

# Bomba Peristáltica rotatoria para dosificación del compuesto "Abraxane"

## Rotary peristaltic pump for dosing the compound "Abraxane"

Ricardo Yépez<sup>1</sup> Juan Esteban Chiriboga<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Escuela de Ingeniería Mecatrónica, Universidad Internacional del Ecuador

• e-mail: ricardoy97@hotmail.com • e-mail: juan.esteban.ch3110@gmail.com

**Abstract**— The administration of medicinal compounds in palliative care has been vital since the beginning of the field of medicine. The concept of the quantity of dose prescribed by doctors in recent years has created a delicate balance between the evolution of the improvement of the patients and the level of professional preparation the doctor has. The emergence of technological resources such as infusion machines that pump small amounts of substances precisely and accurately has made a difference when administering drugs such as Abraxane based on the characteristics of each patient, either intravenously to the circulatory system, subcutaneous or epidural, obtaining quantifiable results with the possibility of elaborating a statistical follow-up for each treatment.

However, knowledge about the construction and manufacture of these technological resources has not reached a high degree of diffusion, making it impossible to use them in regions of the world that do not have the capital to acquire them. The latest OMS report details that 78% of people who need palliative care live in low-income countries, and that, above all, only 14% of these people receive it [?].

The paper shows the design, analysis and virtual precision prototyping of an infusion machine from a rotary peristaltic pump for the dosing of drugs in treatments that slow the progress of cancer cell replication. And in this way offer a viable construction possibility for use with a margin of error of 0.5[ml] per dose in mama, pancreas and lung cancer, in addition to offering an optional fourth dose option in case of having to enter a dosage that is not within the established parameters.

**Keywords**—Pump, Infusion, Dosing, Flow, Rotary, PVP, Pipeline, Roller, Abraxane, Palliative Care, Chemotherapy, Pumping System, Dose, End Pressure, Infusion Hose.

**Resumen**— La administración de compuestos medicinales en cuidados paliativos ha sido vital desde los comienzos del campo de la medicina. El concepto de la cantidad de dosis prescrita por médicos en los últimos años ha creado un delicado equilibrio entre la evolución de la mejoría de los pacientes y el nivel de preparación profesional por parte del médico. El surgimiento de recursos tecnológicos como máquinas de infusión que bombean pequeñas cantidades de sustancias de forma precisa y exacta ha marcado la diferencia al administrar drogas como Abraxane en función de las características de cada paciente, ya sea de forma intravenosa al sistema circulatorio, subcutánea o epidural, obteniendo resultados cuantificables con posibilidad de elaborar un seguimiento estadístico para cada tratamiento.

Sin embargo, el conocimiento acerca de la construcción y fabricación de dichos recursos tecnológicos no ha alcanzado un alto grado de difusión, imposibilitando su uso en regiones del mundo que no cuentan con el capital para adquirirlos. El último informe de la OMS detalla que el 78 % de personas que necesitan cuidados paliativos viven en países de bajos recursos, y que, sobre todo, solo el 14 % de estas personas lo reciben [1].

El paper muestra el diseño, análisis y prototipado virtual de precisión de una máquina de infusión a partir de una bomba peristáltica rotatoria para la dosificación de drogas en tratamientos que mermen el avance de la replicación de células cancerígenas. Y de esta forma ofrecer una posibilidad de construcción viable para su uso con un margen de error de ±0.5[ml] por dosis en cáncer de mama, páncreas y pulmón, además de ofrecer una cuarta opción de dosis opcional en caso de tener que ingresar una dosificación que no se encuentren en los parámetros establecidos.

**Palabras Clave**—Bomba, infusión, dosificación, flujo, rotatoria, PVP, pipeline, rodillo, Abraxane, cuidados paliativos, quimioterapia, sistema de bombeo, dosis, presión final, tubo flexible de infusión.

### I. INTRODUCCIÓN

La administración de compuestos por vía oral indicados por prescripción médica elevan la posibilidad de una atenuación del impacto de la droga en el sistema, debido a ya sea por cambios alimenticios, cambios psi-químicos por el estado mental del paciente, o el consumo de otras sustancias para

tratar otro padecimiento [2]. Por otro lado, las máquinas de infusión cuyo proceso se basa en bombas peristálticas, ya sea lineal o rotatoria, usan un sistema programable de infusión que regula la cantidad administrada de medicamentos [3]. Ha medida que su sistema ha ido adquiriendo reconocimiento en el campo médico, su uso se ha enfocado en tratamientos para

prolongar la vida del paciente con enfermedades terminales o cuyo pronóstico no es favorable. La ventaja de su uso es la dosificación del compuesto de forma continua durante un determinado tiempo, para elevar el índice de efecto en el sistema circulatorio y tratar el área específica que requiera [4].

En este caso de estudio se usará “Abraxane” que se utiliza para tratar el cáncer de mama, páncreas y pulmón. Cabe resaltar que la dosis que se usa, se la calcula en función de la superficie corporal y resultados de sangre, y su tiempo de administración se recomienda mínimo de 30 minutos vía intravenosa periférica [5].

Debido a la vía que se usa, se debe tomar en consideración que la presión sanguínea PVP que depende de la posición de la vena respecto al corazón y de su distancia a este, por lo que los valores de presión llegan a 30 [mmHg] o 3.99 [KPa] como constante en toda la zona de la presión venosa periférica, y sobre todo también se debe tomar en cuenta la presión ejercida por el set de infusión que llegan a un valor de 111 [mmHg] o 14.79 [KPa]. En consecuencia, se puede determinar que el valor mínimo de presión que deberá ejercer la bomba para dosificar la sustancia será la suma de todas las presiones a vencer previamente dichas con un valor de 141 [mmHg] o 18.79 [KPa], y el valor máximo de presión será de 750 [mmHg] o 99.9 [KPa], propuesto por la OMS para máquinas de infusión.[6]

El diseño de la bomba será de un montaje de reemplazo, es decir existirá un acople en la estructura base para posibilitar el intercambio del tubo flexible en los rodillos. De igual modo, el prototipo esta propuesto para facilitar el acople e intercambio del número de rodillos a usar.

## II. ESTADO DEL ARTE

Las bombas peristálticas nacen por la necesidad de transfusiones de sangre en el año 1845 con un diseño rudimentario que variaba las dimensiones de la manguera disponible, sin embargo en 1855 se patentó el primer diseño oficial por Rufus Porter y J.D. Bradley en Estados Unidos, cuyo diseño consistía en una palanca rotatoria accionada manualmente, la cual estaba incorporada en una base circular cuyo centro contenía un solo rodillo [7].

#### A. *Bomba peristáltica intravenosa*

Primer modelo de 1983 con baja precisión para controlar la dosificación de drogas al sistema circulatorio, usado para terapias en el campo médico. Su objetivo fue determinar el primer diseño de un sistema de infusión con acople de motor.

### **1. Características:**

- Conexión de seguridad del tubo flexible.
  - 2 rodillos principales con porcentaje de precisión de 50 %
  - Rotor central para acople de motor
  - Diámetro de tubo 0,3 [pul]
  - Diámetro de rodillo 0,15 [pul]

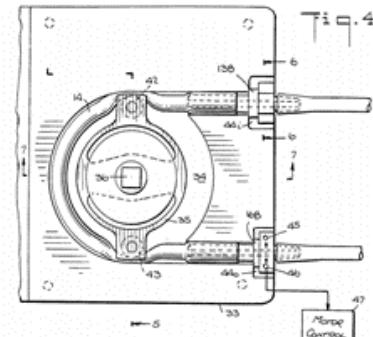


Fig. 1. La ilustración indica la estructura interna del eje con los dos rodillos formando un gran intervalo volumétrico entre ellos.[8]

### *B. Bomba peristáltica para administración de químicos [9]*

Primer modelo propuesto para la infusión con un índice controlado de administración para químicos de limpieza de piscinas. Sin embargo, posteriormente se usaría para la dosificación de drogas en personas con diversas enfermedades, entre ellas la diseminación de morfina para atenuar los efectos del cáncer.

### **1. Características:**

- Diseño circular para minimizar costos de producción.
  - Tres rodillos giratorios de 0,4 [pulg] de diámetro.
  - Un eje coaxial, con unión a motor de 0,8 [pulg] de diámetro.
  - Tubo comprensible quirúrgico de 0,5 [pulg] de diámetro.
  - Precisión del 70 % entre datos calculados y recolectados.
  - Conexión de seguridad del tubo flexible con el soporte de la base.
  - Cuellos base entre el tubo y la estructura principal.

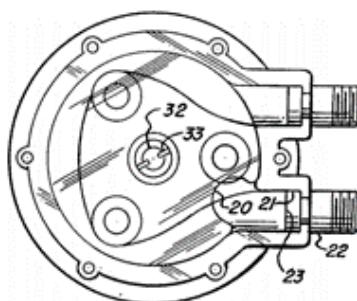


Fig. 2. En la imagen se observa su forma con 3 rodillos y su dimensiones de estructura base relativamente pequeñas.[9]

### *C. Bomba peristáltica con ayuda céntrica*

Modelo desarrollado del modelo de 3 rodillos cuyo objetivo es proporcionar ajuste de la posición del tubo flexible.

### **1. Características:**

- Diámetro de cada eje de ayuda céntrica es de 0,2 [pulg].
  - Diámetro del eje principal inherente a preferencia, debido a extensión de este mismo por fuera de la base.

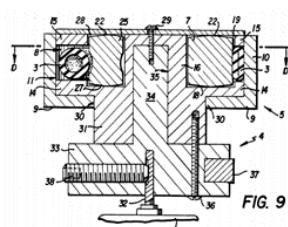
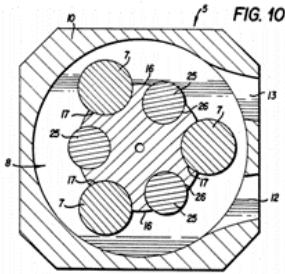


Fig. 3. En la figuras se observa el uso de 3 rodillos principales y 3 rodillos concéntricos, cuyos últimos sirven de sostén para el tubo flexible y garantizar que no se mueva.[10]

#### D. Bomba Peristáltica Squeeze

Modelo propuesto para implementar un sistema rotatorio de 4 secciones principales compuestos por 8 rodillos, que 2 rodillos conforman una sección.

##### 1. Características:

- Diámetro de rodillo de 0,2 [pul].
- Altura de conjunto de sección de 0,8 [pul].
- 75 % de eficiencia.
- Diámetro de unión de eje con motor con rango de 0,2 a 1 [pul].

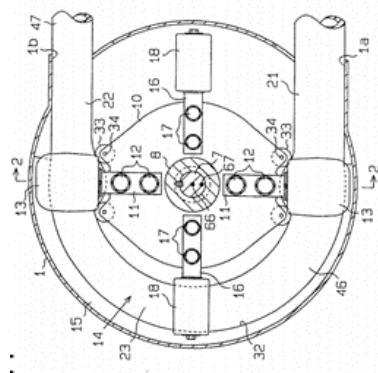


Fig. 4. En la figura se puede apreciar los rodillos que aplastan de forma céntrica entre ellos al tubo.[11]

#### E. Bomba de infusión con 4 rodillos independientes

Modelo propuesto por Brian E. Baldwin en 1988, cuyo objetivo es observar y analizar el resultado del índice volumétrico variando y adaptando la cantidad de rodillos. [12]

##### 1. Características:

- La eficiencia y precisión se incrementa por el número de rodillos usado, esto se verifica en una tabla:

TABLA I  
TABLA DE PRECISIÓN DE RODILLOS

Rodillos	Eficiencia
4	75 %
5	88 %
6	92 %

Donde el porcentaje se obtuvo al comparar los datos calculados con los datos recolectados.

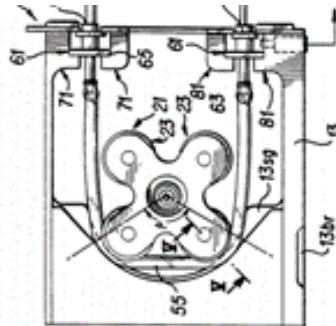


Fig. 5. Se puede observar 4 rodillos que presionan el tubo contra la pared de la cámara de bombeo.[12]

#### F. Clasificación de modelos de bombas

En la siguiente tabla se observa la referencia de modelo de bomba.

TABLA II  
CLASIFICACIÓN DE MODELOS DE BOMBAS

Modelo	Referencia Bibliográfica	Clasificación
Bomba intravenosa	[8]	Dos rodillos
Bomba administración de químicos	[9]	Tres rodillos
Bomba con ayuda céntrica	[10]	Tres rodillos con mini rodillos para ajuste de tubo
Bomba Squeeze	[11]	Cuatro secciones de rodillos, un par de rodillos forma una sección
Bomba 4 rodillos intercambiables	[12]	Cuatro rodillos, con posibilidad de incremento de rodillos

#### G. Gráfico de Taxonomía

#### III. ENFOQUE

La investigación que se presenta describe y detalla el pipeline para llevar a cabo el prototipado virtual de una bomba peristáltica rotatoria considerando parámetros de dimensionamiento de acuerdo con el tubo flexible de infusión a usar y niveles de presión mínima y máxima de la bomba..

#### IV. MATERIALES Y MÉTODOS

El prototipado virtual de la bomba peristáltica considera el diseñado mecánico, modelo y simulado tanto en software CAD, como en software de simulación electrónica.

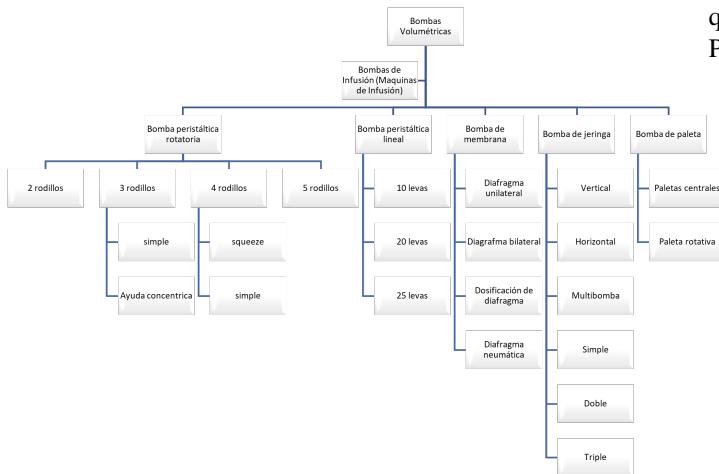


Fig. 6. Clasificación y distribución de bombas peristálticas.

#### A. Presión del sistema circulatorio sanguíneo

La figura 1 se observa los valores de presión para cada sección del cuerpo humano y sus valores máximos dependiendo de su uso. En la figura 2 se observa el valor mínimo de presión de una bomba de infusión para dosificar un fluido, utilizando una aguja intravenosa 16G, 9 [cm] de largo.

Pressure mmHg	Example (rounded pressure values)	Pressure in psi
2 - 20mm Hg	Central Venous pressure range	0 - 0.4 psi
10 - 30mm Hg	Peripheral Venous pressure range	0.2 - 0.6 psi
80-100mm Hg	Extravasation risk	> 2 psi
100-150mm Hg	Systolic Arterial pressure range	2 - 3 psi
75mm Hg	Gravity pressure of fluid 100cm above cannulation site	1.5 psi
750mm Hg	Highest probable pressure required by an infusion pump	15 psi
1,000mm Hg	Many Ambulatory pump occlusion pressure settings	20 psi

Fig. 7. Rangos de presión. [6]

maximum adult venous pressure	30 mm Hg
filter	10 mm Hg
cannula	100 mm Hg
administration set	1mm Hg
Total =	141 mm Hg

Fig. 8. Presión total del set. [6]

Por lo que la presión mínima de la bomba a ejercer será de 141 [mmHg], es decir 18.79 [kPa], y la presión máxima a ejercer será de 750 [mmHg], siendo 99.99 [kPa].

#### B. Tubo Intravenoso

Para el desarrollo de las bombas peristálticas rotatorias se debe tomar en cuenta, dos factores primordiales, el espacio mínimo de compresión del tubo flexible y la cantidad de dosis

que suministrará por intervalo entre rodillo.

Para eso se toma en cuenta las siguientes ecuaciones:

#### 1. Nivel de oclusión para tubo flexible

$$occlusion = \left( \frac{2 * t - gap}{2 * t} \right) * 100 \% \quad (1)$$

Donde  $t$  es el grosor del tubo flexible, y  $gap$  el diámetro interno del tubo flexible. Las condiciones óptimas son en general una oclusión mínima del 10 – 20 %.

#### 2. Dosis por rotación

$$dose = A * R * (a - 2 * s)(occlusion * \frac{1}{100}) \quad (2)$$

Donde  $A$  es la superficie interna del tubo,  $R$  es la curvatura interna de la estructura base con respecto a su centro,  $a$  es el ángulo interno entre dos rodillos adyacentes y  $s$  es el ángulo que el tubo deformado forma alrededor de un rodillo [3].

La resolución volumétrica dependerá del volumen del fluido atrapado entre dos rodillos adyacentes, en consecuencia, la cantidad de rodillos que determina el espacio entre ellos será la variable independiente y la resolución [13] volumétrica será la variable.

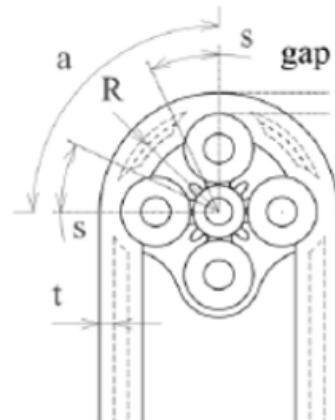


Fig. 9. Características dimensionales del sistema de dosificación. [3]

#### 3. Caudal

El caudal total estará dado por el volumen de la rotación en función de la velocidad por el número de rodillos propuestos.[13]

$$QT = V * w * numero de rodillos \quad (3)$$

#### 4. Velocidad del fluido

Se usa la ley de la ecuación de continuidad para calcular el flujo volumétrico o caudal, despejando la velocidad media [14], para obtener la siguiente ecuación:

$$QT = \frac{V}{t} \quad (4)$$

5. Potencia de la bomba

Se utilizará la potencia de la bomba para posteriormente obtener el cálculo de la altura manométrica de la bomba.[13]

$$\text{Potencia} = T * w \quad (5)$$

6. Altura manométrica de la bomba

Esta dada por la igualdad de la potencia de la bomba a la altura manométrica de la bomba por el caudal total y por su peso específico[14], quedando de la siguiente manera:

$$\text{Potencia} = h_a * QT * y \quad (6)$$

Entonces, despejando quedaría:

$$h_a = \frac{\text{Potencia}}{QT * y} \quad (7)$$

7. Pérdida de energía HL

Para la perdida de energía HI se contemplan las cargas primarias y secundarias, obtenidas por medio del número de Reynolds y el factor de fricción.

a) Número de Reynolds [14]:

$$N_R = \frac{v * D}{v_k} \quad (8)$$

Donde:

- $N_R$  = Número de Reynolds.
- $v$  = velocidad promedio de flujo.
- $v_k$  = viscosidad cinemática.

b) Factor de fricción [14]:

Si el flujo es laminar se usa la siguiente ecuación:

$$f = \frac{64}{N_R} \quad (9)$$

Donde:

- 64 = es la constante de flujo laminar.
- $N_R$  = Número de Reynolds.

Si el flujo es turbulento se usa:

$$f = \frac{0,25}{\left(\log\left(\frac{1}{3,7*(\frac{D}{\epsilon})} + \frac{5,74}{N_R^{0,9}}\right)\right)^2} \quad (10)$$

Donde:

- $D$  = es el diámetro interior del tubo usado.

- $\epsilon$  = es el número.

- $N_R$  = es el número de Reynolds.

c) Carga primaria:

Para la carga primaria se utiliza la ecuación de Darcy [14], siendo:

$$h_{L1} = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2 * g} \quad (11)$$

Donde:

- $f$  = factor de fricción.
- $L$  = la longitud de la tubería.
- $D$  = el diámetro interno de la tubería.
- $v$  = la velocidad del flujo.
- $g$  = la constante de gravedad.

d) Carga secundaria:

La ecuación está dada por:

$$h_{rs} = \partial * \frac{v^2}{2 * g} \quad (12)$$

Donde:

- $\partial$  = Coeficiente adimensional de pérdida secundaria.
- $v$  = velocidad media en la tubería.

e) Pérdida de energía HL total:

Esta dada por:

$$h_L = h_{L1} + h_{L2} \quad (13)$$

8. Ecuación general de la energía:

La ecuación general se aplica en sistemas de flujo no ideal, es decir que existen pérdidas y ganancias de energía, dado por la siguiente ecuación:

$$\frac{P_A}{y} + Z_A + \frac{v^2}{2 * g} + h_A - h_L - h_R = \frac{P_F}{y} + Z_F + \frac{v^2}{2 * g} \quad (14)$$

Donde:

- $P_A, P_F$  = presión del fluido en la sección A y F respectivamente.
- $Z_A, Z_F$  = elevación en la sección A y F respectivamente con respecto a un nivel de referencia.
- $V_A, V_F$  = velocidad del fluido en la sección A y B respectivamente.
- $y$  = peso específico del fluido.
- $g$  = constante de gravedad.
- $h_A$  = energía que se agrega al fluido con un dispositivo mecánico (bomba).
- $h_R$  = energía que se remueve del fluido por medio de un dispositivo mecánico.

- $h_L$  = perdida de energía del sistema por fricción en tuberías o perdidas menores.

#### 9. Dosis de Abraxane por perfusión:

La ficha técnica del compuesto a usar “Abraxane” da a partir de dosis en mg, prescrita por exámenes médicos sobre el tamaño del tumor en el área a tratar [5], como:

$$DosisTotal = \frac{DosisTotalCalculada[mg]}{5 * \frac{[mg]}{[ml]}} \quad (15)$$

Donde:

- Dosis total = la dosis total en volumen de ml a suministrar por 30 minutos [5].
- Dosis total calculada = dosis recomendada por médicos en mg.
- $5mg/ml$  = relación de cantidad de Abraxane en solución de cloruro de sodio al 0.9 % de concentración.

#### 10. Sistema de bombeo

El sistema que se plantea contempla dimensiones promedio del sistema físico real para la infusión intravenosa del compuesto, dando como presente en la figura 10

Donde:

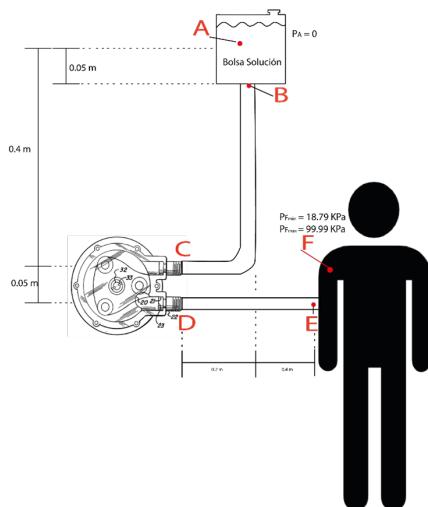


Fig. 10. Diagrama realizado en Inventor: Sistema completo de funcionamiento.

- La presión atmosférica en este caso es despreciable.
- $P_{F\min} = 18,79 \text{ kPa}$
- $P_{F\max} = 99,99 \text{ kPa}$
- $V_A, V_F$  = las velocidades en esos puntos son mínimas por lo que son despreciables.

## V. EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS

### A. Cálculos

#### 1. Nivel de oclusión (Dosis)

Para obtener el nivel de oclusión que guiará la constante

de aplastamiento, se utiliza la ecuación (1).

- $t = 1.8 \text{ mm}$
- $\text{gap} = 3 \text{ mm}$

$$\text{oclusion} = \left( \frac{2 * 1,8 - 3}{2 * 1,8} \right) * 100 \% = 16,66 \% \quad (16)$$

#### 2. Volumen por rotación

Para obtener el volumen entre dos rodillos se utiliza la ecuación (2), donde según las dimensiones de la bomba propuesta obtenemos:

- Diámetro interno = 3 mm
- $R = 20 \text{ mm}$
- $a = 90^\circ$
- $s = 22.5^\circ$

$$dosis = \frac{\pi * (0,003m)^2}{4} * 0,02m * (90^\circ - 2 * 22,5^\circ) * (0,166 * 0,001) \quad (17)$$

$$V_R = dosis = 1,0598 * 10^{-6} \text{ m}^3 \quad (18)$$

#### a) Dosis por perfusión en cáncer de Mama:

La dosis recomendada por la ficha técnica de Abraxane [5] para el cáncer de mama dentro de cuidados paliativos es de  $260 \text{ mg/m}^2$  durante 30 minutos, usando la ecuación 15

$$DosisTotal = \frac{260[\text{mg}]}{5 * \frac{[\text{mg}]}{[\text{ml}]}} = 52\text{ml} = 5,2 * 10^{-5} \text{ m}^3 \quad (19)$$

#### b) Velocidad de la bomba requerida:

Se usa la ecuación (4) y se reemplazan los valores del volumen total a bombear en función del tiempo:

- $V_T$  = volumen total a administrar
- $t = 30 \text{ min}$

$$QT = \frac{5,2 * 10^{-5} \text{ m}^3}{30 * 60 \text{ s}} \quad (20)$$

Una vez calculado el caudal total que se debe entregar podemos obtener la velocidad de la bomba por medio de la ecuación (3), despejando la velocidad  $w$ :

- $V_R$  = volumen por rotación.
- Número de rodillos = 4.

$$w_1 = \frac{QT_1}{V_{R1} * \text{numeroderodillos}} \quad (21)$$

$$w_1 = \frac{2,88 * 10^{-8} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{1,059 * 10^{-6} \text{ m}^3 * 4} \quad (22)$$

#### c) Velocidad media del fluido:

Se usa la ecuación (4)

$$v_1 = \frac{QT}{A} \quad (23)$$

$$v_1 = \frac{2,88 * 10^{-8} \frac{m^3}{s}}{\pi * (0,003)^2 / 4} \quad (24)$$

$$v_1 = 4,085 * 10^{-3} \frac{m}{s} \quad (25)$$

d) Número de Reynolds:

Se usa la ecuación (8)

- $D = 0,003 \text{ m}$
- $v_1 = 4,085 * 10^{-3} \text{ m/s}$
- $v_K = 0,8927 \text{ mm}^2/\text{s} = 8,927 * 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  [sa25C]

$$N_{R1} = \frac{4,085 * 10^{-3} \frac{m}{s} * 0,003}{8,927 * 10^{-7} \frac{m^2}{s}} \quad (26)$$

e) Factor de fricción:

$$f_1 = \frac{64}{N_{R1}} \quad (27)$$

f) Carga primaria:

Se obtiene reemplazando los valores del diagrama 10 y usando la ecuación (11)

$$h_{L1r} = 4,66 * \frac{1m}{0,03m} * \frac{(4,085 * 10^{-3} \frac{m}{s})^2}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} \quad (28)$$

$$h_{L1r} = 1,321 * 10^{-3} \text{ m} \quad (29)$$

g) Carga Secundaria:

Se da por el concepto de presión a vencer por el uso de válvulas, codos, etc. En este caso se presenta por el set de infusión intravenoso [6], dando como presión resultante 110 [mmHg] o 14.66 [kPa], siendo:

$$h_{rs} = \frac{14,66 \text{ KPa}}{9,81 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3}} = 1,4946 \text{ m} \quad (30)$$

h) Perdida de carga  $h_l$ :

Se usa la ecuación (13)

$$h_L = 1,321 * 10^{-3} \text{ m} + 1,4916 \text{ m} = 1,4957 \text{ m} \quad (31)$$

i) Potencia de la bomba:

Se usa el valor de la velocidad de la bomba (22) y se toma el torque del motor con caja reductora 4:1 por el nivel de oclusión del tubo a usar.

- $T = 0,60N * m * 4/1 * 0,166 = 0,3984$
- $w = 6,817 * 10^{-3} \text{ rad/s}$

$$Potencia = 0,3984 \text{ m} * 6,817 * 10^{-3} \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad (32)$$

$$Potencia = 2,7161 * 10^{-3} \text{ W} \quad (33)$$

j) Altura manométrica de la bomba:

Se utiliza la ecuación (7), y se toma los valores del peso específico de la solución a usar

- $y = 9,81 \text{ KN/m}^3$

$$h_a = \frac{2,7161 * 10^{-3} \frac{\text{Nm}}{\text{s}}}{2,88 * 10^{-8} * 9,81 * 10^3 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}} \quad (34)$$

k) Presión final:

Se utiliza la ecuación general de la energía (14), tomando las consideraciones del diagrama (10) y los datos recopilados de las ecuaciones (31) y (33), obteniendo

$$P_F = (h_A - h_L + Z_A) * y \quad (35)$$

$$P_F = (9,5872m - 1,4957m - 0,45m) * 9,81 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3} \quad (36)$$

$$P_F = 74,97 \text{ kPa} \quad (37)$$

l) Dosis por perfusión en cáncer de Pulmón:

La dosis recomendada por la ficha técnica de Abraxane [5] para el cáncer de mama dentro de cuidados paliativos es de 100 [mg/m<sup>2</sup>] durante 30 minutos, usando la ecuación (19)

$$Bolsasolucion = Dt = \frac{100mg}{5 \frac{mg}{ml}} = 2 * 10^{-5} \text{ m}^3 \quad (38)$$

Se lleva a cabo el mismo procedimiento que para el cáncer de mama.

m) Presión Final

Se utiliza la ecuación general de la energía (14), tomando las consideraciones del diagrama (10) y los datos recopilados de las ecuaciones (31) y (33), obteniendo

$$P_F = (h_A - h_L + Z_A) * y \quad (39)$$

$$P_F = (9,7581m - 1,4949m - 0,45m) * 9,81 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3} \quad (40)$$

$$P_F = 76,56 \text{ kPa} \quad (41)$$

- n) Dosis por perfusión en cáncer de Páncreas:  
 La dosis recomendada por la ficha técnica de Abraxane [5] para el cáncer de mama dentro de cuidados paliativos es de 100 [mg/m<sup>2</sup>] durante 30 minutos, usando la ecuación (19)

$$Bolsasolucion = Dt = \frac{125mg}{5\frac{mg}{ml}} = 2,5 * 10^{-5}m^3 \quad (42)$$

Se lleva a cabo el mismo procedimiento que para el cáncer de mama.

ñ) Presión Final

Se utiliza la ecuación general de la energía (14), tomando las consideraciones del diagrama (10) y los datos recopilados de las ecuaciones (31) y (33), obteniendo

$$P_F = (h_A - h_L + Z_A) * y \quad (43)$$

$$P_F = (4,0054m - 1,495m - 0,45m) * 9,81 \frac{KN}{m^3} \quad (44)$$

$$P_F = 79,53kPa \quad (45)$$

### 3. Equivalencias de presión

TABLA III  
EQUIVALENCIAS DE PRESIÓN

Cáncer	Máma	Pulmón	Páncreas
Presión [KPa]	[74,97]	[76,56]	[79,53]

### B. Modelo CAD



Fig. 11. Máquina de infusión: Vista Central, Vista Angular y Vista de ensamble del sistema de bombeo.

El modelo CAD está compuesto por su base principal que contiene un teclado “Pendant”, un teclado numérico, una

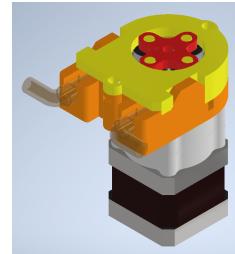


Fig. 12. Sistema de bombeo.

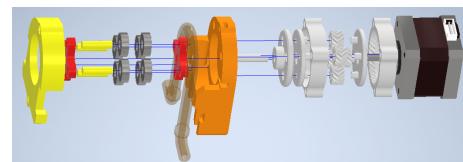


Fig. 13. Ensamble:Sistema de bombeo.

pantalla LCD y el mecanismo de bombeo, el cual será el encargado de la dosificación del compuesto.

El mecanismo se compone de su base principal, la tapa de compresión y el sistema de 4 rodillos anexados por un eje céntrico el cual es el encargado de permitir un giro perpetuo proporcionado por el motor Nema17. Entre los rodillos se encuentra el tubo flexible dentro de un compartimento cilíndrico que permite su oclusión sin tambaleo del tubo dentro de este mismo compartimento.

### C. Pruebas de resistencia mecánica (Simulación CAD)

#### 1. Características

Para la simulación CAD, se consideró 3 puntos estáticos de movimiento, debido a que, al comprenderse la bomba de 4 rodillos, 3 de estos rodillos siempre se encuentran en contacto con el tubo flexible, por lo que el desplazamiento del material por el torque se encuentra en el último rodillo que no se encuentra en contacto con el tubo flexible. Cabe destacar que para la simulación se tomó como material de construcción de la bomba al acero A36, debido a que se encuentra en un ambiente quirúrgico donde es necesario que presente una rigidez estable y se encuentre al alcance en términos de costos.

#### 2. Simulación de desplazamiento estático

Como se puede observar en la figura 14, el desplazamiento máximo que va a tener la bomba, se daría en el cuarto rodillo con una distancia de  $1,572e^{-4}[mm]$ , lo que demuestra una estabilidad proporcional a la rigidez del material usado y que los parámetros del torque usado de 1 [Nm] son ideales para mantener la estructura del material.

#### 3. Simulación de análisis de tensión nodal

En la figura 15, se puede observar que en las zonas donde comienza a cambiar de color a un tono más claro hasta llegar a rojo, se encuentra la mayor concentración

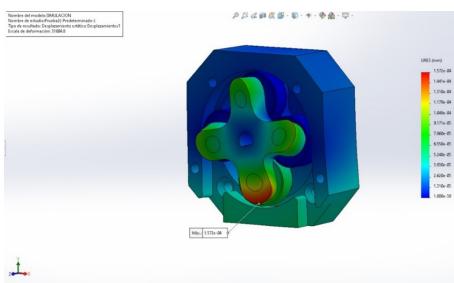


Fig. 14. Desplazamiento estático realizado en Solidworks del Sistema de bombeo.

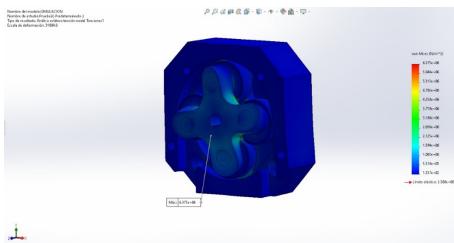


Fig. 15. Análisis de tensión nodal realizado en Solidworks

de esfuerzo considerado como esfuerzo equivalente de Eunice con un valor de  $6,375e^{-6}[N/m^2]$ .

#### 4. Simulación de factor de seguridad Considerando que el

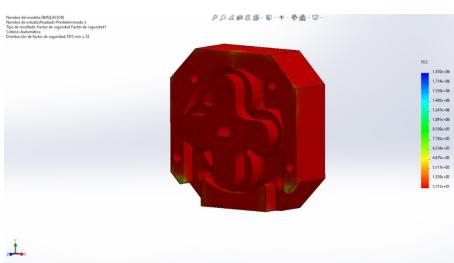


Fig. 16. Factor de seguridad realizado en Solidworks

límite elástico del acero A36 es de  $2,500e^8[N/m^2]$  se puede obtener el factor de seguridad mínimo de 32 adimensional como se observa en la figura 16.

#### 5. Circuito de control Para el presente proyecto se uti-

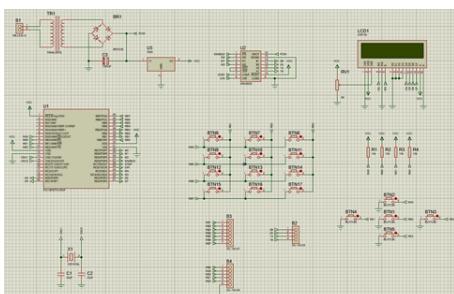


Fig. 17. Circuito de control Por Pic

lizó como sistema de control un microcontrolador PIC16F877A programado en lenguaje Assemble, el objetivo de utilizar este microcontrolador es el de reducir

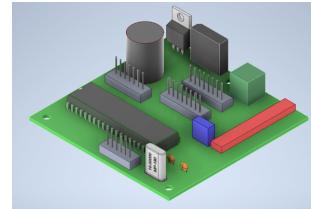


Fig. 18. Circuito de control Por Pic: Diseñado en Proteus e Inventor

en lo posible el espacio utilizado dentro del gabinete de la máquina de infusión.

#### 6. Menú de control

Para el menú de control se estableció las tres opciones



Fig. 19. Opciones de dosificación

principales a dosificar con el compuesto de “Abraxane” de acuerdo con los cálculos realizados para mantener un rango de presión estable entre 18.78 [KPa] y 99.99 [KPa], y además se estableció un modo opcional que permite al usuario (médico) establecer una cantidad en [ml] del compuesto en el tiempo que se desee. Cabe destacar que en este modo se encuentran parámetros de límite que no permiten, a partir de los datos ingresados, exceder el rango de presión final que entrará al torrente sanguíneo.

#### 7. Material y características del prototipo

##### a) Materiales

Para definir los materiales con los que se va a construir el prototipo, se debe diferenciar el concepto de prototipo de investigación y prototipo de aplicación.

El primero define características y aspectos importantes para la obtención y fabricación de la piezas que permite tener una ejemplificación física del objetivo de esta investigación, el cual es ofrecer el diseño, análisis y prototipado virtual de precisión de una máquina de infusión a partir de una bomba peristáltica rotatoria para la dosificación de drogas en tratamientos que mermen el avance de la replicación de células

cancerígenas. Y de esta forma ofrecer una posibilidad de construcción viable para su uso. Mientras que el segundo concepto engloba una producción a mayor escala con materiales más resistentes que permitan una mayor vida útil del prototipo en entornos quirúrgicos, en los cuales los elementos y dispositivos como el presente, necesiten soportar diferentes condiciones como: humedad, calor, desinfección diaria, entre otros.

Por estas razones y tomando en cuenta el primer concepto de prototipo de investigación, en el presente paper se muestra el prototipo de la bomba peristáltica fabricado en su mayoría a partir de fabricación de fusión de filamento (FFF) con PLA, sin tomar en cuenta los elementos electro-mecánicos; como el motor Nema17, las placas de circuito, el transformador y la pantalla LCD 16x2.

El motivo para escoger el PLA (Ácido Poliláctico), es debido a su facilidad de impresión en 3D y sus propiedades físico-mecánicas en comparación a otros filamentos 3D: Sin embargo, las condiciones

	ABS	Flexible	PLA
Compare Selected	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ultimate Strength	40 MPa	26 - 43 MPa	65 MPa
Stiffness	5 / 10	1 / 10	7.5 / 10
Durability	8 / 10	9 / 10	4 / 10
Maximum Service Temperature	98 °C	60 - 74 °C	52 °C
Coefficient of Thermal Expansion	90 $\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$	157 $\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$	68 $\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$
Density	1.04 g/cm <sup>3</sup>	1.19 - 1.23 g/cm <sup>3</sup>	1.24 g/cm <sup>3</sup>
Price (per kg)	\$10 - \$40	\$30 - \$70	\$10 - \$40
Printability	8 / 10	6 / 10	9 / 10
Extruder Temperature	220 - 250 °C	225 - 245 °C	190 - 220 °C
Bed temperature	95 - 110 °C	45 - 60 °C	45 - 60 °C
Heated Bed	Required	Optional	Optional
Recommended Build Surfaces	Kapton Tape, ABS Slurry	PEI, Painter's Tape	Painter's Tape, Glue Stick, Glass Plate, PEI
Other Hardware Requirements	Heated Bed, Enclosure Recommended	Part Cooling Fan	Part Cooling Fan

Fig. 20. Propiedades de filamentos disponibles

del análisis de elementos finitos que se llevaron a cabo, fueron pensados para contemplar el concepto de prototipo de aplicación en el cual el prototipo es pensado para estar fabricado de acero A36, el material más común con el que está hecho los elementos del campo de medicina.

## b) Características del prototipo

El prototipo contempla las siguientes características:

- 1) Peso aproximado = 4.52 Kg
- 2) Altura = 115 mm
- 3) Ancho = 163.6 mm
- 4) Profundidad = 133.22 mm
- 5) Alimentación = 110V

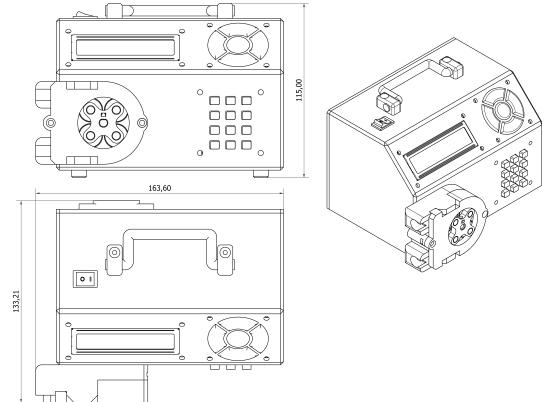


Fig. 21. Características del prototipo

## c) Funcionamiento

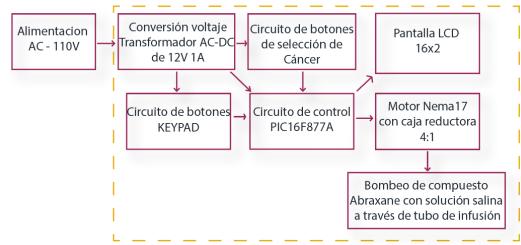


Fig. 22. Diagrama de funcionamiento

### -Alimentación:

• Directa: La máquina de dosificación funciona primero con alimentación de pared AC de 110V, conectado a un enchufe americano de 3 Pines.

• Convertida: Posteriormente pasa a un transformador de voltaje que convierte el voltaje AC a DC con un valor de 12V, 1A.

• Control: Esta compuesta por un circuito alimentado por 12V. En él se encuentra conectado por jumpers hembra, el circuito de botones de control de selección, el circuito de botones KEYPAD y la pantalla LCD 16x2. Y finalmente el motor se encuentra conectado a la placa pasando primero por el driver DVR8825. Todo se controla a partir de un microcontrolador PIC16F877A.

• Bombeo: El eje del motor Nema17 se encuentra conectado a una caja reductora 4:1, que permite elevar el torque del motor de 0.6 N.m a 2.4 N.m, suficiente para vencer el coeficiente de arrastre o coeficiente de oclusión del tubo flexible y que

permite bombear el compuesto por todo el tubo hasta el torrente sanguíneo del paciente.

**A. Encendido:** El encendido permite visualizar 4 diferentes de opciones de dosificación:

- 1: Cáncer de Mama; 52 ml en 30 minutos.
- 2: Cáncer de Páncreas; 20 ml en 30 minutos.
- 3: Cáncer de Pulmón; 25 ml en 30 minutos.
- 4: Dosificación Opcional de acuerdo con parámetros establecidos

**B. Modo:** Una vez seleccionado el modo, se presiona el botón del medio para comenzar la dosificación.

**C. La dosificación:** Comenzará y se deberá esperar el tiempo especificado. En cuarto caso, la dosificación primero se verificará que este dentro de los parámetros permitidos.

## 8. Pruebas y resultados (IV)

Para el objetivo de realizar las pruebas y obtener resultados aproximados, se debe tener en cuenta que el sistema de bombeo final debe quedar como se observa en la figura 10. Debido a la naturaleza del estudio y la limitación del campo de investigación, se reemplazó el punto final de bombeo del sistema sanguíneo humano por un contenedor volumétrico en [ml]. De esta forma, se puede verificar la cantidad dosificada en un intervalo de tiempo.

Condiciones:

- a) Elevar la bolsa solución un promedio de 45 [cm] con respecto a la bomba de infusión. Normalmente se lo coloca en un soporte vertical de soluciones.
- b) Colocar la máquina de infusión a la altura del punto de dosificación (Contenedor volumétrico).
- c) Seguir los pasos descritos en la parte de "Encendido" de la sección de funcionamiento.
- d) Al comenzar la dosificación, tomar por medio de un cronómetro el tiempo que se demora la dosificación según la opción previamente elegida.
- e) Repetir el proceso 10 veces para cada opción y obtener un promedio de dosificación

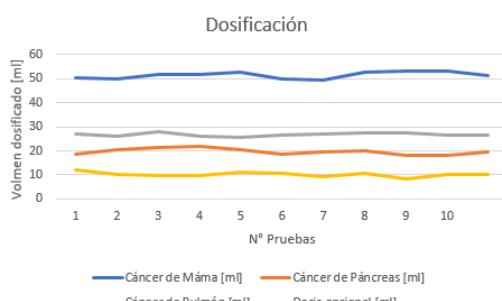


Fig. 23. Pruebas de dosificación

Es así como se puede observar un promedio de dosifi-

cación como en la tabla [IV] con un promedio de error de 2.65 %.

Lo que significa que el valor del volumen administrado se aleja en  $\pm 0.5[ml]$ , convirtiéndose este en el margen de error del sistema de bombeo.

TABLA IV  
PRUEBAS Y RESULTADOS

Cáncer	Caudal	Volumen a dosificar 30 en minutos
Máma		51.5 [ml]
Páncreas		19.6 [ml]
Pulmón		26.8 [ml]
Dosis opcional		10.1 [ml] en 1 minuto

## VI. CONCLUSIÓN

El sistema intravenoso unidireccional propuesto en la investigación determina parámetros de construcción acordes al cálculo de presión final requerido y aceptable dentro del rango de presión a vencer y presión límite soportada por el torrente sanguíneo PVP, de 18.79 [KPa] y 99.99 [KPa].

Las presiones finales dadas por la dosis de perfusión de "Abraxane" para el cáncer de mama, páncreas y pulmón, difieren en porcentajes menores, esto se atribuye a que los parámetros de fluidos para "Abraxane" en cada dosis, presentan las mismas condiciones, la única variante que cambia, es la cantidad de "Abraxane" prescrita por un profesional para la mezcla de la bolsa solución final que se va a administrar.

Es así como con una perfusión promedio de "Abraxane" en 30 minutos a partir del modelo planteado, obtiene una presión final promedio de 77.02 [KPa] para la dosificación.

Las dosis por segundo del compuesto "Abraxane" ofrecen la facilidad de administrar estas mismas ya sea en un tiempo prolongado, o bajo condiciones donde se necesite una rápida dosificación, sin correr riesgo de sobrepasar los rangos permitidos de presión que soporta el cuerpo humano, gracias a su sistema unidireccional de presión calibrada.

Igualmente, los cálculos demuestran que existe una relación directa entre las variables del torque usado y la velocidad del motor, siendo estas directamente proporcionales con la variable de la presión final, que se observa en la ecuación (5), es decir, el aumento o disminución del torque, o de la velocidad del motor, incrementa igualmente la altura manométrica del fluido y con esto la presión final.

Por otro lado, los resultados indican un margen de error de [2,65 %] para las dosificaciones por medio de los 4 rodillos, un posible planteamiento para reducir el margen de error podría ser el incremento de rodillos, debido a que este factor puede determinar una resolución mas pequeña y por consecuencia una resolución de error mas baja.

Para la simulación CAD, se demuestra que la estructura propuesta de 4 rodillos y su base, compuestos por acero A36, tiene un máximo de desplazamiento estático de  $1,5e^4[mm]$  en el cuarto rodillo, su esfuerzo Eunice de  $6,375e^6[N/m^2]$ , y un factor de seguridad mínimo de 32, lo que indica un comportamiento equilibrado y rígido de la fuerza de torque aplicada en el eje de la bomba, lo suficiente como para establecer un valor aceptable de integridad estructural que permita cumplir con su dosificación por tiempo prolongado sin que el material se llegue a romper.

Cabe resaltar que el prototipo teórico está diseñado con material de acero A36 mientras que el implementado se lo fabricó por medio de “Fabricación por Fusión de Filamento” en impresión 3D con material PLA. Esto puede estimar que el comportamiento de desplazamiento estático y el esfuerzo Eunice se reduzcan al igual que el factor de seguridad para materiales mas blandos como el PLA, y con ello el tiempo de duración del prototipo se vea reducido.

## REFERENCIAS

- [1] “Cuidados paleativos 2020.” *OMS*, 2020.
- [2] P. J. Blacksear, “Implantable drug-delivery systems,” *Scientific American*, vol. 241, no. 6, pp. 66–73, 2017.
- [3] I. Tamadon, V. Simoni, V. Iacovacci, F. Vistoli, L. Ricotti, and A. Menassi, “Miniaturized peristaltic rotary pump for non-continuous drug dosing,” in *2019 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*. IEEE, 2019, pp. 5522–5526.
- [4] J. Escobar Restrepo *et al.*, “Diseño y construcción de un prototipo de una jeringa de infusión para neonatología,” B.S. thesis, Ingeniería de Diseño de Producto, 2007.
- [5] M. Changes, “Abraxane,” *U.S Food and drug administration*, vol. 50, no. July, pp. 1–25, 1998.
- [6] D. WOM, “Vascular infusion systems,” *EBME Clinical Engineering Articles*, 2017.
- [7] R. Porter and J. Bradley, “Porter bradley rotary pump,” *United States Patent Office*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 1855.
- [8] W. J. O’leary, T. J. Hartnett Jr, and R. G. Jones, “Intravenous infusion pumping system including independent pump set,” Jan. 17 1989, uS Patent 4,798,590.
- [9] G. H. Stenner, “Peristaltic pump for feeding chemical,” *United States Patent Office*, vol. 40, no. 19, 1973.
- [10] C. H. Hackman, “Peristaltic pump centric help,” *United States Patent Office*, vol. 35, no. 160, 1982.
- [11] I. Noboru, “Squeeze type pump,” *United States Patent Office*, vol. 407, no. 16, 1995.
- [12] B. E. Baldwin, “Fluid conduit-responsively adjustable pump arrangement and pump/conduit arrangement and method, and fluid conduits therefor,” Dec. 11 1990, uS Patent 4,976,590.
- [13] R. O. Ventimilla Toro, “Diseño y construcción de una bomba peristáltica,” B.S. thesis, 2015.
- [14] R. L. Mott, *Mecánica de Fluidos 6/e*. Pearson educación, 2006.