	74
62	Prueba de la Presión del Tanque $T_{Ne}$ conectado a la Bomba $P_L$ . . . . .	74
63	Prueba del Flujo del Tanque $T_{Ne}$ conectado a la Bomba $P_Q$ . . . . .	75
64	Prueba de la Presión del Tanque $T_{Ne}$ conectado a la Bomba $P_Q$ . . . . .	75
65	Prueba del Flujo de $T_{Hf}$ conectado $T_{He}$ . . . . .	76
66	Prueba de la Presión de $T_{Hf}$ conectado $T_{He}$ . . . . .	76
67	Prueba del Flujo de $T_{Nf}$ conectado $T_{Ne}$ . . . . .	76
68	Prueba de la Presión de $T_{Nf}$ conectado $T_{Ne}$ . . . . .	77
69	Prueba de Flujo con $P_L$ conectado a $T_{He}, T_{He2}, T_{He3}, T_{He4}$ . . . . .	78
70	Prueba de Presión con $P_L$ conectado a $T_{He}, T_{He2}, T_{He3}, T_{He4}$ . . . . .	78
71	Prueba de Flujo con $P_L$ conectado a $T_{Ne}, T_{Ne2}, T_{Ne3}, T_{Ne4}$ . . . . .	78

72	Prueba de Presión con $P_L$ conectado a $T_{Ne}, T_{Ne2}, T_{Ne3}, T_{Ne4}$ . . . . .	79
73	Prueba de $P_L$ y $P_{L2}$ conectado a $T_{He}$ . . . . .	79
74	Prueba de $P_L$ y $P_{L2}$ conectado a $T_{Ne}$ . . . . .	80
75	Prueba del Actuador $A_H$ conectado a la Bomba $P_L$ por la izquierda . . . . .	80
76	Prueba del Actuador $A_N$ conectado a la Bomba $P_L$ por la izquierda . . . . .	81
77	Prueba del Actuador $A_H$ conectado a la Bomba $P_L$ por la derecha . . . . .	81
78	Prueba del Actuador $A_N$ conectado a la Bomba $P_L$ por la derecha . . . . .	81
79	Prueba del Actuador $A_H$ conectado al Tanque $T_{Hf}$ . . . . .	82
80	Prueba del Flujo y Presión del Tanque $T_{Hf}$ conectado al Actuador $A_H$ . . . . .	82
81	Prueba del Actuador $A_N$ conectado al Tanque $T_{Nf}$ . . . . .	83
82	Prueba del Flujo y Presión del Tanque $T_{Nf}$ conectado al Actuador $A_N$ . . . . .	83
83	Prueba de $A_H, A_{H2}$ y $A_{H3}$ iguales . . . . .	84
84	Prueba de $A_H, A_{H2}$ y $A_{H3}$ con distinta masa . . . . .	84
85	Prueba de $A_N, A_{N2}$ y $A_{N3}$ iguales . . . . .	84
86	Prueba de $A_N, A_{N2}$ y $A_{N3}$ con distinta masa . . . . .	85
87	Prueba del componente Fuga . . . . .	85
88	Prueba del componente Válvula . . . . .	86
89	Prueba de $P_L$ y $P_{L2}$ conectado a cada lado de $A_H$ . . . . .	86
90	Prueba de $P_L$ y $P_{L2}$ conectado a cada lado de $A_N$ . . . . .	87
91	Prueba con $P_{L2}$ con $Q_{max} = 100[m^3/s]$ . . . . .	87
92	Prueba con $P_{L2}$ con $Q_{max} = 10[m^3/s]$ . . . . .	88

## ÍNDICE DE TABLAS

## INTRODUCCIÓN

Los simuladores son aparatos que reproducen algún sistema en condiciones determinadas [36]. Una de las razones más comunes para el desarrollo de un simulador es ayudar en el aprendizaje de algún área, ya sea por motivos de seguridad en el caso de experiencias peligrosas o porque no se cuenta con los medios necesarios para poder reproducir la experiencia en la realidad.

La esencia de todo simulador es generar una apariencia de realidad que implica realizar la experiencia sin mayores riesgos. Por ejemplo, en aeronáutica son usados para aprender a conducir y entrenar pilotos de aviones, y en ciberdefensa se recrea ataques para poder poner en práctica técnicas de ciberseguridad, por señalar sólo dos áreas de utilidad. En general, se pueden desarrollar simuladores para reproducir cualquier fenómeno del mundo real, si existe algún interés en observarlo. En el caso específico de esta memoria se ha elegido una propuesta de simulación de sistemas hidráulicos con el objetivo de apoyar al aprendizaje.

La hidráulica es una rama de la física que estudia el comportamiento de los líquidos y sus propiedades[21]. Estos conocimientos permiten la construcción de sistemas hidráulicos que buscan aprovechar las propiedades de los fluidos para cumplir determinadas funciones como: producción de energía, movimientos de gran fuerza a través de maquinarias como grúas, prensas e incluso ascensores, por mencionar algunas de sus utilidades.

Además de estudiar modelos y leyes físicas, la aplicación de la hidráulica para la construcción de estos sistemas se beneficia de un aprendizaje práctico. Esto significa trabajar directamente con los componentes, observando de primera mano cómo funcionan y cómo se usan al crear algún tipo de sistema, en un ambiente controlado. Sin embargo, este aprendizaje práctico no puede ser realizado en cualquier lugar e implican un alto costo, por lo cual, la tecnología de simulación es una alternativa más accesible que se ubica entre la teoría y la realidad.

Para la capacitación en el diseño y construcción de sistemas hidráulicos se necesita un simulador de circuitos. Estos se crean mediante el uso de *software* especializado que combina principios fundamentales de la física y la hidráulica con algoritmos de simulación avanzados. Tienen la capacidad de llevar a cabo simulaciones del circuito en tiempo real. Esto permite al usuario interactuar con el sistema y observar las respuestas del mismo en términos de caudales, presiones, velocidades, fuerzas, u otras dependiendo de las características del simulador.

Estas herramientas virtuales permiten a los ingenieros y técnicos realizar análisis exhaustivos de los sistemas hidráulicos, lo cual simplifica una toma de decisiones informada y una optimización del diseño.

En conclusión, el simulador de sistemas hidráulicos representa una herramienta de gran valor para la capacitación y mejora de sistemas. Al proporcionar un ambiente seguro y asequible para realizar prácticas y experimentos, este simulador se convierte en una pieza fundamental para el aprendizaje en el campo de la hidráulica. Su aplicación no solo impulsa el desarrollo profesional, sino que también fomenta la innovación, la seguridad y el progreso continuo en la aplicación de la hidráulica en diversos campos de la ingeniería e industria.

## CAPÍTULO 1

### DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En esta sección se presenta el problema, es decir, los inconvenientes del trabajo físico, en relación a sus contextos, sus efectos y los beneficios de su solución. Todo lo anterior, con el objetivo de aclarar la necesidad de este trabajo de memoria.

#### 1.1. Contexto General

En electrónica y mecánica se trabaja desarrollando sistemas, lo que requiere la aplicación de conceptos físicos y químicos. La creación de dichos sistemas requiere, en parte, de ensayo y error. Esto significa indefectiblemente que en las fases de prueba los componentes base pueden sufrir daños irreparables, que se traducen en pérdidas económicas.

En el aprendizaje de carreras afines a la electrónica y mecánica a los estudiantes se les suele encargar la confección de circuitos para que se familiaricen con las herramientas y componentes a través del proceso de construcción en general. Pero como se está en proceso de aprendizaje el error es mucho más común y, dependiendo de las políticas universitarias, estos yerros podrían traducirse en pérdidas económicas de carácter personal. Este factor genera un estrés adicional al aprendizaje mismo que produce un ambiente no muy grato a la hora de practicar.

Ya en el ámbito laboral, las pérdidas pueden ser mayores. Al aumentar la escala del trabajo, una implementación errónea no solo puede generar gastos en materiales dañados sino que también se empiezan a apreciar los gastos en *retrabajo*<sup>1</sup>. Por ejemplo, la red eléctrica de una casa o alguna maquinaria de fábrica basada en sistemas hidráulicos. Además la obligación de desarmar la implementación actual, y la nueva planificación implica volver a implementar el sistema. Ello, necesariamente, llevará a pérdidas de tiempo y económicas, las que pueden ser invertidas en otros proyectos.

#### 1.2. Contexto Específico

La empresa YOY, que trabaja desarrollando simuladores y experiencias de realidad virtual, se encuentra en el proceso de crear un simulador de sistemas hidráulicos y neumáticos con fines educativos. En general cualquier organización que necesite capacitar a una persona para realizar una tarea práctica, pero compleja, tendrá algún interés en lo que es simulación. Éste es exactamente el público objetivo al que YOY busca satisfacer con sus productos y servicios. Actualmente, YOY ya ha desarrollado un simulador electrónico, de nombre *Electrosim*, con experiencias de trabajo tipo laboratorio. Este simulador se ofrece en forma de servicio a uni-

---

<sup>1</sup>Considera aquellos servicios que están fuera del proceso original de manufactura o fabricación.

versidades u otras entidades educativas del área electrónica.

Actualmente, sin el uso de *Electrosim*, estas actividades prácticas de aprendizaje se realizan con *kits*<sup>2</sup> físicos de trabajo. El uso de componentes reales trae problemas para los actores involucrados, por ejemplo, es posible perder o averiar algunos elementos. Justamente por esto, el simulador, por su naturaleza virtual, ofrece el beneficio de no disponer ni arriesgar elementos físicos. Esto es bastante positivo, ya que asegura que existan instrumentos y piezas de la misma calidad para un número prácticamente ilimitado de estudiantes. Todo lo que se necesita es un dispositivo con acceso al simulador. Además, se abre la posibilidad de trabajar con herramientas y componentes extremadamente grandes o pequeños que normalmente no podrían ser manipulados por un estudiante en una sala de clases. Ello permite crear diversas experiencias de aprendizaje mucho más diversas para la mejor formación de los aspirantes a profesionales.

Hoy existen simuladores que permiten manejar una excavadora o pilotear un avión de forma bastante similar a la realidad por lo que, en primera instancia, no se debe dudar de lo que se puede lograr con estas tecnologías.

El desafío actual es expandir *Electrosim* para simular componentes hidráulicos y los circuitos que forman con estos. Se trata de una expansión y no un sistema aparte puesto que se busca recrear realidades más complejas al simular hidráulica y electrónica a la vez. Se necesitan muchas cosas para completar el módulo hidráulico del simulador, aspectos de *frontend*<sup>3</sup>, *backend*<sup>4</sup>, conexión con base de datos entre otras. Esta memoria se encarga de investigar la teoría para diseñar un algoritmo que al recibir una descripción de un sistema hidráulico, permita modelar el comportamiento de este tanto en un momento exacto como a lo largo de un intervalo de tiempo, lo que corresponde a un aspecto de *backend*.

Esta expansión no terminará solo en un módulo hidráulico, es bastante probable que a medida que el simulador se difunda correctamente dentro de las organizaciones que lo usan se soliciten escenarios nuevos que necesiten de nuevos algoritmos de simulación, como ejemplo, en un futuro se podría agregar un simulador de mecánica para colisiones. Por lo anterior, se pretende que el algoritmo sea lo más eficiente posible para que no aumente la carga al procesamiento y los tiempos de ejecución en una medida mayor a la necesaria. Por esa razón se considera ideal encontrar una manera de aplicar el mismo algoritmo de la parte electrónica sobre los elementos hidráulicos. Es decir, un uso de una interfaz o transformación que permita tratarlo como elementos eléctricos, de esta forma se mantendría la complejidad y la mantención de código se volvería más fácil.

Se debe tener el cuidado de ofrecer un producto que represente la realidad de la manera más cercana posible para que la experiencia virtual sea tan buena como el trabajo con elementos reales. En última instancia esta implementación se realiza para el aprendizaje de la construcción de sistemas y/o circuitos, y si el software no es lo suficientemente cercano a la realidad no podrá ser una alternativa viable a trabajar con componentes físicos.

En resumen, esta memoria plantea el desafío de desarrollar un algoritmo que simule sistemas hidráulicos lo más cercanos a la realidad de forma eficiente. Además, se busca documentar correctamente la teoría, el desarrollo y el funcionamiento de este para que pueda

---

<sup>2</sup>juego de piezas para armar o montar un objeto

<sup>3</sup>Se entiende como la capa visual de un software, aquello que el usuario puede ver e interactuar

<sup>4</sup>Corresponde a una capa funcional que el usuario no puede apreciar visualmente

servir de ayuda a la empresa YOY a mantener y actualizar el simulador, además de ayudar a cualquier otro interesado en expandir sobre este tema.

### 1.3. Efectos de la problemática

Dentro de los efectos de la problemática, como ya se mencionó, se encuentra el estrés generado en los estudiantes al trabajar con componentes y/o equipo sensible, puesto que entorpece su trabajo y aprendizaje. Si bien se podría pensar que este estrés puede mejorar la concentración, teniendo más cuidado con las piezas y herramientas, en el estudio de [11] se confirmó que, si bien el estrés puede traer consecuencias positivas en realización de tareas mecánicas, como la memorización, este tiene efectos negativos en tareas más complejas que requieran el uso de la creatividad como por ejemplo la creación y/o diseño de un circuito. Dependiendo de las políticas de la institución académica podría no existir una penalización al estudiante en caso de daño a los equipos o componentes, pero esto no elimina las consecuencias solo las transfiere a la institución. En el caso anterior se podría entender solo como una pérdida monetaria para el laboratorio, pero la realidad es algo más compleja. Para una buena gestión de los componentes físicos se necesita un sistema de inventario que realice trazabilidad de la cantidad, modelo, ubicación y estado de los componentes. Es necesario, por lo tanto, manejar una sistematización de dicho inventario inventario y actualizarlo cada vez que se realiza una experiencia de laboratorio, o si se mueven y/o usan componentes por alguna otra razón. A fin de un correcto funcionamiento de los trabajos prácticos, este cuidado procura que existan suficientes componentes para una determinada cantidad de estudiantes que entra al laboratorio, sería inaceptable que un estudiante le informaran “no tenemos herramientas para ti”. Para evitar estas situaciones se debe tener un sistema de inventario al día. Si un componente se avería se debe reportar en el inventario y, a través de una evaluación, se determinará la urgencia de reemplazar el componente. Para el reemplazo es muy probable que se necesiten realizar cotizaciones, especialmente en casos de piezas costosas. Posterior a la compra se guardará la boleta y se registrará el gasto para informes financieros o balances contables futuros, además de registrar el nuevo componente en el inventario. Como se puede advertir, la burocracia propia de todo inventario es un proceso tedioso que genera bastante *papeleo*<sup>5</sup>. Al trabajar con materiales físicos este proceso no se puede obviar y el estropeo de componentes resulta en más trabajo al necesitar hacer reemplazos inesperados. Las actividades de inventario descritas se basaron en la definición básica de costos de inventario de [16]. Otro gasto relevante mencionado en el artículo es el costo de almacenamiento de los materiales. Por todo esto se puede estar seguros que, trabajar con componentes físicos es uno de los caminos más costosos para un laboratorio. El valor de mantenimiento solo aumenta si se producen pérdidas frecuentes.

Es importante destacar, considerando el contexto de aprendizaje *online* que se pasó un poco antes de la creación de esta memoria, la necesidad de un laboratorio físico para realizar las actividades. Tener y mantener dicho espacio genera trabajo para la administración y para los estudiantes provoca la necesidad de asistir a dicho lugar en algún tiempo específico, causan-

---

<sup>5</sup>Conjunto de trámites, papeles y documentos que se tienen que cumplimentar para solucionar un asunto

do pérdidas de tiempo en desplazamiento; cuánto tiempo se pierde depende de la persona, sin mencionar que situaciones de emergencia podrían impedir tanto la llegada como el uso del recinto. Sin embargo, con un simulador desplegado en un servidor, se podrían realizar laboratorios *online*. Ello permitiría que estos funcionen incluso en casos de emergencia y, además, los estudiantes podrían invertir su tiempo de mejor manera al no tener que asistir presencialmente al laboratorio.

Para concluir, el uso de componentes delicados en una actividad educativa genera inconvenientes para los encargados, se invierte tiempo y dinero en su organización, y en busca de reducir estos inconvenientes se toman medidas para que los estudiantes procuren trabajar con mucho cuidado, buscando evitar daños o pérdidas, lo que puede generar un ambiente estresante donde se entorpece el aprendizaje del estudiante.

#### 1.4. Efectos de la solución

Para concluir esta sección se destaca cómo la solución general y el trabajo a realizar en esta memoria se relacionan, y cómo contribuyen a combatir las consecuencias del problema. La solución completa es el simulador montado en el servidor de la empresa YOY. En este sentido, el aporte que hace esta memoria es proponer y/o diseñar un algoritmo que simule los componentes; lo que corresponde al núcleo del *backend*. YOY ya tiene desarrollado un simulador de circuitos eléctricos con todo lo necesario para ofrecerlo como servicio. O sea existe el servidor, por esto al crear un algoritmo que simule componentes hidráulicos que se acople a la infraestructura ya existente se puede fácilmente expandir los beneficios del simulador a otras áreas, es decir el trabajo facilitará estos beneficios al área de estudios hidráulicos.

Entre los beneficios que ofrece el simulador se cuenta con eliminar el estrés que significa correr el riesgo de destruir o extraviar algunos componentes. Ello tiene la gran ventaja de que reduce las responsabilidades de los encargados y el estrés de los estudiantes. Junto con esto se elimina la necesidad de hacer el tedioso y costoso inventario. Esto no es sólo una ganancia de tiempo de los estudiantes y profesores, es también, una ganancia de espacio dentro del laboratorio. Por esta misma razón, esos recursos y espacios pueden ser delegados a otras tareas. Como se puede disponer de materiales y laboratorios el simulador es una alternativa para establecimientos de menores recursos que no los puedan costear, permitiendo que esta clase de conocimientos pueda ser transmitidos a más personas. Además, es posible usar el simulador como una herramienta de prueba para empresas que armen circuitos hidráulicos lo cual mejora el proceso de diseño.

Finalmente, contribuye a la revolución del *e-learning*<sup>6</sup> que se ha estado viviendo. El aprendizaje práctico virtual puede no ser un ejercicio real, pero los beneficios de este no solo pueden ayudar en situaciones de emergencia o a establecimientos de menores recursos, sino que ofrecen una posibilidad de mejorar el aprendizaje y trabajo de varias personas, lo que sugiere que el estudio de simulación es muy importante para contribuir al desarrollo de tecnologías futuras.

---

<sup>6</sup>Proceso de aprendizaje que se lleva a cabo a través de internet, caracterizado por una separación física entre profesores y estudiantes

## CAPÍTULO 2

### MARCO CONCEPTUAL

En esta sección se presenta un estado del arte de las técnicas de simulación para sistemas electrónicos, hidráulicos y neumáticos, estando este último contenido en hidráulica por su similitud. El primero, a pesar de ser muy distinto a los dos últimos, se incluye pues es la base existente desarrollada en la empresa a la que se busca integrar la propuesta y no se puede descartar la posibilidad de que avances en dicha área puedan contribuir a desarrollar una buena propuesta para el área hidráulica.

#### 2.1. Simulación de Sistemas Electrónicos

Primero se deben discutir los distintos tipos de análisis que se pueden aplicar a un circuito electrónico. En [30] se identifican los principales:

- Análisis lineal con corriente continua (CC) para determinar las corrientes y voltajes en circuitos lineales invariantes al tiempo.
- Análisis no lineal con CC para obtener el *punto de funcionamiento inactivo* de un circuito que contiene elementos no lineales como transistores.
- Análisis lineal con corriente alterna (CA) para obtener la respuesta de frecuencia en circuitos lineales invariantes al tiempo.
- Análisis de pequeña señal CA para obtener la respuesta en el dominio de frecuencia de un circuito. Se reemplazan los elementos no lineales por sus equivalentes lineales computados desde el *punto de funcionamiento inactivo*.
- Análisis lineal transitorio para determinar la respuesta en el dominio del tiempo de un circuito para varias formas de onda empezando con las condiciones iniciales del análisis lineal con CC.
- Análisis de gran señal transitorio para obtener la respuesta en el dominio de tiempo de un circuito que contiene elementos no lineales. Estas se determinan considerando varias formas de onda empezando con las condiciones iniciales obtenidas en el análisis no lineal con CC.

Estos análisis, como se indica en [30], corresponden a las capacidades más comunes que se pueden encontrar en simuladores electrónicos. Existen otros tipos menos comunes como análisis de *pole/zero*, análisis de ruido, análisis térmicos, por dar algunos ejemplos. La forma típica en que se usan los modos mencionados consiste en aplicar el análisis no lineal con CC

para encontrar el *punto de funcionamiento inactivo* al inicio de la simulación, seguido de un análisis lineal transitorio. Todos los modos nombrados comparten un núcleo en el algoritmo de análisis lineal con CC, por ende, al ser la base de los demás modos, se transforma en la parte más importante para crear un buen simulador electrónico. Las siguientes secciones se basan principalmente en [30] y busca explicar el funcionamiento de estos análisis.

### 2.1.1. Circuitos lineales invariantes al tiempo

Antes de continuar se necesita una breve explicación de circuitos lineales y cómo pueden representarse. Se usan los mismos modelos presentes en [30] para este efecto. Los componentes básicos que interesan para los circuitos lineales invariantes en el tiempo son resistores, fuentes ideales de corriente y voltaje, las cuales pueden representarse como en la figura 1. En un diagrama de circuito estos componentes son aristas y sus extremos los nodos del circuito. Lo importante ahora es destacar  $V_{n+}$  y  $V_{n-}$  que corresponden al potencial en cada nodo y  $V_R$  que corresponde a la diferencia de potencial en el componente. Junto con esto se define la dirección de la corriente desde (+) a (-) la que coincide con la dirección de baja de voltaje.

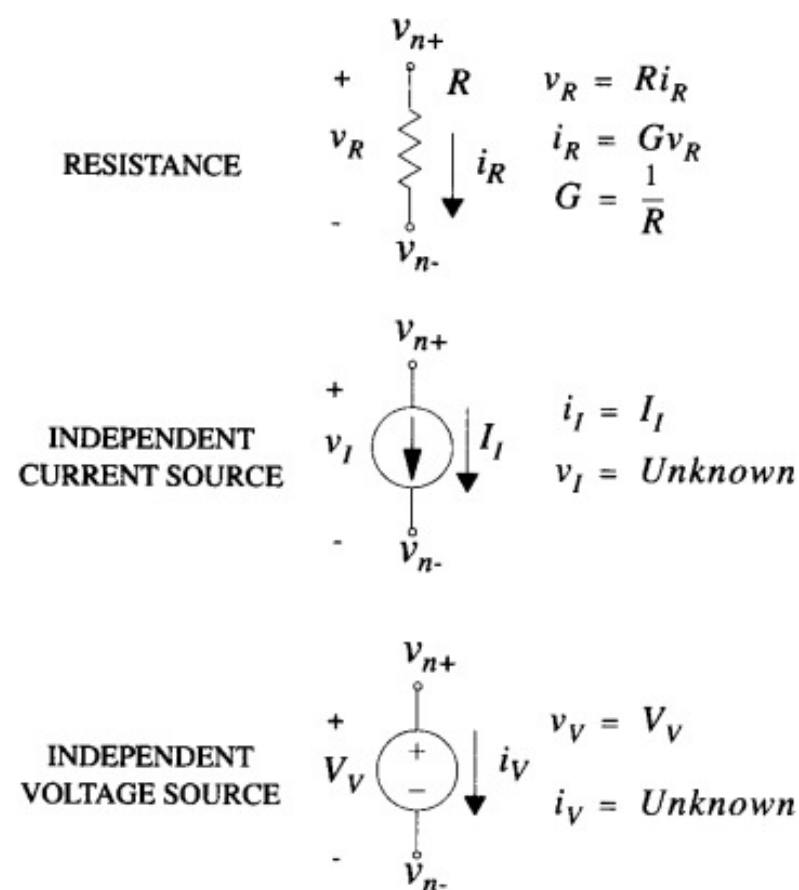


Figura 1: Representación de resistor, fuente de corriente y voltaje.  
Fuente: [30].

Ahora con el entendimiento de los componentes se definen las leyes de Kirchhoff para la corriente y voltaje. Estas son de gran importancia pues definen las ecuaciones que tiene que resolver el algoritmo para simular el circuito. La ley del voltaje de Kirchhoff indica que cada nodo del circuito tiene un voltaje único con respecto a la tierra (nodo con voltaje 0 por convención) y la caída de voltaje o diferencia de potencial a lo largo de una arista corresponde a la diferencia de voltaje de los nodos positivo y negativo en los que incide. La ley de corriente de Kirchhoff señala que la suma algebraica de todas las corrientes que fluyen hacia y desde un nodo debe ser 0. Como ejemplo, en la figura 2 la suma de  $I_1, I_2, I_3, I_4$  debe ser igual a 0.

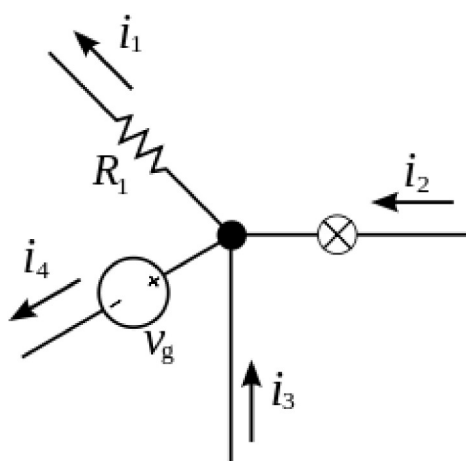


Figura 2: Ley de corriente de Kirchhoff ejemplo  
Fuente: [6].

Usando la ley de corriente se puede hacer un análisis nodal del circuito definiendo un sistema de ecuaciones para encontrar los voltajes en cada nodo. Por ejemplo, si se considera el circuito en la figura 3 se obtiene un sistema de ecuaciones como el siguiente:

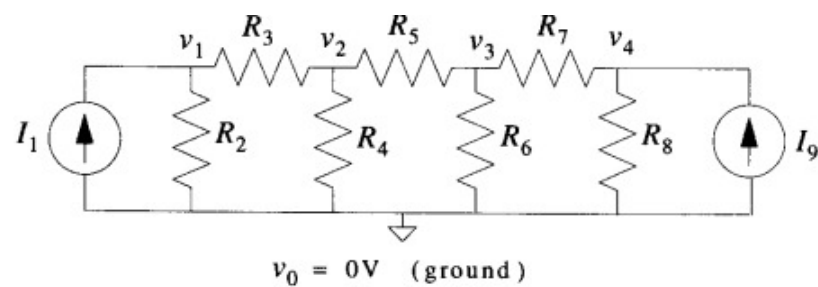


Figura 3: Circuito de ejemplo  
Fuente: [30].

$$\begin{aligned} \frac{v_1 - v_0}{R_2} + \frac{v_1 - v_2}{R_3} + I_1 &= 0 \\ \frac{v_2 - v_1}{R_3} + \frac{v_2 - v_0}{R_4} + \frac{v_2 - v_3}{R_5} &= 0 \\ \frac{v_3 - v_2}{R_5} + \frac{v_3 - v_0}{R_6} + \frac{v_3 - v_4}{R_7} &= 0 \\ \frac{v_4 - v_3}{R_7} + \frac{v_4 - v_0}{R_8} + I_9 &= 0 \end{aligned}$$

Cada componente puede expresar su corriente en base a la diferencia de potencial, en el caso de fuentes de corriente esta es conocida. Las incógnitas serán los voltajes en cada nodo. En forma matricial este sistema de  $n$  ecuaciones se puede expresar como  $Yv = J$  donde  $Y$  corresponde a la matriz  $n \times n$  de *admitancia*<sup>7</sup>, inversos a la resistencia,  $J$  es el vector  $n \times 1$  de fuentes de corriente y  $v$  es el vector  $n \times 1$  de voltajes por nodo. Como el mismo libro [30] indica, escribir estas ecuaciones no es lo más eficiente para un programa de software, por lo tanto, aquí se encuentra un paso muy importante en el algoritmo de simulación que es el *estampado* de la matriz.

### 2.1.2. Proceso de estampado

En general, un programa recibe la instancia de un circuito en la forma de una lista de red, esto es una descripción de las conexiones de un circuito. Para la figura 3 la lista sería similar a la figura 4. Para leer este archivo y rellenar la matriz  $Y$  e  $J$  se define un estampado para los componentes. En el caso de un resistor este afectará la matriz de *admitancia*, si el resistor se encuentra entre los nodos  $i, j$  se rellenan las intersecciones de las filas y columnas en la matriz de *admitancia*, estos son 4 valores que se observan en la figura 5.

Como se puede ver para  $(i, i)$  y  $(j, j)$  se suman la *admitancia* positiva y en  $(i, j)$  y  $(j, i)$  de forma negativa, esto viene del cálculo de corriente entre  $i$  y  $j$  donde se restan los potenciales. Cuando se va de  $i$  a  $j$  se tiene  $v_i$  como extremo positivo y  $v_j$  el negativo. Por el contrario cuando es desde  $j$  a  $i$   $v_j$  es la referencia positiva y  $v_i$  la negativa. Esencialmente se está rellorando la matriz de tal forma que, al multiplicar la fila  $i$  por las incógnitas aparezcan todas las expresiones de corriente involucradas en el nodo  $i$ .

Si se tiene una fuente de corriente, su valor es conocido, entre los nodos  $i$  y  $j$  se debe añadir este valor al vector de corrientes  $J$  en la posición  $i$  e  $j$  con la estampa de la figura 6. Para el nodo  $i$  se ingresa el valor de la corriente que sale de  $i$ , por eso es negativo, y en el nodo  $j$  la que llega a éste siendo positiva.

Distintos componentes tendrán valores de estampado diferentes, pero se abstiene de entrar en detalle de otros componentes pues se quiere concentrar en el flujo del algoritmo. Lo importante es que cada componente tiene una estampa que se aplica a la matriz.

---

<sup>7</sup>Término para referirse a la facilidad para que pase la corriente en un circuito

Branch type/ name	From node	To node	Value
I1	0	1	1.0
R2	1	0	1.0
R3	1	2	1.0
R4	2	0	1.0
R5	2	3	1.0
R6	3	0	1.0
R7	3	4	1.0
R8	4	0	1.0
I9	0	4	1.0

Figura 4: Lista de red de figura 3  
Fuente: [30].

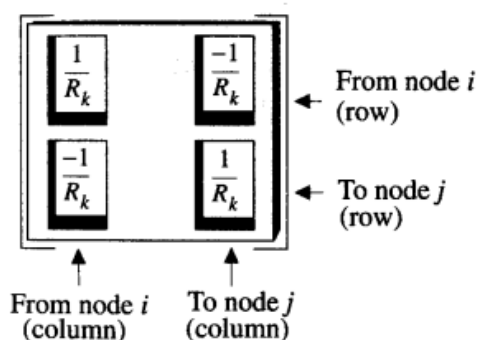


Figura 5: Ejemplo de estampa de un resistor.  
Fuente: [30].

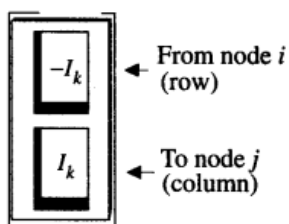


Figura 6: Ejemplo de estampa de una fuente de corriente.  
Fuente: [30].

Para aclarar un poco más el proceso, en la figura 7 se ve el resultado de imprimir los dos primeros elementos de la lista de red de la figura 4. Se recalca que al imprimir se están sumando valores a la matriz sin remplazarlos, por tanto al ingresar el tercer elemento que también rellenaría un valor en la posición (1, 1) de la matriz no se produce un remplazo sino que los valores se suman. El resultado se ve al final del estampado en la figura 8. Se destaca que actualmente la matriz no tiene una solución única, esto porque cada fila actualmente suma algebraicamente 0. Esto implica que si todos los voltajes tienen el mismo valor  $v$  las ecuaciones se cumplen para cualquier  $v$ . Se necesita usar un nodo como referencia y este es el trabajo del nodo tierra. Al eliminar la fila y columna de este nodo el sistema tendrá una única solución.

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{R_2} & -\frac{1}{R_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{R_2} & \frac{1}{R_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_0 \\ v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -I_1 \\ I_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Figura 7: Estampado de resistor y fuente en práctica.  
Fuente: [30].

$$\begin{bmatrix} (\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_8}) & -\frac{1}{R_2} & -\frac{1}{R_4} & -\frac{1}{R_6} & -\frac{1}{R_8} \\ -\frac{1}{R_2} & \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} & -\frac{1}{R_3} & 0 & 0 \\ \frac{1}{R_4} & -\frac{1}{R_3} & \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} & -\frac{1}{R_5} & 0 \\ -\frac{1}{R_6} & 0 & -\frac{1}{R_5} & (\frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_7}) & -\frac{1}{R_7} \\ -\frac{1}{R_8} & 0 & 0 & -\frac{1}{R_7} & \frac{1}{R_7} + \frac{1}{R_8} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_0 \\ v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -I_1 - I_9 \\ I_1 \\ 0 \\ 0 \\ I_9 \end{bmatrix}$$

Figura 8: Estampado completo figura 4  
Fuente: [30].

### 2.1.3. Solución del circuito lineal

Para un circuito lineal invariante en el tiempo simplemente se resuelve la matriz que se crea. Esto porque al no presentar cambios en el tiempo, si se resuelve el sistema una vez, es suficiente para conocer los voltajes y corrientes para todo instante  $t$ . En [30] se propone resolver usando eliminación gaussiana o factorización  $LU$ , siendo este último preferido para el caso de un cambio en las fuentes de corriente, ya que si solo cambia el lado derecho del sistema se pueden reusar las matrices  $L$  y  $U$  ya calculadas. Se define factorización  $LU$  en los anexos.

### 2.1.4. Elementos no lineales y los demás modos de análisis

Una vez explicado cómo trabajar el primer modo de análisis, los demás casos necesitan agregar algunos pasos extras, pero todos tiene como base el algoritmo de análisis lineal. Se considera un circuito simple con un elemento no lineal, un diodo. La función que dicta la corriente que pasa por la rama del diodo es:

$$i_d = I_{sat} \left[ \exp\left(\frac{qv_d}{\eta kT}\right) - 1 \right]$$

En la figura 9 se ve dicho circuito y que este tiene una resistencia en paralelo al diodo. La ecuación nodal que describe esta situación correspondería a la corriente de la resistencia más la corriente del diodo es igual a la corriente de la fuente.

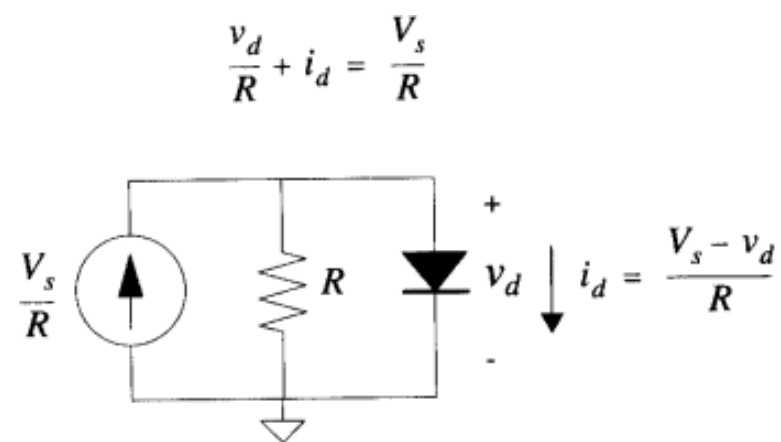


Figura 9: Circuito No lineal.  
Fuente: [30].

Lo anterior quedaría descrito de la siguiente manera:

$$\frac{v_d}{R} + I_{sat} \left[ \exp\left(\frac{qv_d}{\eta kT}\right) - 1 \right] = \frac{V_s}{R}$$

Esto se puede convertir en un problema de búsqueda de ceros, el libro [30] propone el uso del algoritmo de Newton-Rhapon para encontrar la solución.

$$f(v_d) = \frac{V_s}{R} - \left( \frac{v_d}{R} + I_{sat} \left[ \exp\left(\frac{qv_d}{\eta kT}\right) - 1 \right] \right) = 0$$

$$f(v_n + \Delta v_n) \simeq f(v_n) + f'(v_n)\Delta v_n = 0$$

No se profundizará sobre Newton-Rhapon dentro de esta sección, lo importante a saber es que el método resuelve un sistema lineal en cada una de sus iteraciones hasta que el resultado esté dentro de un error aceptable. Esto para el circuito es equivalente a reemplazar el diodo por un elemento lineal equivalente.

Entonces para extender el algoritmo lineal con la intención de soportar elementos no lineales se debe añadir una función de linealización para trabajar con equivalentes lineales y resolver en varias iteraciones hasta tener un error pequeño respecto a la precisión que se busca. Al trabajar una matriz con múltiples elementos lineales y no lineales, esencialmente, se está aplicando el método de Newton multidimensional. La estampa que generará este elemento afecta tanto a  $Y$  como a  $J$ . Esto ocurre pues el método de Newton agrega términos “independientes” del voltaje buscado. Se ve un ejemplo de estampa en la figura 10.

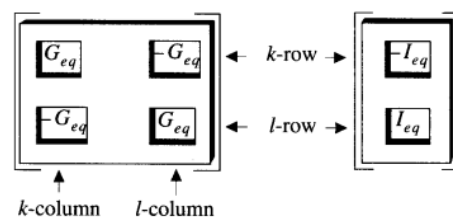


Figura 10: Estampa de elemento No lineal.  
Fuente: [30].

Esto permite entender el remplazo lineal como añadir entre los nodos  $k$  y  $l$  dos ramas, una con una resistencia y otra con una nueva fuente de corriente.

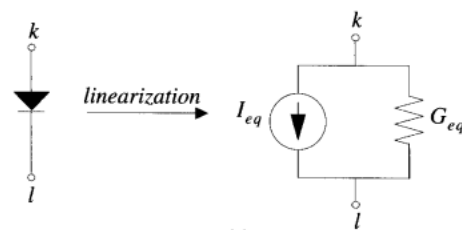


Figura 11: Transformación del Diodo a elemento lineal.

Fuente: [30].

Como se indicó, este método toma varias iteraciones y en cada una deberá recalcularse los valores de la estampa descrita usando el resultado de la iteración anterior, hasta que el resultado esté dentro de un intervalo de error aceptable. Todo el proceso anterior permite realizar el análisis con CC de circuitos no lineales, hasta encontrar el *punto de funcionamiento inactivo* o *estado estacionario del circuito*.

Desde aquí se pasa al análisis de pequeña señal CA. Anteriormente en análisis CC no lineal, se computaba el estado del circuito sin considerar la frecuencia de la corriente ni el paso del tiempo. La técnica de análisis de pequeña señal CA busca ver el comportamiento de los componentes en respuesta a distintas frecuencias de corriente. Al trabajar con CA se agregarán valores complejos de corriente y voltaje para los componentes. Ello permite simular la oscilación de la corriente con algún valor de frecuencia  $\omega$  que pasa por dichos elementos. Para usar esta técnica lo primero es resolver el circuito usando el análisis CC no lineal. Esto permite encontrar el *punto de funcionamiento inactivo* y posteriormente usando este resultado, crear una nueva matriz. Al considerar los efectos de la frecuencia en los componentes, es necesario que el algoritmo tenga la capacidad de trabajar con números complejos. Pero el proceso es el mismo, es decir: estampar la matriz y resolver el sistema.

En contraste con el análisis de pequeña señal CA, que ve el comportamiento del circuito para un dominio de frecuencia, existe el análisis lineal transitorio. Este busca contemplar el comportamiento en el dominio del tiempo, introduciendo fuentes de corriente que dependen del tiempo con una función  $I(t)$ . Al añadir el tiempo al análisis, ahora interesarán circuitos con componentes que cambien de estado con el paso del tiempo como lo son capacitores e inductores. Como ejemplo, se introduce un capacitor:

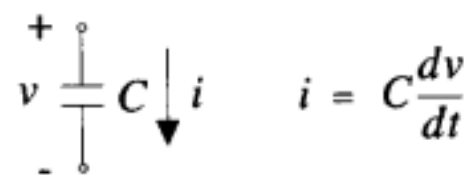


Figura 12: Capacitor.

Fuente: [30].

Como se puede observar la fórmula de corriente que pasa por este elemento corresponde a la capacitancia por la derivada del voltaje respecto al tiempo. Esto, combinado con una fuente dependiente del tiempo, genera ecuaciones nodales como estas:

$$\frac{v_1}{R_1} + \frac{v_1 - v_2}{R_2} + C_1 \frac{d}{dt}(v_1 - v_2) = I_{in}(t)$$

$$\frac{v_2}{R_3} + \frac{v_2 - v_1}{R_2} + C_1 \frac{d}{dt}(v_2 - v_1) + C_2 \frac{dv_2}{dt} = 0$$

Estas son ecuaciones diferenciales de primer orden, en lugar de resolverlas, [30] propone una forma distinta de presentarlas, integrando la relación en 12 sobre el intervalo de tiempo a simular. Como también es complejo resolver la integral [30] se propone usar métodos de aproximación, a través de tres maneras: *forward Euler*, *backward Euler* y *trapezoidal*. Se omiten los detalles de éstos métodos y se usa *trapezoidal* para continuar el ejemplo. Con el proceso anterior se consigue lo siguiente:

$$v(t + \Delta t) \simeq v(t) + \frac{\Delta t}{2C} [i(t) + i(t + \Delta t)]$$

Los valores  $t$  y  $\Delta t$  son conocidos,  $C$  es la capacitancia también conocida, las incógnitas que se buscan son las funciones  $i$  e  $v$  evaluadas en  $t + \Delta t$ . Como solo es una ecuación y se tienen dos incógnitas no es posible determinar  $i(t + \Delta t)$  y  $v(t + \Delta t)$ , [30] decide modelar la ecuación de la siguiente manera:

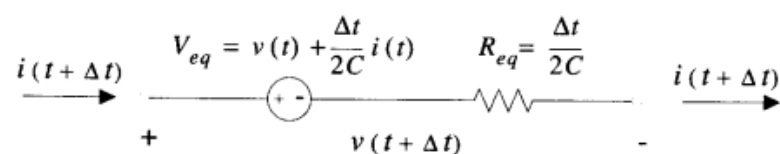


Figura 13: Modelo para un capacitor en el intervalo  $t$  y  $t + \Delta t$ .  
Fuente: [30].

Con esto se relacionan los valores  $i(t + \Delta t)$  y  $v(t + \Delta t)$  con una fuente de voltaje y una resistencia calculadas con  $i(t)$  y  $v(t)$ . Ello implica que aplicando este proceso se obtiene un circuito equivalente a los circuitos lineales que ya se han discutido y resolviendo iterativamente empezando por algún  $t$  se podrá encontrar el estado del circuito en  $t + \Delta t$  de manera similar al caso no lineal. También se propone el siguiente modelo alternativo que es más parecido al usado en el ejemplo del diodo en la figura 14.

Para terminar de explicar el análisis lineal transitorio, en [30] se menciona que no es recomendable trabajar inmediatamente con una variación de tiempo igual al intervalo. Esto pues, para tiempos muy largos, el resistor equivalente se podría convertir en un circuito abierto lo que no entregaría una buena aproximación. Por esto se calculan variaciones de tiempo pequeñas y se resuelve el sistema en varias iteraciones hasta llegar a la variación de tiempo indicada. También hay problemas para variaciones de tiempo muy pequeñas convirtiendo el resistor en un corto circuito, por eso se debe tener cuidado al elegir un  $\Delta t$ . La versión no lineal de análisis transitorio cambia en que se usa un análisis no lineal en cada iteración, esto significa que en cada iteración de análisis transitorio se realizan las iteraciones necesarias de análisis no lineal. El diagrama de flujo en la figura 15 resume este proceso.

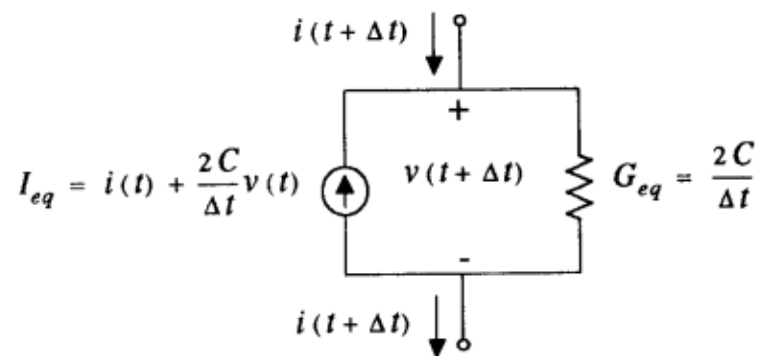


Figura 14: Modelo alternativo para un capacitor en el intervalo  $t$  y  $t + \Delta t$ .  
Fuente: [30].

Como se puede ver del estudio de [30], todos los modos de simulación se basan en el método de análisis lineal y en general, se puede describir el algoritmo de simulación en 3 pasos: transformación a un circuito lineal equivalente, estampado de la matriz y resolución del sistema de ecuaciones.

### 2.1.5. Newton-Raphson para Circuitos No lineales

Newton-Raphson es el método que se presenta en [30] para resolver circuitos no lineales. Se describe en los siguientes pasos:

Inicio:  $v_n = V_{inicial}$

Linealizar:  $f(v_n + \Delta v_n) \simeq f(v_n) + \Delta v_n \cdot f'(v_n) = 0$

Resolver:  $\Delta v_n = -\frac{f(v_n)}{f'(v_n)}$

Incrementar:  $v_{n+1} = v_n + \Delta v_n$

Verificar:  $|f(v_{n+1})| \leq \varepsilon$

Caso No: Volver a Linealizar con  $v_{n+1}$

Caso Si:  $v_{n+1}$  es el resultado

Donde  $v_n$  es el resultado a  $f(v) = 0$  en la  $n$ -ésima iteración y se busca continuar iterando hasta que se cumpla  $|f(v_{n+1})| \leq \varepsilon$ . Para ello  $\varepsilon$  es un valor que representa el máximo error que se tolera. Este método permite encontrar la solución a una ecuación pero los circuitos usualmente tendrán más de una por lo que es necesario extender al método de Newton multidimensional donde  $f(v) = 0$  representa un sistema de ecuaciones con un vector de incógnitas  $v$ . Para esto se necesita resolver una expresión del siguiente tipo en cada iteración:

$$J\Delta v = -f(v)$$



Figura 15: Flujo de análisis no lineal transitorio  
Fuente: Elaboración Propia.

Donde  $J$  es el jacobiano<sup>8</sup> de la función vectorial  $f$  respecto al vector  $v$ . Esta vez se quiere encontrar el valor de todas las variables en un vector  $v$ . Esto requiere que se calcule un incremento  $\Delta v$  vectorial. Se puede lograr usando un método de resolución de ecuaciones matriciales como factorización LU, de igual modo se resolvería el sistema de un circuito lineal invariante al tiempo de ahí que esta técnica se asemeja a resolver un problema lineal en cada iteración. Tal como en el caso lineal se usa un método de estampado para armar la matriz a resolver. Aquí se hará lo mismo con el jacobiano, linearizando los componentes de forma individual y estampándolos en la matriz. Se volverá a ver el ejemplo del diodo:

<sup>8</sup>Matriz cuyos elementos son las derivadas parciales de primer orden de una función vectorial

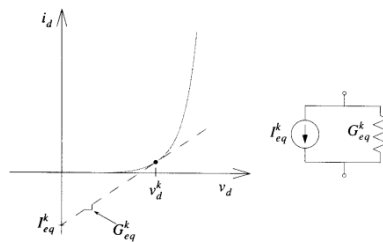


Figura 16: Gráfico del paso de linearización  
Fuente: [30].

Esta recta tangente tiene la siguiente ecuación:

$$i_d = i_d^k + G_{eq}^k (v_d - v_d^k)$$

Donde el par  $i_d^k$  y  $v_d^k$  son los valores corriente y voltaje conocidos en la iteración  $k$ . Como se puede ver, la tangente a la recta que usa el Método de Newton se puede entender como el modelo de una resistencia y fuente conectada a la rama, y se conoce cómo estampar estas en la matriz. Se pueden calcular los valores de  $G_{eq}^k$  y  $I_{eq}^k$  de la siguiente forma:

$$G_{eq}^k = \frac{di_d}{dv_d}(v_d^k)$$

$$I_{eq}^k = i_d^k - G_{eq}^k v_d^k$$

Y así la ecuación de la recta se puede representar alternativamente como:

$$i_d = G_{eq}^k v_d + I_{eq}^k$$

Este proceso se repite con todos los componentes hasta completar la matriz y resolviendo se encontrarían los valores  $i_d^{k+1}$  y  $v_d^{k+1}$  de cada componente que se usarán en la siguiente iteración. Como un último punto a añadir sobre esta técnica, está el hecho de que la forma de la función  $f$  afecta fuertemente a la convergencia del método, por lo que en algunos casos se necesita especial cuidado con el valor de  $\Delta v$  y  $V_{inicial}$ . Un  $\Delta v$  muy grande podría llevar a divergencias en funciones exponenciales. Otro problema es en el caso de que  $f(v) = 0$  tenga más de una solución, el resultado que se obtiene no necesariamente será el que corresponde. Por lo anterior si se busca la convergencia, la implementación de este método debe presentar dependencia con los modelos planteados para cada componente.

## 2.2. Simulación de Sistemas Hidráulicos

Contrario a las secciones previas aquí se entra en detalle sobre los conceptos físicos que rigen estos sistemas, además de estudiar las técnicas de simulación aplicadas para estos sistemas.

### 2.2.1. Principios de un sistema Hidráulico

Primero se considera importante revisar algunos de los principios y/o relaciones relevantes que existen en un circuito hidráulico. De [9] se extrae esta información. En el trabajo [9] se señalan como las ecuaciones más relevantes la de conservación de masa y la de conservación de energía. Con estas se pueden derivar expresiones que modelen un sistema hidráulico o partes de este en casos invariantes al tiempo. La más simple es la ley de conservación de masa que tiene dos formas:

$$\begin{aligned}\sum Q_{in} &= \sum Q_{out} \\ \sum \dot{m}_{in} &= \sum \dot{m}_{out}\end{aligned}$$

Donde  $Q$  y  $\dot{m}$  son el flujo expresado en volumen por segundo y masa por segundo respectivamente, el lado izquierdo de la ecuación contiene el flujo de entrada y el derecho el de salida. Como se puede esperar esta ley dice que toda la masa debe ser considerada. Es decir, esta no puede desaparecer, el flujo que entra es igual al de salida.

Sigue la ley de conservación de energía que se expresa de la siguiente forma para un flujo pasando por un sistema hidráulico cualquiera:

$$\frac{dQ_h}{dt} - \frac{dW}{dt} + \dot{m}C_pT_1 + \dot{m}\frac{p_1}{\rho} + \dot{m}\frac{v_1^2}{2} + \dot{m}h_1g = \dot{m}C_pT_2 + \dot{m}\frac{p_2}{\rho} + \dot{m}\frac{v_2^2}{2} + \dot{m}h_2g$$

Es importante notar que a pesar de que se le llama conservación de energía ambos lados de la ecuación están en unidades de energía por tiempo. Esto pues no se usa masa del fluido sino el flujo de masa que pasa en un segundo. Esto podría entenderse como una equivalencia de potencia pero es mejor que se entienda cómo que se evalúa la energía de la masa de fluido que pasa por el sistema en una unidad de tiempo. Para este caso  $C_p$  corresponde al calor específico del fluido y  $\rho$  la densidad del fluido, además  $T_i$  la temperatura,  $v_i$  la velocidad,  $p_i$  la presión,  $h_i$  la altura del fluido en un lugar y momento  $i$ , por último  $g$  es la gravedad.

La expresión  $\frac{dQ_h}{dt}$  corresponde a la transferencia de calor que entra al sistema, esta es una suposición que realiza el autor de [9], es posible que tome un valor negativo, y la expresión  $\frac{dW}{dt}$  representa el trabajo que produce el sistema, o sea es la energía que libera para cumplir su función por eso es negativa. Las expresiones restantes  $\dot{m}C_pT_i, \dot{m}\frac{p_i}{\rho}, \dot{m}\frac{v_i^2}{2}, \dot{m}h_i g$  corresponden a la energía calorífica, energía de la presión, energía cinética y energía potencial gravitatoria respectivamente.

Como señala el autor de [9] a partir de estas ecuaciones se pueden derivar expresiones para la mayoría de los componentes, la metodología consistiría en determinar cómo se comportan el fluido en entrada y salida del componente para luego reemplazar en la ecuación de conservación pertinente y simplificar la expresión lo más que se pueda. Aun así, también señala que existen excepciones como es el caso de los acumuladores<sup>9</sup> que se rigen por las leyes de los gases y por ende deben ser expresados tomándolas en cuenta.

<sup>9</sup>depósito en el que se mantiene un fluido a presión con el objetivo de almacenar energía

Se menciona antes que el autor de [9] considera las ecuaciones suficientes para sistemas invariantes al tiempo. Ahora, en el caso contrario o situaciones donde los efectos dinámicos que afectan el sistema se vuelven significantes, es necesario tomar en cuenta el efecto de la aceleración y la compresión o expansión del fluido. Se presenta la siguiente ecuación que relaciona el cambio de presión con el cambio de volumen:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{B_{eff}}{V} \frac{dV}{dt}$$

Aquí  $B_{eff}$  representa el módulo de compresibilidad<sup>10</sup> y  $V$  es el volumen. Adicionalmente el autor presenta la siguiente fórmula para el cambio de volumen:

$$\frac{dV}{dt} = \sum Q_{in} - \sum Q_{out}$$

Combinando ambas expresiones se llega a:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{B_{eff}}{V(t)} \left( \sum Q_{in} - \sum Q_{out} \right)$$

Se determina el cambio de presión para un tiempo  $t$  respecto al volumen en ese instante y la diferencia entre los flujos de entrada,  $Q_{in}$ , y salida,  $Q_{out}$ . El autor señala que para este caso los flujos pueden ser tanto reales (fluido que entra por un orificio) o pueden ser causados por el movimiento de las paredes del contenedor, un ejemplo sería el movimiento de un pistón<sup>11</sup>.

Para considerar la aceleración o dinámica de las partes móviles se aplica la segunda ley de Newton. El autor la expresa como el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales de segundo orden:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= v \\ \frac{dv}{dt} &= \sum_{i=1}^n F_i / m \end{aligned}$$

Las fuerzas en las partes móviles resultan de diferencias de presión, fricción viscosa, fricción de coulomb, gravedad y fuerzas de flujo. Un tipo de elemento en el que estos fenómenos se vuelven relevantes es el actuador, ya que este usa una diferencia de presión para causar el movimiento de una barra.

---

<sup>10</sup>Mide la resistencia a la compresión uniforme, o sea, indica la cantidad de presión requerida para una disminución unitaria del volumen

<sup>11</sup>Pieza de una bomba o del cilindro de un motor que se mueve hacia arriba o hacia abajo impulsando un fluido ,o bien, recibiendo el impulso de él

### 2.2.2. Componentes de un sistema Hidráulico

En la sección anterior se vieron los principios más relevantes que rigen un sistema Hidráulico. Ahora se estudiarán sus componentes y cómo distintos autores los han modelado. Los sistemas hidráulicos están conformados principalmente por: depósitos para guardar el fluido, bombas para forzar al fluido a través del circuito, válvulas para controlar la presión y flujo del fluido, y actuadores para convertir la energía hidráulica en energía mecánica [12]. Se pueden representar estos elementos con **resistencias**, definidas como el cambio de potencial necesario para el cambio unitario de corriente, y **capacitancias**, definidas como cambio en cantidad de material o distancia para un cambio unitario de potencial [12]. Matemáticamente se definen de las siguientes maneras:

$$\begin{aligned} \text{Resistencia } R &= \frac{\text{Cambio en presión diferencial}}{\text{Cambio en razón de flujo}} \\ \text{Resistencia } R &= \frac{\text{Cambio en altura diferencial}}{\text{Cambio en razón de flujo}} \\ \text{Capacitancia } C &= \frac{\text{Cambio en cantidad de liquido}}{\text{Cambio en presión}} \\ \text{Capacitancia } C &= \frac{\text{Cambio en cantidad de liquido}}{\text{Cambio en altura}} \end{aligned}$$

Se puede observar que  $R$ , resistencia, para un elemento del circuito hidráulico, como una tubería o válvula, por ejemplo, se puede definir como la variación de presión o altura sobre la razón de flujo, el valor de la resistencia depende del componente, pero esta relación dice que a mayor diferencia de presión entre dos nodos se tiene mayor flujo. La capacitancia  $C$ , por otra parte, se define como la variación en la cantidad de líquido sobre el cambio en presión o altura. Esta es una propiedad de elementos como tanques que guardan cierto volumen de líquido, por lo tanto, esta relación permite determinar la cantidad de fluido que se necesita para un cambio en la presión.

Como se puede entender, se usa presión y altura como una fuente de potencial que suministra un flujo o corriente en el sistema. Estos conceptos son equivalentes a algunos ya vistos en circuitos electrónicos, lo que permite definir un sistema equivalente, transformando de hidráulica a electrónica. Este modelo, propuesto en [12], es visto con más detalle en [9] donde se explica que el paso de circuito hidráulico a electrónico no es necesariamente uno a uno. Para empezar el flujo y la diferencia de presión se relacionan a través de la resistencia de la siguiente forma:

$$\sqrt{\Delta p} = RQ$$

En [9] se obtiene esta conclusión comparando la relación entre flujo y presión de varios componentes al observar que todos tenían la forma  $p = f(Q^2)$ . El más grande impacto está en los cálculos de resistencia equivalente, ya que calcular esta es una forma clásica de resolver circuitos, se puede ver el cálculo de esta para  $n$  resistencias en el caso paralelo y en serie de

la siguiente forma:

$$\frac{1}{R_{par}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}$$

$$R_{ser}^2 = \sum_{i=1}^n R_i^2$$

Si bien el caso en paralelo,  $R_{par}$ , no difiere del caso eléctrico, se ve que en serie,  $R_{ser}$ , el valor al cuadrado del equivalente corresponde a la suma cuadrada de las resistencias del sistema. Estos resultados deben ser tomados en cuenta al momento de intentar resolver un circuito hidráulico como uno electrónico. La propuesta de [12] sigue siendo válida en casos donde la precisión de los valores no sea tan necesaria y prime más la velocidad de resolución. Se podría optar por esta mirada simple y tratar la transformación como uno a uno y probablemente obtener resultados satisfactorios. Aun así, en general y si nada lo impide, es mejor optar por el resultado de [9] para un resultado más preciso. En [12] se presenta un circuito de ejemplo con tres tanques en serie, se puede ver el diagrama de este y su versión equivalente electrónica en las siguientes figuras:

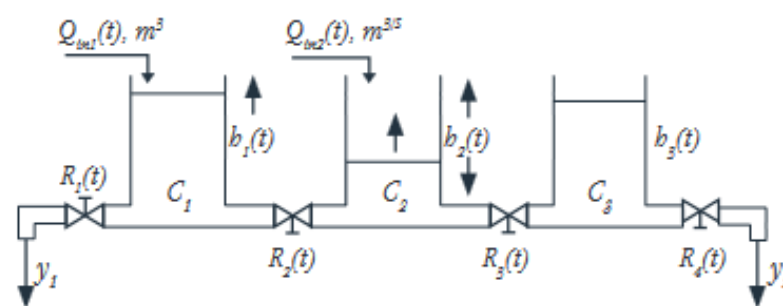


Figura 17: 3 Tanques en serie  
Fuente: [12].

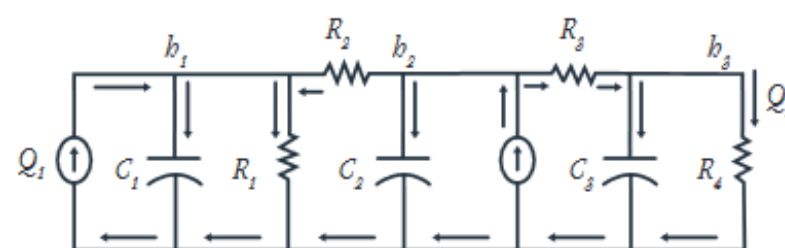


Figura 18: Modelo equivalente para 17  
Fuente: [12].

En [18] se propone una estrategia de modelado bastante similar, de forma más detallada, definiendo los principales elementos de circuitos hidráulicos como: bombas, volúmenes, resistores de flujo y actuadores. Ellos son equivalentes a las bombas, depósitos, válvulas y actuadores definidos en [12]. Se añade a la definición de volumen o depósito la propiedad de que estos pueden comportarse tanto como capacitores, almacenando energía por medio de la presión del fluido, e inductores, almacenando energía en base a la inercia generada por el

flujo del fluido. El trabajo por [18] va más adelante, definiendo, además, puertos para representar las conexiones entre los elementos del circuito, estos son *puertos hidráulicos* usados para conectar volúmenes con otros elementos hidráulicos, *puertos de control* para aquellos elementos que pueden recibir señales de control como válvulas *on/off* u orificios de tamaño variable, y *puertos mecánicos* que definen un punto de interacción entre el sistema hidráulico y uno mecánico.

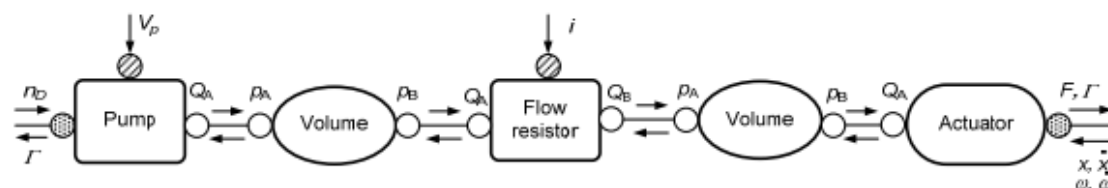


Figura 19: Diagrama usando Puertos  
Fuente: [18].

Como se menciona los *puertos hidráulicos*( $\circ$ ) se usan en conexiones entre volúmenes y los otros elementos, en estos se tiene un **output** de presión desde los volúmenes, pero en resistores y actuadores ambos presentan un output de flujo. Los *puertos Mecánicos*( $\bullet$ ) permiten el funcionamiento de una simulación hidráulica con una simulación mecánica de forma simultánea, esta idea presenta interés para el problema de simulación eléctrica junto a simulación hidráulica, por lo que será discutida más adelante.

Los *puertos de control*( $\otimes$ ) reciben señales externas, estas pueden venir de un usuario que busca manipular el sistema o podrían formar parte de algún otro sistema, como el ya mencionado mecánico, que puede enviar señales a medida que el sistema hidráulico interactúa con el exterior. Como pequeño ejemplo imaginen un circuito que envíe flujo a un actuador (*puertos Mecánicos*) el cual empuja una palanca de una válvula (*puertos de control*) este circuito generaría su propia señal de control a través del sistema mecánico, por lo tanto sería correcto decir que los *puertos de control*, al igual que los *puertos Mecánicos*, permiten la comunicación entre dos sistemas.

En los siguientes párrafos se continuará con el modelo de [18], se explicarán los modelos matemáticos usados para cada elemento. Estos se modelan en [18], como sistemas de parámetros concentrados (*lumped-parameter system*<sup>12</sup>) por lo que justifica su descripción como ecuaciones diferenciales ordinarias.

### 2.2.3. Modelo Bomba

Para el modelo de una Bomba se consideran las pérdidas mecánicas y volumétricas. Para calcular estas, se usan datos medidos de forma experimental, creando modelos realistas y eficientes de las funciones de pérdida. Uno de los mejores métodos es el uso de un ajuste polinomial con los datos ya que no requiere muchas medidas y muestra bastante precisión.

<sup>12</sup>Sistema donde los parámetros solo dependen del tiempo

En forma resumida, el modelo de la bomba expresa el flujo  $Q$  como una función de  $n_D$  velocidad rotacional del eje ( $[rad/s]$ )<sup>13</sup>,  $V_p$  desplazamiento volumétrico ( $[m^3/rad]$ )<sup>14</sup> y la presión presente en los puertos de entrada y salida. El autor no explicitó la formula de este modelo, pero presentó modelos para todos los demás. Considerando las definiciones de  $V_p$  y  $n_D$  se puede decir que  $n_D V_p$  es un valor posible para el flujo que sale de la bomba pero aun sería necesario calcular las pérdidas mencionadas antes y el efecto de la presión en la entrada y la salida. Si se apoya en [27] es posible encontrar una forma de modelar la bomba, similar a lo mencionado en [18] con la siguiente formula:

$$Q = n_D V_p - K_{ps} p$$

Donde  $K_{ps}$  es el coeficiente de fugas internas de la bomba, este depende de la geometría de la bomba y la viscosidad del fluido, y  $p$  es la presión a la que se somete la bomba. Para el modelo completo propuesto por [18] se necesita considerar a fondo las pérdidas mecánicas y volumétricas. Como el alcance de este trabajo va más allá de solo la bomba este detalle se omite al menos en esta sección.

#### 2.2.4. Modelo Volumen

Para los volúmenes, el trabajo en discusión presenta dos casos: volumen de **tamaño fijo** y **tubería corta**. En ambos casos las ecuaciones que describen su dinámica son de la ley de conservación de masa en *volúmenes de control*<sup>15</sup>. Para el caso de **tamaño fijo** se considera un capacitor donde la tasa de energía, en términos de presión, se expresa como el flujo neto  $Q$  que entra en un volumen de control  $V$ . El problema se representa usando la ecuación de generación de presión:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{B_{eff}(p)}{V} \left( \sum Q - \frac{dV}{dt} \right)$$

$B_{eff}$  corresponde al *módulo de compresibilidad*<sup>16</sup> efectivo del fluido. Como  $\frac{dV}{dt} = 0$  para el caso de un volumen de tamaño fijo se puede simplificar la expresión como:

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dt} &= \frac{B_{eff}(p)}{V} \left( \sum Q \right) \\ \frac{dp}{dt} &= \frac{1}{\frac{V}{B_{eff}(p)}} \left( \sum Q \right) \\ \frac{dp}{dt} &= \frac{1}{C} \left( \sum Q \right) \end{aligned}$$

<sup>13</sup>Giros por segundo que realiza el eje de la bomba

<sup>14</sup>Volumen desplazado por rotación del eje de la bomba.

<sup>15</sup>Volumen por el que se mueve un continuo de tal forma que la masa que entra y sale sean iguales, un volumen arbitrario que no cambia

<sup>16</sup>Mide la resistencia a la compresión uniforme, o sea indica la cantidad de presión requerida para una disminución unitaria del volumen

La expresión anterior se convierte en algo muy similar a la relación entre corriente y voltaje de un capacitor, por lo que se encuentra  $C = \frac{V}{B_{eff}(p)}$  un valor de capacitancia equivalente para este modelo. En el caso de **tubería corta** se consideran las pérdidas de presión del fluido a lo largo de una tubería y también los efectos inerciales causados por la aceleración del fluido en dicho tramo. El autor representa el modelo como dos volúmenes de **tamaño fijo** conectados por un resistor de flujo:

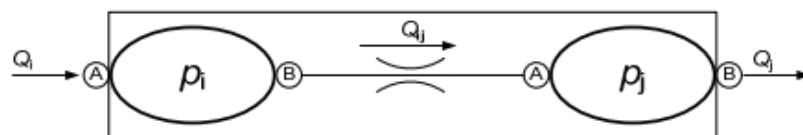


Figura 20: Modelo Volumen de Tubería corta  
Fuente: [18].

Las presiones  $p_i$  e  $p_j$  se modelan con la ecuación de **tamaño fijo** ya descrita. Las pérdidas provenientes del desplazamiento del fluido a lo largo de la tubería son descritas en la siguiente ecuación:

$$p_{loss} = \frac{128v\rho LQ}{\pi D^4} + \frac{8\rho\xi Q|Q|}{\pi^2 D^4}$$

Donde  $v$  corresponde a la viscosidad del fluido,  $\rho$  la densidad del fluido,  $L$  el largo de la tubería,  $D$  el diámetro de la tubería,  $Q$  el flujo volumétrico y  $\xi$  el coeficiente de resistencia. Este último se determina experimentalmente de acuerdo con los cambios en la geometría de la tubería. Además, se pueden encontrar valores tabulados en [25]. Para los efectos inerciales el autor usa la ecuación de la segunda ley de Newton para una masa de fluido concentrado:

$$\frac{dQ_{ij}}{dt} = \frac{A}{\rho L} (\Delta p_{ij} - p_{loss})$$

Donde la nueva variable  $A$  corresponde a la sección transversal de la tubería. Reemplazando  $p_{loss}$  en la ecuación de efectos inerciales se describen tanto las pérdidas como los efectos inerciales en una ecuación. Por todo lo anterior el modelo completo de volumen de **tubería corta**, propuesto en [18], es el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias:

$$\begin{aligned} \frac{dp_i}{dt} &= \frac{B_{eff}}{\frac{1}{2}AL} (Q_i - Q_{ij}) \\ \frac{dp_j}{dt} &= \frac{B_{eff}}{\frac{1}{2}AL} (Q_{ij} - Q_j) \\ \frac{dQ_{ij}}{dt} &= \frac{A}{\rho L} \left( p_i - p_j - \left( \frac{128v\rho LQ}{\pi D^4} + \frac{8\rho\xi Q|Q|}{\pi^2 D^4} \right) \right) \end{aligned}$$

### 2.2.5. Modelo Resistor de flujo

Se continúa con el modelo para resistores de flujo, los cuales disipan la energía del fluido transformándola en calor. El autor define el orificio como una restricción súbita y corta. Este

es el elemento resistor más elemental que puede usarse para modelar resistores más complejos. Los resistores son caracterizados por funciones tipo  $Q = f(\delta p)$  en el caso del orificio se suele usar la ecuación de flujo turbulento  $Q = K\sqrt{(\Delta p)}$ , siendo  $K$  un coeficiente de flujo variable, pero su jacobiano presenta una singularidad en el origen. Para eludir este problema se presenta una alternativa del trabajo de [17] que consiste en la siguiente función por partes:

$$Q = \begin{cases} C_q A \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} & \text{si } \Delta p > \Delta p_{tr} \\ \frac{3AvRe_{tr}}{4d} \frac{\Delta p}{\Delta p_{tr}} \left(3 - \frac{\delta p}{\delta p_{tr}}\right) & \text{si } 0 < \Delta p < \Delta p_{tr} \end{cases}$$

$C_q$  corresponde al coeficiente de descarga de flujo<sup>17</sup>,  $Re_{tr}$  es el número de Reynolds<sup>18</sup>, y  $\Delta p_{tr} = \frac{9v^2 Re_{tr}^2 \rho}{8DC_q^2}$  corresponde al valor de transición donde cambia la función para evitar la singularidad en el origen, pero mantiene valores similares a la original. El autor menciona otros ejemplos de resistores, si bien, no serán explicados en este trabajo, cabe mencionar que lo principal en modelo de resistores es encontrar la relación  $Q = f(\Delta p)$  que mejor modela el elemento, usando el orificio como un subcomponente donde sea pertinente.

### 2.2.6. Modelo Actuador

Por último, se explican los modelos de actuadores. Un propósito de los sistemas hidráulicos es generar poder mecánico, por eso los actuadores son de gran importancia.

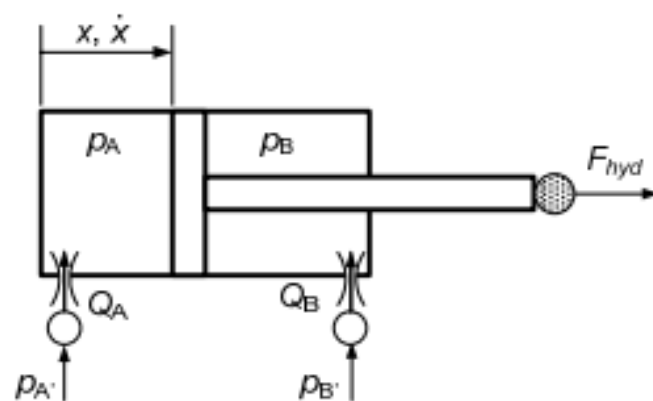


Figura 21: Actuador de cilindro doble  
Fuente: [18].

En un actuador de cilindro doble, por ejemplo, se tienen dos cámaras que se llenan de fluido generando una presión que puede mover la barra, lo que genera poder mecánico. Las presiones  $p_a$  y  $p_b$  en ambas cámaras siguen el modelo de un volumen tamaño fijo, los flujos

<sup>17</sup>Razón entre descarga real y descarga ideal en un punto

<sup>18</sup>Relación entre fuerzas inerciales y viscosas de un fluido, su valor indica si el flujo sigue un modelo laminar o turbulento

$Q_a$  y  $Q_b$  vienen del modelo de orificio, por lo tanto, con estas variables se puede determinar  $F_{hyd}$  fuerza que se transmite a un sistema mecánico. Las ecuaciones que determinan el comportamiento de  $p_a$  y  $p_b$  son las siguientes:

$$\frac{dp_a}{dt} = \frac{B_{eff}}{A_a x} \left( Q_a - \frac{dx}{dt} A_a \right)$$

$$\frac{dp_b}{dt} = \frac{B_{eff}}{A_b (x_{max} - x)} \left( Q_b + \frac{dx}{dt} A_b \right)$$

Como se mencionó anteriormente, se usa el modelo de tamaño fijo, pero se agrega el valor  $x$  y  $\frac{dx}{dt}$  de posición y velocidad del pistón, de esta forma se considera el cambio de volumen de cada cámara. La fórmula de  $F_{hyd}$  se obtiene de la sumatoria de fuerzas siendo  $F_{hyd}$  la fuerza neta:

$$F_{hyd} = p_a A_a - p_b A_b - F_\mu - F_{ext}$$

Las expresiones  $p_a A_a$  y  $p_b A_b$  corresponden a las fuerzas generadas por los fluidos, por la presión que ejercen.  $F_\mu$  corresponde a la fuerza de roce, dependiendo del detalle que se necesite en la simulación, podría ser despreciada. En caso contrario se tiene que presentar un modelo para su comportamiento.  $F_{ext}$  es la fuerza externa proveniente del sistema mecánico con el que se comunica el actuador, por lo anterior su valor viene dado por un simulador de mecánica. El simulador hidráulico solo necesita "preguntar" esa información en cada iteración. Uniendo todas las ecuaciones anteriores se tiene un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias que modela un actuador.

En los párrafos anteriores se hizo referencia al trabajo de [18] y los cuatro elementos principales de un circuito hidráulico al cual se añaden con los modelos propuestos en dicho trabajo. Lo más destacable es que, al definir estos elementos básicos se pueden armar elementos más complejos, como en el caso del actuador que se arma con volúmenes y orificios. Por lo anterior, es importante que los modelos básicos estén bien definidos y así se podrán simular elementos más complejos.

### 2.2.7. Diagrama de bloques

Esta técnica se presenta en [9], combinada con transformadas de Laplace, como una forma de resolver el sistema de ecuaciones diferenciales asociado a un circuito hidráulico lineal<sup>19</sup> que incluya *feedback*<sup>20</sup> y/o un elemento de control. Uno puede decir que el conjunto de ecuaciones diferenciales es la forma más "procesada" de un modelo, puesto que puede actuar como entrada a cualquier algoritmo que resuelva estos sistemas y encontrar el estado del sistema.

Pero aunque es un formato de fácil comprensión para una máquina, no lo es para los humanos. Lo anterior, ya que no podrían concluir mucho sobre la naturaleza del sistema solo

<sup>19</sup>Para el contexto del texto desde que se extrajo el método [9] hace referencia a un sistema representado por ecuaciones diferenciales ordinarias con coeficientes constantes

<sup>20</sup>Fenómeno en que una salida de un sistema es enviada como entrada a este mismo

viendo las ecuaciones. En caso contrario, un dibujo o diagrama permite un mejor entendimiento humano, pero no es apto para la máquina.

Un diagrama de bloques consiste en un enlace entre el sistema físico y su sistema de ecuaciones diferenciales. Esto es un punto medio entre las dos situaciones antes descritas, pues, por un lado, ofrece un formato que puede servir como entrada a una máquina y por otro, tiene una forma visual que puede ser entendida por un operador humano.

La metodología para confeccionar el diagrama es bastante simple y se puede resumir en dos pasos: primero se deben encontrar las expresiones de los componentes en la forma  $f(In) = Out$ . En el lado izquierdo se tiene una función que recibe una entrada  $In$  y el lado derecho solo tiene la salida  $Out$ . Esto formara el "bloque" que representa el componente.

El siguiente paso será conectar estos "bloque" de la misma manera que se conectan los componentes del sistema real, para ello, se debe tener especial cuidado en el flujo que va de componente a componente pues no siempre representan lo mismo. En algún momento se puede pasar una salida de presión como entrada que posteriormente se transforma en una salida de corriente. En la siguiente imagen se presentan algunas propiedades de diagramas de bloques:

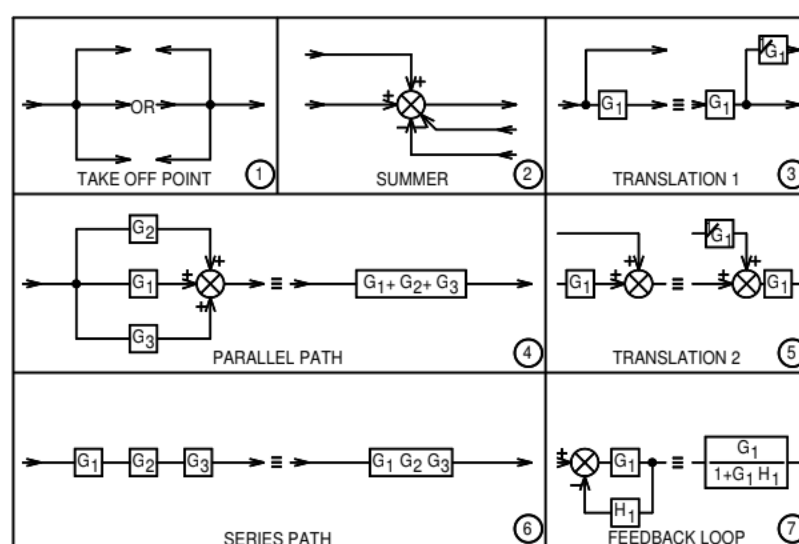


Figura 22: Características de diagrama de bloques  
Fuente: [9].

El punto 1 de 22 muestra lo que es un *take off point* que hace referencia a un punto donde se separa el flujo en varios caminos, el valor de este flujo se mantiene igual en cada uno de estos. El punto 2 muestra un bloque *summer* el cual suma los flujos que entran a este. Del punto 3 en adelante todos son equivalencias que pueden usarse para simplificar un diagrama sin cambiar el sentido, donde los bloques  $G_i$  son constantes que multiplican el flujo que pasa por estos.

Existen dos usos para el diagrama de bloques, el primero es transformar el diagrama desde el dominio del tiempo a un dominio  $s$  con transformadas de Laplace y posteriormente reducir el diagrama en un bloque que consiste en una razón de polinomios. Transformando este bloque de vuelta al dominio de tiempo se simula el sistema aunque como se señala en [9] hay mejores métodos para resolver las ecuaciones diferenciales, por tanto, volvieron obsoleta esta solución. Aún así, este único bloque en el dominio de Laplace puede ser usado para

un estudio de la estabilidad del sistema<sup>21</sup>.

El segundo uso consiste en ignorar las transformadas de Laplace y trabajar con el diagrama en el dominio de tiempo, esto permite agregar bloques/componentes no lineales. En el procedimiento anterior solo se consideraban lineales, y posteriormente se procedió a analizar y formular el sistema de ecuaciones para resolver dicho diagrama para su simulación.

La siguiente figura muestra un ejemplo del uso de diagramas de bloques:

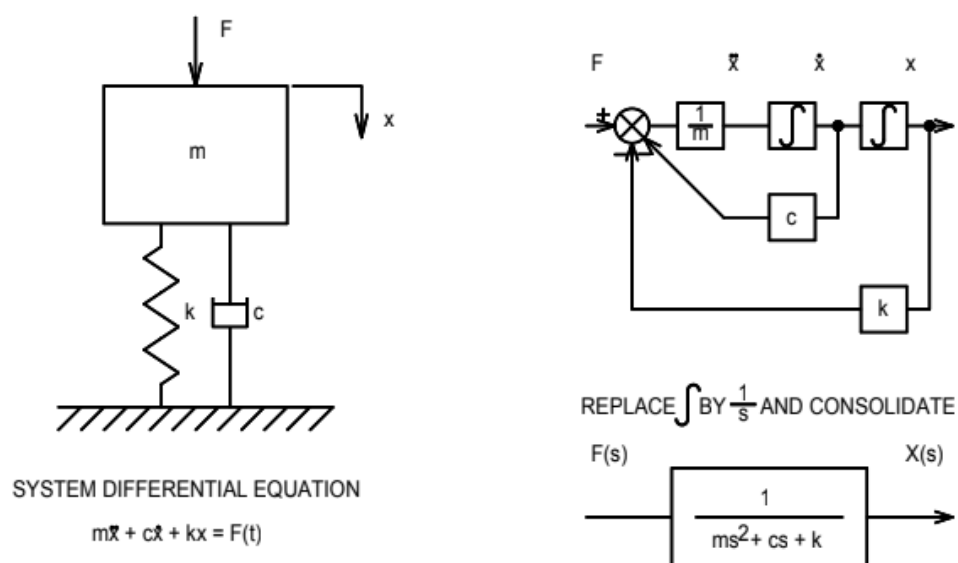


Figura 23: Ejemplo Diagrama de bloques  
 Fuente: [9].

En este ejemplo se aprecia una masa  $m$  sostenida por un resorte y un actuador hidráulico,  $x$  corresponde a la posición de la masa y en base a esta se puede expresar la sumatoria de fuerzas en un momento  $t$  como  $F(t) - c\dot{x} - kx = m\ddot{x}$ .

Donde  $kx$  y  $c\dot{x}$  son las fuerzas ejercidas por el resorte y actuador respectivamente,  $F(t)$  es una función que representa el comportamiento de la fuerza de entrada, y  $m\ddot{x}$  es la fuerza neta. El diagrama de bloques que lo representa entrega como salida la posición de la masa  $m$  y consiste en un bloque constante  $\frac{1}{m}$  que convierte la fuerza entregada por el *summer* en aceleración, posteriormente pasa por un bloque  $\int$  que la convierte en velocidad y al pasar por un segundo  $\int$  en posición. Los dos flujos de *feedback* restan a la fuerza inicial la fuerza generada por el resorte y el actuador, sería correcto decir que  $(c \int)$  y  $(k \int)$  son bloques que representan al actuador y al resorte, pero en este diagrama existen en bloques separados para poder usar fuerzas como input y *feedback* y terminar con posición de output.

Como se señala la transformada de Laplace de  $\int$  es  $\frac{1}{s}$  los demás bloques al ser constantes se mantienen y usando las propiedades de la figura se puede llegar al bloque unificado  $\frac{1}{ms^2 + cs + k}$ . Esto se considera una función de transferencia<sup>22</sup> y al multiplicarla por una función  $G(s)$  que represente la entrada del sistema tendrá un  $S(s)$  que representa la salida que, si se transforma al dominio de tiempo  $t$ , puede simular el sistema.

El  $G(s)$  que se mencionó es la transformada de Laplace de  $F(t)$ , o sea, la fuerza de entrada. Para determinar la estabilidad se puede probar distintas  $F(t)$  y ver el comportamiento

<sup>21</sup>Para este contexto se refiere a un sistema estable cuando no contiene salidas que crecen exponencialmente con cambios lineales en las entradas

<sup>22</sup>Función que relaciona la entrada de un sistema con la salida

de  $S(s)$ , pero gracias a [9] se puede definir si un sistema es estable solo con la función de transferencia, tal como dice en su trabajo, a saber que: un sistema es estable si en su función de transferencia todas sus raíces son negativas en su componente real. Aun así, si se quiere simular el sistema es recomendable probar la función de transferencia con algún  $G(s)$  sinusoidal para una prueba de respuesta en frecuencia que permitirá encontrar un valor de control que se puede añadir al modelo o sistema para que este se comporte como estable, el procedimiento exacto no será discutido de momento pero puede ser revisado en [9]. Se destaca, por último, que la metodología de diagrama de bloques tiene el potencial de adaptarse bien a interfaces visuales. A medida que se posicionan componentes y se realizan conexiones en algún ambiente virtual, se crearían los bloques y sus conexiones lo que sería bastante intuitivo para desarrolladores.

### 2.2.8. Resultados de otros trabajos

En esta sección se agrupan breves descripciones de trabajos con objetivos similares a esta investigación y se exponen sus resultados.

En [22] se realiza una propuesta para un *software* simulador de circuitos neumáticos, la cual abarcaba tanto el funcionamiento del simulador como los aspectos de interfaz e interacción usuaria. Es bueno agregar que este *software* está dirigido a los estudiantes de una asignatura que necesita práctica en confección de circuitos neumáticos, contexto muy similar al de esta memoria. La propuesta se basa en OMT *Object-Modeling Technique* o en español Técnica de Modelado de Objetos. Ella consiste en usar programación orientada a objetos (POO<sup>23</sup>) para crear una representación del sistema.

Se programan clases para el circuito y componente. El circuito es el encargado de administrar los componentes y el proceso de simulación. En el caso del componente es una “plantilla” de elementos que a través de herencia<sup>24</sup> permite crear clases para cada componente dentro del alcance del *software*. La clase circuito se relaciona con componentes en una relación uno a muchos y se decidió agregar las conexiones entre componentes como un campo de circuito. En el caso de componentes los campos varían dependiendo del componente específico.

El circuito tiene programado un método de simulación que capta y llama al método de ejecución de cada componente. En este proceso, cada elemento recibe sus entradas y genera sus salidas junto con cambiar su estado enviando la información pertinente a circuito para simular el flujo del gas.

El autor de [22] afirma que obtuvo buenos resultados para simulación con este método, a pesar de esto se señala que una desventaja de su estrategia es que se tendrán que programar nuevas clases si se necesitan simular nuevos componentes. Además se debe tener cuidado de que el método de ejecución de esta clase sea compatible con el funcionamiento de la clase circuito y otros componentes ya creados.

En resumen, este *software* vivirá mientras los componentes concuerden con el currículum

---

<sup>23</sup>Paradigma de programación que parte del concepto de objetos como base, los cuales contienen información en forma de campos y código en forma de métodos.

<sup>24</sup>método para crear clases reutilizando clases viejas, heredando sus métodos y campos

del curso que lo usa. Cuando el currículum cambia se necesitará una actualización para no quedar obsoleto. Cabe agregar que la desventaja descrita es típica en esta clase de *software* simuladores y puede manejarse bastante bien con buena modularización y documentación. En [28] se presenta el software de dominio publico *EPANet* desarrollado por la *Environmental Protection Agency* (EPA) para el análisis de sistemas de distribución de agua potable. Este tiene la capacidad de encontrar valores de caudal y presión para tuberías y nodos respectivamente. Adicionalmente puede calcular la calidad de agua y el tiempo de viaje de esta entre nodo y nodo. Para esto se requiere la información de estructura de la red, y de demanda en los nudos. Además de poder modelar tuberías y nodos con una demanda de fluido, es también capaz de modelar depósitos, bombas y válvulas, siendo el único elemento faltante el actuador para modelar circuitos hidráulicos del contexto de este trabajo.

Señala el autor en [28] que cada problema al que se enfrente el sistema requiere una solución particular. Ello deja claro que *EPANet* es una potente herramienta para proyectos que necesitan un elevado número de simulaciones hidráulicas, el cual puede/debe expandirse por el usuario para resolver bien el problema a explorar. *EPANet* puede ser usado desde entornos de programación como *C/C++*, *Visual Basic* y *Matlab*, y además se encuentra una librería de este para *javascript* que facilita su uso en aplicaciones de servidor. Si bien, *EPANet* no trabaja precisamente en el mismo contexto que esta memoria se destaca de todas maneras ya que tiene las capacidades suficientes para ser considerado una posible base para trabajos de simulación hidráulica. Ya se decida o no usar este se discutirá en la sección de *Propuesta de solución*.

En los estudios de [23] y [24] se presenta un modelo en base a un análisis térmico de una bomba de pistón y un actuador electro-hidrostático respectivamente. Estos trabajan con ecuaciones de conservación de energía y transferencia de calor entre las distintas partes del componente (entradas, salidas, cámaras, etc) para modelar y analizar la temperatura del sistema. Construyen el modelo siguiendo pasos muy similares a lo descrito al inicio de la sección y en ambos casos se obtuvieron buenos resultados.

También en el último estudio de [24] se señala la ventaja de modelar de esta forma con un enfoque de parámetros concentrados (*lumped-parameter method*<sup>25</sup>) por ser más flexible sobre herramientas de software ya existentes para componentes hidráulicos especiales como fue el caso del actuador electro-hidrostático la cual fue considerada por este como una nueva tecnología.

En [33] se usó *SIMUSOL*, un simulador de sistemas de energía solar, que en este caso se utilizó para simular sistemas hidráulicos. Se logró aplicando la analogía entre circuitos eléctricos e hidráulicos combinado con algunas particularidades de *SIMUSOL*, como es que este trabaja directamente sobre los valores numéricos entregados y no considera un sistema de unidades. Al final del trabajo se comprueba que existe una relación no solo conceptual sino simbólica y matemática, entre los sistemas eléctricos e hidráulicos. Ello permite usar un programa concebido para el estudio de sistemas térmicos solares para resolver problemas que involucran diferentes tipos de fluidos.

Se puede ver el modelado de un sistema híbrido en el trabajo [40] donde se modela un sistema hidráulico de cambios para un vehículo, el cual, operaba con una válvula de solenoide la

---

<sup>25</sup>Simplificación de un sistema físico en una topología de elementos discretos

cual hace uso de un circuito magnético para cambiar su estado y redirigir el flujo. La válvula en cuestión consta de una bola en su interior sujeta a un resorte y posicionada frente a un solenoide, la diferencia entre fuerza magnética y elástica determinan la posición de la bola y esto a su vez determina cómo se conectan internamente los puertos de la válvula.

Para considerar la dinámica de esta bola se usó una ecuación de campo magnético relativa a la ley de Faraday para posteriormente calcular la fuerza magnética y hacer un equilibrio de fuerzas con la resistencia del resorte, es importante para el caso considerar la velocidad con que crece o decrece la fuerza magnética respecto a la corriente en el solenoide para representar correctamente esta dinámica.

Para este y los demás componentes, cuando se trata de modelar el flujo y presión, el autor tomó especial concentración en los puertos de entrada y salida aplicando la ecuación de modelo de orificio en su gran mayoría. También tomó consideraciones del cambio de *flujo laminar a flujo turbulento* para mantener un modelo estable cuando la presión se acerca a 0. Todas estas son técnicas ya discutidas al principio de la sección.

Al final del trabajo, logra un modelo que representa bastante bien la realidad. Indica además, que la consideración de las dinámicas del solenoide fue necesaria para este resultado, ya que sin atender a estas, el modelo logra resultados muy poco realistas.

Por último, señala que la complejidad de este modelo es alta porque lo recomienda para aplicaciones *offline*<sup>26</sup> mientras que su uso en sistemas *online*<sup>27</sup> requiere simplificar el modelo y lo propone como un trabajo futuro.

Se encuentra un software que incluye simulación de circuitos hidráulicos con fines educativos llamado *Automation Studio* desarrollado por la empresa **Famic Technologies** [3], este consiste en una *aplicación de escritorio*<sup>28</sup> con distintas bibliotecas de componentes, los cuales, el usuario puede usar para armar circuitos y observar su comportamiento, de forma visual a través de animaciones y también a través de gráficos de las variables pertenecientes al circuito que elija el usuario.

Es posible modificar los parámetros de los componentes y también programar fallas si alguna variable alcanza cierta condición. Con esto se pueden crear bibliotecas personalizadas con componentes y circuitos específicos a un ejercicio de laboratorio.

En [19] se puede ver la interfaz, donde se arrastran los componentes en un *canvas* para armar el circuito. Se accede a las *hojas de cálculo* de los componentes para modificar sus parámetros, en caso de no conocer un parámetro el sistema ofrece ecuaciones para calcular estos en base a otros parámetros. Se pueden seleccionar variables para mostrar en un gráfico junto con las animaciones del circuito. Se puede también, controlar la velocidad de simulación haciéndola normal, cámara lenta o incluso paso a paso. Visualmente los componentes se representan con símbolos acorde a los estándares *ISO 1219-1:1991/2012* y *1219-2:1991/2012* pero también se ofrecen representaciones de aspecto más realista para mejorar las habilidades de trabajo con piezas reales.

Otro software similar al anterior es *FluidSim*. Un programa de simulación y diseño de esquemas de circuitos para la neumática, la hidráulica y la electrotécnica[4]. Actualmente, en su

---

<sup>26</sup>Que no se conectan o no funcionan con internet

<sup>27</sup>Que funciona con internet

<sup>28</sup>Una aplicación de escritorio, es aquella que se encuentra instalada en el ordenador y se puede ejecutar sin internet

sexta versión, sus cualidades más destacables son su capacidad para ser usado como sistema de control en sistemas reales siendo compatible con el estándar industrial OPC-UA<sup>29</sup> y su modo de trabajo con GRAFCET<sup>30</sup> para fácilmente añadir lógica en los circuitos[15].

Un punto débil de este software es que no posee representaciones visuales semejantes a la realidad de los componentes y trabaja en su lugar con símbolos simples[37]. El software *Automation Studio* y *FluidSim* son bastante parecidos a *Electrosim*, el simulador desarrollado en YOY sobre el cual está trabajando la presente memoria, pero al no ser aplicaciones de código abierto, no se tiene acceso al código fuente de estos simuladores para verificar sus algoritmos.

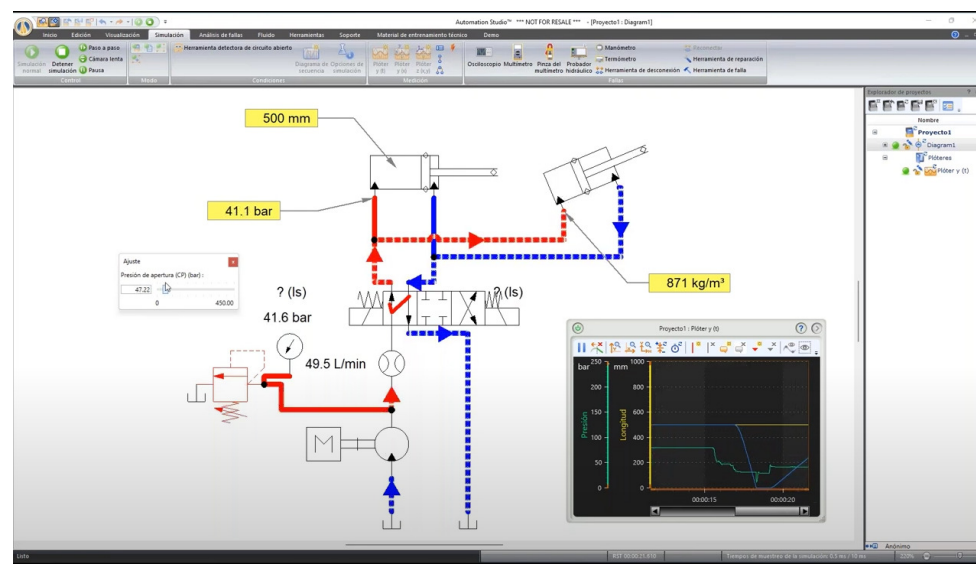


Figura 24: Interfaz de *Automation Studio*  
Fuente: [19].

Se pasará a mencionar otros software que simulan otros tipos de circuitos/sistemas hidráulicos. Se tiene *SWMM (Storm Water Management Model)* un programa de escritorio para distribuciones de *Windows* de código abierto gratuito para su uso en todo el mundo [38]. Este está centrado en la simulación de sistemas y/o redes de drenaje para ayudar a la gestión de aguas pluviales. Se pueden modelar caminos, superficies, tuberías, etc para observar el movimiento del agua proveniente de fenómenos hidrológicos como la lluvia. Con esto se obtienen resultados en forma de gráficos o tablas, entre otras formas, para analizar la red de drenaje y otros aspectos como el porcentaje de polución en el agua. También es capaz de modelar infraestructuras verdes que usan vegetación y tierra para absorber y evaporar el agua [38].

Existe otro software gratuito, bastante similar al anterior llamado *HEC-RAS* cuya principal diferencia consiste en que, en vez de enfocarse en sistemas de drenaje este se especializa en simular flujos en ríos, canales o cauces naturales o artificiales para determinar el nivel de agua. Ello da, como objetivo principal, realizar estudios de inundabilidad y determinar zonas inundables[31].

*Iber* es otro software para la simulación de flujo en ríos como *HEC-RAS*[20]. Se diferencian en que *Iber* ofrece modelamiento bidimensional mientras que *HEC-RAS*, principalmente, ofrece

<sup>29</sup>Arquitectura Unificada de Comunicaciones de Plataforma Abierta

<sup>30</sup>Modelo de representación gráfica, de los sucesivos comportamientos de un sistema lógico

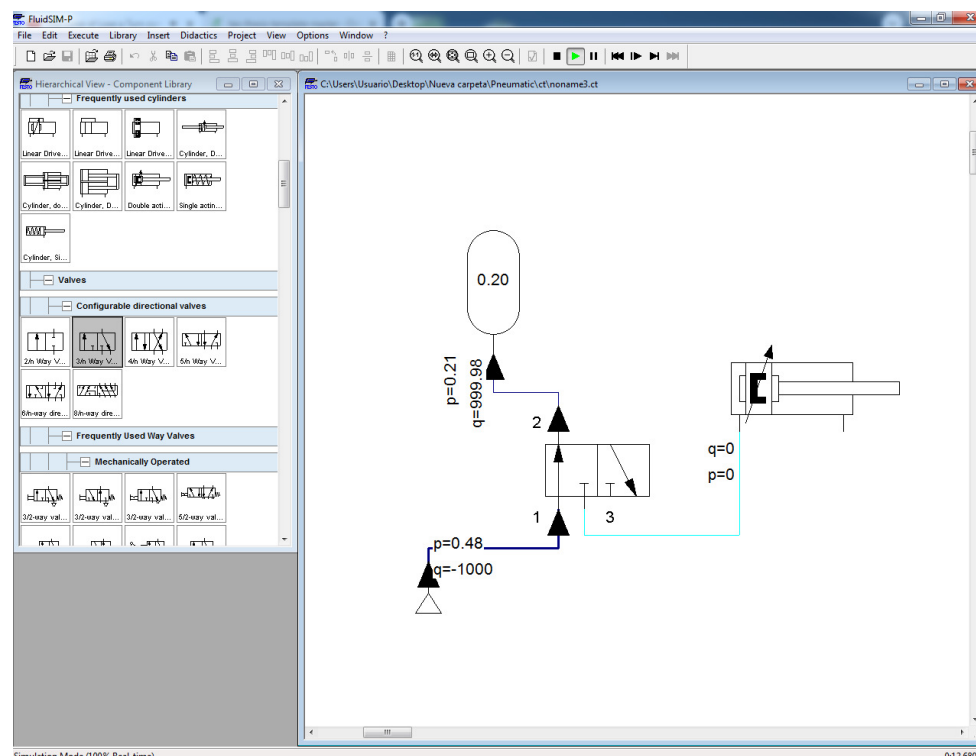


Figura 25: Interfaz de *FluidSim*  
Fuente: Elaboración Personal.

modelamiento unidimensional con un módulo bidimensional añadido en versiones recientes. Para casos de ríos con geometrías simples como sería el caso donde el ancho de un río es despreciable comparado a su longitud un modelamiento unidimensional con *HEC-RAS* representará bien la realidad y con menor esfuerzo que un modelamiento bidimensional. Por eso, este último, es más adecuado para canales con geometrías más complejas [13].

En el trabajo de [34] se recomienda *HEC-RAS* para modelamiento bidimensional, sobre *Iber*, debido al bajo coste computacional, la visualización de los resultados, la organización de los elementos, la información de errores disponible y la actualización constante. Otro beneficio señalado en [13] es la posibilidad de unir modelamiento unidimensional con bidimensional en distintos tramos del canal donde sean adecuados para reducir el esfuerzo computacional. También se encuentra *Hcanales* [14] y *AseTub* [26] como herramientas más sencillas para la simulación de canales y tuberías. En general no se centran en simular un modelo a tiempo real sino que se concentra en solicitar al usuario las dimensiones y características específicas del canal para calcular valores de interés como por ejemplo el caudal, todo esto con el objetivo de facilitar trabajos de construcción y/o instalación de dichos canales o tuberías.

### 2.2.9. Comentarios adicionales

El desarrollo de Sistemas hidráulicos incluye dinámica de los fluidos, FEA<sup>31</sup>, análisis dinámico, termodinámica y CAD/CAM<sup>32</sup> [32]. Como ejemplo de una herramienta CAD se posee el software *HydroSym*, de Paro Software, diseñado para ayudar a las empresas a crear diagramas de sistemas hidráulicos y neumáticos. Posee una amplia biblioteca de componentes

<sup>31</sup> *finite element analysis*: técnica de simulación por computador usada en ingeniería

<sup>32</sup> *Computer aided design/manufacturing*: Diseño y fabricación con ayuda del computador

hidráulicos, diagramas de montaje y símbolos con detalles sobre los números, descripciones, tipos, fabricantes y más de las piezas [1][5][29]. HydroSym carece de una función de simulación impidiendo hacer prueba de los diseños.

En el trabajo de [10] se usa FEA para el análisis del modelo de un actuador rotativo sumergible, previo a su diseño. Principalmente se buscaba ver que el componente resistiera las presiones que trabajarían sobre él. Para dicho análisis dos software, uno siendo *Solidworks* descrito como un paquete de herramientas de análisis estructural fáciles de usar que utilizan el análisis de elementos finitos para predecir el comportamiento físico real de un producto mediante la prueba virtual de modelos CAD [2] y *ANSYS* software con capacidades de simulación de fluidos y análisis FEA estructural [8], el cual el autor de [10] señala está más especializado que el primero para este tipo de análisis.

Otro caso similar al anterior es el estudio de [39] donde se buscaba modelar una bomba hidráulica para comparar los datos obtenidos experimentalmente con los logrados por un análisis del modelo computacional. Para esto se usó el programa *GAMBIT* para crear el modelo en forma de una malla geométrica<sup>33</sup>. Posteriormente se usa *FLUENT*, simulador de mecánica de fluidos computacional, para simular el flujo de fluido y transferencia de calor sobre el modelo anteriormente creado en *GAMBIT*.

Se encuentra como un buen ejemplo el software *Amesim* de *Siemens*, el que permite el diseño, simulación, evaluación y optimización de sistemas mecatrónicos<sup>34</sup>, lo que incluye hidráulica [7]. Este, al igual que otros software descritos anteriormente, posee una lista de componentes los cuales se pueden arrastrar para armar un sistema en un canvas y luego empezar la simulación [35].

Pero además, ofrece una vista más detallada de los componentes, lo que permite seleccionar aquellos de interés para un análisis más detallado que puede incluir aspectos como la temperatura, geometría de las piezas, interacción de fluidos/gases, entre otras cosas[7].

Otra funcionalidad interesante está su capacidad de crear ROM<sup>35</sup>, versiones simplificadas de modelos complejos, como el caso de modelos tridimensionales, para una menor carga en memoria y procesamiento, posibilitando extender el alcance de los modelos para por ejemplo usarlos en simulaciones de sistemas [7].

Si bien el estudio de estas distintas áreas es interesante para motivos de la presente memoria el foco está en las técnicas que puedan simular el flujo del fluido que pasa por los componentes del sistema y los cambios de estado que producen en estos. En otras palabras interesan más detalles en los cambios de los componentes y para el fluido basta con saber su movimiento.

Se puede describir el proceso de simulación de estos sistemas independiente del programa o método usado en 5 pasos: a) establecer el modelo simplificado del sistema, b) establecer la descripción matemática del modelo, c) establecer todos los parámetros físicos, d) obtener la solución numérica y e) analizar los resultados [32]. Los primeros dos pasos corresponden a generar una imagen del sistema a diseñar que pueda ser comprendida por una máquina. El siguiente paso establece los parámetros físicos conocidos del sistema para que en el cuarto paso sea posible obtener una solución numérica. Ya en el último paso, el análisis permite

---

<sup>33</sup>Una malla es un conjunto de caras poligonales que definen una superficie en el espacio

<sup>34</sup>Rama de la ingeniería que combina mecánica, electrónica, Informática y la ingeniería de control.

<sup>35</sup>*Reduced Order Model*

transformar la respuesta numérica en el funcionamiento esperado del sistema.

En [32] se considera como la mejor opción de modelado para sistemas dinámicos, un enfoque en los puertos y sus conexiones, ya que representa de mejor manera la realidad. Para su simulación propone dos alternativas: la primera es determinar las derivadas de las variables de estado en cada componente y subsistema para encontrar una solución en un *solver*<sup>36</sup> centralizado, y la segunda consiste en un *solver* distribuido donde las ecuaciones diferenciales se resuelven en cada componente y subsistema.

A lo largo de esta sección se exploró la información relevante referida a circuitos eléctricos e hidráulicos junto con algunos conceptos físicos que gobiernan esta clase de sistemas, y también se vieron las técnicas que otros autores han derivado para resolver problemas similares al que trata esta memoria. Todo esto, con el objetivo de distinguir las herramientas que se pueden aplicar al contexto de la presente memoria y presentar una posible solución como se realiza en la próxima sección.

---

<sup>36</sup>Término usado para referirse a un programa que resuelve un problema

## CAPÍTULO 3

### PROPUESTA DE SOLUCIÓN

#### 3.1. El Problema en específico

Después de terminar el estado del arte se da cuenta que los problemas de simulación hidráulica/neumática son extremadamente variados y en la mayoría de los casos requieren soluciones específicas acordes a los requisitos específicos del simulador deseado, como podría ser el tipo de bomba o el detalle con que se desea observar la bomba y el fluido que pasa por esta.

Por lo anterior se debe dejar claro cuáles son los objetivos específicos del simulador. El simulador tiene que funcionar en tiempo real, debe ser capaz de describir las entradas y salidas de flujo y presión de cada componente de tal forma que el resultado se asemeje a la realidad. No interesa ver cómo el fluido se desplaza o colisiona con partes específicas de los componentes por lo que se descartan análisis de elementos finitos y por último debe ser capaz de integrarse en el sistema ya existente. Entre otras cosas, esto implica que debe estar codificado en javascript igual que el sistema actual de YOY.

##### 3.1.1. Casos de Prueba

Se mencionó antes que el simulador calculará entradas y salidas de componentes. Puede llegar a tener una gran cantidad de componentes dependiendo de los requisitos que tenga el cliente por lo que es de esperarse que con el tiempo se agreguen varios componentes al sistema.

Para esta memoria se decidió, en conjunto con la empresa YOY, trabajar con los componentes de Bomba, Tanque, Válvula y Actuador. Junto con eso, se entregaron los casos de prueba que estos componentes simulados deberían superar. Estos serían los primeros componentes que usará el simulador, pero se debe desarrollar de tal forma que el proceso de agregarlos sea claro y reproducible. Se lista aquí los casos de prueba con el resultado que se espera y una breve descripción de cómo se comportan en el simulador *FluidSim*:

##### 1 Bomba funcionando sin conexión:

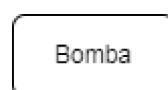


Figura 26: Caso 1  
Fuente: Elaboración Propia.

- El resultado esperado es que la bomba expulse flujo al ambiente en su máxima potencia.
- El resultado, probando este caso en *FluidSim*, causa que la bomba expulse su flujo en su máxima potencia.

## 2 Tanque lleno sin conexión:

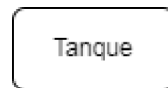


Figura 27: Caso 2  
Fuente: Elaboración Propia.

- El resultado esperado es que el tanque expulsa su contenido con un flujo cada vez menor hasta quedar vacío, o más precisamente, que su presión se iguale con la del ambiente.
- El resultado probando este caso en *FluidSim* causa que el tanque expulse su flujo cada vez más lento hasta vaciarse, se necesitó un caso equivalente para la prueba en *FluidSim*, ya que en este no se puede empezar con un tanque lleno por lo que se usó un circuito básico que llenaba el tanque y luego permitía con una válvula cambiar la conexión a la bomba con el exterior.

## 3 Bomba conectada a Tanque vacío:

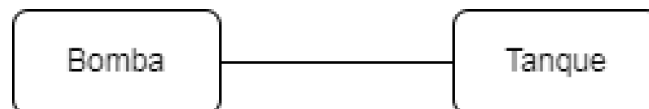


Figura 28: Caso 3  
Fuente: Elaboración Propia.

- El resultado esperado es que la bomba expulse flujo hacia el tanque hasta que la presión ejercida por la bomba se iguale con la ejercida por el tanque.
- El resultado probando este caso en *FluidSim* fue que las presiones en la bomba y el tanque se igualaron, el flujo se mantuvo prácticamente constante hasta poco antes de llenar el tanque cuando este descendió rápidamente a 0.

#### 4 Tanque lleno conectado a otro tanque vacío:

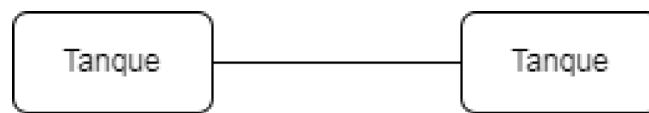


Figura 29: Caso 4  
Fuente: Elaboración Propia.

- El resultado esperado es que el contenido del tanque lleno, se distribuya con el tanque vacío, quedando ambos con misma presión.
- El resultado probando este caso en *FluidSim* fue el esperado.

#### 5 Bomba llena múltiples tanques en paralelo:

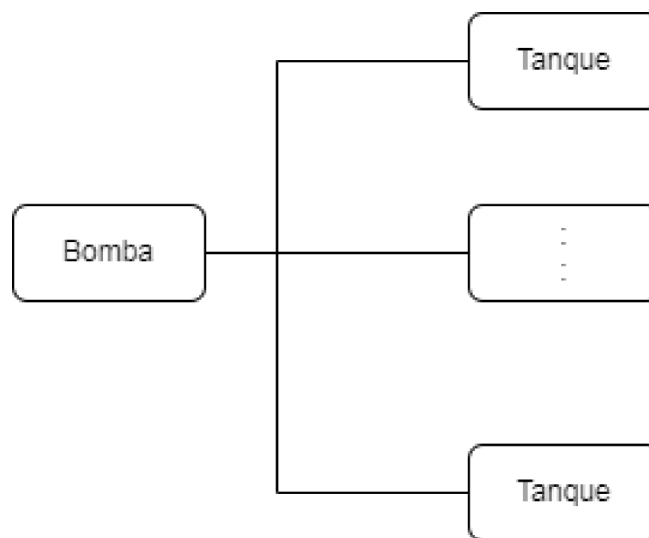


Figura 30: Caso 5  
Fuente: Elaboración Propia.

- El resultado esperado es que se llenen todos los tanques al mismo tiempo porque las presiones en todos debe ser la misma.
- El resultado probando este caso en *FluidSim* es que se llenan al mismo tiempo con tanques de tamaños iguales, con tamaños diferentes hay un pequeño desfase pero es tan pequeño que se puede decir que ocurre lo mismo y se llenan al mismo tiempo.

## 6 Múltiples bombas en tanque:

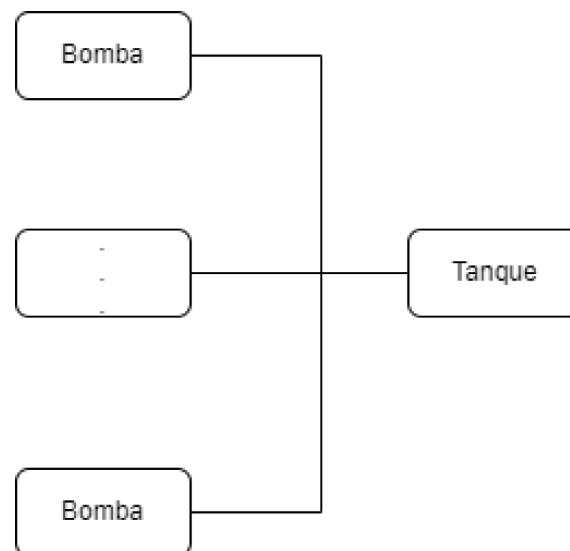


Figura 31: Caso 6  
Fuente: Elaboración Propia.

- Se espera que se sumen los flujos de las bombas y se llene el tanque.
- El resultado probando este caso en *FluidSim* fue el esperado

## 7 Bomba conectada a un actuador:

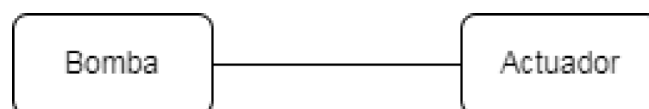


Figura 32: Caso 7  
Fuente: Elaboración Propia.

- El resultado esperado es que el flujo de la bomba causa movimiento en la barra del actuador (cambio de su estado).
- El resultado probando este caso en *FluidSim* fue el esperado, el flujo se detiene poco después de desplazar al máximo el actuador.

## 8 Tanque lleno Conectado a un actuador:

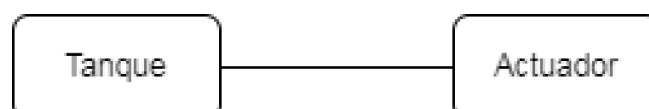


Figura 33: Caso 8  
Fuente: Elaboración Propia.

- El resultado esperado es que el flujo expulsado por el tanque causa movimiento en la barra del actuador, el tanque se vacía hasta que el actuador llegue a su posición final o alternativamente mueve al actuador hasta que expulse todo su contenido.
- El resultado probando este caso en *FluidSim* concuerda con lo esperado.

### 9 Bomba conectada a múltiples actuadores:

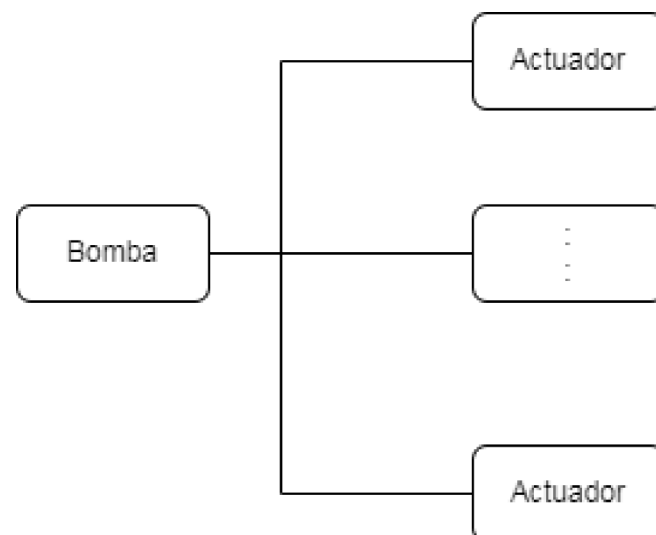


Figura 34: Caso 9  
Fuente: Elaboración Propia.

- El resultado esperado es que se mueven las barras de todos los actuadores.
- El resultado probando este caso en *FluidSim* fue, para casos de actuadores iguales, tal como es esperado (las barras se detienen al mismo tiempo). Con diferentes tamaños de actuadores el programa no parece representar un comportamiento correcto, las barras del más pequeño se detenía por completo en un punto, para luego esperar a terminar el más grande y en algunos casos las barras oscilaban.

### 10 Bomba conectada a actuador y presenta una fuga:

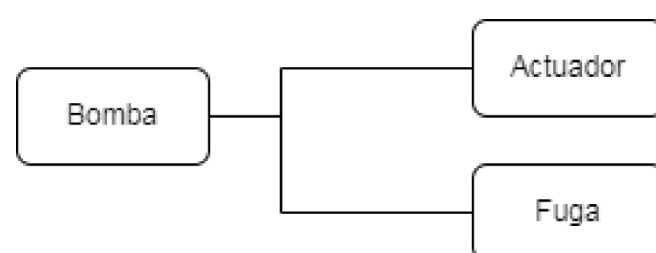


Figura 35: Caso 10  
Fuente: Elaboración Propia.

- El resultado esperado es que la barra del actuador NO se debería mover, la mayoría del flujo se redirige por la fuga.
- El caso no se puede recrear en *FluidSim*

### 11 Bomba conectada a válvula dirigiendo el flujo a tanques y fuga:

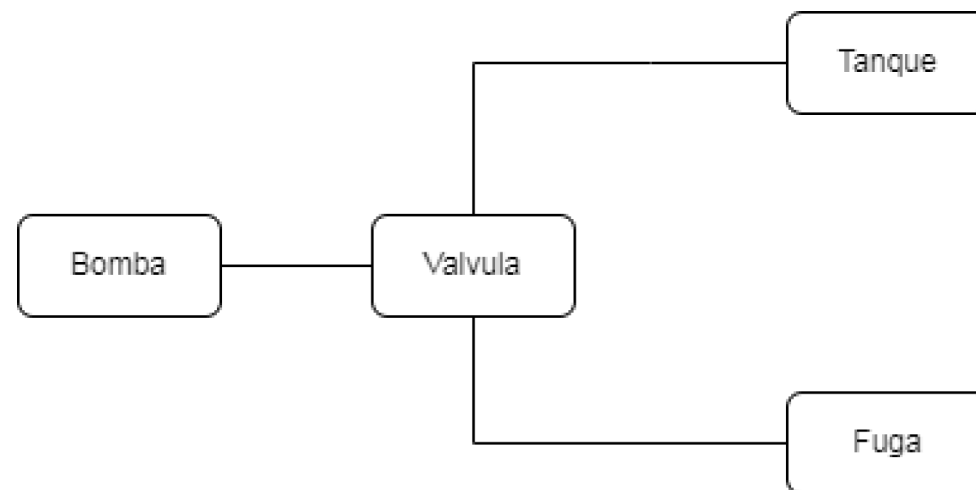


Figura 36: Caso 11  
Fuente: Elaboración Propia.

- Se espera que la válvula permita dirigir el flujo a una fuga o al actuador.
- El resultado probando este caso en *FluidSim* fue el esperado, aunque se tuvo que usar un tanque muy grande para representar la fuga pues como ya se mencionó estas no se pueden representar en *FluidSim*.

### 12 Bombas actuando en un actuador con flujos contrarios:

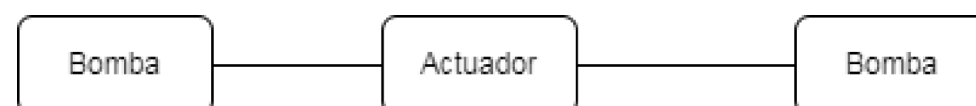


Figura 37: Caso 12  
Fuente: Elaboración Propia.

- Se espera que se mueva la barra desde el lado de mayor fuerza a menor fuerza.
- El resultado probando este caso en *FluidSim* fue el esperado.

### 3.1.2. Componentes y sus Modelos

Ahora que se tienen los casos de prueba se necesita agregar más detalle a los componentes. Para esto se habló con un experto del área hidráulica con el que se definen supuestos y se encuentran modelos matemáticos que representan el comportamiento presión/flujo de los componentes.

### 3.1.3. Bomba

Para el componente Bomba se definió que ésta, expulsa flujo en función de la presión que se le opone. La relación se conoce como curva de funcionamiento, información que entregan los fabricantes de las bombas para informar al usuario que flujo podrán obtener a diferentes "alturas"<sup>37</sup>. Además, se hace el supuesto de que el flujo no puede entrar a la bomba este siempre es expulsado, en la realidad las bombas tienen un seguro que cumplen esta función por lo que el supuesto es correcto. Como esta curva es diferente para cada bomba se definieron dos funciones que cumplen con el comportamiento básico. La primera es una relación lineal:

$$Q = Q_{max} - \frac{Q_{max}}{P_{max}} \cdot P \quad \text{si } P \leq P_{max}$$

$$Q = \frac{Q_{max}}{P_{max}} \cdot (P_{max} - P) \quad \text{si } P \leq P_{max} \quad \frac{P_{max}}{Q_{max}} \cdot Q = P_{max} - P \quad \text{si } P \leq P_{max}$$

Donde  $Q_{max}$  y  $P_{max}$  son constantes que representan el flujo máximo de la bomba y la presión máxima en que funciona la bomba, estas podrían ser modificadas por el usuario en el simulador permitiendo definir una infinidad de bombas. La variable  $P$  es la presión que se opone a la bomba y  $Q$  el flujo resultante, es importante considerar que  $Q$  siempre es mayor o igual 0 y menor o igual a  $Q_{max}$  por ende a la relación anterior se agrega:

$$Q = 0 \quad \text{Si } P > P_{max}$$

Y para que siempre sea menor a  $Q_{max}$  basta con que  $P$  siempre sea  $P$  siempre sea mayor que 0 lo cual siempre debería cumplirse pues las presiones no pueden ser negativas.

La segunda alternativa es una relación cuadrática como la siguiente:

$$Q^2 = \frac{P_{max} - P}{c}$$

$$Q = \sqrt{\frac{P_{max} - P}{c}}$$

Donde  $P_{max}$  vuelve a representar la presión máxima de operación y  $c$  es una constante típicamente de valor pequeño (ej:  $c = 0,001$ ). Esta relación fue propuesta por el experto después de analizar la literatura. Para evitar resultados imaginarios de  $Q$  también se agrega que  $Q = 0$  cuando  $P > P_{max}$ .

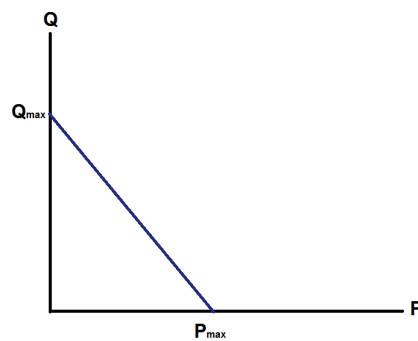


Figura 38: Gráfica de Representación lineal de una bomba  
Fuente: Elaboración Propia.

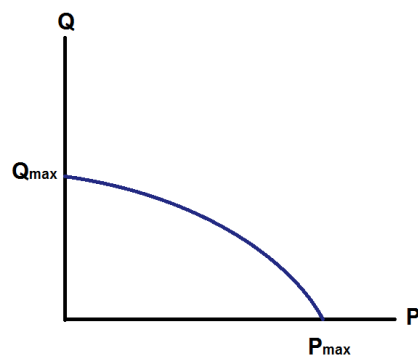


Figura 39: Gráfica de Representación cuadrática de una bomba  
Fuente: Elaboración Propia.

Ambas relaciones representan de forma correcta el comportamiento de la bomba. El objetivo es que su flujo baje a medida que la presión en contra aumente, esto fue corroborado con el experto. Cabe también añadir que la presión que expulsa la bomba es  $P_{max}$ , pues se conoce que el flujo se genera por una diferencia de presión por lo que si  $P$  es la presión fuera de la bomba  $P_{max}$  debe ser igual a la presión en la bomba, dato que fue confirmado con el experto. Por último, se destaca que ambos modelos propuestos son válidos para bomba hidráulica como neumática.

#### 3.1.4. Tanque

Para el componente tanque es importante definir su forma, y en el caso de trabajar con líquidos, definir el punto de entrada/salida. Se especifica el tanque que se usará, como un cilindro con solo un punto de conexión que puede funcionar tanto como entrada y salida en la parte más baja de este.

Con esta forma los parámetros más relevantes son su altura  $H$  su área transversal  $A$  y su volumen total  $V$ , relacionándose estos como  $V = H \cdot A$ . La elección de un tanque cilíndrico es adecuada pues como dice el experto es la forma más común de los tanques reales. Esto es algo un poco más simplificado que la realidad, donde los tanques tienen área transversal

<sup>37</sup>Altura es una forma más practica de medir presión usando unidades de distancia

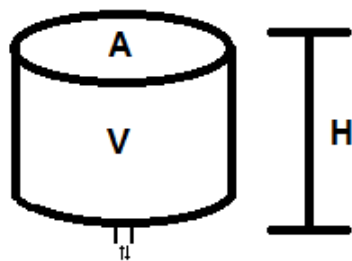


Figura 40: Dibujo de la forma del tanque

Fuente: Elaboración Propia.

variable en sus extremos, pero para un simulador con fines educativos, un cilindro de área transversal constante es una aproximación suficiente.

Se coloca solo un punto para la entrada y salida pues es lo que se pidió por la empresa. Se ubica abajo del cilindro para que el flujo siempre se enfrente a la máxima presión. En el caso hidráulico, no es lo más real, pero es mucho más interesante de modelar. Además, acerca el caso hidráulico al problema neumático que eventualmente se quiere trabajar en el simulador. Se define el flujo en la entrada/salida de un tanque como:

$$Q = D(P_e, P_t) \cdot \sqrt{\frac{|P_e - P_t|}{C}}$$

$$C = \frac{\rho}{2A_e^2}$$

Donde  $P_e$  y  $P_t$  son la presión exterior y la presión del tanque respectivamente,  $C$  es una constante formada por  $\rho$  densidad del fluido y  $A_e$  el área transversal de la entrada, o la tubería, por donde se intercambia flujo con el exterior. Es relevante mencionar como las conexiones entre componentes son iguales e ideales  $A_e$  se tratará como una constante igual para todos los tanques. La función  $D(P_e, P_t)$  ayudara a indicar la dirección del flujo, con valor negativo si el flujo entra y positivo cuando este sale del tanque, y tiene la siguiente forma:

$$D(P_e, P_t) = \begin{cases} -1 & \text{Si } P_e - P_t \geq 0 \\ 1 & \text{Si } P_e - P_t < 0 \end{cases}$$

El valor de  $P_e$  viene de afuera del tanque por lo que dependerá del sistema al que se conecte el tanque, en cambio  $P_t$  es propio del tanque y su cálculo difiere entre un tanque hidráulico y uno neumático. Para el Hidráulico se tiene que:

$$P_t = h \cdot \rho \cdot g$$

$$P_t = \frac{V}{A} \cdot \rho \cdot g$$

Donde  $\rho$  corresponde a la densidad del fluido,  $g$  la gravedad, y  $h$  es la altura que alcanza el fluido en el tanque, que se calcula como el volumen  $V$  de fluido en el tanque dividido en el

área transversal  $A$  del tanque. Para este caso el valor de  $V$  y por ende  $h$  tienen un límite dado por el tamaño del tanque. Una vez se llegue a este valor no podrá entrar más flujo causando que  $P_t$  crezca rápidamente equiparándose a la presión externa. El valor del  $V$  en el tanque depende del tiempo en que se observe. Matemáticamente sería:

$$V_t = V_{t-1} + \Delta t \cdot Q_{t-1}$$

Donde los subíndices  $t$  y  $t - 1$  hacen referencia a instantes de tiempo consecutivos,  $\Delta t$  es la variación de tiempo entre esos instantes y  $Q_{t-1}$  el flujo que se calculó en el instante  $t - 1$ . Si se ve el caso neumático, es diferente ya que, contrario a lo que sucede con un líquido, el gas se expande por todo el tanque y su presión es la misma en todos lados.  $P_t$  se calcularía como:

$$P_t = M \cdot \frac{RT}{P_m V}$$

Donde se introduce  $M$  como la masa de gas en el tanque,  $T$  es la temperatura que, para efectos del simulador, es constante,  $V$  es el volumen total del tanque,  $P_m$  hace referencia al peso molecular del gas y  $R$  la constante universal de los gases ideales. También se considera el cambio de masa en el tiempo, pero con el supuesto de que la densidad del gas es constante en las conexiones/tuberías antes de entrar al tanque (supuesto verificado con el experto) se define la masa en el tiempo como:

$$M_t = M_{t-1} + \rho \cdot \Delta t \cdot Q_{t-1}$$

Muy parecido al caso de volumen, pero multiplicando el flujo por densidad pasando de flujo volumétrico a flujo másico. Con el objetivo de trabajar en las mismas unidades, tanto en un tanque hidráulico como neumático se reemplaza  $M$  en la expresión de presión por el volumen descomprimido a la densidad  $\rho$ , que se denota como  $V_\rho$ , fuera del tanque:

$$P_t = V_\rho \cdot \rho \cdot \frac{RT}{P_m V}$$

Con esto se concluyen los modelos de tanque propuestos por el experto.

### 3.1.5. Actuador

Un actuador es un componente que transforma la energía hidráulica/neumática en algún efecto distinto con la finalidad de cumplir alguna función. Para el simulador se pide un actuador de cilindro doble. El que ya se desarrolló en el marco conceptual:

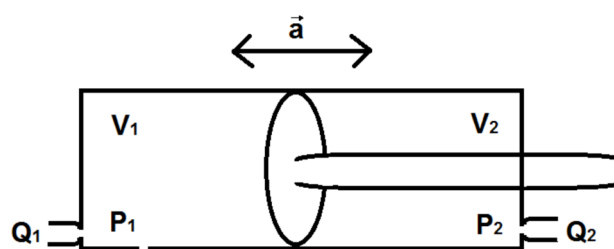


Figura 41: Actuador de cilindro doble  
Fuente: Elaboración Propia.

Este actuador convierte la energía hidráulica/neumática en energía mecánica en la forma del desplazamiento de una barra. Se considera que la barra tiene una aceleración  $\vec{a}$  que se obtiene de la siguiente formula:

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = M_{db} \cdot \vec{a}$$

Donde  $\vec{F}_1$  y  $\vec{F}_2$  son las fuerzas que ejerce el fluido del compartimiento izquierdo y derecho en el disco que sujeta la barra y  $M_{db}$  es la masa del disco más la barra. Para calcular las magnitudes de  $\vec{F}_1$  y  $\vec{F}_2$  se usa la relación entre presión y área:

$$F_1 = P_1 \cdot A_1$$

$$F_2 = P_2 \cdot A_2$$

Donde  $A_1$  y  $A_2$  son el área de contacto del fluido y el disco para cada compartimiento, es importante considerar que el área de las caras del disco no es igual.  $A_1 > A_2$  ya que se pierde el espacio que ocupa la barra en  $A_2$ . Lo mismo pasa con los volúmenes teniendo  $V_1 > V_2$  también por el espacio que toma la barra. También es importante, al menos para hidráulica, considerar que el fluido no estará siempre cubriendo todo el disco por lo que el área también dependerá de la cantidad de fluido en el tanque.

La ecuación que se ha discutido puede explicar el movimiento de la barra, sin embargo, aun se necesita saber cómo se relacionan la presión y el flujo. Como ambos compartimientos están aislados, junto al experto, se encuentra que la mejor forma de modelarlos es considerar a cada uno, como un tanque de tamaño variable. Esto es, asumir que un actuador son 2 tanques unidos que se relacionan por la función de aceleración de la barra, por lo que ya se conocen las ecuaciones que determinan el flujo y la presión, pero ahora, además, se debe considerar el tamaño variable del contenedor.

El volumen del contenedor en el tiempo necesitará las siguientes ecuaciones:

$$V_t = A \cdot L(x_t)$$

$$x_t = \frac{a_{t-1} \cdot \Delta t^2}{2} + v_{t-1} \cdot \Delta t + x_{t-1}$$

$$v_t = v_{t-1} + a_{t-1} \cdot \Delta t$$

Con las 2 últimas ecuaciones se actualiza tanto la posición del disco, como la barra y su velocidad en el instante  $t$ . Usando una función  $L(x_t)$  para cada tanque, se calcula el nuevo largo y al multiplicarlo por el área transversal se tendrá el nuevo volumen.

$$L(x_t) = \begin{cases} x_t & \text{para el primer tanque} \\ L_T - x_t & \text{para el segundo tanque} \end{cases}$$

Con  $L_t$  el largo total del actuador o lo que es lo mismo los 2 tanques.

Volviendo al tema de la superficie de contacto, en la sumatoria de fuerzas del disco/barra para un actuador neumático, se usa gas. Se considera, puede expandirse dentro de las cabinas de este, por ello, la superficie siempre será la máxima posible, o sea, todo el disco, por lo que estos valores son constantes  $A_1$  y  $A_2$ .

Además, se sabe que un gas ejerce la misma presión sobre toda la superficie que lo contiene por ende la presión también es constante, de modo que, calcular las fuerzas se reduce a una multiplicación como ya se estudió.

El problema ahora es un actuador hidráulico donde sí se asume que los compartimientos contienen 0 líquido y se llenan como tanques, para empezar, ya que ahora el cilindro está acostado, el área transversal  $A$  no sería una circunferencia constante si no un rectángulo cuya área varía con el nivel del agua. Ello vuelve más complejo el cálculo de la altura  $h$  y junto con eso la presión en el tiempo, además el área de contacto con el disco depende de la altura que alcance el líquido por lo que para una altura  $h$  se necesita conocer la siguiente área:

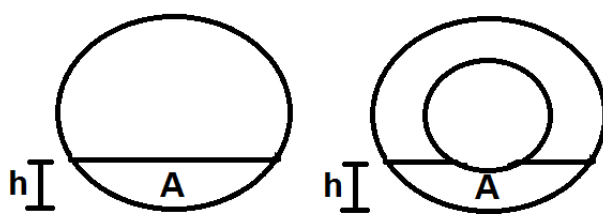


Figura 42: Superficie del disco que cubre un líquido con altura  $h$   
Fuente: Elaboración Propia.

En la imagen se ve el área que tocaría el fluido en ambas caras del disco. Si se sabe  $V$  volumen de líquido actual en la cabina calcular el valor de  $A$  en cada uno, no es tan complicado. Basta con resolver  $A = V/L$  siendo  $L$  el largo actual del cilindro. De aquí en adelante se podría encontrar el  $h$  resolviendo la siguiente expresión que calcula la misma área  $A$  en base a  $h$  y el radio  $R$  del disco:

$$A = R^2 \cdot \cos^{-1}\left(1 - \frac{h}{R}\right) - (R - h) \cdot \sqrt{2Rh - h^2}$$

Como  $A$  se conoce, es cosa de despejar por  $h$ , pero no deja de ser una expresión bastante compleja de solventar. Se tendría que resolver para cada instante de tiempo  $t$  que se simule para cada actuador. Esta expresión corresponde al lado sin barra.

Una vez que se añade la barra, se vuelve aún más complejo. Para ello, se necesitará añadir casos dependiendo si el nivel de agua toca a ésta o no. Todo este problema generado por el área de contacto, es irrelevante al usuario.

Como último punto, cabe destacar que si se conecta una cabina y se desplaza la barra la segunda cabina no tendrá flujo que expulsar al estar vacía. No es incorrecto, pero difiere del comportamiento del actuador neumático originalmente deseado. Ya que el simulador no necesita precisión absoluta de cada componente, al ser de carácter educativo, basta con que se respeten las cualidades básicas. Para ello, se decidió usar la siguiente simplificación:

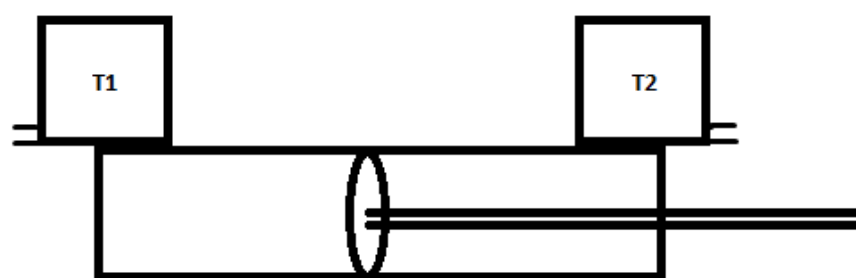


Figura 43: Actuador Hidráulico Modelo Equivalente  
Fuente: Elaboración Propia.

Se supone primero que las cabinas del actuador ya están llenas, por lo que la superficie de contacto del disco siempre es máxima. Y también supone que la presión en estas cabinas es la misma en cada punto y es determinada por la presión en el fondo de un tanque de dimensiones iguales a la cabina cuando la barra está en su posición inicial.

En la figura 43 se aprecia cómo se vería este modelo equivalente. Si se ve de forma literal permite sugerir que hay tanques conectados en las entradas del actuador y que estos al llenarse, transmiten su presión a la cabina que está llena. A medida que se mueve la barra para mantener las cabinas del actuador llenas y ser consistentes, se calcula el fluido desplazado en ambas cabinas que correspondería a  $A \cdot \Delta x$ , área transversal de la cabina por desplazamiento de la barra. Este valor se restaría del tanque unido a la cabina que está creciendo y se sumaría en el tanque unido a la cabina que se está encogiendo, ello causaría un decrecimiento y un incremento de presión en cada tanque respectivamente.

Si bien este modelo de actuador puede crearse en la realidad, para la presente memoria se usa como una simplificación. Los tanques  $T1$  y  $T2$  no existen y son solo una forma de representar el crecimiento y decrecimiento de presión en cada cabina.

Este modelo concuerda con la propuesta del experto de representar la presión de cada cabina como un tanque y es consistente con el comportamiento de la presión en las cabinas de un actuador donde la presión aumenta para la cabina que se reduce y baja para la cabina que se expande. Todo esto representado por la pérdida y ganancia de fluido en los tanques.

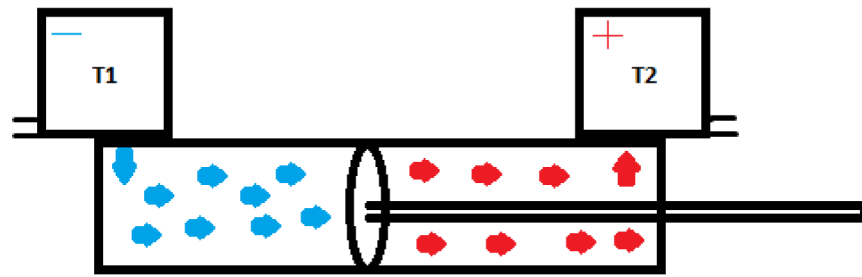


Figura 44:  $T1$  cede flujo a la cabina y  $T2$  recibe flujo de la cabina  
Fuente: Elaboración Propia.

Con esta simplificación se elimina el difícil cálculo del  $h$  dentro de la cabina real y mantiene el comportamiento característico del actuador, por lo que cumple con los requisitos. Y con esto se tiene lo necesario para calcular ambas fuerzas en el actuador hidráulico, definiendo por completo su comportamiento.

### 3.1.6. Válvula

El tipo de válvula que se define tiene como función el determinar el camino del flujo que pasa por esta. Se considera que no hay pérdidas de presión/flujo al pasar por ella por lo que su modelo se simplifica al punto de solo ser una conexión que se puede cambiar al activarla. Se considera que la válvula tendrá 3 puertos  $p_0, p_1, p_2$  y una variable de estado  $E$  con posibles valores 0 o 1:

Si  $E = 0$  entonces hay un camino entre  $p_0$  y  $p_1$  por donde puede pasar el flujo.

Si  $E = 1$  entonces hay un camino entre  $p_0$  y  $p_2$  por donde puede pasar el flujo.

También se puede agregar la siguiente consideración para el puerto que queda desconectado de los demás:

Si  $E = 0$  entonces  $p_2$  se conecta al exterior volviéndose fuga.

Si  $E = 1$  entonces  $p_1$  se conecta al exterior volviéndose fuga.

De todas maneras, para el caso de prueba, basta con la primera regla. Al agregar la segunda, sería otro tipo de válvula. Esto es suficiente para definir el comportamiento de la válvula.

### 3.1.7. Discrepancia Bomba Tanque

En este punto es fácil identificar un problema entre la bomba, principalmente cuadrática, y el tanque:

$$Q_b = \sqrt{\frac{P_{max} - P_o}{c_b}}$$

$$Q_t = \sqrt{\frac{|P_e - P_t|}{C_t}}$$

Con  $Q_b$  flujo de la bomba y  $Q_t$  flujo del tanque si se conectan se tiene lo siguiente:

$$Q_b = Q_t$$

$$\sqrt{\frac{P_{max} - P_o}{c_b}} = \sqrt{\frac{|P_e - P_t|}{C_t}}$$

Como ya se dedujo,  $P_{max}$  es la presión del lado de la bomba por ende  $P_e = P_{max}$  y la presión a la que se enfrenta la bomba es la del tanque por ende  $P_o = P_t$ :

$$\sqrt{\frac{P_{max} - P_t}{c_b}} = \sqrt{\frac{|P_{max} - P_t|}{C_t}}$$

Es claro que para este caso, la única forma de que el sistema tenga solución sería que  $c_b = C_t$ , pero estas dependen de la bomba y del tanque respectivamente y no serán necesariamente iguales. Sin embargo, se sabe que es posible conectar cualquier bomba a un tanque. También se aprecian problemas con la bomba lineal, aunque no es tan evidente.

$$\frac{Q_{max}}{P_{max}} \cdot (P_{max} - P_t) = \sqrt{\frac{|P_{max} - P_t|}{C_t}}$$

$$|P_{max} - P_t| = \frac{P_{max}^2}{Q_{max}^2 C_t}$$

Como se puede observar, sí se puede encontrar una solución, pero en el proceso se asigna un valor para  $P_t$  o  $P_{max}$  pero estas dependen del estado del componente al que pertenecen. El problema al usar ambas ecuaciones juntas, es que se están rellenando las incógnitas de

una con las constantes de las otras. Por ende, no hay variables que encontrar.

Ésta incompatibilidad dice que las reglas que forman estas ecuaciones no pueden aplicarse al mismo tiempo para solucionarlo. Se determinó que el modelo de bomba es el más adecuado para llenar un tanque pues este determinará el flujo y la incógnita que en este caso, sería la presión del tanque.

Esta presión se calcula para cada instante viendo cuánto fluido entró en el tanque. La ecuación del tanque todavía se usará, pero cuando no esté recibiendo fluido de la bomba, es decir, solo cuando expulse flujo. De esta manera, se dirá que la ecuación del tanque es válida cuando el flujo sale naturalmente del tanque y la bomba tomará preferencia cuando se conecta al tanque, ya que esta fuerza el flujo que entra al sistema, lo que es bastante lógico.

## 3.2. La Propuesta de solución

La mayoría de los detalles del problema fueron expuestos, ahora se presenta la propuesta de solución. Se mencionó anteriormente que se busca adaptar el simulador de circuitos eléctricos actual para simular componentes hidráulicos, por ende, la solución consiste en la generación de un sistema de ecuaciones basado en análisis nodal y la ley de corrientes de Kirchhoff. Para este caso, la versión hidráulica/neumática, se resuelve el sistema de ecuaciones usando factorización *LU* y *forward and backward substitution*.

El sistema de ecuación que se formará con el análisis nodal, requiere algunos pasos extra para ser similar al formado en sistemas eléctricos. Brevemente se explicará como convertir los modelos antes descritos en un equivalente al sistema de ecuaciones nodal de los circuitos eléctricos.

### 3.2.1. Formar el sistema de ecuaciones

Originalmente en circuitos eléctricos se generaba una ecuación en cada nodo haciendo que la sumatoria de las corrientes sea 0, o lo que es lo mismo que las corrientes de entrada y salida del nodo fueran iguales. En estos problemas, las incógnitas en su mayoría eran los voltajes. El caso mas simple seria la conexión de una fuente de corriente constante  $I$  y una resistencia  $R$ . Esta presentaría 2 nodos, uno con voltaje  $V_1$  y el otro con  $V_2$ , y se puede expresar con el siguiente sistema:

$$\begin{aligned} I &= \frac{V_1 - V_2}{R} \\ -I &= \frac{V_2 - V_1}{R} \end{aligned}$$

Se tienen dos ecuaciones, pero como ya se vio en la primera parte una es redundante. Lo

normal es tomar el nodo tierra como referencia, se le da a  $V_2$  el valor de 0 y se obtiene una ecuación con una incógnita:

$$I = \frac{V_1}{R}$$

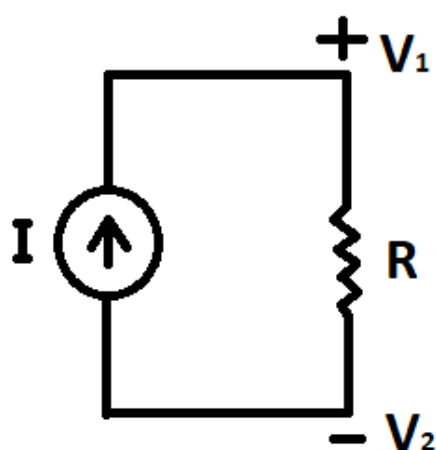


Figura 45: Circuito simple con una fuente de corriente y una resistencia  
Fuente: Elaboración Propia.

Ahora se quiere hacer lo mismo en circuitos hidráulicos/neumáticos por lo que se debe encontrar un equivalente para  $I$ , los  $V_i$  y  $R$ . De los casos de prueba y el modelado de los componentes se ve que lo más importante por representar es la conexión entre bomba y tanque. Esto se presenta en prácticamente todos los casos, en este circuito simple se encuentra una reducción al problema del circuito con una fuente y una resistencia.

Primero el flujo  $Q$  que es equivalente a la corriente  $I$ , anteriormente esta era una constante, pero  $Q$  dependerá de la bomba y es una función dependiente de la presión a la que se enfrenta que en este caso, sale del tanque. Este valor es conocido para todo tiempo  $t$ . Se sabe que depende de la cantidad de fluido en el tanque. Por ende, para un instante  $t$  se dice que  $I = Q(t)$ , es decir, una constante para ese momento en el tiempo que será actualizada en la siguiente iteración.

La conexión entre bomba y tanque solo presenta un nodo, pero con los modelos que se tiene asignar presión como incógnita no tendrá mucho sentido, es más correcto suponer que la presión en el nodo es igual a la del tanque pero como esta es conocida no es un equivalente para  $V_i$ . Hay algo que es incógnita y es requisito necesario calcular cuál es el aumento de presión en el nodo para ese instante de tiempo  $t$ , esto es desconocido y depende del flujo circulante.

Esto sería  $V_1 = \Delta P$ , no existe una incógnita para  $V_2$  pues no hay más nodos. Por compatibilidad con la solución del sistema eléctrico se añade una conexión imaginaria entre la bomba y el tanque para "cerrar el circuito" y  $V_2$  será tierra igual a 0 todo el tiempo. Con este acercamiento, es fácil encontrar el equivalente de  $R$ . Lo primero es pensar en cuánto fluido entró al

tanque en un intervalo de tiempo  $\Delta t$ , y esto es  $Q \cdot \Delta t$ . Luego, usando el modelo del tanque, se une esta variación de fluido con una variación de presión:

$$\begin{aligned} \Delta P &= P_{t+\Delta t} - P_t \\ \Delta P &= \frac{V_t + Q \cdot \Delta t}{A} \cdot \rho \cdot g - \frac{V_t}{A} \cdot \rho \cdot g \\ \Delta P &= \frac{Q \cdot \Delta t}{A} \cdot \rho \cdot g \\ \Delta P &= \frac{\rho \cdot g \cdot \Delta t}{A} \cdot Q \\ \Delta P &= R \cdot Q \end{aligned}$$

Con esto se determina que el  $R$  para un tanque hidráulico es igual a  $\frac{\rho \cdot g \cdot \Delta t}{A}$ . Para el caso del tanque neumático el desarrollo es bastante similar y se llega a un  $R = \frac{\rho \cdot \Delta t \cdot R \cdot T}{P_m V}$ . Entonces, este caso simple se vería así:

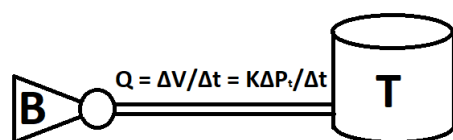


Figura 46: Circuito simple con una Bomba y un Tanque  
Fuente: Elaboración Propia.

Donde se reemplaza  $R$  por  $\Delta t / K$  para separar las constantes dependientes del tanque en  $K$  de la variable  $\Delta t$ . Ella depende de los parámetros del simulador y se modifica a conveniencia. Y, ahora, se ve qué pasa cuando se tienen múltiples tanques en paralelo:

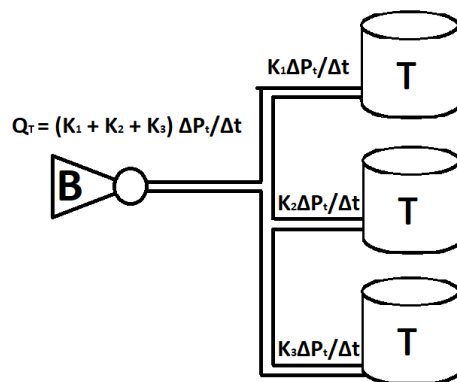


Figura 47: Circuito simple con una Bomba y 3 Tanques  
Fuente: Elaboración Propia.

En este caso la variación de presión es igual en los 3 tanques independiente de su  $K$ , esto porque el experto indicó que la presión para tanques en paralelo conectados a una bomba, debe ser la misma. Por ende, la variación de presión también debe ser la misma, mientras la presión de los tanques sea igual. En este caso la ecuación sería:

$$Q_T = \frac{K_1}{\Delta t} \cdot \Delta P_t + \frac{K_2}{\Delta t} \cdot \Delta P_t + \frac{K_3}{\Delta t} \cdot \Delta P_t$$

Donde se ve que el flujo total  $Q_T$  proveniente de la bomba es igual a la suma de los flujos que recibe cada tanque, esto es la ley de Kirchhoff. Con esto se constata que este acercamiento es también compatible para el cálculo de flujos en múltiples tanques y por ende será capaz de cumplir todos los casos de prueba. En este caso, es necesario recordar que los actuadores también son tanques.

Entonces ahora, para el proceso de armar la matriz y el sistema de ecuaciones es útil, definir las “estampas” de cada componente como fue en el caso eléctrico descrito en el estado del arte. A modo de recordatorio las estampas son una estructura de valores que representa el aporte de un componente al sistema de ecuaciones y agregando todas las estampas a la matriz se construirá el sistema completo. Se reitera que la estampa de una resistencia  $R$  desde un nodo  $i$  a un  $j$  era:

$$\begin{pmatrix} \frac{1}{R} & -\frac{1}{R} \\ -\frac{1}{R} & \frac{1}{R} \end{pmatrix}$$

Por lo anterior, para el caso de un tanque hidráulico la estampa sería:

$$\begin{pmatrix} \frac{A}{\rho \cdot g \cdot \Delta t} & -\frac{A}{\rho \cdot g \cdot \Delta t} \\ -\frac{A}{\rho \cdot g \cdot \Delta t} & \frac{A}{\rho \cdot g \cdot \Delta t} \end{pmatrix}$$

Y para un tanque neumático:

$$\begin{pmatrix} \frac{P_m V}{\rho \cdot \Delta t \cdot R \cdot T} & -\frac{P_m V}{\rho \cdot \Delta t \cdot R \cdot T} \\ -\frac{P_m V}{\rho \cdot \Delta t \cdot R \cdot T} & \frac{P_m V}{\rho \cdot \Delta t \cdot R \cdot T} \end{pmatrix}$$

Para la corriente  $I$  la estampa que va de un nodo  $i$  a uno  $j$  tiene la forma:

$$\begin{pmatrix} -I \\ I \end{pmatrix}$$

Por lo que la estampa para una bomba del tipo lineal Hidráulica/Neumática será:

$$\begin{pmatrix} -Q_{max} + \frac{Q_{max}}{P_{max}} \cdot P \\ Q_{max} - \frac{Q_{max}}{P_{max}} \cdot P \end{pmatrix}$$

Y para una cuadrática:

$$\begin{pmatrix} -\sqrt{\frac{P_{max}-P}{c}} \\ \sqrt{\frac{P_{max}-P}{c}} \end{pmatrix}$$

Se nota que en ambos casos de bomba la variable  $P$ , que se entiende como la presión que se opone a su flujo, corresponde a la presión en el nodo al que está conectada. Por ende, su valor se debe actualizar a medida que el instante  $t$  cambia y la presión cambia.

No es el mismo caso para los tanques donde sus estampas están formadas exclusivamente por constantes y no necesitan ser actualizadas. Excepto en algunos casos particulares que se explicarán más adelante.

Están son todas las estampas que se necesita definir. Se debe recordar que el actuador son dos tanques unidos por lo que usan la misma estampa. Por ello, se tiene todo lo necesario para describir el algoritmo de simulación propuesto.

### 3.2.2. Algoritmo de Simulación

El algoritmo de simulación recibe como entrada un circuito hidráulico/neumático en la forma de una lista de componentes con sus conexiones. Estos se pueden armar fácilmente a nivel de programador usando las funciones ya existentes en el simulador de YOY pero se necesitarían arreglos menores para la interfaz del usuario del programa. Todo ello para que se considere la segunda conexión imaginaria que se propuso, de forma que sea invisible al usuario.

El simulador ya cuenta con una función de análisis de nombre ***analyzeCircuit*** que toma la entrada y genera una lista de nodos  $N$  donde cada uno tiene una lista de los componentes y el puerto con el que se conectan a este. Se tendrá otra lista  $NTension$  del tamaño igual a la cantidad de nodos donde se almacenan las incógnitas del sistema, para circuitos eléctricos esto era el voltaje en el nodo, pero para el caso representará el cambio de presión en el tiempo. Por último, se crea la matriz del sistema  $A$  y estampa todos los componentes para luego hacer una simplificación de la matriz y aplicar factorización  $LU$ .

Todo lo generado por ***analyzeCircuit*** es necesario para el algoritmo. En ese sentido esta función no necesita ser modificada, por lo que se mantendrá como caja negra. Pero sí necesita que se agreguen tres listas del largo de  $N$ . La primera se llamará  $NPressure$  y almacenará las presiones del nodo, ya que  $NTension$  solo guarda la variación de presión por segundo. La segunda lista será  $NMaxPressure$  que contendrá la presión máxima que puede alcanzar el nodo, esta solo es relevante al caso hidráulico y se crea revisando la presión máxima de cada componente conectado al nodo y elige la mayor. La tercera lista será  $NMustCheck$  también de largo  $N$  que contendrá valores de verdadero y falso, su uso se explicará más adelante. De momento se definirá ***analyzeCircuitExtended*** como el siguiente algoritmo:

---

#### ***analyzeCircuitExtended()***

---

```

analyzeCircuit()
NPressure = newArray(N.length)
NPressure.fill(0)
NMaxPressure = newArray(N.length)
NMaxPressure.fill(0)
i = 0
while i < N.length do
  for tuple in N[i] do
    if tuple.component.getMaxPressure() > NMaxPressure[i] then
      NMaxPressure[i] = tuple.component.getMaxPressure()
    end if
  end for
  i = i + 1
end while
NMustCheck = newArray(N.length)
NMustCheck.fill(false)

```

---

Como se puede ver, se agrega la creación de las listas usando *Array* e inicializando sus valores con *fill*<sup>38</sup>. De *N* se obtiene acceso a los componentes para inicializar *NMaxPressure*, el método *getMaxPressure()* es definido para cada componente y retorna la presión máxima que pueden generar en el nodo.

En los componentes hidráulicos, una bomba entregará la presión máxima a la que puede trabajar, un tanque la presión que contiene actualmente y un actuador la presión máxima entre ambos compartimientos comprimidos al máximo. Para elementos neumáticos no es necesario limitar la presión, esto pues se considera que trabajan con fluido compresible, por lo que su método retorna un valor "Infinito".

Luego del proceso de análisis del circuito se ejecuta la función ***runCircuit*** para realizar la simulación. Esta recibe como parámetro la cantidad de tiempo que se quiere simular, aunque, normalmente, estará funcionando constantemente en el programa. En cada iteración correspondiente a un tiempo *t* se recorre la lista de componentes y para cada uno se llama su método ***startIteration***. Se usa para ejecutar cualquier código pertinente a las funciones del componente previo a resolver el sistema, aquí se hacen modificaciones en la matriz para los componentes como, por ejemplo, bomba que tienen estampas que cambian en el tiempo. Posteriormente si hubo cambios en la matriz *A* se volverá a realizar la factorización *LU*<sup>39</sup> para luego resolver el sistema usando *forward and backward substitution*. Normalmente, esto entregaría una lista de soluciones *NTension* con todos los voltajes de cada nodo y se continuaría actualizando cada componente de cada nodo con estos resultados.

En este caso, la lista *NTension* contendrá el cambio de presión en el tiempo  $\Delta P_i / \Delta t$  del nodo pero se necesita entregar la presión del nodo a los componentes, así que se toma *NTension[i]* que contiene el  $\Delta P_i / \Delta t$  del nodo y se suma a *NPressure[i]* para obtener la presión total del nodo. En caso de que esta suma fuera a exceder el valor de *NMaxPressure[i]* el valor de *NTension[i]* se modifica para que alcance el máximo sin rebasarlo.

Habiendo obtenido la presión total de cada nodo para el instante *t* que se está calculando se entrega a cada componente el *NPressure[i]* junto con el *NTension[i]* del nodo *i* real<sup>40</sup> al que están conectados. Con esto, todos los componentes tienen cargados los valores necesarios para terminar la iteración, así que para cada uno se llama al método ***stepFinished*** donde actualizarán cualquier variable propia del componente. Por ejemplo, el caso del actuador que necesitará actualizar la posición de su barra. Se describe el algoritmo de simulación propuesto como:

---

<sup>38</sup>Se usaron *Array* de javascript para describir el algoritmo ya que es el lenguaje en que se programó el simulador

<sup>39</sup>La factorización *LU* de una iteración pasada se puede reusar si no hay cambios en la matriz, esto ahorra bastante tiempo de procesamiento

<sup>40</sup>Recordar que cada componente estará conectado a 2 nodos y para el caso hidráulico/neumático solo uno es real, el otro imaginario se ignora pues no almacena información relevante

---

**runCircuitExtended(T)**

---

```

steps = T/Δt
iter = 0
while iter < steps do
  for component in currentComponents do
    component.startIteration()
  end for
  if mustCalcFactor then
    A.lu_factor()
  end if
  NTension = A.lu_solve()
  i = 0
  while i < N.length do
    if NPressure[i] + NTension[i] * Δt > NMaxPressure[i] then
      NTension[i] = NMaxPressure[i] - NPressure[i]
    end if
    NPressure[i] = NPressure[i] + NTension[i] * Δt
    for tuple in N[i] do
      tuple.component.setPinTension(tuple.pin, NPressure[i], NTension[i])
    end for
    i = i + 1
  end while
  for component in currentComponents do
    component.stepFinished()
  end for
  iter = iter + 1
end while

```

---

Esta sería, de momento, la estructura básica del algoritmo de solución. Los métodos *lu\_factor()* y *lu\_solve()* de la matriz *A* se encargan de realizar la factorización *LU* y aplicar *forward and backward substitution* para resolver el sistema respectivamente.

Se ve que cada elemento de *N*, la lista de nodos, contiene una lista de tuplas con *component* y *pin*, el segundo corresponde al puerto de conexión del componente. El método *setPinTension* se usa para actualizar la presión del componente, y como se puede ver se envía el *pin* para que el componente identifique si los datos que recibe son de su *pin* real o el imaginario y, como ya se mencionó, de eso dependerá si debe actualizarse o no.

Queda por explicar que ocurre en *startIteration*, *stepFinished* y *setPinTension* de cada componente, incluyendo además un caso que no se ha considerado.

### 3.2.3. Tanques con Distintas Presiones

Se plantea que todos los tanques conectados al mismo nodo, en paralelo, tendrían la misma presión y crecerían al mismo ritmo, pero ¿qué ocurriría si uno o más tanque se conectan ya con carga en su interior?.

En ese caso la presión no será la misma en cada tanque y por consiguiente, el supuesto inicial no servirá para resolver esta situación. De acuerdo a las leyes de la física, las presiones tenderán a equilibrarse y una vez así, se puede seguir como siempre. Para estos fines, el comportamiento que se simula para llevar distintos tanques al equilibrio es el siguiente:

1. Tanque(s) con la menor presión corresponderá a la presión del nodo y se llenará normalmente.
2. Los demás Tanques con mayor presión a la del nodo expulsaran su flujo, tal como una bomba, aumentando la presión del nodo y los tanques que están a su nivel.
3. Los Tanques cuya presión baja, eventualmente alcanzarán la presión del nodo y dejarán de expulsar y pasarán a recibir.
4. Este comportamiento se mantiene hasta que todos los tanques tengan la misma presión.

Este comportamiento describe cómo el flujo toma el camino con menor resistencia, que, en este caso, serían los tanques con menor presión. Nótese que si la bomba está conectada, se sigue el mismo comportamiento solo que la presión puede seguir aumentando después de alcanzar el equilibrio.

Para lograr esto se necesita hacer dos cosas, identificar para un nodo cuál es la menor presión que tiene conectada y dar a los tanques la capacidad para reaccionar a la presión del nodo y pasar de recibir flujo a expulsarlo. El primer punto necesita una función que revise la lista de los componentes conectados al nodo y verifique cuál es la menor presión, esto tendría la siguiente estructura:

---

#### ***checkNodePressure(i)***

---

```

min = INFINITY
for tuple in N[i] do
  if tuple.component.hasPressure() and tuple.component.getPressure() < min
  then
    min = tuple.component.getPressure()
  end if
end for
if min ≠ INFINITY then
  NPressure[i] = min
end if

```

---

Se obtiene la presión de cada componente usando *getPressure()* método que entrega este valor, y *hasPressure()* entregará un verdadero o falso dependiendo si el componente debe participar en esta comparación. Por ejemplo, la bomba no tiene una presión que se asocie al nodo. Ahora se llama esta función dentro de la función de análisis:

---

***analyzeCircuitExtended()***

---

```

analyzeCircuit()
NPressure = newArray(N.length)
NPressure.fill(0)
NMaxPressure = newArray(N.length)
NMaxPressure.fill(0)
i = 0
while i < N.length do
  for tuple in N[i] do
    if tuple.component.getMaxPressure() > NMaxPressure[i] then
      NMaxPressure[i] = tuple.component.getMaxPressure()
    end if
  end for
  i = i + 1
end while
NMustCheck = newArray(N.length)
NMustCheck.fill(false)
i = 0
while i < N.length do
  checkNodePressure(i)
  i = i + 1
end while

```

---

Normalmente hacer esta identificación en el análisis previo a la simulación sería suficiente, pero por cómo funcionan los actuadores que cambian su presión a medida que su barra se mueve, también será necesario hacer esta revisión cada vez que esto ocurra.

La mejor solución será que, para componentes donde este caso pueda ocurrir, revisen en ***stepFinished*** si su presión se volvió distinta a la presión del nodo y en ese caso modificarán el valor de *NMustCheck* del nodo correspondiente para que antes de la próxima iteración de ***runCircuitExtended*** ejecute la función para ese nodo.

Antes de terminar con esta discusión, queda revisar lo que pasa cuando hay solo un componente en un nodo. Esto, tanto para tanques y bomba, debería ser considerado una fuga pero es interesante el caso del tanque. Esto porque al aplicar el proceso anterior en un tanque, solo determinaría la presión del nodo y por ende no habría una diferencia de presión para que entre en el modo expulsar.

Para solucionar esto se marcan los nodos con solo un componente como nodos con fuga y para ellos, entonces, su presión siempre será 0 e ignoraran *checkNodePressure*. Para hacer esta marca se usa otro array de booleanos *leakNode* donde un valor verdadero en *leakNode[i]* indicará una marca de fuga en el nodo *i* y se armará este array identificando

cada nodo formado por solo un elemento en ***analyzeCircuitExtended()***:

---

***analyzeCircuitExtended()***

---

```

analyzeCircuit()
NPressure = newArray(N.length)
NPressure.fill(0)
NMaxPressure = newArray(N.length)
NMaxPressure.fill(0)
i = 0
while i < N.length do
  for tuple in N[i] do
    if tuple.component.getMaxPressure() > NMaxPressure[i] then
      NMaxPressure[i] = tuple.component.getMaxPressure()
    end if
  end for
  i = i + 1
end while
NMustCheck = newArray(N.length)
NMustCheck.fill(false)
leakNode = newArray(N.length)
leakNode.fill(false)
i = 0
while i < N.length do
  count = 0
  for tuple in N[i] do
    count = count + 1
    if count > 1 then
      Break
    end if
  end for
  if count == 1 then
    leakNode[i] = true
  end if
  i = i + 1
end while
i = 0
while i < N.length do
  if !leakNode[i] then
    checkNodePressure(i)
  end if
  i = i + 1
end while

```

---

Ahora que el análisis incluye la creación de *leakNode* y lo usa en un condicional *if* para validar la llamada a *checkNodePressure(i)* es necesario agregar esto mismo en **runCircuitExtended(T)**, de tal manera que se valide lo anterior y la suma de presión en *NPressure[i]*:

---

**runCircuitExtended(T)**


---

```

steps = T/Δt
iter = 0
while iter < steps do
  for component in currentComponents do
    component.startIteration()
  end for
  if mustCalcFactor then
    A.lu_factor()
  end if
  NTension = A.lu_solve()
  i = 0
  while i < N.length do
    if !leakNode[i] then
      if NPressure[i] + NTension[i] * Δt > NMaxPressure[i] then
        NTension[i] = NMaxPressure[i] - NPressure[i]
      end if
      NPressure[i] = NPressure[i] + x[i] * Δt
    end if
    for tuple in N[i] do
      tuple.component.setPinTension(tuple.pin, NPressure[i], NTension[i])
    end for
    i = i + 1
  end while
  for component in currentComponents do
    component.stepFinished()
  end for
  i = 0
  while i < N.length do
    if NMustCheck[i] and !leakNode[i] then
      checkNodePressure(i)
      NMustCheck[i] = false
    end if
    i = i + 1
  end while
  iter = iter + 1
end while

```

---

Con esta versión de *runCircuitExtended(T)* el solver tiene lo necesario para comprender los casos, de presiones distintas en un nodo, que se generan tanto al principio como en medio de la simulación, y las fugas cuando solo hay un componente. Lo único que queda por revisar son los *startIteration* y *stepFinished* de cada componente.

### 3.2.4. Métodos *startIteration* y *stepFinished*

Ahora, para cada componente, se explica como funcionarán estos métodos, empezando por el más simple: la bomba. Este caso es bastante sencillo. Se define *startIteration* donde se calcula el flujo, obteniendo la presión del nodo, y se realiza la stampa. Este método difiere entre lineal y cuadrático por la forma en que calculan el flujo:

---

#### ***PumpLinear.startIteration()***

---

```

PO = Solver.getNodePressure(this)
this.flow = this.Qmax - this.Qmax/this.Pmax * PO
if this.flow < 0 then
    this.flow = 0
end if
this.removeStamp()
this.stamp()

```

---



---

#### ***PumpQuadratic.startIteration()***

---

```

PO = Solver.getNodePressure(this)
this.flow = sqrt((this.Pmax - PO)/this.c)
if this.flow < 0 then
    this.flow = 0
end if
this.removeStamp()
this.stamp()

```

---

Se aprovecha este caso simple para explicar métodos que se reutilizan más adelante. *Solver* hace referencia al objeto que contiene todo lo necesario para la simulación, incluyendo *analyzeCircuitExtended()* y *runCircuitExtended(T)*.

Su método *getNodePressure(Component)* retorna la presión del nodo al *Component* que está conectado y *stamp()* es el método del componente que modificará la matriz con la stampa del componente. Antes de llamarlo se usa *removeStamp()* para remover el valor estampado en la iteración previa. En el método *stamp()*, que se trabaja como caja negra, además de estampar revisa el estado del componente para hacer la stampa correspondiente y por lo mismo, éste es propio de cada componente.

Se sigue con el tanque, este proceso es un poco más complicado. En *startIteration* tendrá que diferenciar el estado en que se encuentra el tanque. Esto es, si recibe o expulsa, y dependiendo de eso hacer la stampa correspondiente:

---

**tank.startIteration()**

---

```

 $P_O = Solver.getNodePressure(this)$ 
if !this.source and this.pressure >  $P_O$  then
    Solver.mustCalcFactor = true
    this.removeStamp()
    this.source = true
else if !this.source and this.resistanceChange then
    Solver.mustCalcFactor = true
    this.removeStamp()
    this.stamp()
else if this.source and this.pressure ≤  $P_O$  then
    Solver.mustCalcFactor = true
    this.removeStamp()
    this.stamp()
    this.source = false
end if
if this.source then
    this.flow =  $\sqrt{(this.pressure - P_O)/this.C}$ 
    this.removeStamp()
    this.stamp()
    this.pressure = this.pressure - this.flow * this.resistance
end if

```

---

El estado del tanque se guarda en su atributo *source*, el que es verdadero si es una fuente de flujo. El primer y tercer condicional usan este atributo junto con la condición correspondiente para determinar si hay un cambio de estado.

El segundo condicional usa un atributo *resistanceChange* el cual será verdadero si en la iteración pasada *resistance*<sup>41</sup> cambió. Esto ocurre en el caso de un actuador neumático al modificar su tamaño cambiando la resistencia del recipiente y también se usará para el momento en que un tanque hidráulico se llena reemplazando la resistencia por un valor muy grande para equiparar rápidamente su presión con el exterior.

El último condicional ocurre siempre que el tanque esté funcionando como fuente. Calcula y estampa el flujo de la misma manera que lo haría una bomba. En caso de estar recibiendo flujo, este se calculará en **stepFinished**. En este punto ya se ejecutó *setPinTension* por lo que se tienen los valores necesarios para calcularla:

---

**tank.stepFinished()**

---

```

if this.source then
    this.flow = -this.NTension/this.resistance
end if

```

---

Donde *NTension* es el atributo en el cual se almacena el *NTension*[*i*] calculado en el solver,

---

<sup>41</sup>Atributo que almacena el equivalente a resistencia de un tanque que se había definido

que corresponde al nodo donde se conectó este tanque, el signo es negativo para señalar que el flujo se absorbe dentro del tanque en lugar de expulsarlo al sistema.

A continuación, se hablará del actuador. Al ser dos tanques juntos, la mayoría de su código está listo, solo necesita describir el movimiento de su barra en **stepFinished**:

---

**actuator.stepFinished()**

---

```

FL = this.tankLeft.getPressure * this.traversalAreaLeft
FR = this.tankRight.getPressure * this.traversalAreaRight
this.acceleration = (FL - FR)/this.mass
if (this.tankLeft.source and this.acceleration >= 0)|| (this.tankRight.source and
this.acceleration <= 0) then
    this.acceleration = 0
end if
movement = (this.acceleration * Δt * *2)/2 + this.speed * Δt
if (this.tankLeft.isMaxed and movement < 0) or (this.tankRight.isMaxed and
movement > 0) then
    movement = 0
end if
this.position = this.position + movement
this.boundPosition()
this.speed = this.speed + this.acceleration * Δt
this.tankLeft.subVolume(movement * this.traversalAreaLeft)
this.tankLeft.mustCheckTrue()
this.tankRight.subVolume(movement * this.traversalAreaRight)
this.tankRight.mustCheckTrue()
if this.tankRight.isLeak() then
    this.tankRight.expelVolume(movement * this.traversalAreaRight)
else if this.tankLeft.isLeak() then
    this.tankLeft.expelVolume(movement * this.traversalAreaRight)
end if

```

---

Prácticamente son solo cálculos matemáticos básicos de lo destacable se dice que *tankLeft* y *tankRight* son atributos que almacenan los tanques dentro del actuador y que se usa un método *boundPosition* después de calcular la nueva posición para que *position* se acote a los límites puestos por las dimensiones del actuador.

Se incluye también un condicional para volver *acceleration* igual a 0 si esta va en dirección opuesta a un tanque que está expulsando su contenido, lo que se sabe revisando su atributo *source*, con el fin de tener un movimiento de la barra más estable y no oscilatorio cuando el tanque que se comprime tiene un aumento mucho más rápido de presión pero este tiene hacia donde liberar flujo.

El siguiente condicional revisa si el movimiento producido va en la dirección de un tanque lleno, revisando el atributo *isMaxed* de tanque, y si es el caso convierte *movement* en 0 para que se respete la no compresión en tanques hidráulicos. Este condicional se ignora si el actuador es neumático, ya que, en el si se permite la compresión.

Lo más importante de este método es la introducción del método *subVolume* de tanque para indicarles que su volumen fue modificado. En el caso hidráulico esto es reducir la cantidad de fluido dentro del tanque y en el neumático un cambio en el volumen del contenedor, ello conlleva a su vez un cambio en su resistencia, cosas que ya se explicó anteriormente en el modelo de actuador.

Una vez que se ejecutó *subVolume* se debe modificar el valor de *NMustCheck[i]* asociado al tanque correspondiente para que el solver revise la presión mínima en el nodo, cosa que se explicita con el método *mustCheckTrue()* pero esta operación podría ocurrir en *subVolume*.

Se agrega por último, un condicional para cada tanque donde se evalúa el método *isLeak()* el cual revisa si el nodo en que está el tanque está marcado como *true* en la lista *leakNode* indicando que el tanque está expulsando libremente su contenido, y si este es el caso el método *expelVolume()* se encargará de modificar el flujo para que en la siguiente iteración se expulse todo el contenido del tanque manteniendo la presión en 0.

Se hace esto, ya que, considerando que si el otro compartimiento está en equilibrio con el ambiente debería expulsar su contenido sin resistencia al moverse la barra. Con esto el algoritmo de solución cubre la mayoría de los casos, pero hay una cosa más que se debe agregar para completar todos los casos propuestos.

### 3.2.5. Fuga como componente

En el caso de prueba número 10 y 11 con diagramas 35 y 36 respectivamente se puede ver que se usa una fuga como una entidad. Si bien no es algo que se tomó de forma literal al momento de definir los casos de prueba con la empresa, y el experto, para estos casos será necesario definir la fuga como un componente.

Esto porque la infraestructura actual que se desarrolla no considera la posibilidad de que un nodo con dos componentes tenga fuga. Esto no es incorrecto, como ejemplo en el caso 10 de una bomba conectada a un actuador y una fuga solo se podría saber que tiene una fuga si esta se explicita, si todo lo que se sabe es que un actuador se conecta a una bomba, lo normal es pensar que no hay fuga y es esto lo que hace el algoritmo.

Para el caso 11 donde se usa la válvula el problema está en que a pesar de que esta solo sirve para cambiar las conexiones, sigue siendo un componente en el nodo y esto impide que se reconozca una fuga, este problema viene de la función ***analyzeCircuit*** que se trata como caja negra.

Modificarla podría traer problemas para el simulador de circuitos eléctricos así que lo mejor es para estos casos también usar la fuga explícita, ya se tuvo que crear para el caso 9 así que no hace daño reusarla aquí. Lo único que necesita el componente fuga que se describe es una estampa de resistencia con un valor muy bajo, puede ser modificado por el usuario para fugas más leves o más graves, y un ***stepFinished*** como el siguiente:

**Leak.stepFinished()**

```

this.pressure = 0
this.mustCheckTrue()
    
```

En ella, se asegura que la presión en ese punto sea 0 y se informa al solver que debe verificar la presión más pequeña en este nodo.

Por fin se ha descrito en forma completa la propuesta a solución, esta será programada en javascript como ya se había mencionado. Las funciones y/o algoritmos que se describen deben entenderse como una simplificación de lo programado.

Existen otros detalles provenientes tanto del lenguaje de programación como la infraestructura ya existente que se debieron considerar, pero no eran relevantes para esta descripción de la propuesta.

Además varios métodos fueron descritos con palabras como lo es por ejemplo el método *subVolume* o toda la válvula, pero estos también tuvieron que ser programados.

Con esta tarea completada se pasa a la siguiente sección para confirmar que tan válida es la solución.

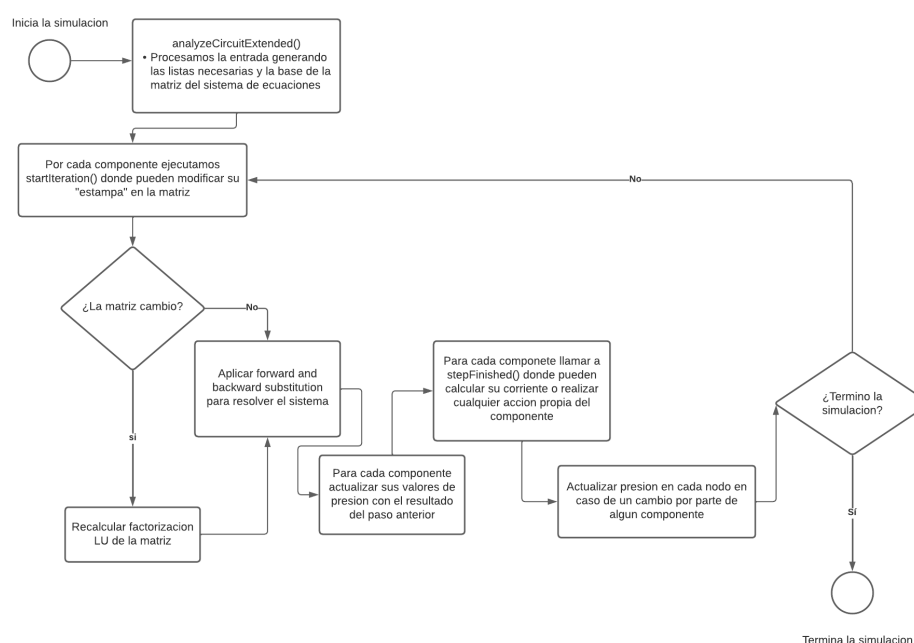


Figura 48: Diagrama Resumido del algoritmo propuesto  
Fuente: Elaboración Propia.

## CAPÍTULO 4

### VALIDACIÓN DE LA SOLUCIÓN

Para validar la solución será necesario que apruebe todos los casos de prueba, esto es que al recrearlos y simularlos con el algoritmo, se obtengan los resultados deseados que se señalan en su descripción de la sección anterior.

El simulador está programado en javascript y usa **Node.js** para ejecutarlo en un servidor, las pruebas se realizarán abriendo un servidor local en un computador. Para probar los casos de prueba se programarán test unitarios con la ayuda del *framework*<sup>42</sup> *Mocha* y la librería *Chai* para javascript, herramientas y método ya utilizado por la empresa para probar el simulador. La ventaja de este acercamiento es que los test unitarios programados se pueden guardar para ser ejecutados en el futuro lo que permite que durante un nuevo desarrollo del simulador se pueda verificar que el sistema aún funcione como debe a pesar de los cambios, facilitando el proceso de mantención de código.

Como el desarrollo de esta memoria se centra en el algoritmo solver y no en los aspectos visuales del simulador, se proveerán como evidencias valores numéricos de la simulación que se extraen desde la consola. Estos valores incluirían presiones y flujos, y la forma en que se presenten dependerá del caso de prueba en particular, lo que si se mantendrá constante en todos los casos de prueba es una media del **tiempo simulado v/s tiempo de procesamiento**:

$$e = \frac{t_s}{t_p}$$

Este valor que se denota como  $e$  es la división entre el tiempo simulado y el tiempo de procesamiento que le tomó al algoritmo hacer esa simulación, se puede entender como la cantidad de tiempo que se puede simular en 1 segundo de procesamiento. Idealmente se intenta que todas las simulaciones tengan  $e \geq 1$ , ya que, eso significa que se puede simular en tiempo real sin problemas, en cambio para  $e < 1$  significa que se tendrá que esperar al algoritmo para que avance la simulación.

Este valor depende fuertemente de la cantidad de componentes simulados, el simulador tendrá algún límite, y la máquina donde se realizan las pruebas. No se quieren hacer pruebas de estrés, necesariamente, pero si se pretende demostrar que para un número razonable de componentes los casos de prueba cumplen con  $e \geq 1$  en la computadora donde se tomó la prueba.

Las pruebas se realizaron en una computadora con un procesador AMD Ryzen 9 5900X a 3.70 GHz, con 32 GB de Ram DDR4, una unidad M.2 SSD de 1 TB de almacenamiento, una tarjeta gráfica NVIDIA GeForce RTX 3060 ti con 8 GB VRam, Sistema Operativo Microsoft Windows 11 Pro con ambiente de trabajo Windows.

---

<sup>42</sup>Marco o esquema de trabajo generalmente utilizado por programadores para realizar el desarrollo de software

## 4.1. Pruebas

Antes de empezar con las pruebas, se determina el intervalo  $\Delta t$  que calcula el simulador en cada iteración, de momento se elige como  $\Delta t = 5 \cdot 10^{-3}$ . Un lapso de tiempo bastante pequeño para tener una buena precisión en los resultados sin aumentar innecesariamente el tiempo de procesamiento. En cada prueba será necesario describir la cantidad de componentes que se están usando y los parámetros con los que fueron creados, a modo de resumen se darán nombres a algunos componentes para poder reusarlos en pruebas siguientes.

Para los parámetros se usarán las unidades del sistema internacional, se medirán flujos en metros cúbicos por segundo  $[m^3/s]$  y la presión en Pascal  $[Pa] = [kg/m \cdot s^2]$ . Se podrían usar otras unidades o incluso no usar ninguna, ya que solo se necesita verificar el comportamiento característico de los valores y no su exactitud. Se incluyen de todas maneras para dar más realidad a las pruebas.

Como último dato relevante, al simulador, se considera la presión del ambiente como 0, esto significa que cada componente en fuga considera que la presión en su nodo es 0, se elige así porque es la presión más baja que pueden tener los tanques al ser inicializados.

### 1 Bomba funcionando sin conexión:

Para este caso se prueban con los dos modelos de bomba, lineal y cuadrática, se define la bomba lineal  $P_L$  con los siguientes parámetros:

- $Q_{max} = 1000[m^3/s]$
- $P_{max} = 6 \cdot 10^5[Pa]$

Y para la bomba cuadrática  $P_Q$ :

- $c = 6 \cdot 10^{-1}[kg/m^7]$
- $P_{max} = 6 \cdot 10^5[Pa]$

Con estos valores el flujo máximo para ambas correspondería a  $1000[m^3/s]$ , y en este caso este valor se debería mantener. Además, se debe observar que la presión se mantenga en 0. Al ejecutar la simulación se obtienen los siguientes valores para 10 instantes de tiempo distintos:

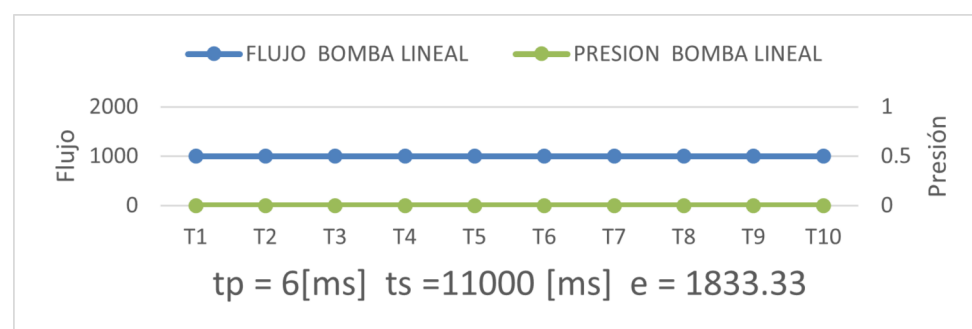


Figura 49: Prueba de  $P_L$  sin conexión  
Fuente: Elaboración Propia.

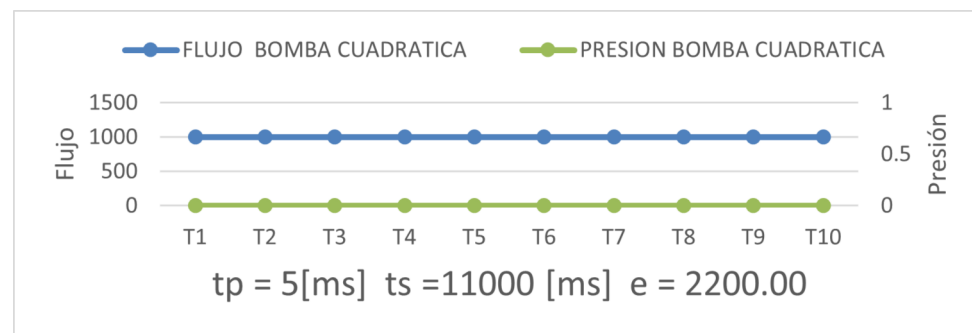


Figura 50: Prueba de  $P_Q$  sin conexión  
Fuente: Elaboración Propia.

Se ve en las gráficas que el flujo tuvo un valor de 1000 y la presión 0 para todo el intervalo simulado para ambas bombas. También muestran el tiempo de procesamiento, el tiempo simulado y su división  $e$  la cual se aprecia tiene un valor mucho mayor a 1 por lo que se está en el caso positivo donde se puede simular sin problemas.

Se destaca que para este caso el algoritmo no tiene necesidad de simular, pues no hay elemento que acumule presión en el nodo, por esto tenemos valores de  $e$  tan grandes. Con esto se concluye de forma exitosa este caso de prueba.

## 2 Tanque lleno sin conexión:

Para este caso se prueba con los dos modelos de Tanque, Hidráulico y Neumático, se define el tanque hidráulico lleno  $T_{Hf}$  con los siguientes parámetros:

- $V_{max} = 200[m^3]$
- $A_t = 2[m^2]$
- $P_T = 6 \cdot 10^5[Pa]$

Con  $V_{max}$  el volumen máximo,  $A_t$  el área transversal y  $P_T$  la presión del tanque. También se define un tanque Neumático  $T_{Nf}$  con parámetros:

- $V = 0,15[m^3]$
- $P_T = 6 \cdot 10^5[Pa]$

Con  $V$  el volumen del tanque y  $P_T$  vuelve a hacer referencia a la presión. Se realizará una simulación graficando los valores de flujo y presión para 10 instantes de tiempo equiespaciados extraídos por consola. Se empieza con la gráfica de flujo para el tanque hidráulico obteniendo lo siguiente:

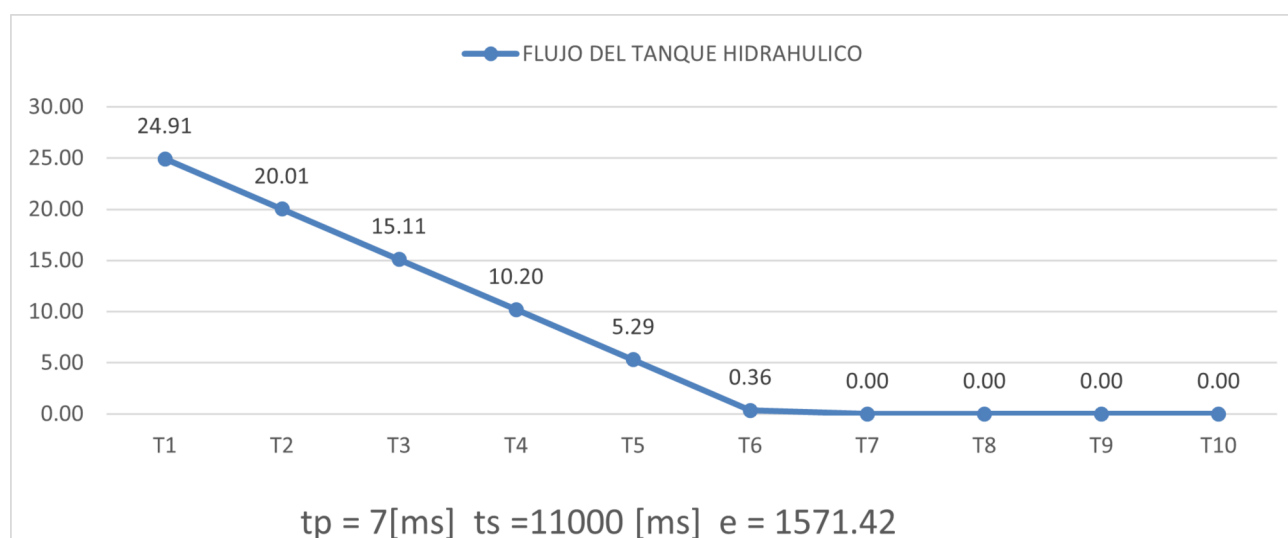


Figura 51: Prueba del Flujo de  $T_{Hf}$  sin conexión  
Fuente: Elaboración Propia.

Se observa cómo, con el paso del tiempo, el valor del flujo se reduce hasta volverse 0, que es lo que se espera pues el tanque está abierto, junto con esto la presión dentro del tanque también debería disminuir a medida que expulsa flujo y eso se ve en la siguiente gráfica:

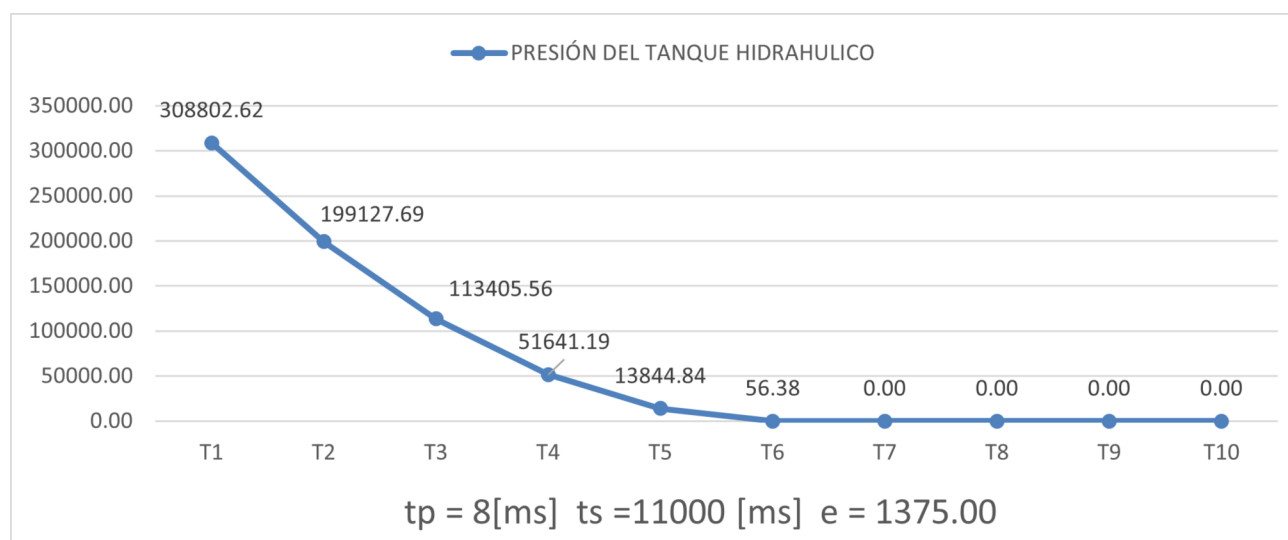


Figura 52: Prueba de la Presión de  $T_{Hf}$  sin conexión  
Fuente: Elaboración Propia.

Se ve que la presión del tanque también baja por lo que el comportamiento es correcto. Se repite el mismo proceso con el tanque neumático mostrando ambas gráficas de flujo y presión:

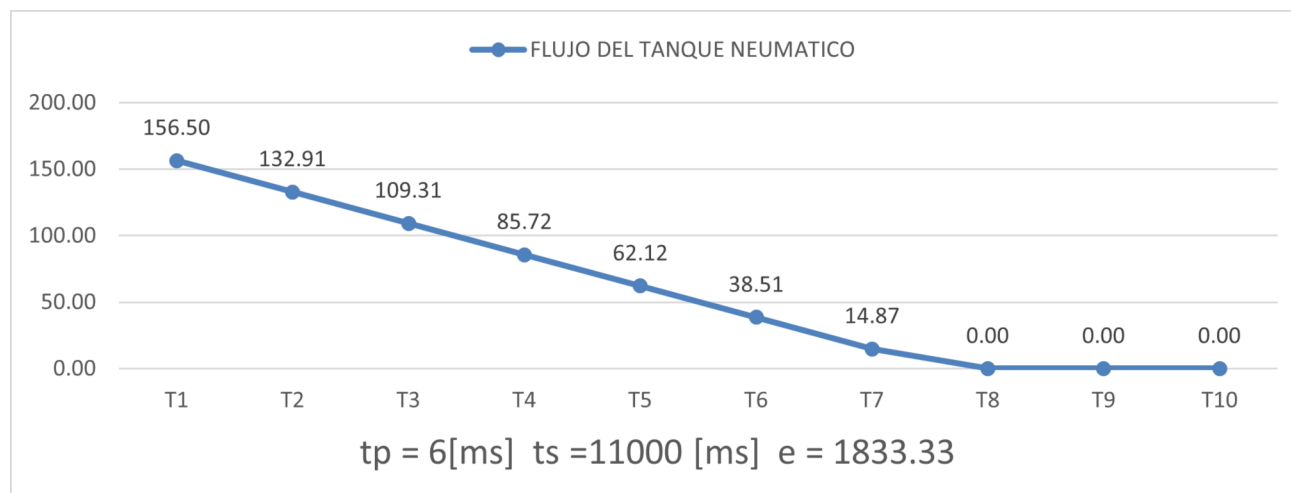


Figura 53: Prueba del Flujo de  $T_{Nf}$  sin conexión  
Fuente: Elaboración Propia.

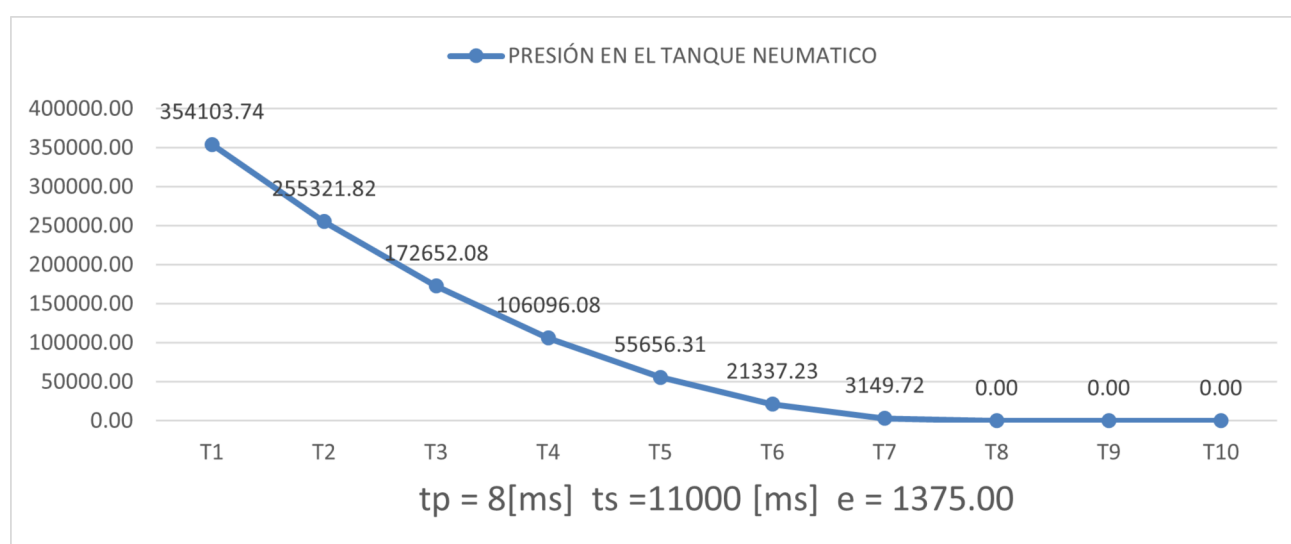


Figura 54: Prueba de la Presión de  $T_{Nf}$  sin conexión  
Fuente: Elaboración Propia.

Se observa que se respeta el mismo comportamiento, tanto el flujo como la presión, bajan con el tiempo hasta llegar a 0. Se destaca que para todos los casos se obtiene  $e > 1$  por ende se pueden simular en tiempo real sin problemas. Como se observó lo esperado, el caso de prueba fue exitoso.

### 3 Bomba conectada a Tanque vacío:

Se empieza con las interacciones entre componentes conectando un tanque vacío a la bomba, se usarán la bombas  $P_L$  y  $P_Q$  antes definidas junto con 2 tanques vacíos, uno hidráulico y el otro neumático, teniendo en total 4 combinaciones distintas que probar. El primer tanque vacío  $T_{He}$  será hidráulico y tendrá parámetros:

- $V_{max} = 200[m^3]$
- $A_t = 2[m^2]$
- $P_T = 0[Pa]$

Y el segundo será neumático  $T_{Ne}$ :

- $V = 2[m^3]$
- $P_T = 0[Pa]$

Primero se prueba la bomba lineal  $P_L$  con el tanque hidráulico  $T_{He}$  observando las siguientes gráficas revisando flujo y presión:

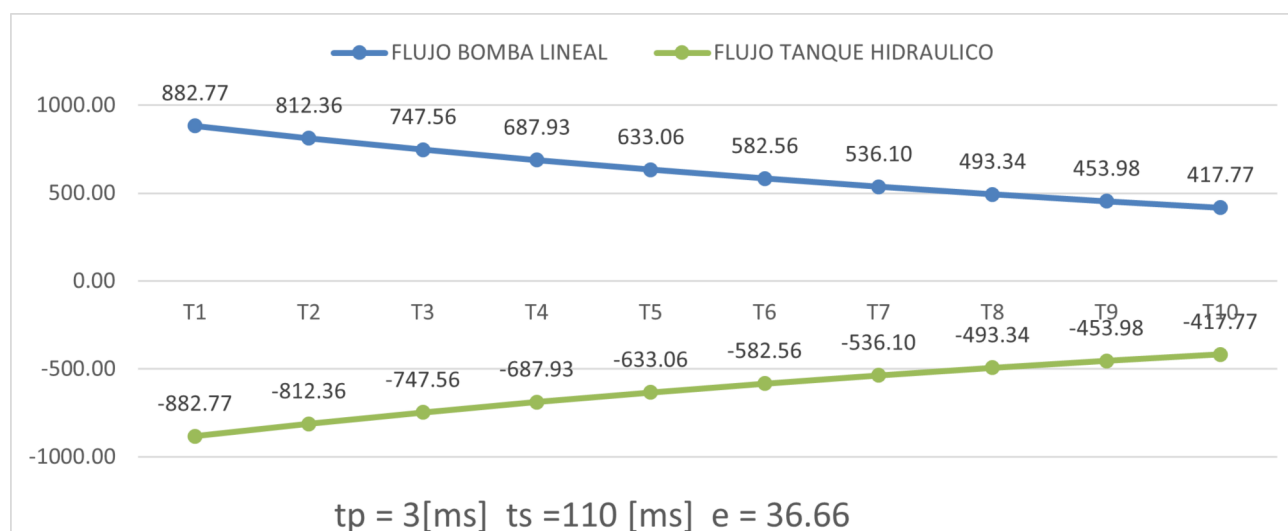


Figura 55: Prueba del Flujo de  $T_{He}$  conectado a  $P_L$   
Fuente: Elaboración Propia.

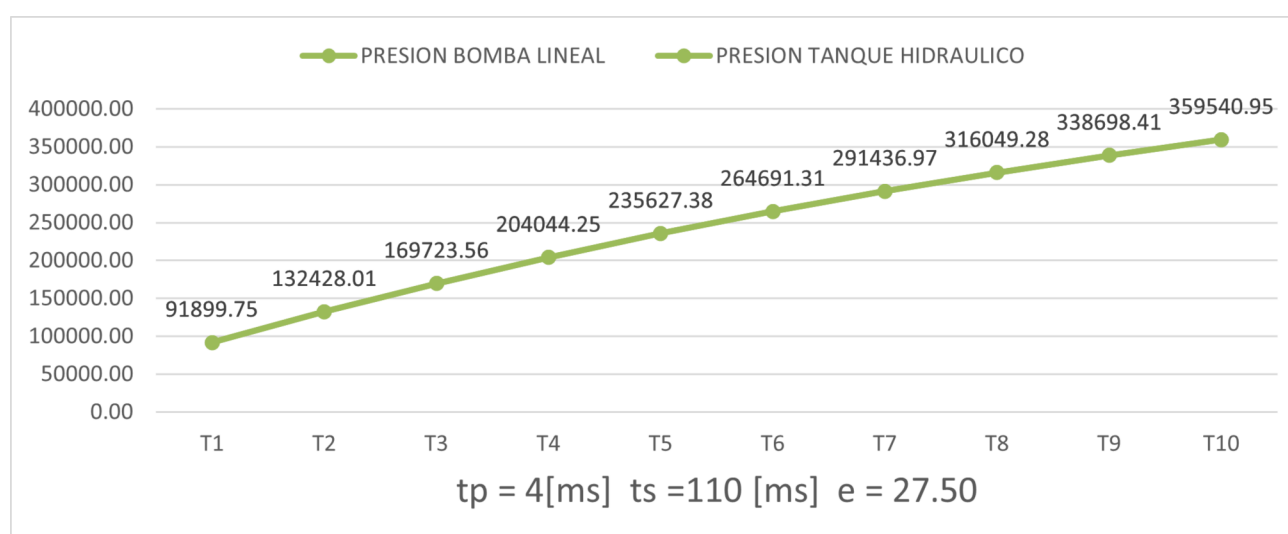


Figura 56: Prueba de la Presión de  $T_{He}$  conectado a  $P_L$   
Fuente: Elaboración Propia.

Como era de esperarse el flujo que expulsa la bomba va bajando con el tiempo, también, se ve que el valor del flujo de bomba es el mismo que el del tanque, pero en sentido contrario, para denotar que este está recibiendo.

Si ahora se prueba usando el mismo tanque, pero con la bomba cuadrática  $P_Q$  se obtiene lo siguiente:

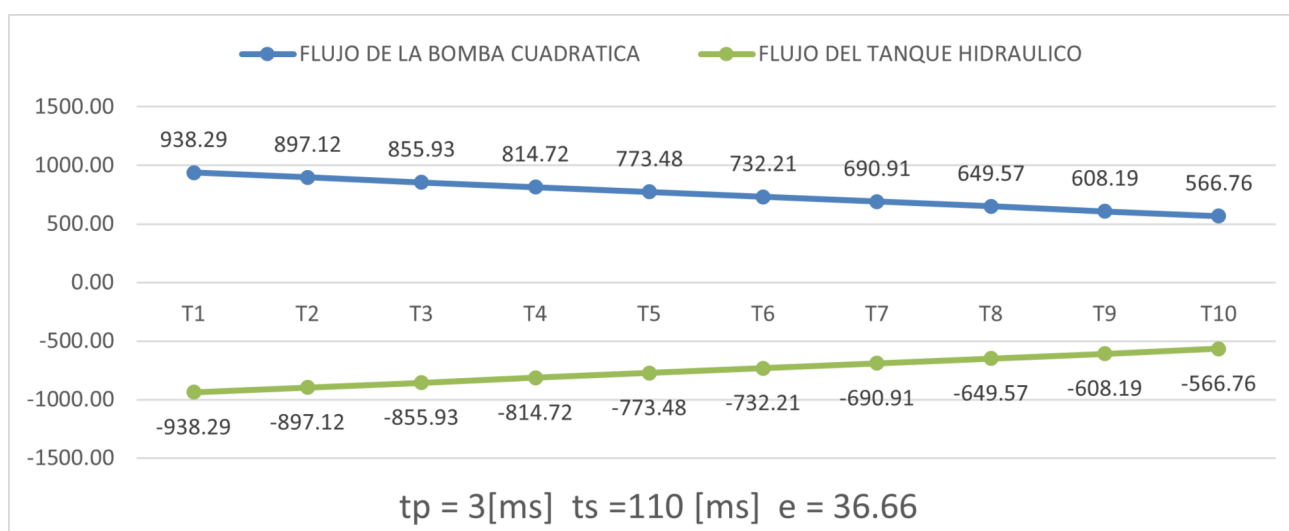


Figura 57: Prueba del Flujo de  $T_{He}$  conectado a  $P_Q$   
Fuente: Elaboración Propia.

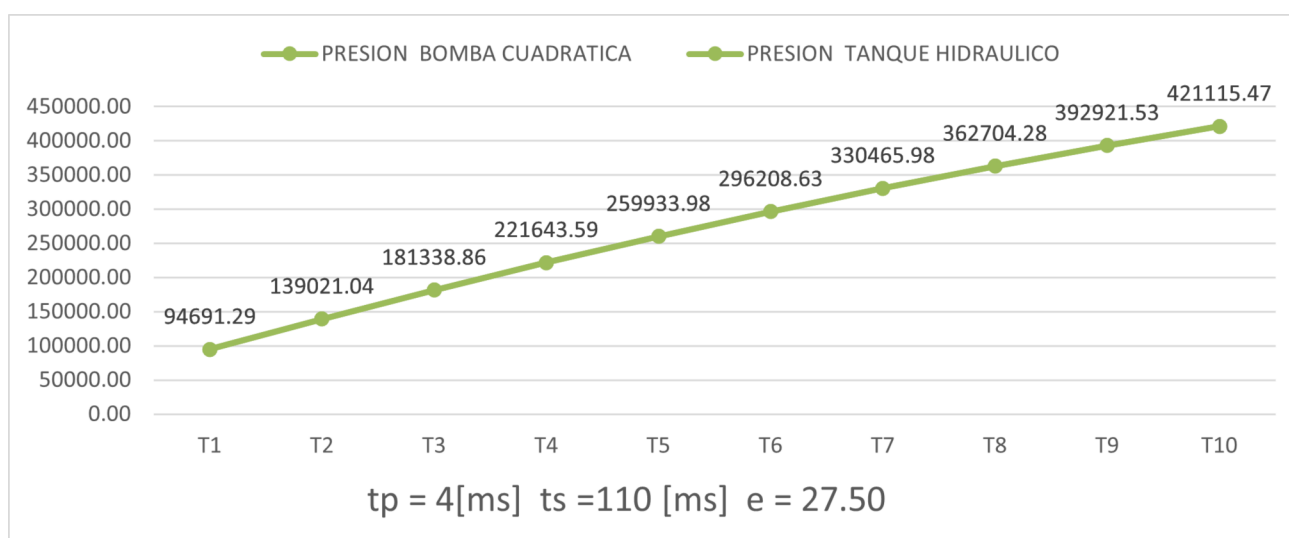


Figura 58: Prueba de la Presión de  $T_{He}$  conectado a  $P_Q$   
Fuente: Elaboración Propia.

Se observa el mismo comportamiento con un poco de variación en los valores. Quedaría confirmar que las bombas efectivamente dejen de expulsar flujo cuando la presión en el tanque alcanza la presión máxima de esta. En las primeras pruebas no se alcanza a llegar a dicho instante de tiempo así que para ambas bombas se repite la prueba pero con un tiempo más largo obteniendo los siguientes resultados:

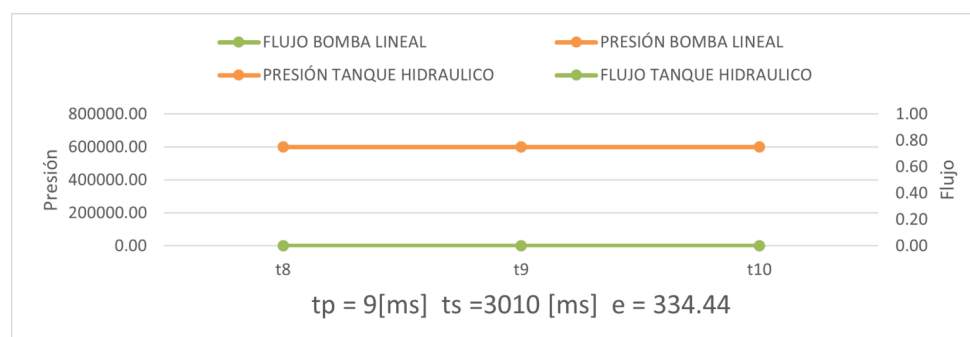


Figura 59: Prueba de la bomba  $P_L$  deteniéndose  
Fuente: Elaboración Propia.

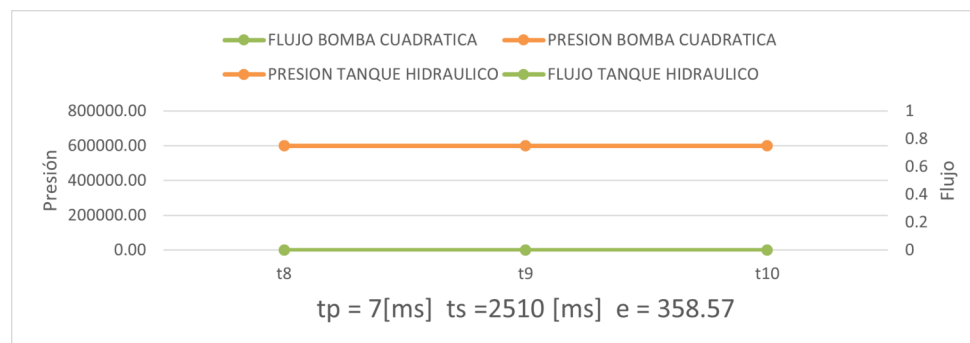


Figura 60: Prueba de la bomba  $P_Q$  deteniéndose  
Fuente: Elaboración Propia.

En ambos casos la bomba se detiene con la diferencia que para la bomba lineal se detuvo en un valor muy cercano a  $6 \cdot 10^5$  en lugar del valor exacto. Esto ocurrió probablemente, porque la variación de presión se volvió muy pequeña al acercarse al valor máximo, pero la diferencia es lo suficientemente pequeña para considerarlo el mismo valor por lo que no es erróneo. Considerando esto ambas bombas cumplen con la condición de detenerse al llegar a su máxima presión. Ahora se observan los resultados de conectar  $P_L$  y  $P_Q$  al tanque neumático  $T_{Ne}$  donde se debería ver el mismo comportamiento:

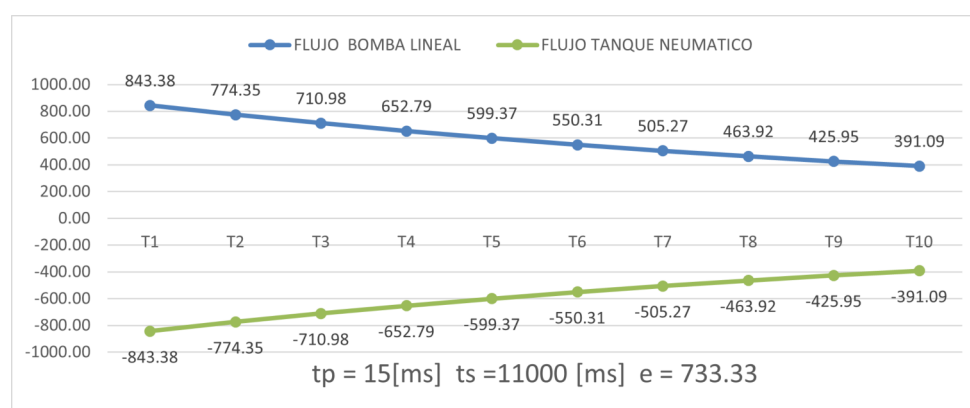


Figura 61: Prueba del Flujo del Tanque  $T_{Ne}$  conectado a la Bomba  $P_L$   
Fuente: Elaboración Propia.

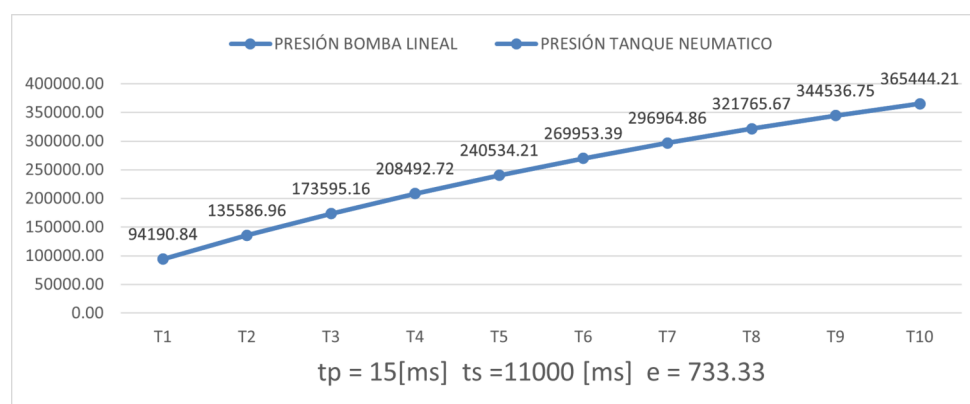


Figura 62: Prueba de la Presión del Tanque  $T_{Ne}$  conectado a la Bomba  $P_L$   
Fuente: Elaboración Propia.

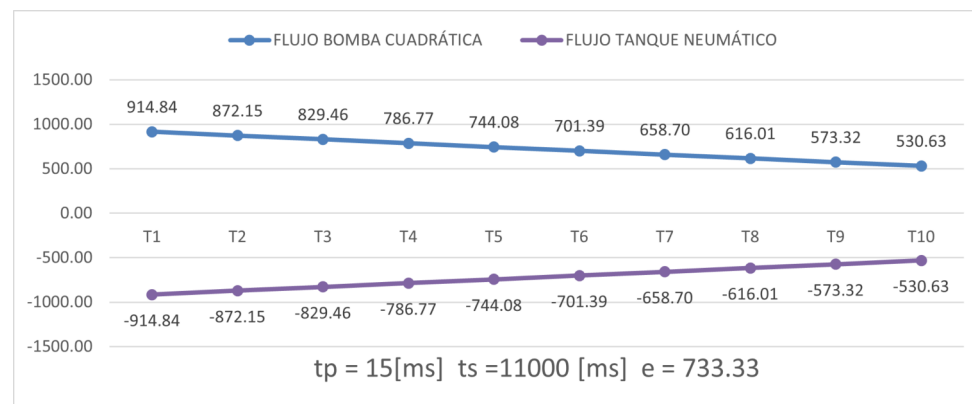


Figura 63: Prueba del Flujo del Tanque  $T_{Ne}$  conectado a la Bomba  $P_Q$   
Fuente: Elaboración Propia.

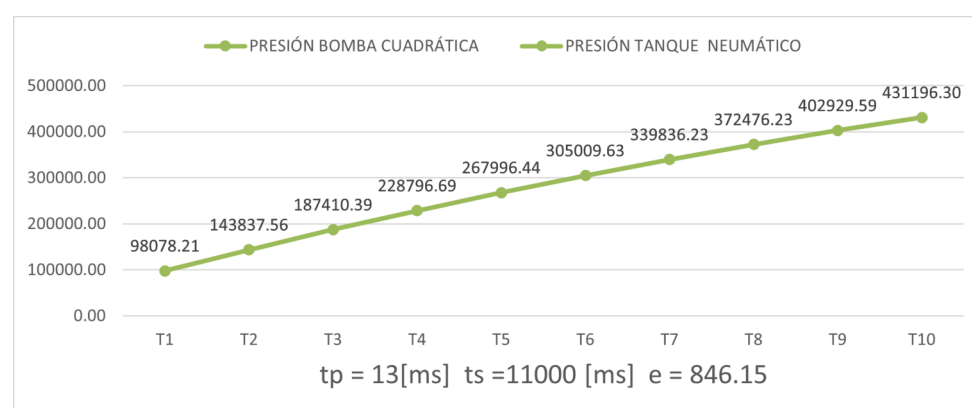


Figura 64: Prueba de la Presión del Tanque  $T_{Ne}$  conectado a la Bomba  $P_Q$   
Fuente: Elaboración Propia.

Se observa que el tanque  $T_{Ne}$  también se comporta como debe para ambas bombas, su presión crece en el tiempo y es claro que eventualmente alcanzará la presión máxima de las bombas. Ya se confirmó antes que estas se detienen al alcanzar esta presión por lo que no se necesita probar nuevamente.

Con esto se confirma que los dos modelos de bomba y tanque funcionan como deben para el caso más simple con un valor de  $e > 1$  por lo que este caso de prueba también es exitoso.

En lo que respecta a bombas se omitirán más evidencias con el modelo cuadrático y se continuará con el lineal esto pues ya se confirmó su correcto funcionamiento. Esto no quiere decir que los casos siguientes no se probaron con bomba cuadrática solo que no se agregaron sus evidencias para evitar redundancia.

#### 4 Tanque lleno conectada a otro Tanque Vacío:

Para esta prueba se pretende confirmar que los tanques eventualmente alcanzan el equilibrio y detienen el intercambio de flujo, se hará una prueba hidráulica con  $T_{Hf}$  y  $T_{He}$  y otra neumática con  $T_{Nf}$  y  $T_{Ne}$ . Agrego que no tiene sentido probar tanques hidráulicos conectados a neumáticos porque las reglas que los definen dependen del fluido que pasa por ellos y conectarlos en el programa sería como decir que mágicamente el agua se convierte en aire. Se observan primero los resultados para flujo y presión de tanques hidráulico:

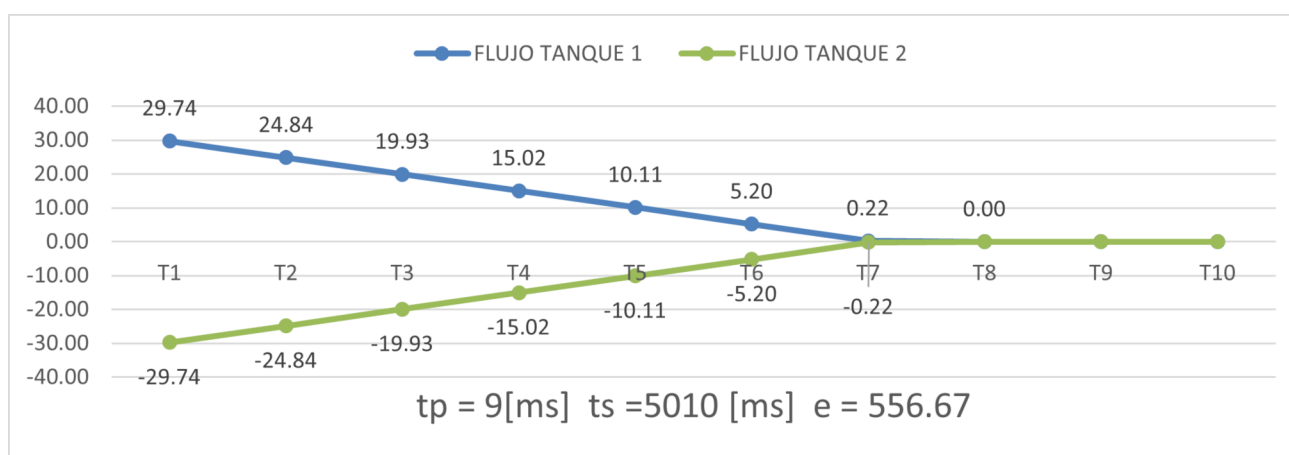


Figura 65: Prueba del Flujo de  $T_{Hf}$  conectado  $T_{He}$   
Fuente: Elaboración Propia.

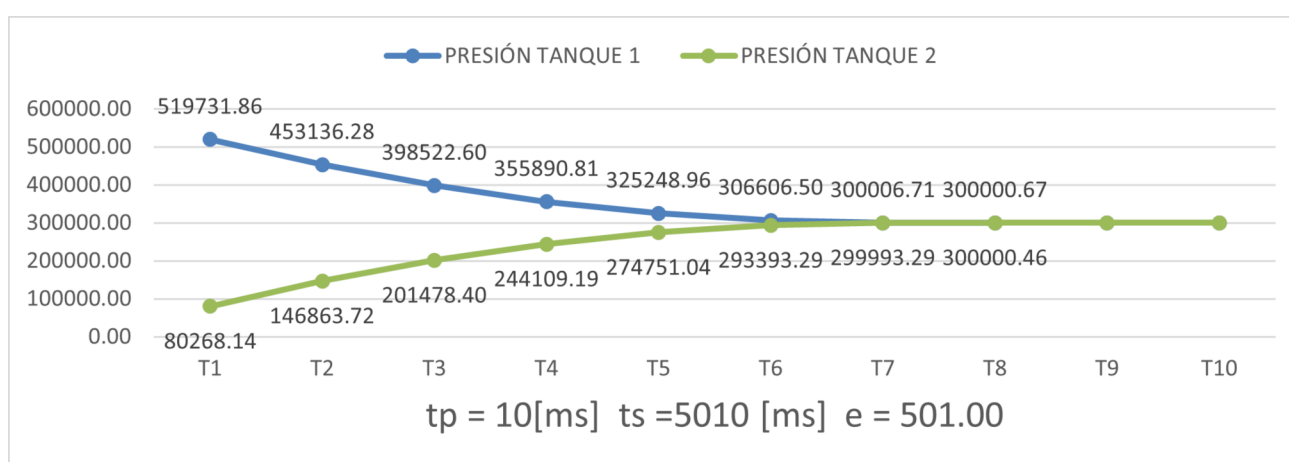


Figura 66: Prueba de la Presión de  $T_{Hf}$  conectado  $T_{He}$   
Fuente: Elaboración Propia.

Se ve en la prueba de flujos el tanque 1,  $T_{Hf}$ , expulsa flujo y el tanque 2,  $T_{He}$ , lo recibe, esta cantidad es cada vez más baja hasta volverse 0 donde los tanques encuentran el equilibrio. En la prueba de presión se ve que la presión dentro de  $T_{Hf}$  va bajando mientras que la de  $T_{He}$  va subiendo y el cambio de las mismas se detiene al llegar a un valor muy similar. No son exactamente el mismo valor, pero es un error aceptable considerando el orden de los valores. El comportamiento para el caso hidráulico concuerda con lo esperado ahora se verá que pasa en el neumático:

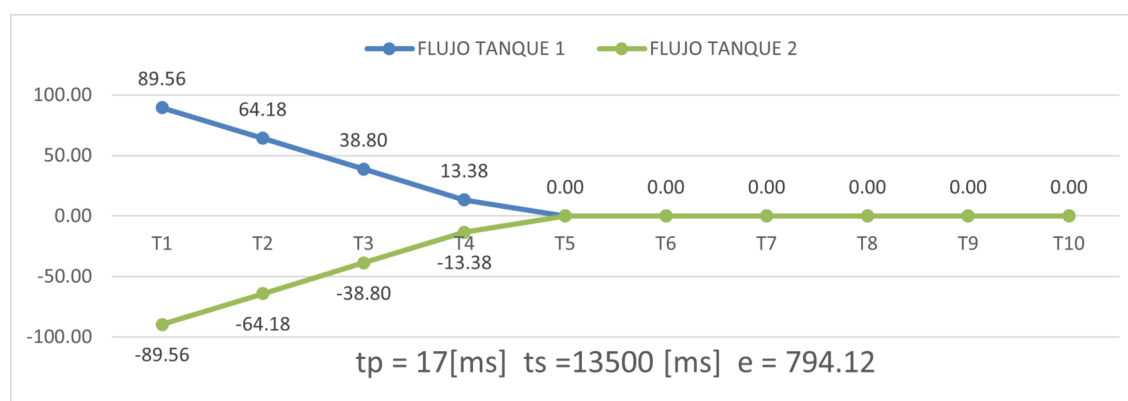


Figura 67: Prueba del Flujo de  $T_{Nf}$  conectado  $T_{Ne}$   
Fuente: Elaboración Propia.

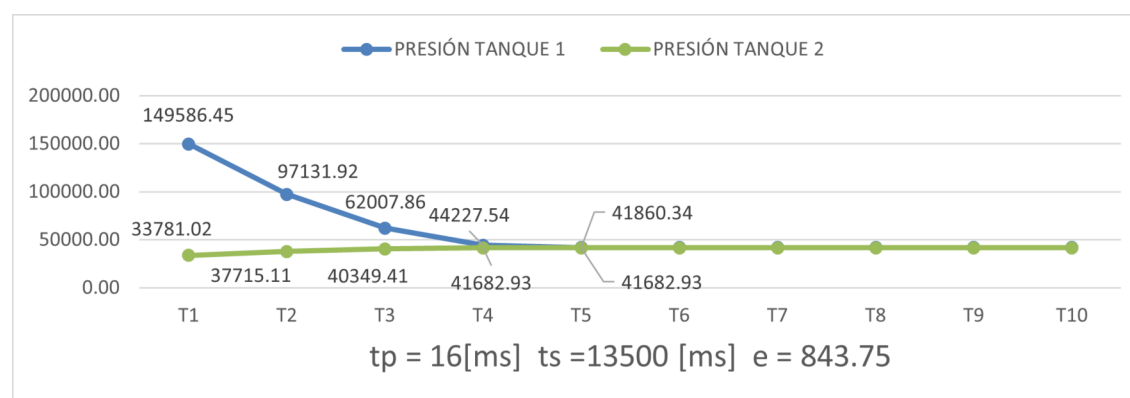


Figura 68: Prueba de la Presión de  $T_{Nf}$  conectado  $T_{Ne}$   
Fuente: Elaboración Propia.

Se ve que para este caso también se respeta el mismo comportamiento, el flujo se va reduciendo, mientras las presiones se van igualando. Además de cumplir con lo esperado, las pruebas cumplieron con  $e > 1$  por lo que fueron exitosas.

### 5 Bomba llena múltiples Tanques en Paralelo:

En este caso se pretende comprobar que el flujo que se expulsa en un nodo se puede repartir entre varios componentes conectados al nodo, y también que la cantidad de flujo que recibe cada componente sea inversamente proporcional a su resistencia equivalente.

Para la prueba se usará la bomba lineal  $P_L$  que será conectada a 4 tanques Hidráulicos y posteriormente se repetirá la prueba con 4 tanques neumáticos. Para la prueba Hidráulica se definirán dos tanques  $T_{He2}$  y  $T_{He3}$  con los mismos parámetros que  $T_{He}$  y un último tanque  $T_{He4}$  con los siguientes parámetros:

- $V_{max} = 200[m^3]$
- $A_t = 4[m^2]$
- $P_T = 0[Pa]$

Este tanque tiene un área transversal más grande que los demás por ende su resistencia al flujo será más baja y se esperaría que este recibiera mayor flujo. Para la prueba neumática se definen tres tanques  $T_{Ne2}$ ,  $T_{Ne3}$  y  $T_{Ne4}$  con los siguientes parámetros:

- $V = 200[m^3]$
- $P_T = 0[Pa]$

Los que tienen un volumen mucho más grande que  $T_{Ne}$  por lo que su resistencia también será menor y se esperaría mayor flujo en estos. Se ve que ocurrió en la prueba hidráulica:

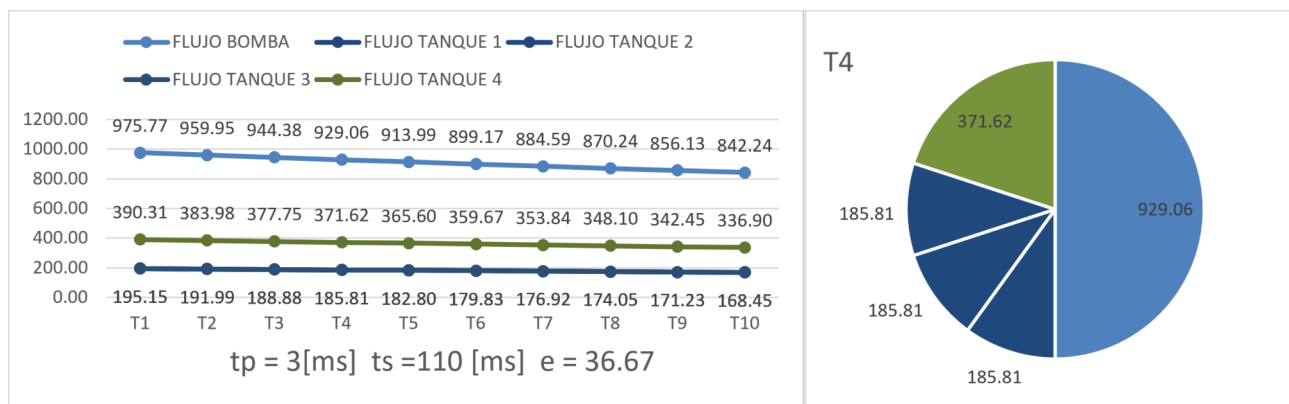


Figura 69: Prueba de Flujo con  $P_L$  conectado a  $T_{He}, T_{He2}, T_{He3}, T_{He4}$   
Fuente: Elaboración Propia.

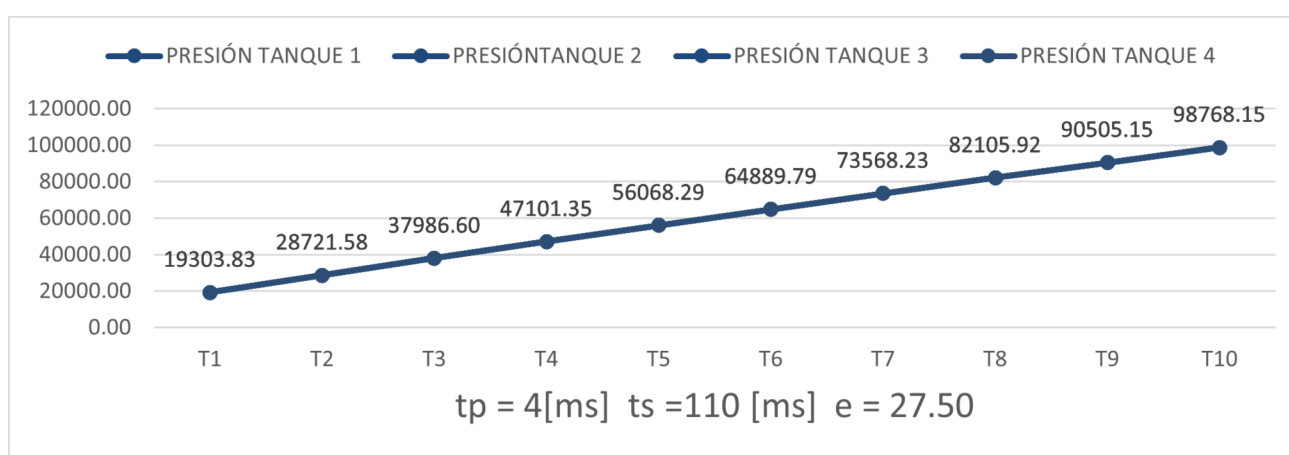


Figura 70: Prueba de Presión con  $P_L$  conectado a  $T_{He}, T_{He2}, T_{He3}, T_{He4}$   
Fuente: Elaboración Propia.

Se ve el flujo de la bomba y los tanques 1 al 4 que se corresponden con  $T_{He}, T_{He2}, T_{He3}, T_{He4}$ . En el gráfico de torta se aprecia que los flujos que ingresan a los tanque son iguales al expulsado por la bomba para un instante de tiempo. Además, el flujo que ingresa a  $T_{He4}$  es mayor al de los demás por ende el comportamiento es correcto.

Por último, en la prueba de presión se confirmó que todos los tanques poseen la misma presión a lo largo del tiempo, una de las condiciones que el caso de prueba tenía que cumplir. Probando ahora de la misma manera la versión neumática:

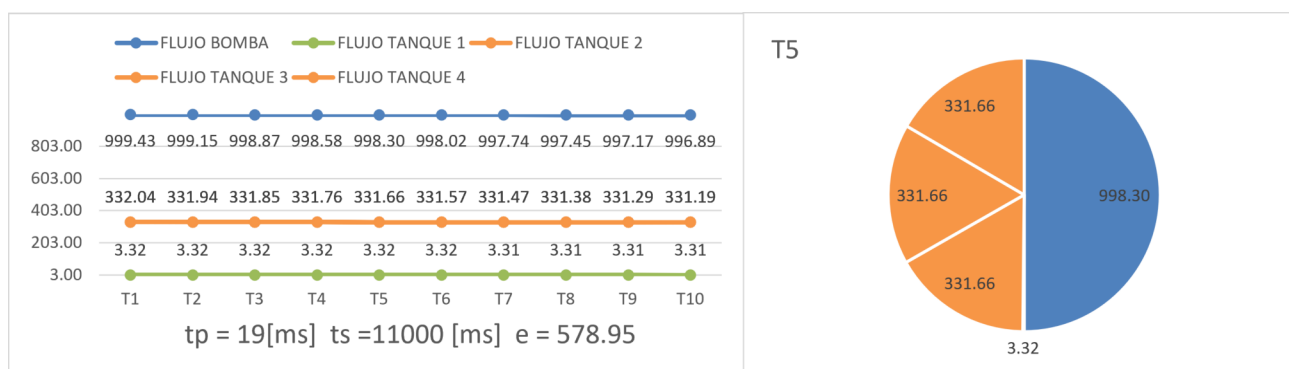


Figura 71: Prueba de Flujo con  $P_L$  conectado a  $T_{Ne}, T_{Ne2}, T_{Ne3}, T_{Ne4}$   
Fuente: Elaboración Propia.

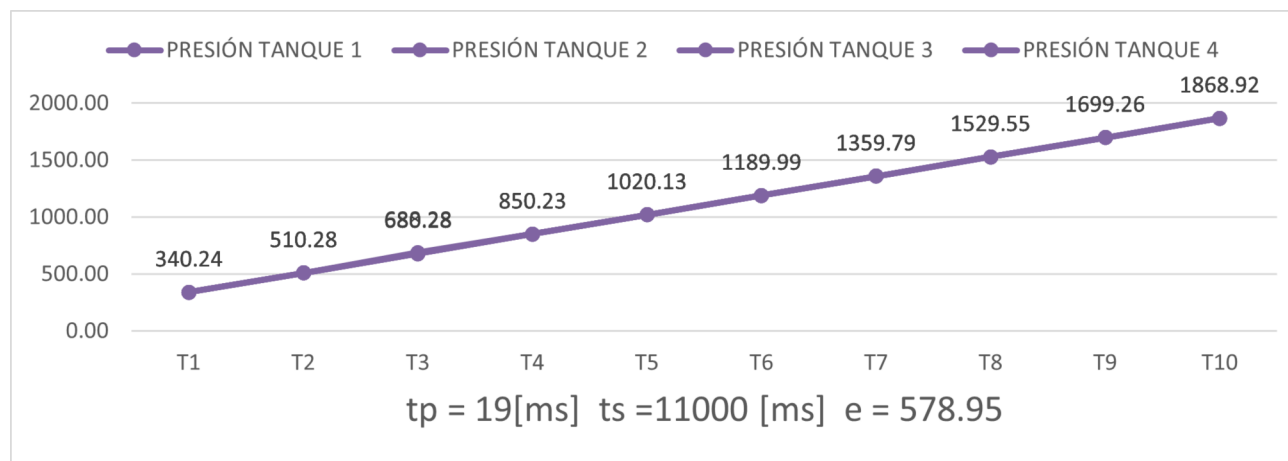


Figura 72: Prueba de Presión con  $P_L$  conectado a  $T_{Ne}, T_{Ne2}, T_{Ne3}, T_{Ne4}$   
Fuente: Elaboración Propia.

Se observa que para este caso también se respeta el comportamiento, la suma de flujos de tanque iguala a la de la bomba y la presión es igual en cada tanque. Como se esperaba, el flujo es menor en  $T_{Ne}$  ya que este tanque al tener un menor volumen tenía una mayor resistencia. Ambos casos terminaron con un buen valor de  $e$  superior a 1 por lo que se logra cumplir el caso.

### 6 Múltiples bombas conectadas a un Tanque:

Se espera ver que los flujos fuente que se conectan a un nodo se sumen para un componente que recibe. Se definirá otra bomba  $P_{L2}$  idéntica a  $P_L$  y se hará una prueba hidráulica conectándola al tanque  $T_{He}$ , y una neumática conectándola a  $T_{Ne}$ . En ambos casos se debe observar como el flujo de ambas bombas se suma para igualar el flujo que recibe el tanque, esto es verificado por código y detendría la prueba si no fuera el caso. Los resultados de la prueba hidráulica fueron:

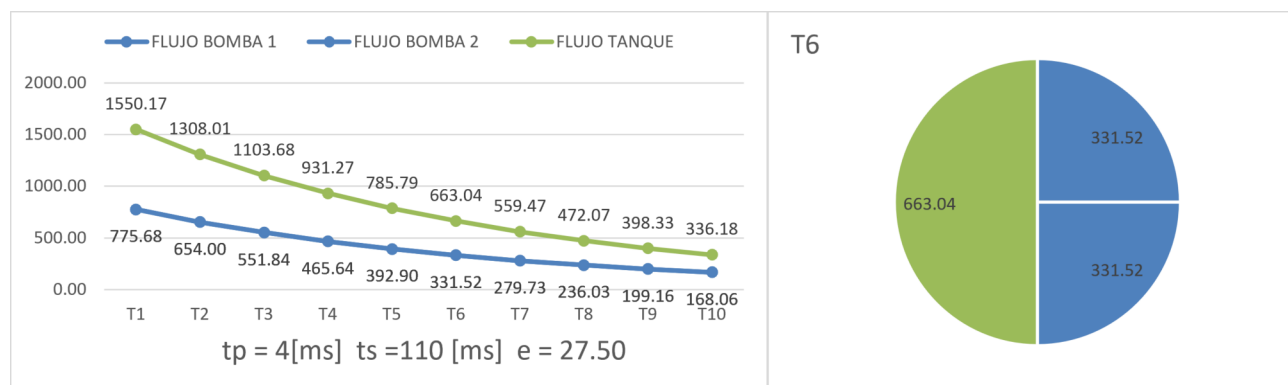


Figura 73: Prueba de  $P_L$  y  $P_{L2}$  conectado a  $T_{He}$   
Fuente: Elaboración Propia.

Se ve que ocurre lo esperado el flujo que ingresa al tanque es la suma del flujo que expulsan ambas fugas, y con el tiempo este se va reduciendo ya que la presión en el tanque crece. Y con el caso neumático:

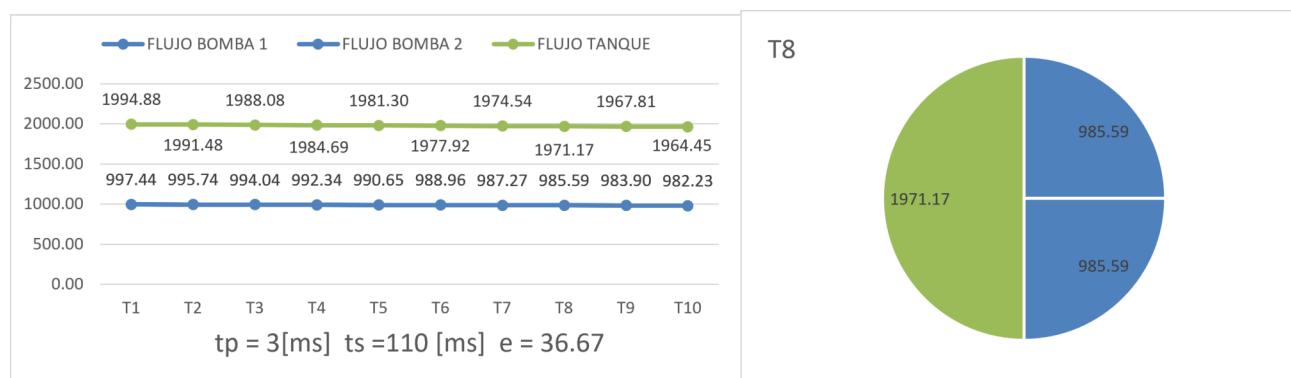


Figura 74: Prueba de  $P_L$  y  $P_{L2}$  conectado a  $T_{Ne}$   
Fuente: Elaboración Propia.

Se ve que en este caso también ocurre lo esperado por lo que queda claro que los flujos de dos fuentes se suman en un nodo. Como el  $e$  es mayor que 1 tampoco hay problemas para simular por lo que el caso es exitoso.

### 7 Bomba conectada a un Actuador:

Se empiezan a ver casos de prueba de la funcionalidad del actuador, se define un actuador hidráulico y uno neumático,  $A_H$  y  $A_N$  respectivamente, con los mismos parámetros:

- $A_t = 2[m^2]$
- $A_b = 1[m^2]$
- $L = 100[m]$
- $M = 100[Kg]$

$A_t$  y  $A_b$  son el área transversal del disco y de la barra respectivamente,  $L$  el largo total y  $M$  es la masa de la barra. Como ya se ha mencionado, el actuador usa estos parámetros para crear 2 tanques que representan cada uno de sus compartimientos. Se conecta la bomba  $P_L$  a su compartimiento *izquierdo* y se espera ver que la barra se mueva hacia la derecha, que se considera como positivo, que la presión aumente en el compartimiento derecho y que se expulse flujo en el izquierdo. Los resultados fueron los siguientes:

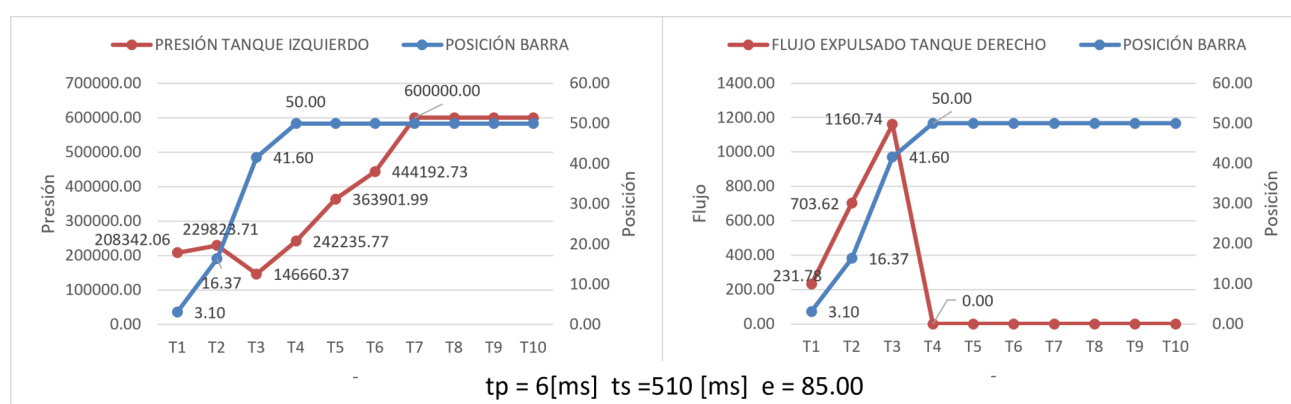


Figura 75: Prueba del Actuador  $A_H$  conectado a la Bomba  $P_L$  por la izquierda  
Fuente: Elaboración Propia.

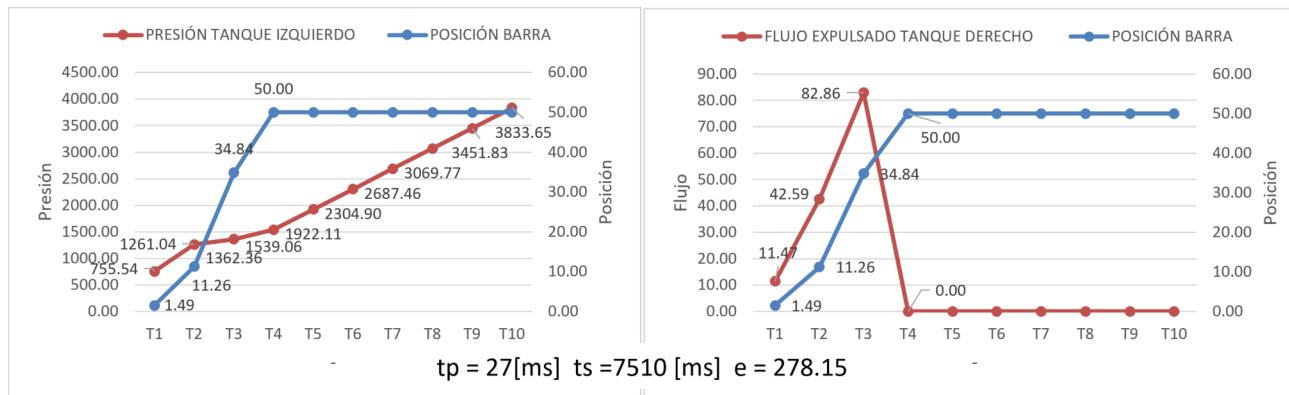


Figura 76: Prueba del Actuador  $A_N$  conectado a la Bomba  $P_L$  por la izquierda  
Fuente: Elaboración Propia.

Se ve que como se esperaba, el aumento de presión en el compartimiento izquierdo genera un movimiento positivo de la barra y una expulsión de flujo en el compartimiento contrario.

También se observa cómo la barra llega a su máximo desplazamiento posible,  $50[m]$  la mitad del largo total del actuador, y cuando esto pasa, el compartimiento izquierdo que sigue conectado se comporta como un simple tanque y el compartimiento derecho ahora está vacío, por ende no tiene más flujo que expulsar.

Antes de considerar esta prueba como exitosa, se debe verificar que ocurra lo mismo en el caso contrario donde se conecta la bomba en el lado derecho:

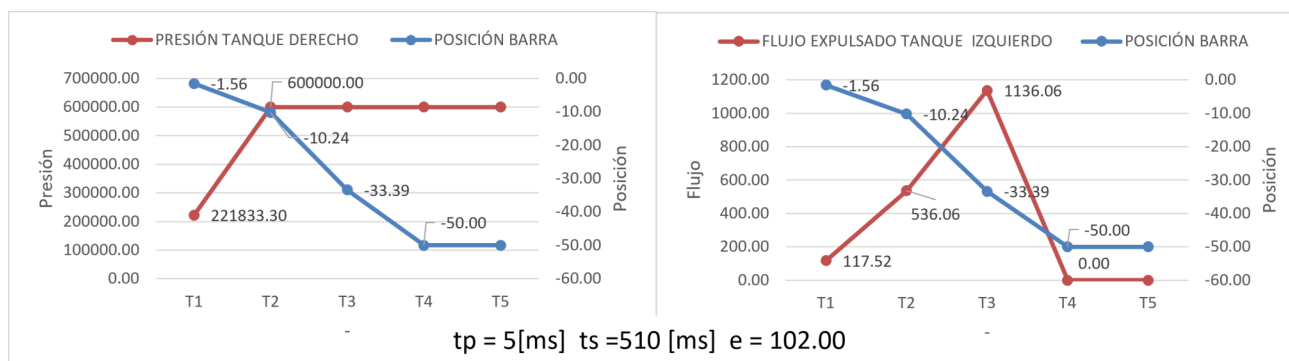


Figura 77: Prueba del Actuador  $A_H$  conectado a la Bomba  $P_L$  por la derecha  
Fuente: Elaboración Propia.

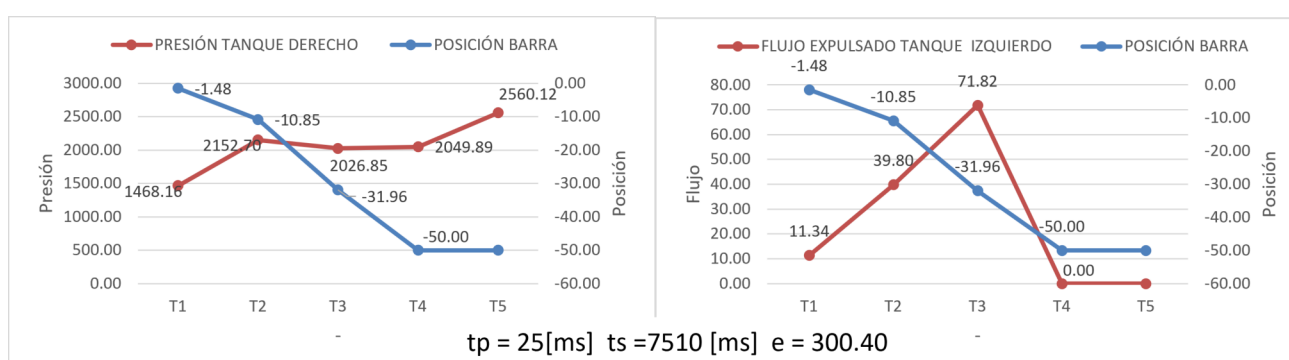


Figura 78: Prueba del Actuador  $A_N$  conectado a la Bomba  $P_L$  por la derecha  
Fuente: Elaboración Propia.

Se ve que esta vez la barra presenta un movimiento negativo como se esperaba. Se observa también, como crece un poco más rápido la presión del tanque derecho, esto ocurre pues su volumen es más pequeño por el espacio que toma la barra. Todo esto concuerda con lo esperado y con  $e > 1$  por lo que el caso de prueba es exitoso.

### 8 Tanque lleno conectado a un Actuador:

Se continúa probando para verificar que el flujo proveniente de un tanque pueda causar un movimiento en el actuador. Se conecta los tanques  $T_{Hf}$  y  $T_{Nf}$  a los actuadores  $A_H$  y  $A_N$  respectivamente. Se recuerda que no tiene sentido conectar un componente hidráulico con uno neumático, y se revisa tanto la presión y flujo del tanque como el movimiento de la barra en los actuadores. Se empieza con el caso hidráulico:

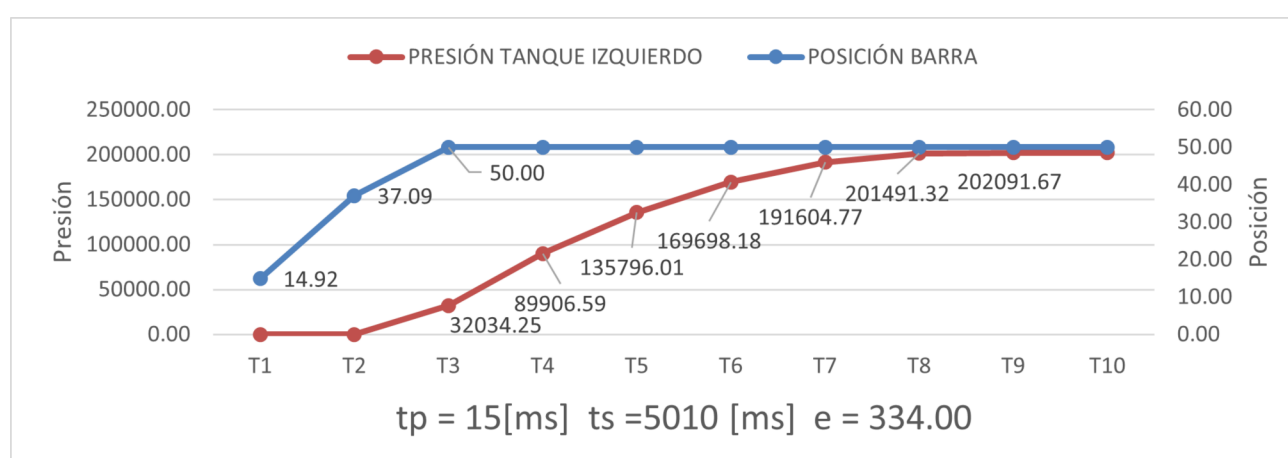


Figura 79: Prueba del Actuador  $A_H$  conectado al Tanque  $T_{Hf}$   
Fuente: Elaboración Propia.

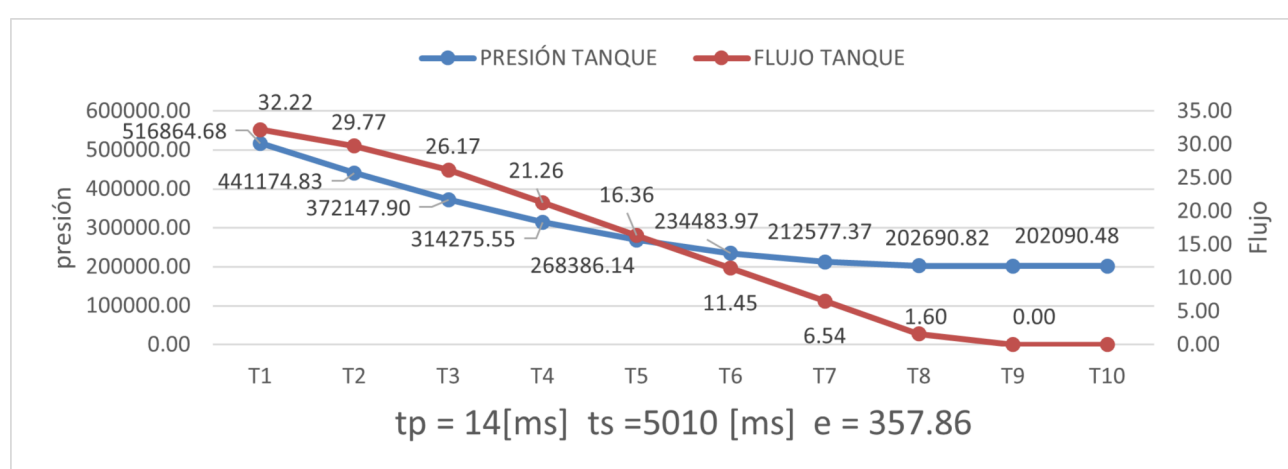


Figura 80: Prueba del Flujo y Presión del Tanque  $T_{Hf}$  conectado al Actuador  $A_H$   
Fuente: Elaboración Propia.

Se ve que el Tanque se comporta como debería, su presión y flujo van bajando hasta llegar a un equilibrio con el exterior. El actuador también muestra lo esperado ya que la barra presentó movimiento. Lo más interesante del actuador en este caso es que la presión aparentemente es 0 en instantes donde se mueve la barra, pero esto ocurre debido a la baja de presión al expandirse la cabina izquierda con el movimiento de la barra, por lo que es algo completamente normal en un caso donde el flujo es mucho menor. Ahora se continúa con el caso neumático:

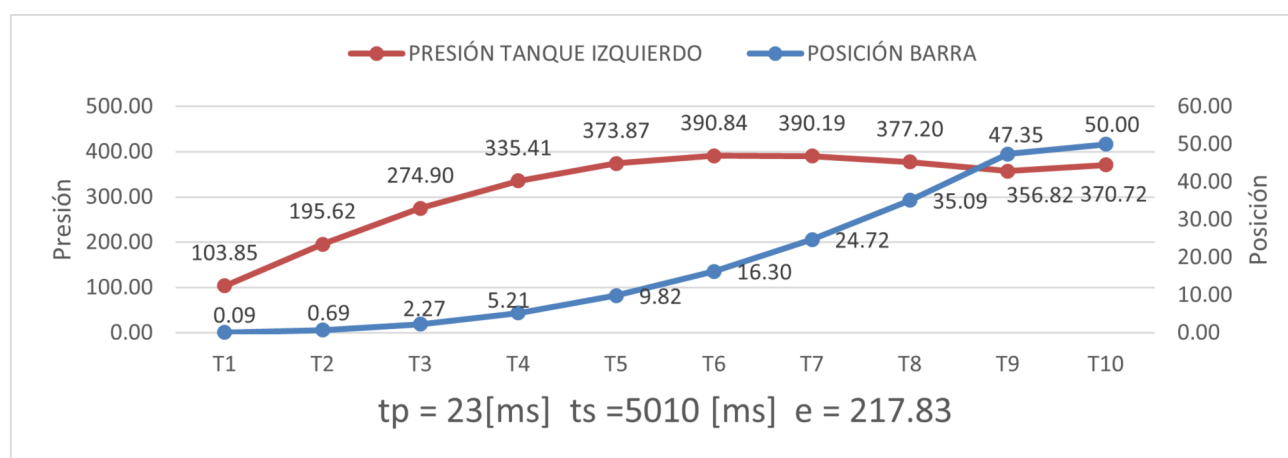


Figura 81: Prueba del Actuador  $A_N$  conectado al Tanque  $T_{Nf}$   
Fuente: Elaboración Propia.

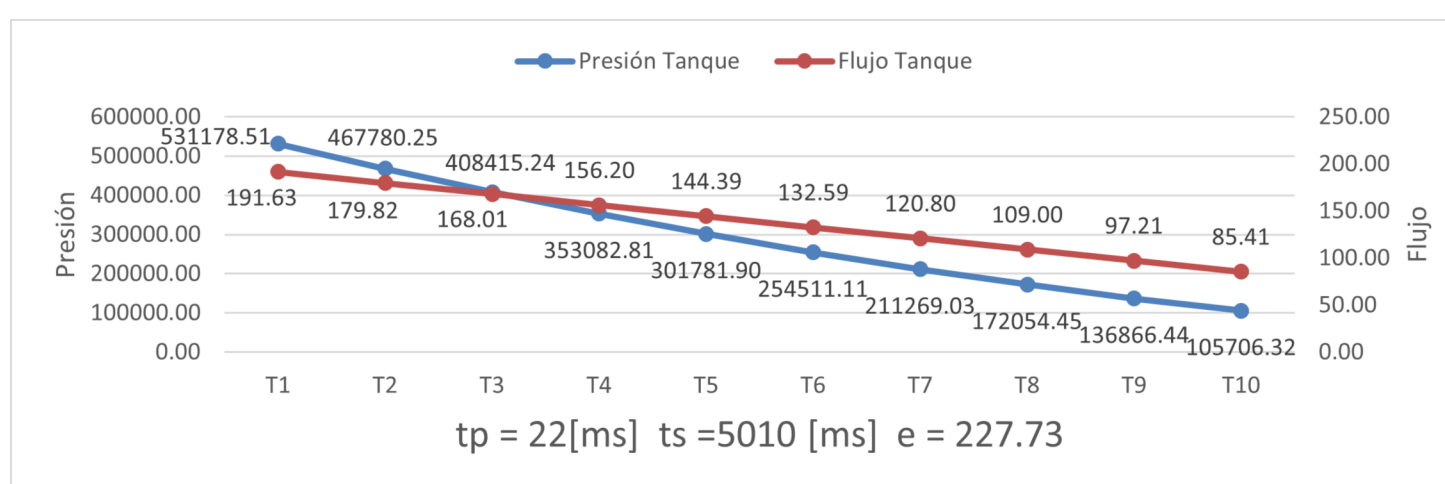


Figura 82: Prueba del Flujo y Presión del Tanque  $T_{Nf}$  conectado al Actuador  $A_N$   
Fuente: Elaboración Propia.

Esta prueba también cumplió con lo esperado. Con la leve diferencia de que el tanque no alcanza a detener su flujo. Tanto el caso hidráulico y neumático funcionan como se espera y obtienen  $e > 1$  nuevamente un éxito.

### 9 Bomba conectada a múltiples Actuadores:

Aquí, como ya se sabe que el flujo de una fuente se reparte bien gracias a la prueba con múltiples tanques en paralelo, se quiere verificar que se produzca movimiento consistente en las barras de los actuadores.

Se usarán tres actuadores  $A_H$ , que ya se definió, junto con  $A_{H2}$  y  $A_{H3}$  que tendrán los mismos parámetros, en este caso se esperaría que todas las barras se movieran al mismo tiempo, por ende en cada instante deben estar en aproximadamente la misma posición.

Luego se repetirá la prueba, pero se modificará  $A_{H3}$  para que su barra tenga una menor masa  $M$ , específicamente se dejará en  $50[kg]$  la mitad que tiene normalmente, y se debería observar que este actuador termina su movimiento primero. Se hará lo mismo con el tanque neumático con actuadores  $A_N$ ,  $A_{N2}$  y  $A_{N3}$  cambiando la masa de este último, a  $10[kg]$  específicamente. Se presentan los resultados del caso hidráulico:

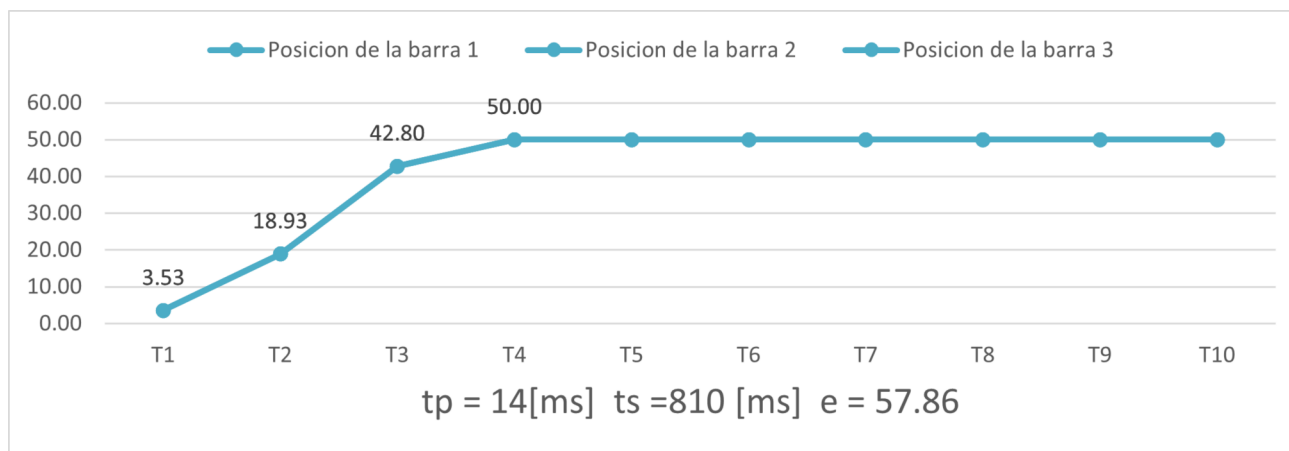


Figura 83: Prueba de  $A_H, A_{H2}$  y  $A_{H3}$  iguales  
Fuente: Elaboración Propia.

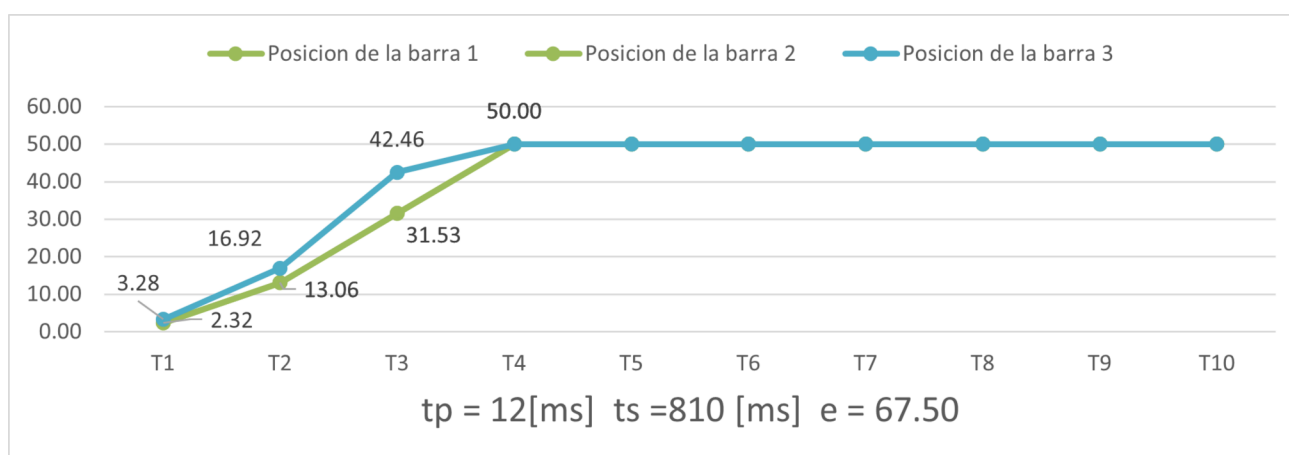


Figura 84: Prueba de  $A_H, A_{H2}$  y  $A_{H3}$  con distinta masa  
Fuente: Elaboración Propia.

Se ve que se cumplió lo esperado, se produce movimiento en todos los actuadores y cuando estos son completamente iguales sus barras se mueven al mismo tiempo, pero al modificar la masa de uno en la siguiente prueba este actuador terminó está mas adelante de los demás al tener menor masa. Esto confirma que los actuadores hidráulicos en paralelo funcionan como deberían, ahora se ve el caso neumático:

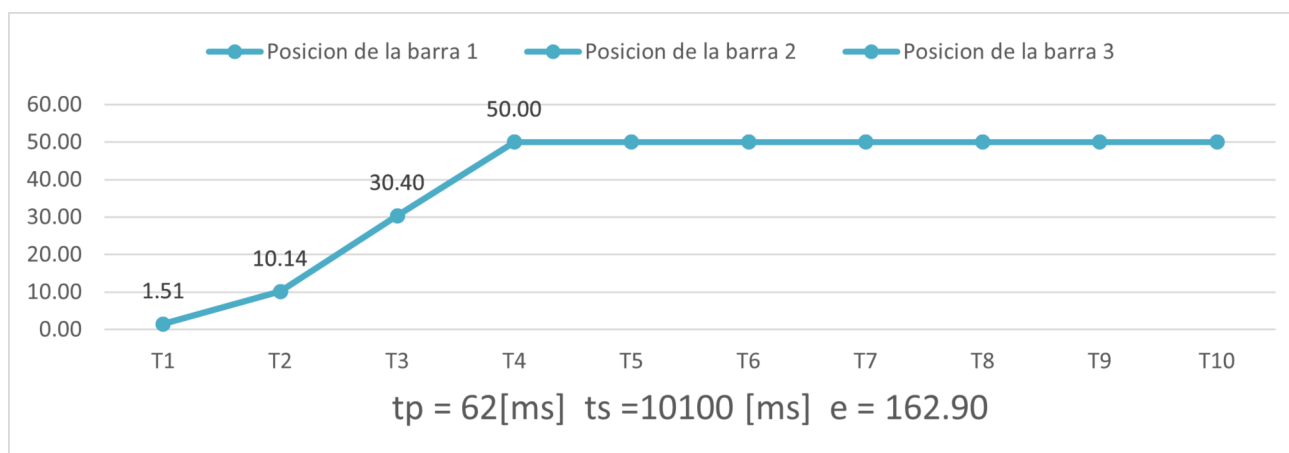


Figura 85: Prueba de  $A_N, A_{N2}$  y  $A_{N3}$  iguales  
Fuente: Elaboración Propia.

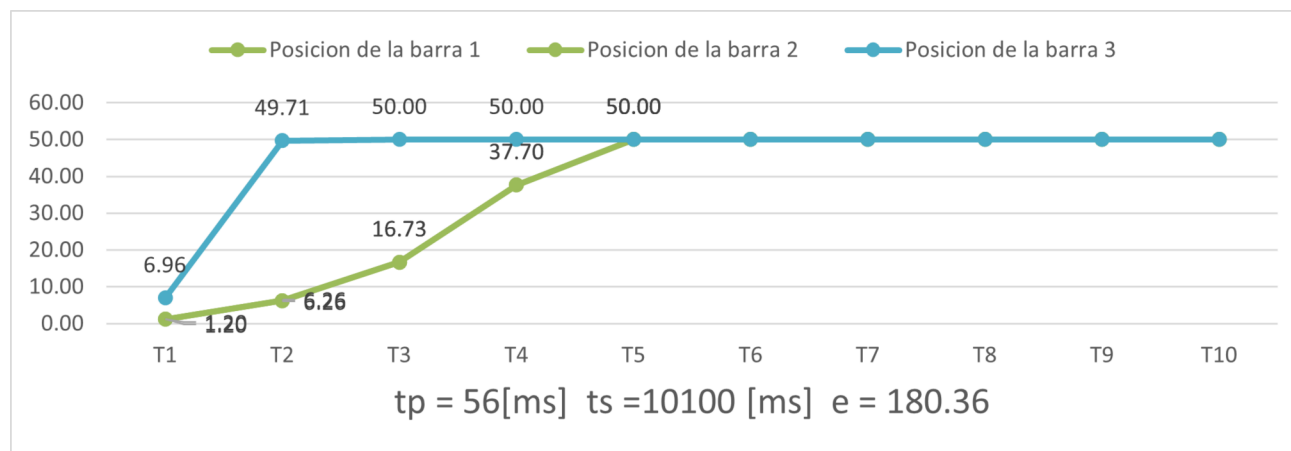


Figura 86: Prueba de  $A_N, A_{N2}$  y  $A_{N3}$  con distinta masa  
Fuente: Elaboración Propia.

Y se ve que estas también funcionan correctamente, se observa como para masas distintas un actuador termina antes que los demás. Ambas pruebas funcionaron con  $e > 1$  y funcionaron como se esperaban así que se tiene otro éxito.

#### 10 Bomba conectada a Actuador y presenta una Fuga:

En este caso se prueba la Fuga como componente, esta no necesita parámetros pues siempre será la misma, aun así destaca que su valor de resistencia está en el orden de  $10^{-6}$  pues debe ser muy pequeño.

Solo se hará una prueba usando la bomba  $P_L$  y el actuador  $A_H$ , esto pues solo interesa verificar que la fuga funcione como debe. Los demás componentes pasan a segundo plano. Se debería ver en la prueba como gran parte del flujo, sino todo el flujo es recibido por la fuga y el actuador no debería recibir suficiente flujo para mover su barra, se observó lo siguiente:

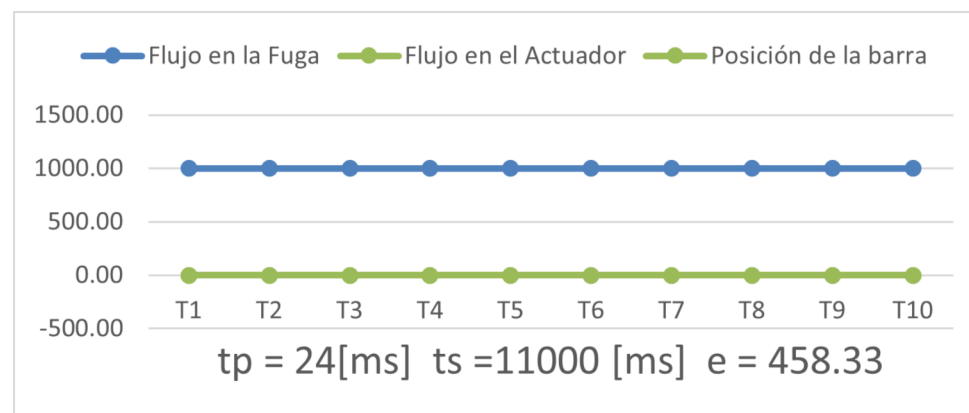


Figura 87: Prueba del componente Fuga  
Fuente: Elaboración Propia.

Se ve como se reparte el flujo entre la fuga y el actuador, teniendo la fuga un valor muy cercano al máximo de la bomba que es 1000 y el actuador un valor muy cercano a 0 los cuales no cambian con el paso del tiempo. Además, la barra del actuador se mantiene en su posición inicial para cada instante. Con esto los valores son aceptables y el comportamiento es adecuado además de tener un  $e > 1$  demostrando que el componente fuga funciona como debe.

### 11 Bomba conectada a válvula dirigiendo el flujo a tanques y fuga

Ahora se probará el componente válvula, probando que es posible cambiar la forma del circuito durante la simulación. Se usa la bomba  $P_L$  y el actuador  $A_H$  esta vez conectando  $P_L$  a la válvula y  $A_H$  a una de las salidas de esta. La otra salida de la válvula tendrá conectado un componente fuga. La prueba consistirá en que la válvula dirija el flujo hacia el actuador, hasta que se llegue a la mitad de la simulación donde la válvula se activa para que el flujo se redirija a la bomba. Se pretende ver que el flujo que va hacia el actuador se vuelva 0 después del cambio y que el flujo en la fuga suba hasta el máximo de la bomba, teniendo los siguientes resultados:

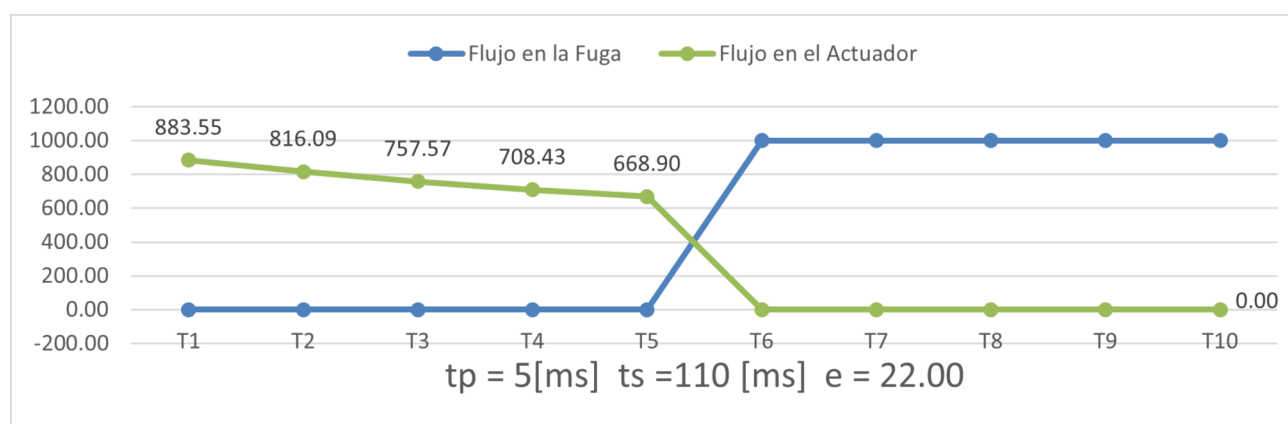


Figura 88: Prueba del componente Válvula  
Fuente: Elaboración Propia.

Ocurrió lo esperado. Después de activar la válvula el flujo pasó de dirigirse al actuador, a dirigirse a la fuga, confirmando que la válvula funciona como debe, y al tener  $e > 1$  este caso es exitoso.

### 12 Bombas actuando en un Actuador con flujos contrarios

Si se conectan  $P_L$  y  $P_{L2}$  a cada lado de un actuador, debería producirse algo de movimiento en dirección positiva, pero eventualmente, debería detenerse e incluso podría retroceder o también oscilar. Esto ya que las bombas tienen el mismo flujo por lo que el crecimiento de presión que generan es igual y el movimiento de la barra en una dirección, favorece el aumento de la fuerza que la moverá en la dirección contraria. Probando con el actuador hidráulico  $A_H$  y el neumático  $A_N$  se obtiene lo siguiente:

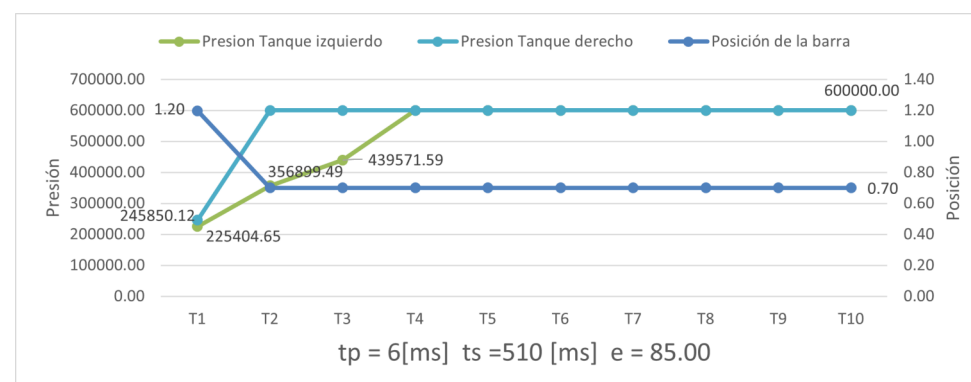


Figura 89: Prueba de  $P_L$  y  $P_{L2}$  conectado a cada lado de  $A_H$   
Fuente: Elaboración Propia.

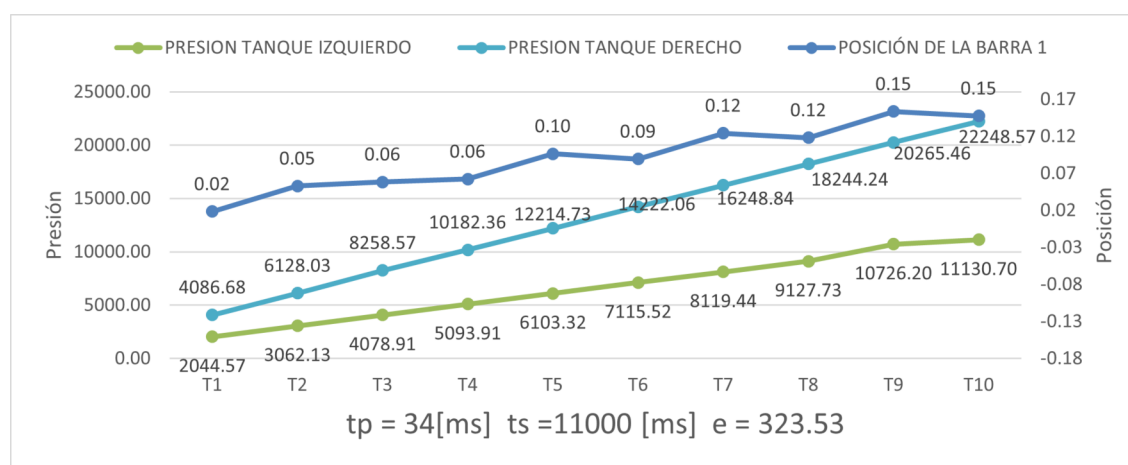


Figura 90: Prueba de  $P_L$  y  $P_{L2}$  conectado a cada lado de  $A_N$   
Fuente: Elaboración Propia.

En el caso hidráulico el actuador presentó movimiento positivo, pero este retrocedió cuando la presión del tanque derecho se llenó y alcanzó la presión máxima suministrada por la bomba. Al asumir que el agua no se puede comprimir el actuador ya no se puede mover mas hacia la derecha y la presión del tanque izquierdo sube sin causar movimiento. En el caso neumático las presiones van subiendo poco a poco siendo favorecido el movimiento positivos como se espera, si bien se observa que la presión del tanque derecho es mayor, este lado tiene la mitad del área de disco que el lado izquierdo gracias a los parámetros con que se definió  $A_N$  por lo que las fuerzas en cada lado son muy similares. Pasado el cuarto instante de tiempo registrado se observa cómo la barra empieza a oscilar entre ir hacia el lado positivo y el negativo lo que es de esperarse por la similitud de fuerzas en cada lado. Este es un caso muy difícil de evaluar, pero considerando que las dos bombas son idénticas y los supuestos bajo los que se crearon los modelos el resultado está dentro de lo esperado. Ahora para ver algo más consistente se probará cambiando el flujo máximo de la bomba  $P_{L2}$  dejándolo para la prueba hidráulica en un valor de  $100[m^3/s]$ , con esto el crecimiento de presión en el tanque derecho será menor lo que permitirá un mayor movimiento de la barra:

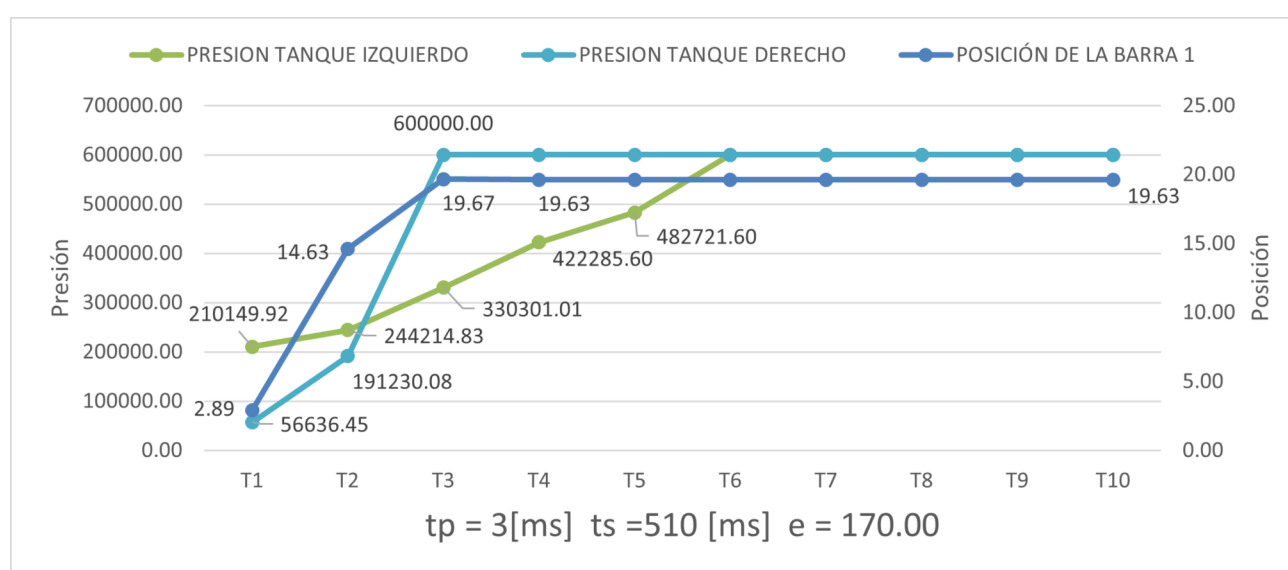


Figura 91: Prueba con  $P_{L2}$  con  $Q_{max} = 100[m^3/s]$   
Fuente: Elaboración Propia.

Esta vez se ve un claro movimiento de la barra hacia la derecha. Esto aumenta el crecimiento de presión en el tanque derecho y este llega a llenarse subiendo la presión rápidamente al máximo de la bomba. Se alcanza a producir un leve retroceso, pero como el flujo sigue entrando en el lado izquierdo este también llega a llenarse. Ello permite alcanzar la presión al otro lado y al no poder comprimirse más el agua, el sistema se detiene. Se repite en el caso neumático pero esta vez  $P_{L2}$  considerará un flujo de  $10[m^3/s]$ :

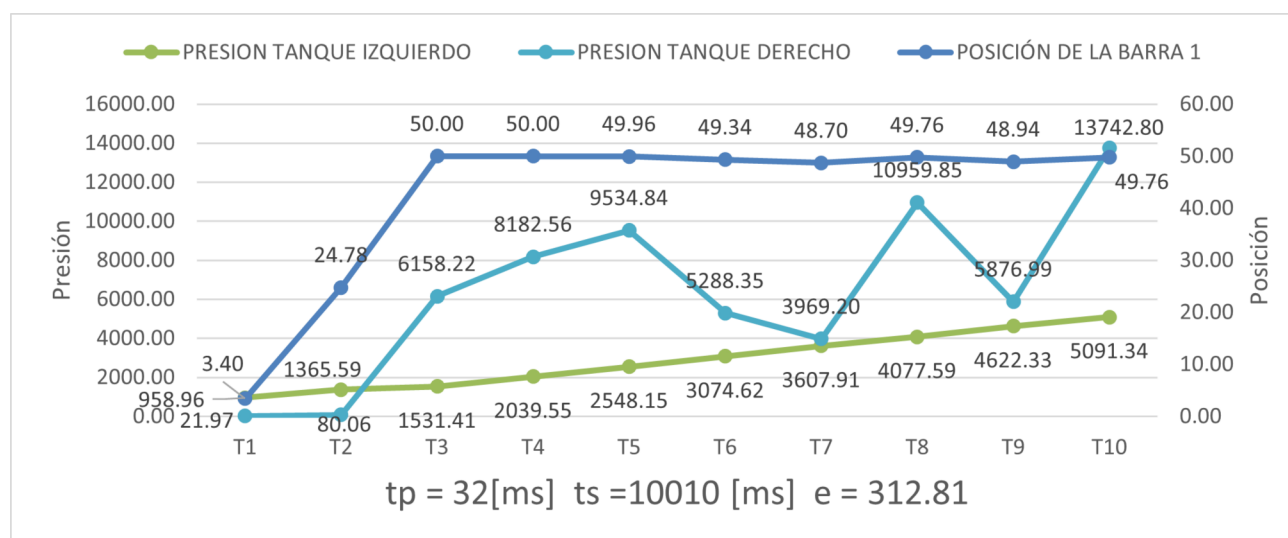


Figura 92: Prueba con  $P_{L2}$  con  $Q_{max} = 10[m^3/s]$   
Fuente: Elaboración Propia.

Para este caso se llega a la posición final de la barra, donde por el crecimiento de presión en un volumen pequeño la barra empieza a oscilar levemente cerca de esta posición. Esto se mantendrá a lo largo del tiempo y solo se detendrá cuando terminé el crecimiento de presión en cada tanque.

Esta oscilación es el resultado del supuesto de compresión sin límites del aire. Gracias a esto, los tanques no se llenan y por ende contrario al caso hidráulico no hay nada que los fuerce a detenerse. Por este mismo fenómeno se realizó esta prueba con  $10[m^3/s]$  y no con  $100[m^3/s]$  ya que en ese caso, a pesar de que la posición de la barra siempre estaba en el lado positivo, la oscilación que se producía era mucho mas grande.

Esto no es algo erróneo es el resultado de los supuestos que se realizaron al empezar el trabajo para el caso neumático. En cualquier caso, los resultados son esperados, el movimiento de la barra depende de la presión en cada lado del actuador y siempre acelerará desde el lado de mayor presión a menor presión, y todo con  $e > 1$  por lo que se concluye este caso como exitoso.

Con esto se concluyen las pruebas de todos los casos de prueba que se habían propuesto. De ellos se demostró que todos cumplen el comportamiento esperado y que su valor de Tiempo simulado/Tiempo procesado es siempre mayor que 1 por un margen bastante grande. Por todo esto se considera el algoritmo como una solución aceptable al problema.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSIONES

Esta memoria comenzó con la problemática de la simulación de sistemas del mundo físico, específicamente, sistemas hidráulicos/neumáticos, para ayudar al aprendizaje y/o capacitación de personas aptas para trabajar con estos sistemas como desarrollar sus propios sistemas.

Uno de los efectos principales de la problemática que se descubrió es lo que implica en costos la necesidad de un espacio junto con instrumentos físicos apropiados, es decir un laboratorio, para poder realizar esta clase de experiencias educativas, lo que limita la cantidad de instituciones que pueden impartir esta clase de entrenamientos.

De esta forma un simulador ofrece una solución al ser una alternativa de un costo mucho menor que puede permitir el trabajo con sistemas mucho más complejos de los que se podrían ver en laboratorios asociados a costos mayores. Como una idea, se podría practicar cómo construir la red de tuberías que suministran agua en una casa desde un espacio no mayor a un escritorio con la ayuda de un simulador, cosa que no es posible en un laboratorio típico de una escuela.

Esta problemática se presentó por la empresa YOY que desarrolla simuladores. Se encontraba trabajando en la expansión de su simulador orientado al aprendizaje de circuitos electrónicos, *Electrosim*, para la simulación de sistemas más complejos al incluir elementos del área hidráulica con vistas a seguir expandiendo con componentes del área neumática y otras en el futuro.

Aun con el objetivo fijado en el aprendizaje se descubrió rápidamente que las herramientas de simulación tienen beneficios más allá de este, como la mejora del trabajo de diseño de sistemas. Ello permitirá el poder tanto diseñar como probar el comportamiento de prototipos en un entorno virtual lo que además permitirá ahorrar en costos de compra, almacenamiento e inventario de piezas y herramientas gracias a la posibilidad de usar versiones simuladas de estas que se pueden reusar una infinidad de veces.

También se observa como un beneficio que las herramientas de simulación permiten analizar sistemas extremadamente grandes con relativa facilidad. Esto se confirmó durante el estudio de otros trabajos, centrados en aprovechar las capacidades analíticas y predictivas de la simulación, y de ese modo examinar redes de drenaje e incluso estructuras naturales como los ríos. Dicho esto, el objetivo principal es ver el comportamiento del flujo e identificar posibles zonas de inundación.

Con esto quedó claro que los simuladores siguen siendo herramientas relevantes fuera del aprendizaje al permitir a profesionales ya formados una mejor capacidad de análisis, predicción y control sobre sistemas de cualquier tamaño, además de reducir costos debido a un mejor trabajo de diseño con menor gasto en componentes.

Comenzó la investigación de esta memoria con el estudio del simulador de circuitos electrónicos *Electrosim*, perteneciente a la empresa YOY, y sus orígenes con el objetivo de comprender como funcionaba el sistema actual y revisar si las técnicas empleadas podían ser reutilizadas para la simulación de sistemas hidráulicos. En general aquí fue donde se comprendió lo bá-

sico de un sistema de simulación de circuitos, se deben identificar las reglas que rigen a cada componente individual y como afectan al sistema completo para hacer un modelo que pueda adaptarse a una cantidad prácticamente infinita de combinaciones.

Esto se logró en circuitos electrónicos modelando el sistema completo como un sistema de ecuaciones, basado en la ley de corrientes de Kirchhoff, donde cada componente tenía una ecuación, una matriz de expresiones algebraicas provenientes de las reglas que rigen al componente, que se añade al sistema de ecuaciones de forma consistente a como está conectado el componente.

Esta técnica resuelve la compleja tarea de representar la infinidad de circuitos posibles y además logra hacerlo de una forma eficiente para un programa de software, sobre este punto sin conocer las peculiaridades de sistemas hidráulicos se decidió que el sistema necesitaría una solución similar tomando la idea de definir cada componente en forma individual y sistemáticamente añadirlos a la definición de un todo que sería el sistema que forman.

Posteriormente se empezó a estudiar sobre hidráulica revisando los principios físicos que rigen estas clases de sistemas buscando encontrar similitudes con los sistemas electrónicos, se encontró que el flujo de un fluido en una tubería también denominado caudal es equivalente al flujo de electrones en un cable también denominado corriente y que estas se producen por una diferencia de presión y una diferencia de voltaje respectivamente.

Además, igual que en el caso eléctrico el flujo en un circuito hidráulico también respeta una regla idéntica a la ley de corrientes de Kirchhoff, con estas similitudes se concluyó que era posible representar un circuito hidráulico con un sistema de ecuaciones similar al usado para los circuitos eléctricos. Se continuó revisando que componentes se usan comúnmente en los sistemas hidráulicos y se determinó que los componentes básicos que componen circuitos hidráulicos son las bombas, volúmenes/tanques, resistores de flujo y actuadores donde existen semejanzas con componentes eléctricos.

Una bomba administra caudal al sistema como una fuente de corriente/voltaje un flujo de electrones, un volumen o tanque puede acumular fluido de la misma manera que un capacitor acumula electrones ambos acumulan energía, y los resistores de flujo se definen como cambios en la tubería que oponen resistencia al paso del fluido igual como lo hace una resistencia eléctrica con la corriente en un circuito.

Actuador es el único que no tiene una equivalencia clara pero eso es porque su definición cubre muchos componentes distintos, se debe recordar que estos son componentes que de alguna manera transforman la energía del circuito en otro tipo de energía, pero es claro por esta misma definición que aparatos de este tipo existen en ambos tipos de sistemas, como un ejemplo se puede generar energía mecánica usando presión para empujar un pistón y también se puede hacer algo muy similar moviendo una barra con fuerza magnética generada por un solenoide<sup>43</sup>.

Si bien estas similitudes entre componentes existen, se descubrió que las fórmulas que los definen no son exactamente uno a uno, al intentar definir modelos para los componentes hidráulicos con la ley de conservación de energía se entendió que la relación entre caudal y la diferencia de presión es cuadrática contrario al caso eléctrico más simple de la resistencia

---

<sup>43</sup>Bobina formada por un alambre enrollado en espiral sobre una estructura cilíndrica que crea un campo magnético cuando circula una corriente por su interior.

donde la relación entre corriente y diferencia de voltaje es lineal. A esto se le suma también el caso de la bomba cuyo comportamiento es algo más complejo de definir que una batería. Es posible entender una bomba como un artefacto que administra una diferencia de presión igual como una batería administra una diferencia de voltaje. Por lo tanto el flujo dependería del sistema que se le conecte, esto sería correcto pero se observó que las definiciones más comunes de bombas con la que expertos trabajan incluyen una curva de funcionamiento entre la presión, o altura, sobre la que trabaja la bomba y el flujo que puede expulsar.

Esto también pone un límite al flujo que puede expulsar la bomba, pero no es el caso de una batería la cual puede, teóricamente, generar corrientes muy altas si se coloca una resistencia muy pequeña. En general después del estudio del tema se comprendió la complejidad de los sistemas hidráulicos sobre los circuitos eléctricos, aun así, se vieron trabajos que confirman la efectividad de simular estos sistemas, transformándolos en un circuito eléctrico equivalente y usando un solver de circuitos electrónicos. Esta es una solución factible mientras el proceso de transformación que se programe tome en cuenta las diferencias de ambos casos para obtener resultados los más precisos posibles.

Durante la investigación se revisaron distintos trabajos con programas simuladores con diferentes técnicas y objetivos, muchos de estos simuladores hidráulicos no se centraban en la construcción de circuitos hidráulicos que la empresa YOY tenía como objetivo.

En algunos casos esta diferencia de objetivos cambia el tipo de valores que se quiere observar. Como ejemplo, centrarse en un análisis de temperatura en el sistema hidráulico en lugar de un análisis de presión, o también el grado de detalle con el que se representan, en algunos casos optando por el uso de modelos tridimensionales de componentes hidráulicos para poder observar el efecto del flujo en sus piezas internas.

En otros casos, las situaciones a modelar eran completamente diferentes. En lugar de centrarse en componentes hidráulicos se centraban en simular el movimiento del fluido a través de canales, ríos o ciudades.

Aun queriendo representar el mismo fenómeno se puede observar desde perspectivas distintas, y también con distinto nivel de detalle, por lo que un *software* simulador debe ser construido para observar lo que se necesita. Si bien podría ser ideal tener un simulador que representa todo los aspectos de un fenómeno en variadas situaciones con precisión perfecta, esta no solo sería una tarea extremadamente compleja sino que un desperdicio de esfuerzo si los usuarios a los que el sistema este dirigido solo necesitan ver una parte específica del fenómeno. Como por ejemplo: no tendría sentido simular con lujo de detalle el funcionamiento del motor de un auto si lo que el usuario desea observar es el movimiento de este vehículo, sería un desperdicio de esfuerzo por parte del programador que resultaría en un programa ineficiente que gasta tiempo de procesamiento en una tarea irrelevante.

Ya terminada la investigación y antes de proponer una solución, se volvió a observar el problema particular que quería resolver la empresa YOY con su simulador, esta vez buscando precisar qué aspectos querían observar y con qué grado de detalle. Se definieron una serie de casos de prueba con comportamientos esperados que el simulador debía ser capaz de reproducir. Para ello se quiso observar valores de flujo y presión en los componentes, en las pruebas estaban presentes los componentes bomba, tanque, actuador (cilindro de doble efecto) y válvula. Para estos valores no se pedía exactitud, pero sí un comportamiento coherente, por ende, lo más importante son los cambios de los componentes a través del tiempo.

Luego de la investigación se tenía una idea de cuales eran estos comportamientos y se discutió aún más con un experto del tema para hacer modelos de los componentes. El experto con el que se habló, también poseía conocimientos de neumática y ya que la empresa estaba interesada en expandir el simulador a esta área y las diferencias entre hidráulica y neumática no eran tantas, el experto propuso también versiones neumáticas de los modelos que también se decidió probar a pesar de no ser el foco de este trabajo.

Discutir con un experto fue necesario pues mi área de trabajo es la informática no la hidráulica ni la neumática. Para asegurar un simulador de calidad es necesaria la coordinación de expertos tanto del área que se quiere simular como personas diestras en el área de programación. Esta es una realidad que se volvió evidente rápidamente en la etapa de investigación. Como ya se mencionó el experto ayudó en la generación de los modelos de los componentes deseados y verificar los comportamientos de los casos de prueba, pero en este punto, se terminó su colaboración. Si bien lo ideal sería continuar el trabajo con su ayuda, la empresa no tenía el presupuesto para mantener al experto. Por ello, ya se habían probado alternativas como trabajar con un profesor de laboratorio de una universidad que usa *Electrosim*, pero estos no tenían la disponibilidad necesaria para ser parte del trabajo.

Comento esto para dejar en evidencia la situación en que se realizó esta memoria y también agregar una reflexión personal respecto al tema. No siempre se tendrán los recursos para poder trabajar en condiciones ideales, en algunos casos será necesario usar las herramientas y conocimientos que se tengan en lugar de preocuparse por problemas fuera de nuestro control.

De todas maneras, la pérdida del experto, si bien negativa, no fue fatal para el proyecto. Se logró formular modelos para cada componente presente en los casos de prueba. Solo se necesitaba programar una solución acorde a los modelos establecidos.

Al momento de construir la solución se optó por emplear la analogía entre circuitos eléctricos e hidráulicos/neumáticos. Se intentó aplicar el mismo algoritmo que usa el simulador *Electrosim*.

Entre otros beneficios esto permite reutilizar distintos aspectos del programa simulador *Electrosim* como, por ejemplo, su representación del circuito, componentes y conexiones. Al usar estas mismas estructuras se facilita la integración con aspectos de *frontend* como la interfaz gráfica. Comúnmente, los trabajos que usan esta analogía igualan voltaje con presión, pero en el caso de esta memoria se tomó un acercamiento un poco diferente para poder alcanzar los resultados deseados.

Se igualó la variación de presión en el intervalo de tiempo de una iteración como el equivalente al voltaje del caso eléctrico. Esto permitió definir el componente tanque, que usualmente es igualado a un capacitor en la analogía, como una resistencia. Ya que el comportamiento simulado por *Electrosim* de un capacitor no se parecía en nada a lo esperado por un tanque, no tenía sentido usar esa clase de equivalencia. Además el tanque era el componente más básico encontrado en los casos de prueba por lo que tiene algo de sentido igualarlo con una resistencia que es el componente más básico de un circuito electrónico.

Junto con esta propuesta fue necesario programar nuevas clases para cada componente nuevo. Cada clase tiene el código necesario para realizar una transformación del elemento hidráulico a un equivalente eléctrico que el algoritmo modificado de *Electrosim* puede comprender, así como también el código que dicta su comportamiento, como es el caso de la

bomba que calcula su caudal y el actuador que mueve una barra.

Se podría decir que si bien se apoyó en el algoritmo original gran parte del código que simula los componentes está en ellos mismos por lo que la solución es una combinación entre un solver centralizado y elementos distribuidos.

Del proceso de construcción de la solución puedo decir que para la situación en particular fue necesaria una improvisación no antes vista en los trabajos investigados. Lo anterior, porque se quiso aprovechar al máximo el programa ya existente de la empresa, aunque otros trabajos ayudan como una guía se pueden encontrar distintas soluciones dependiendo de la creatividad y el contexto en el que trabaje el desarrollador.

Habiendo hecho todo este desarrollo se probó el algoritmo con resultados satisfactorios. Se evaluaron todos los casos de prueba obteniendo los resultados que se esperaban de acuerdo con los modelos propuestos. Para cada caso además se calculó un  $e$  que se definió como el tiempo simulado, dividido en el tiempo de procesamiento, y así verificar que se podía simular en tiempo real. De ello se obtuvo valores de  $e$  superiores a 1 para cada caso de prueba, indicando que el tiempo de simulación es mayor al tiempo que toma procesar esa simulación haciendo posible la simulación en tiempo real.

Por la forma en la que se programó la solución existe un pequeño margen de error entre lo que serían los valores reales de presión y flujo con los valores simulados, pero en las pruebas se observó que este era bastante pequeño, y en varios casos imperceptible. La precisión de los valores numéricos no era una prioridad, en cambio la forma en que variaban en el tiempo sí. Esto último quedó confirmado al cumplir con los casos de prueba por lo que se cumplió con los requisitos pedidos por la empresa, y los expertos.

De este modo el algoritmo es adecuado para ser usado en el simulador orientado al aprendizaje de la empresa YOY. Además de cumplir con lo esperado para los modelos hidráulicos, también se consiguió con los modelos neumáticos desarrollados con el experto, pero como esta área no fue el foco de este trabajo, bajo mi perspectiva se necesita algo más de estudio para considerarla lista para ser integrada en el simulador de forma satisfactoria.

Comentando ahora sobre los alcances y límites de la solución, el algoritmo es capaz de simular el comportamiento de circuitos hidráulicos/neumáticos formados por bombas, tanques de solo una entrada, actuadores de cilindro doble efecto y válvulas direccionales. Estos no son todos los componentes posibles de encontrar en estos sistemas y por ende es un límite de los circuitos que es posible simular, aun así, agregar nuevos componentes no será complicado mientras se pueda modelar su valor de presión en relación al flujo o cantidad de fluido en su interior, para luego realizar un proceso similar al descrito en la propuesta de solución. Cabe destacar que al ser esta una extensión del algoritmo para simular circuitos electrónicos, el algoritmo aun es capaz de hacer estas simulaciones.

Haciendo pruebas para ver los límites del simulador, usando el mismo PC de las pruebas con los mismos parámetros, se observó valores de  $e$  levemente mayores a 1 para cerca de 200 pares de bomba y tanque. En el caso de pares actuador y bomba solo cerca de 70 para el actuador hidráulico y 40 para el neumático lo que es entendible pues el comportamiento del actuador es más complejo que el del tanque, y el actuador neumático más complejo que el hidráulico por sus cambios de resistencia equivalente en cada iteración.

Con estos resultados se fijó el límite de componentes para que el simulador funcione bien en los 50 componentes para el caso hidráulico y 30 si se usara el neumático. Se bajó bastante el

máximo para asegurar un buen valor de  $e$ , lo que son buenos resultados pues las experiencias de laboratorio no suelen ocupar tantas piezas. Como última limitante se recuerda que el simulador fue construido como herramienta para el aprendizaje, no es una herramienta de alta precisión por lo que su uso no es recomendado para diseñadores de sistemas hidráulicos/neumáticos de alto nivel.

Como trabajos futuros que se recomiendan a lectores interesados, está la investigación de componentes híbridos, es decir, características hidráulicas y electrónicas, sería interesante analizar cómo estos componentes funcionarían con el algoritmo, el cual se sabe puede manejar ambos tipos de componentes.

También se recomendaría una investigación para proponer modelos alternativos de los componentes, especialmente en el caso de los actuadores los cuales podrían simplificarse para un mejor funcionamiento. Un trabajo que puede ser logrado por expertos de las áreas hidráulicas y neumáticas.

También trabajos que integren nuevos componentes hidráulicos/neumáticos al algoritmo. Serían interesantes para verificar qué tan complejo sería el trabajo de adaptar esta técnica a nuevos componentes.

Un trabajo relevante sería continuar expandiendo las áreas del simulador, ya se mencionó que sería bueno mas trabajo para la parte neumática, pero sería interesante agregar un sistema que simule colisiones mecánicas para que así, los elementos como el actuador que generan movimiento puedan afectar otros elementos, como ejemplo la barra del actuador podría hacer reaccionar un botón que active otro sistema.

Para terminar las conclusiones se resaltan los aspectos más relevantes presentados en esta sección. Se propuso una técnica para resolver circuitos hidráulicos/neumáticos usando un solver de circuitos electrónicos con una equivalencia entre variación de presión en un intervalo de tiempo y voltaje, distinta al enfoque clásico de la equivalencia entre presión y voltaje, para facilitar la simulación de componentes tipo tanque.

El algoritmo permitirá a la empresa YOY expandir su simulador al área hidráulica y al mantener la estructura básica del algoritmo original se espera facilitar la mantención de este simulador, además de haber documentado el trabajo de tal forma de que sea fácil continuar expandiendo con más componentes hidráulicos.

Por lo anterior, se cumplió con una solución acorde al problema presentado por la empresa; sin embargo, aún hay trabajo por hacer que puede mejorar o expandir la solución, pero se llegó a un resultado que permite llamar a esta memoria un éxito.

## ANEXOS

### 5.1. Factorización LU

La factorización LU es un método utilizado para descomponer una matriz cuadrada  $A$  en el producto de dos matrices: una matriz triangular inferior  $L$ , valores 0 sobre su diagonal, y una matriz triangular superior  $U$ , valores 0 bajo su diagonal, se puede expresar como  $A = LU$ . La factorización LU se utiliza comúnmente para resolver sistemas de ecuaciones lineales y calcular determinantes. Para la resolución del sistema con este método se suelen aplicar otros 2 métodos que son *Forward substitution* y *Backward substitution*.

### 5.2. Forward Substitution

*Forward substitution* es un algoritmo utilizado para resolver sistemas de ecuaciones lineales cuando la matriz es triangular inferior. Suponga un sistema de ecuaciones lineales  $Lx = b$ , donde  $L$  es una matriz triangular inferior y  $b$  es el vector de términos independientes. El algoritmo de *Forward substitution* procede de la siguiente manera:

1. Inicializar  $x$  como un vector de ceros.
2. Para cada fila  $i$  desde 1 hasta  $n$ , donde  $n$  es el tamaño del sistema:
  - Calcular  $x_i$  utilizando la fórmula  $x_i = \frac{b_i - \sum_{j=1}^{i-1} L_{ij}x_j}{L_{ii}}$ .

Al finalizar este algoritmo, se obtiene la solución  $x$  del sistema de ecuaciones lineales.

### 5.3. Backward Substitution

*Backward substitution* es el algoritmo, por así decirlo, opuesto a *Forward substitution* ya que este resuelve sistemas de ecuaciones lineales cuando la matriz es triangular Superior. Para un sistema de ecuaciones lineales  $Ux = b$  el algoritmo procede de la siguiente manera:

1. Inicializar  $x$  como un vector de ceros.
2. Para cada fila  $i$  desde  $n$  hasta 1, donde  $n$  es el tamaño del sistema:
  - Calcular  $x_i$  utilizando la fórmula  $x_i = \frac{b_i - \sum_{j=i+1}^n U_{ij}x_j}{U_{ii}}$ .

Como se puede ver, se recorren las filas en sentido contrario, y al finalizar se encuentra la solución  $x$ .

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] <https://www.getapp.cl/software/2036463/hydrosym>. Accessed: 2022-7-26.
- [2] <https://www.solidworks.com/es/product/solidworks-simulation>. Accessed: 2022-7-22.
- [3] Famic technologies: System design & simulation software. <https://www.famictech.com/es/Productos/Automation-Studio/Edici%C3%B3n-Educacional>. Accessed: 2022-7-20.
- [4] FluidSIM 6. <https://www.festo-didactic.com/int-es/learning-systems/aprendizaje-digital/fluidsim/fluidsim-6.htm?fbid=aW50LmVzLjU1Ny4xNC4xOC41OTEuMTAzMzc3>. Accessed: 2022-7-25.
- [5] HydroSym. <https://paro.nl/hydrosym-hydraulic-schematic-design>. Accessed: 2022-7-26.
- [6] Leyes de Kirchhoff[online] Disponible en [https://www.wikiwand.com/es/Leyes\\_de\\_Kirchhoff](https://www.wikiwand.com/es/Leyes_de_Kirchhoff).
- [7] Simcenter amesim. <https://www.plm.automation.siemens.com/global/es/products/simcenter/simcenter-amesim.html>. Accessed: 2022-7-28.
- [8] Engineering simulation software. <https://www.ansys.com/products>, December 2020. Accessed: 2022-7-22.
- [9] Arthur Akers, Max Gassman, and Richard Smith. *Hydraulic power system analysis*. CRC press, 2006.
- [10] M Pérez Bayas, S Coba, E Pozo, and M Ordoñez. Diseño y simulación mecánica de un actuador hidráulico rotativo sumergible para aplicación en hidroterapia/design and mechanical simulation of a submersible rotary hydraulic actuator for hydrotherapy application. *KnE Engineering*, pages 64–78, 2020.
- [11] Luis Bertoglia Richards. La ansiedad y su relación con el aprendizaje. *Psicoperspectivas. Individuo y Sociedad*, 4(1):13–18, 2008.
- [12] Olga Lucía Roa Bohórquez, Gloria Amparo Contreras Gelves, Laura Victoria Medina Sánchez, and Hector Vega. Modelado matemático, simulación, análisis y control de un sistema hidráulico interactivo-tres tanques en serie. *Revista de Tecnología*, 16(1):77–98, 2017.
- [13] Belén Lantero Bringas. !hecras vs iber! <https://www.cursosgis.com/hecras-vs-iber/>, March 2017. Accessed: 2022-8-3.

- [14] Angela Gisell Carpio Quispe. *HCANALES version 3.3 Manual de Usuario*. Accessed: 2022-8-8.
- [15] Festo Didactic. FluidSIM 6 - GRAFCET. <https://www.youtube.com/watch?v=0wETL3AI4qw>, March 2022.
- [16] Yosmary Durán. Administración del inventario: elemento clave para la optimización de las utilidades en las empresas. *Visión gerencial*, (1):55–78, 2012.
- [17] A Ellman and R Piché. A modified orifice flow formula for numerical simulation. In *Fluid Power Systems and Technology 1996, Collected papers presented at the 1996 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition November 17-22, 1996, Atlanta, Georgia*, pages 59–62. ASME Press, 1996.
- [18] Salvador Esqué. *A new approach for numerical simulation of fluid power circuits using Rosenbrock methods*. Tampere University of Technology, 2008.
- [19] FamicTechnologies. Hidráulica, neumática y parte 1 del proyecto multi-tecnologías. <https://www.youtube.com/watch?v=90o0botf1ZY>, July 2022.
- [20] Omar Bascoy Feito. ¿que es iber? un software libre para la modelización hidráulica. <https://imasgal.com/que-es-iber/>, February 2021. Accessed: 2022-8-3.
- [21] GESTIONMAX. HIDRAULICA - definicion - significado. <https://diccionario.motorgiga.com/hidraulica>. Accessed: 2023-7-22.
- [22] Yasmina Gómez Pérez and Ender Gamez Montero. Software simulador de circuitos neumáticos. 2000.
- [23] Cheng-gong LI and Zong-xia JIAO. Thermal-hydraulic modeling and simulation of piston pump. *Chinese journal of aeronautics*, 19(4):354–358, 2006.
- [24] Kai Li, Zhong Lv, Kun Lu, and Ping Yu. Thermal-hydraulic modeling and simulation of the hydraulic system based on the electro-hydrostatic actuator. *Procedia Engineering*, 80:272–281, 2014.
- [25] E Merritt Herbert. *Hydraulic control systems*. New York, 1967.
- [26] Adequa Molecor. Instalación de tuberías plásticas en obra civil - adequa en Ase-TUB. <https://www.youtube.com/watch?v=-t9fvToRJKc>, November 2019. Accessed: 2022-8-8.
- [27] Marko Orošnjak, Mitar Jocanović, and Velibor Karanović. Simulation and modeling of a hydraulic system in fluidsim. In *XVII International Scientific Conference on Industrial Systems (IS 2017), Novi Sad, Serbia*, 2017.

- [28] MA Pardo, M Jover, A Trapote, and J Valdes-Abellan. Iniciación a la programación de un software de simulación hidráulica. *X Jornades de Xarxes d'Investigació en Docència Universitària: la participació i el compromís de la comunitat universitària*, pages 671–688, 2012.
- [29] Paro Software. Intro to hydrosym - hydraulic schematic design software. <https://www.youtube.com/watch?v=ZuTYvMzz44E>, January 2016.
- [30] Lawrence T. Pillage, Ronald A Rohrer, and Chandramouli Visweswariah. *Electronic Circuit and System Simulation Methods*. McGraw-Hill, 1995.
- [31] Rebeca Benayas Polo. ¿que es HEC - RAS y para que sirve? <https://www.cursosgis.com/que-es-hec-ras-y-para-que-sirve/>, November 2014. Accessed: 2022-8-3.
- [32] Juan Rafael Pérez Pupo. Estado del arte de los software de simulación de los sistemas hidráulicos. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 15(1):32–37, 2006.
- [33] Carlos Rodríguez, Adolfo Iriarte, and Luis Saravia. Análisis de circuitos hidráulicos en el entorno del simusol. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 6, 2002.
- [34] William Ricardo Sanabria-Diaz and Andrés Camilo Salazar Sanchez. Análisis comparativo de los modelos hec ras e iber en la determinación de las zonas de amenaza por inundación en el corregimiento de santa fe de morichal, municipio de yopal, departamento de casanare. 2021.
- [35] Siemens. Hydraulic axis modelling and coupling to PLCSIM advanced. <https://www.youtube.com/watch?v=AejSXwYFF5E>, January 2020.
- [36] Simulador. REAL ACADEMIA ESPAÑOLA: Diccionario de la lengua española. <https://dle.rae.es/simulador>. [versión 23.6 en línea] Accessed: 2023-7-22.
- [37] Ciencia y Tecnología. Neumática básica FluidSim festo 6. <https://www.youtube.com/watch?v=av1ewJtznjc>, July 2020.
- [38] Ord Us Epa. Storm water management model (SWMM). 2014.
- [39] David Valentín Ruiz. Simulación de una bomba hidráulica. 2011.
- [40] Sarawoot Watechagit and Krishnaswamy Srinivasan. Modeling and simulation of a shift hydraulic system for a stepped automatic transmission. *SAE technical paper*, 2003:01-0314, 2003.