



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - “ESPE”

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

“INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL ELECTRÓNICO PARA UN RESPIRADOR MECÁNICO EMERGENTE”

AUTORES: LOARTE QUINAUCHO BRYAN FRANCISCO
VILLACIS VERA LUIS ALFREDO

DIRECTOR: DR. LOPEZ CARRERA, HENRY. LAURO.

**QUITO-ECUADOR
2022**

VERSIÓN: 1.1



Agenda



01

Introducción

Antecedentes

Justification e importancia

Alcance del proyecto

02

Objetivos

General

Específicos

03

Respiradores

Funcionamiento

Respiradores Emergentes

Parámetros de respiradores

04

Diseño de instrumentación

Criterios de selección

Sensores de posición

Sensores de presión

05

Diseño del control

Etapa Homing

Etapa Control por volumen

06

Implementación

Respirador Emergente

07

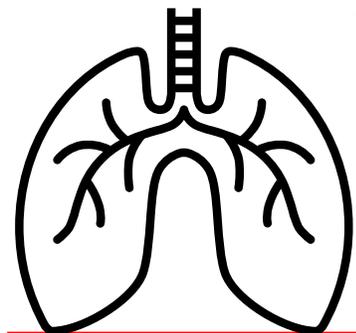
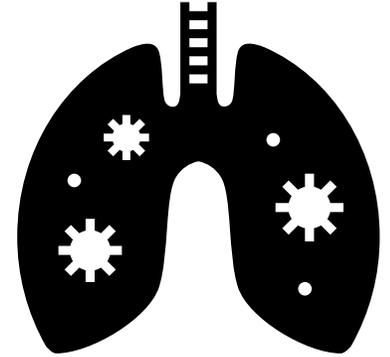
Pruebas y resultados

Costos

Tiempos- Presión

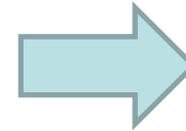
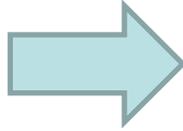
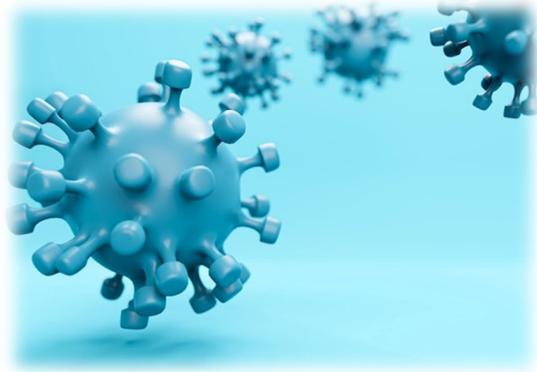
08

Conclusiones y recomendaciones



COVID 19 ECUADOR

-Marzo de 2020 se registra el primer caso COVID-19 en Ecuador

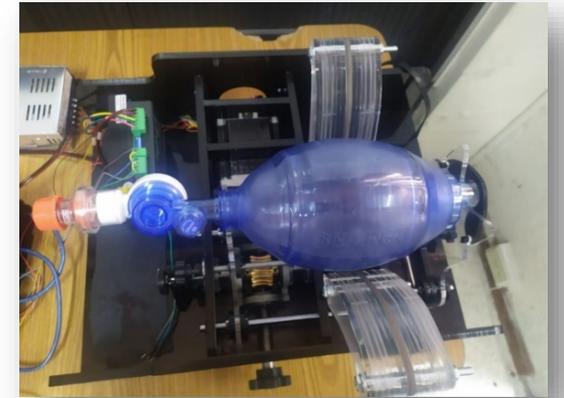


SATURACIÓN

- Pocos ventiladores mecánicos.

RESPIRADOR EMERGENTE

- Varias entidades con diferentes versiones de respirador emergente.



La presente tesis se ampara ante el artículo del código ingenios 134. – Actividades permitidas sin autorización. Permite el uso de una copia legítima con el fin de probar, investigar y corregir el funcionamiento de este sin recurrir a la autorización o pago al autor o titular (CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN, 2016)



Costo elevado y escasez de ventiladores mecánicos



Necesidad de automatizar un respirador manual



Costo de respirador emergente a bajo costo





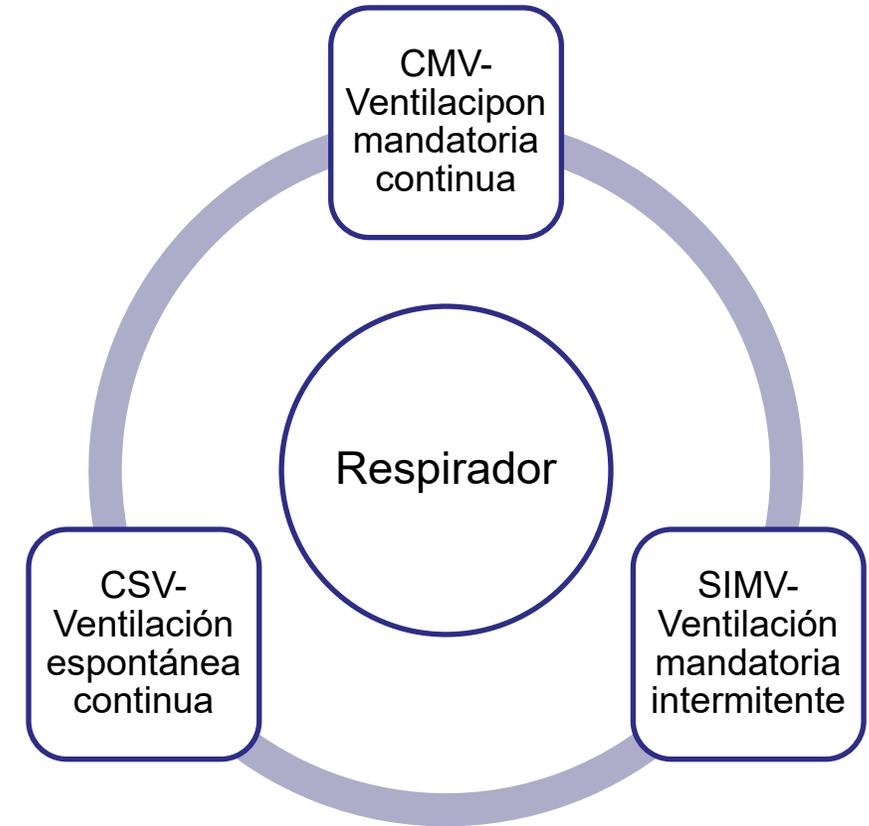
Desarrollo de un respirador emergente a bajo costo



Ventilación Mandatorio Continúa controlada por volumen



Instrumentación Electrónica



Objetivos

Objetivo General

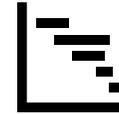
Desarrollar dentro de la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” el control mandatorio continuo por volumen, instrumentación e interfaces electrónicas de un respirador mecánico emergente.

Objetivos Específicos

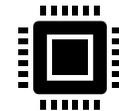
Analizar las características de los sensores y actuadores para el modelamiento e instrumentación electrónica de un respirador emergente.



Desarrollar el algoritmo de control electrónico para un respirador emergente.



Implementar la instrumentación electrónica y el control desarrollado en un prototipo físico de un respirador emergente.



Desarrollar el manual de usuario.



Respirador

Funcionamiento



Panel de control



Tubos de respiración



Necesita

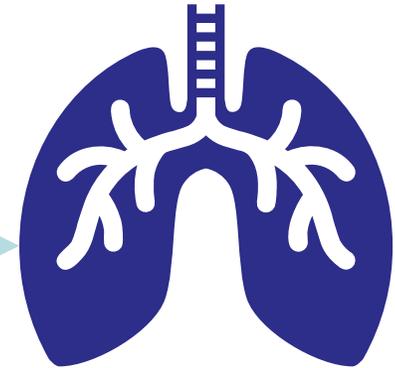


Respirador mecánico comercial

Facilita total o parcialmente



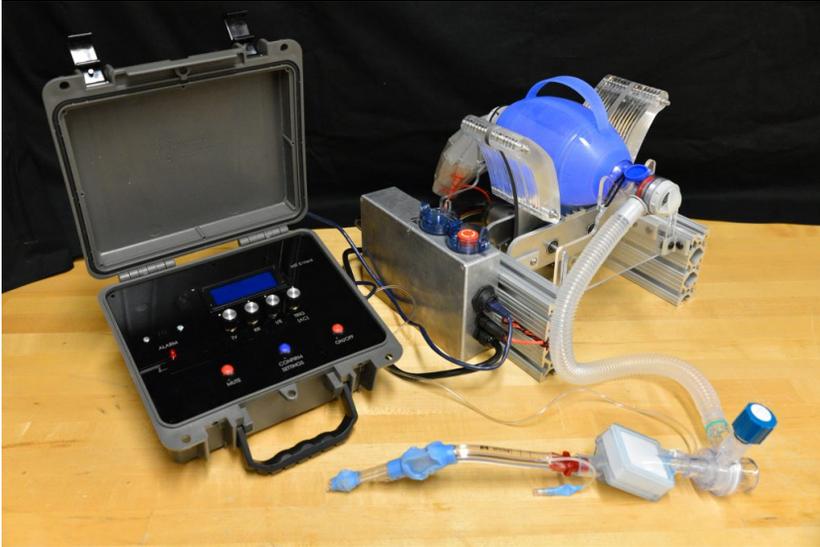
Respiración



Pulmón



MIT E-VENT Emergency Ventilator



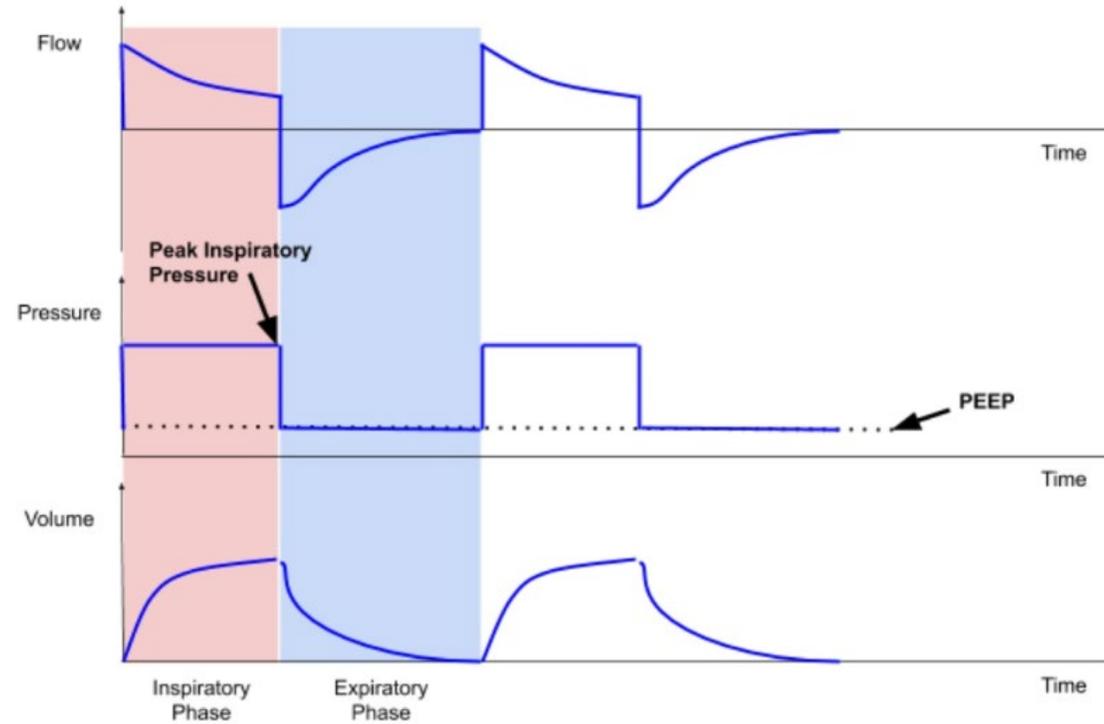
Características:

- Ventilación controlada por volumen (pacientes sedados, intubados).
- Ventilación asistida.
- Factor de inspiración y espiración entre 1:1 hasta 1:4
- Frecuencia respiratoria: desde 8 rpm hasta 30 rpm
- PEEP de 5 a 15 cm H₂O requerido.

Los respiradores emergentes son para uso de emergencia solo cuando se ha agotado toda la asistencia respiratoria.

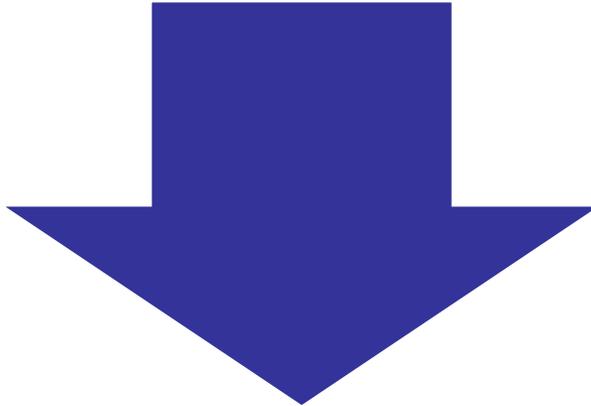
Parámetros:

- Volumen tidal (aire suministrado al paciente).
- I:E -> 1:1;1:2;1:3;1:4
- RPM -> 8 - 30





Consideraciones:



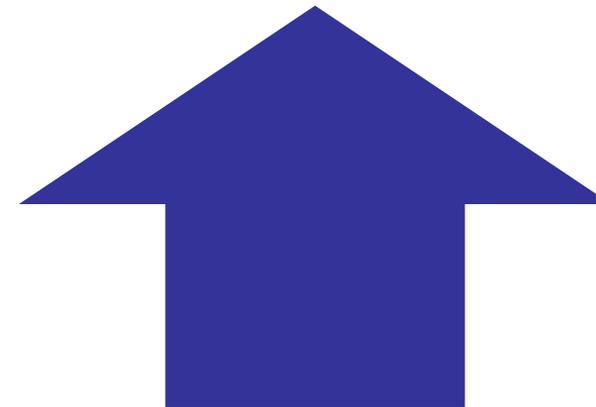
Consideraciones

- Evaluación del estado del paciente
- Control de parámetros
- Tiempos de respuesta
- Confiabilidad del estado del paciente
- Área de implementación
- Costo del respirador
- Uso continuo
- Fácil adaptación



Características

- Implementación física
- Robustez al ruido eléctrico
- Circuito sencillo
- Uso prolongado en condiciones de trabajo
- Sensibilidad del sensor
- Reproducibilidad
- Costo



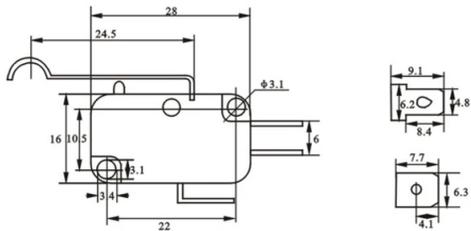
Características relevantes a evaluar:



Implementación física

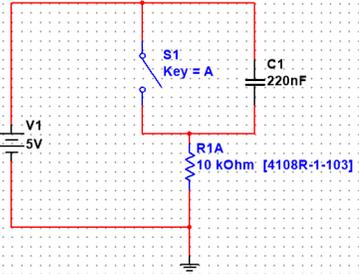
$$y = \begin{cases} 1 & \text{si } A \geq 20 \text{ cm}^2 \\ -\frac{9}{19} \cdot A + \frac{199}{19} & \text{Si } 1 \text{ cm}^2 < A < 20 \text{ cm}^2 \\ 10 & 1 \text{ cm}^2 \leq A \end{cases}$$

Calificación: 8.35



Circuito

Propenso a tener falsos positivos
Circuito pasa altos pasivo



Todos los valores mayores a 72.34 Hz pasarán y se cortarán los valores inferiores.

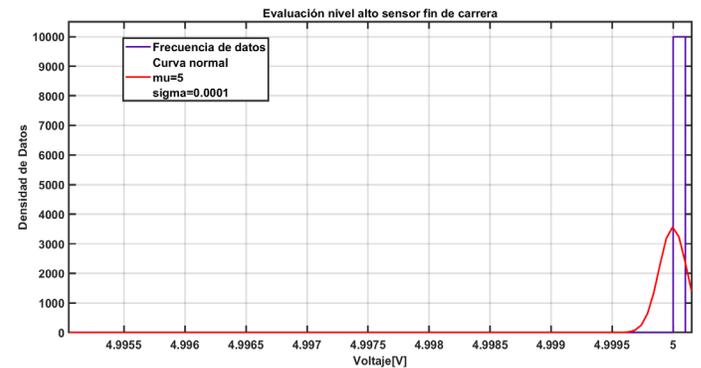
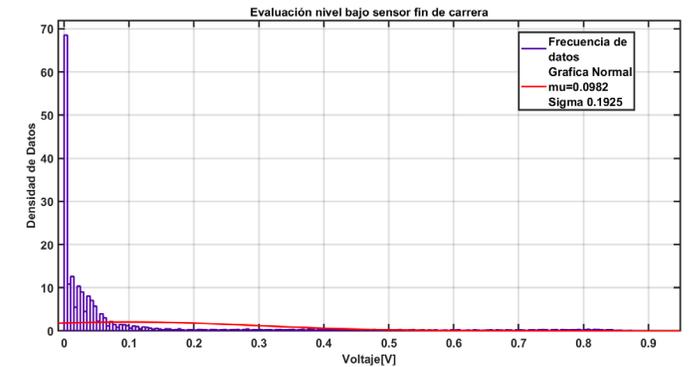
Calificación: 10



**CALIFICACIÓN
FIN DE CARRERA
SV-164-1C25**

Robustes al ruido eléctrico

Calificación: 10



Diseño Instrumentación: Sensor de posición

Uso prolongado en condiciones de trabajo

Según el datasheet la durabilidad mecánica del sensor SV-164-1C2 es de 5×10^7 pulsaciones. Considerando trabajo continuo a 30 pulsaciones por minuto se tiene la vida útil del sensor es de 3.17 años

Calificación: 10

Sensibilidad

Según el datasheet, el sensor trabaja a 60 pulsos por minuto, como el respirador trabaja a 30 respiraciones por minuto, el error de sensibilidad es menor al 5%.

Calificación: 10



**CALIFICACIÓN
FIN DE CARRERA
SV-164-1C25**

Reproducibilidad

Calificación: 10

Día de toma	Media de datos	Desviación	Representación lógica
Día 1	0	0.2159	0
Día 2	0.02	0.1988	0
Día 3	0.01	0.2	0

No existe variación en el sensor

Costo

Costo máximo de 2 dólares

Calificación: 10



Diseño Instrumentación: Sensor de posición



CALIFICACIÓN FIN DE CARRERA

SV-164-1C25

Característica	Evaluación
Implementación física	8.35
Robusto al ruido eléctrico	10
Circuito sencillo	10
Uso prolongado en condiciones de trabajo	10
Sensibilidad del sensor	10
Histéresis(reproducibilidad)	10
Costo	10
Total	9.438



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

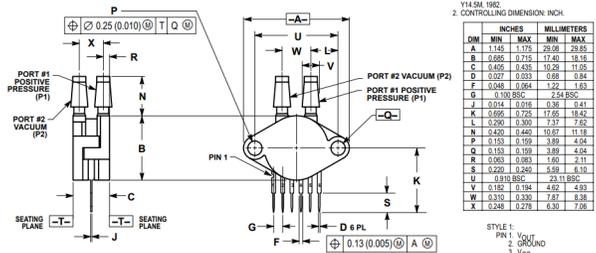
Diseño Instrumentación: Sensor de presión

Implementación física

$$y = \begin{cases} 1 & \text{si } A \geq 50 \text{ cm}^2 \\ -\frac{9}{46} \cdot A + \frac{248}{23} & \text{Si } 1 \text{ cm}^2 < A < 20 \text{ cm}^2 \\ 10 & 4 \text{ cm}^2 \leq A \end{cases}$$

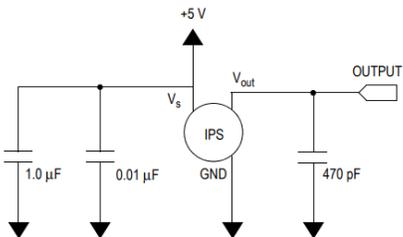
Calificación: 8.35

PACKAGE DIMENSIONS



Circuito

Propenso a tener falsos positivos
Circuito pasa altos pasivo



Todos los valores mayores a 72.34 Hz pasaran y se cortaran los valores inferiores.

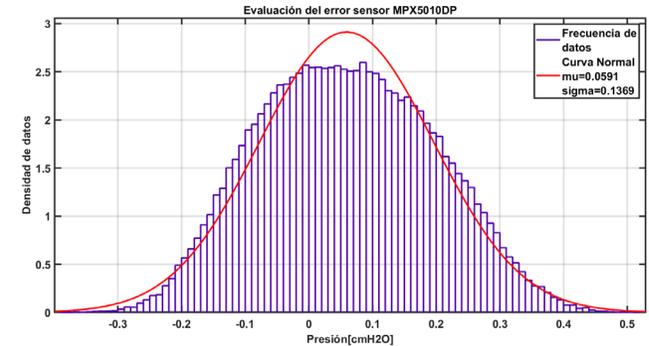
Calificación: 10



CALIFICACIÓN Sensor de presión MPX5010DP

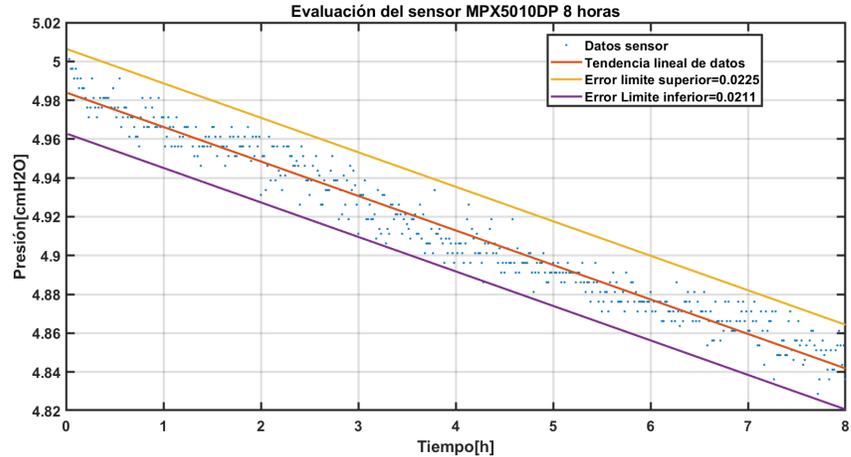
Robustes al ruido eléctrico

Calificación: 9ª1



El error tomado en la medición es de 0.3820 cm H₂O, esto a la escala máxima de 60cm H₂O representa el 0.64% de error en la evaluación de los parámetros, esto es entre 0.5% y 1% de error, dando una calificación de 9.





Calificación: 10

Sensibilidad

Según el datasheet, el sensor trabaja a 60 pulsos por minuto, como el respirador trabaja a 30 respiraciones por minuto, el error de sensibilidad es menor al 5%.

Calificación: 10



CALIFICACION
Sensor de presión
MPX5010DP

Reproducibilidad

Calificación: 10

Día de toma	Media de error
Día 1	0.019
Día 2	0.020
Día 3	0.022

Variación del sensor

Costo

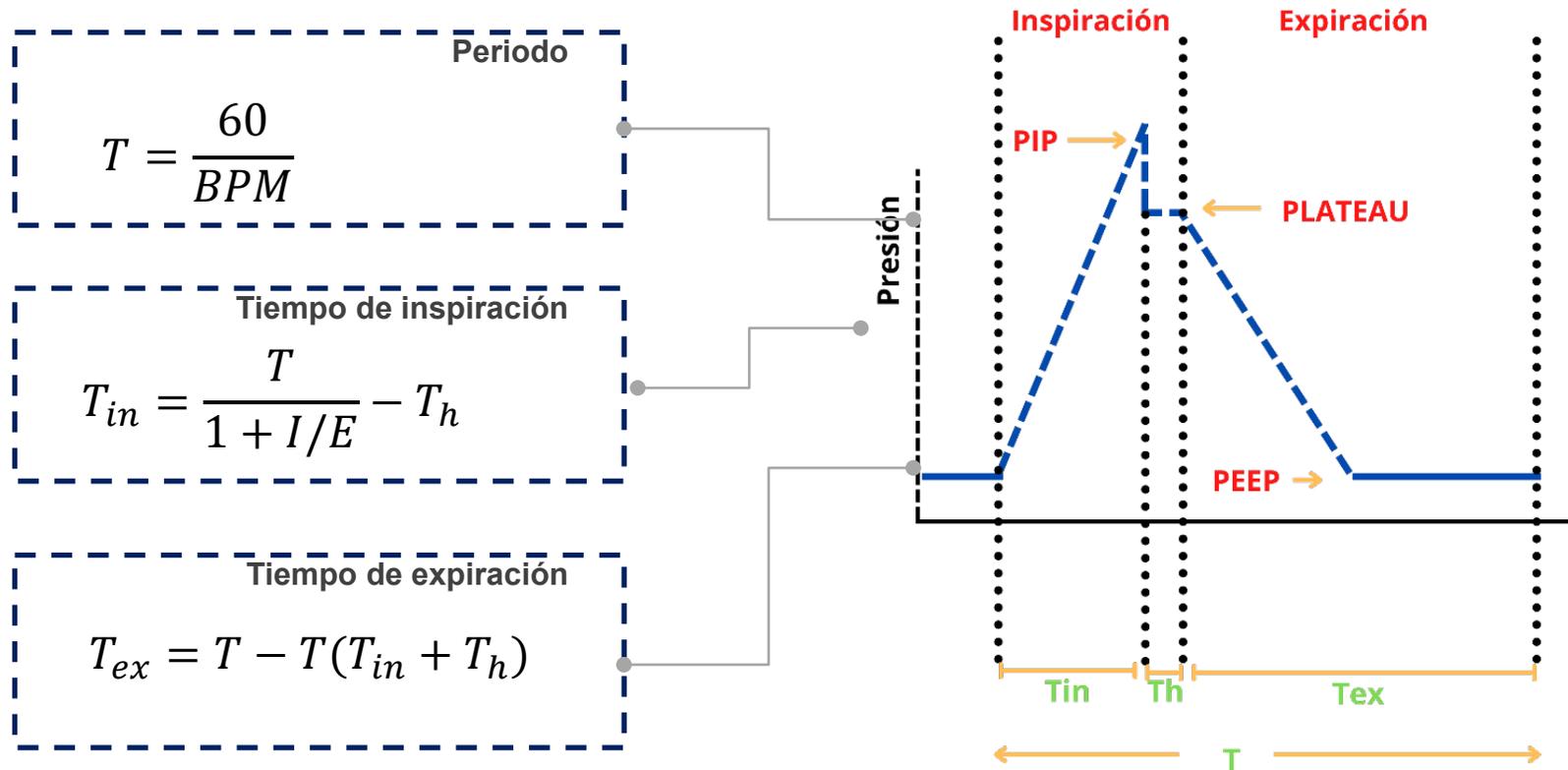
Costo máximo de 2 dólares

Calificación: 10

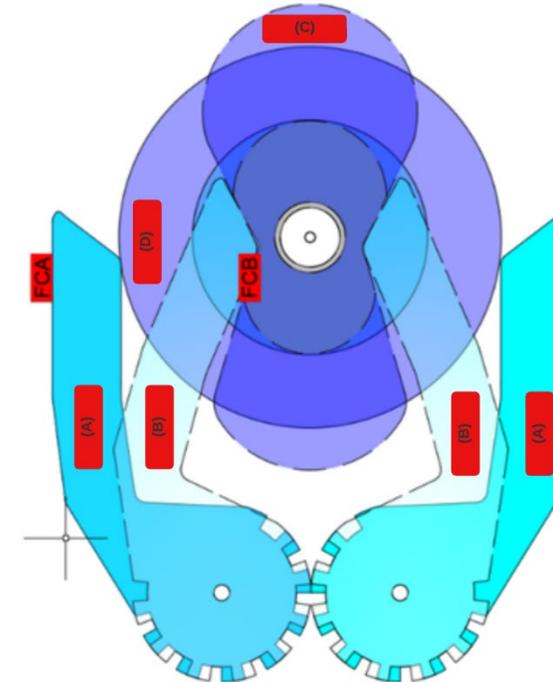
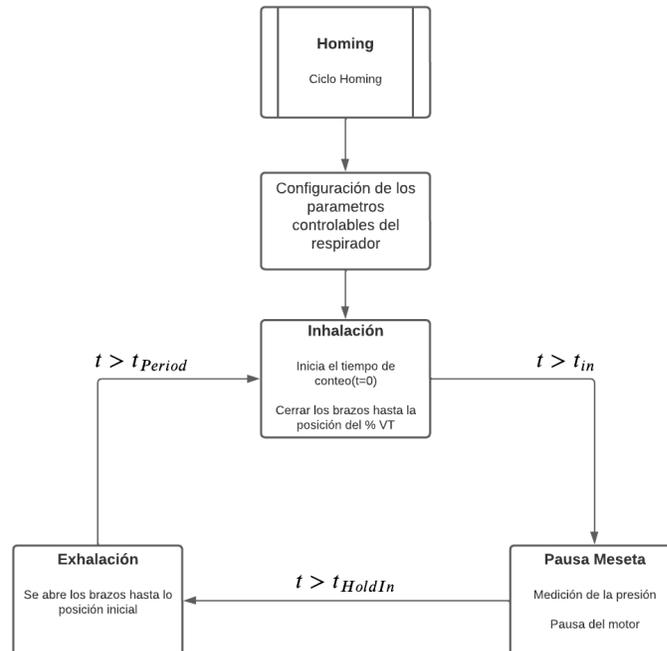
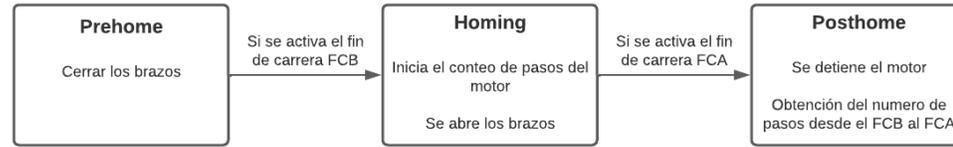


Diseño

Proceso de control

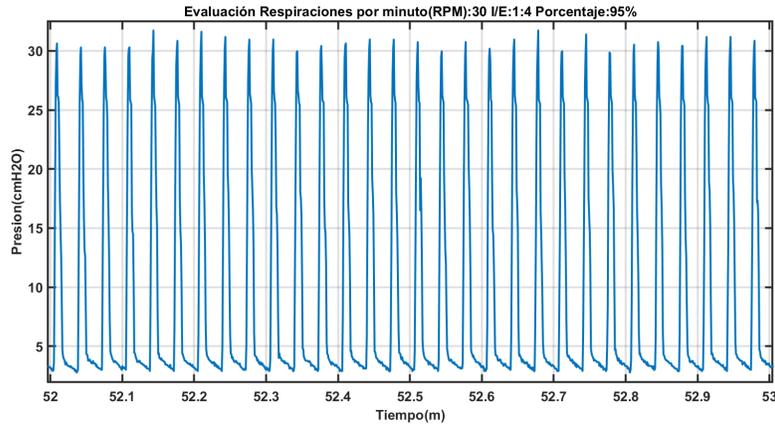


Etapa Inicial de búsqueda de referencia(Homing)



- FCA, FCB: Fines de carrera
- (A) Brazos mecanicos abiertos
- (B) Brazos mecanicos cerrados
- (C) Ambu presionado
- (D) Ambu sin presionar

Evaluación RPM



Formulas

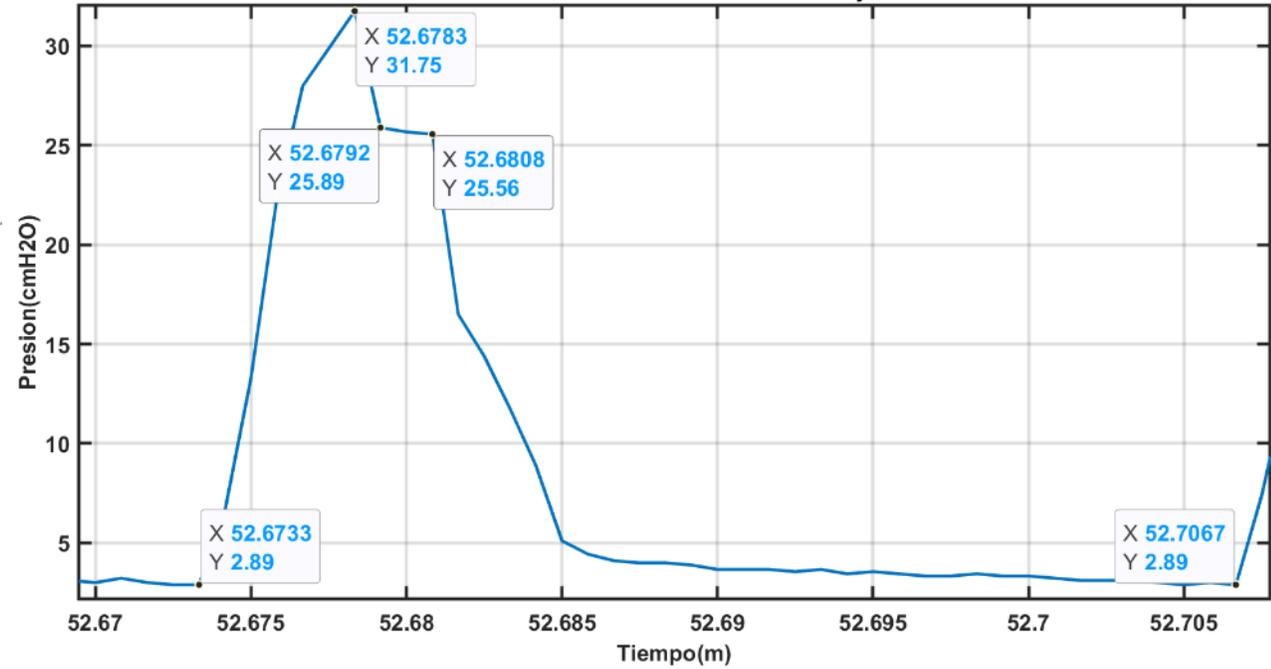
- Respiraciones por minuto: 30
- I/E: 1:4

$$T = \frac{60}{BPM} = \frac{60}{30} = 2$$

$$T_{in} = \frac{T}{1 + IE} - T_h = \frac{2}{1 + 4} - 0.1 = 0.3$$

$$T_{ex} = T - (T_{in} + T_h) = 1.6$$

Evaluación Velocidad:30 I/E:1:4 Porcentaje:95%



Volumen Tidal	Respiraciones por minuto	Parámetro	Valor Teórico	Valor Obtenido	Valor teórico – Valor obtenido	Error [%]
90	15	Respiraciones por minuto	15	15	0	0.000%
		Periodo	4.000	3.996	0.004	0.100%
		Tiempo de inspiración	1.233	1.200	0.033	2.703%
		Tiempo de espera	0.1	0.198	-0.098	98.000%
		Tiempo de exhalación	2.667	2.598	0.069	2.575%
	20	Respiraciones por minuto	20	20	0	0.000%
		Periodo	3.000	3.000	0.000	0.000%
		Tiempo de inspiración	0.900	0.948	-0.048	5.333%
		Tiempo de espera	0.1	0.102	-0.002	2.000%
		Tiempo de exhalación	2.000	1.950	0.050	2.500%
	30	Respiraciones por minuto	30	30	0	0.000%
		Periodo	2.000	2.004	-0.004	0.200%
		Tiempo de inspiración	0.567	0.504	0.063	11.059%
		Tiempo de espera	0.1	0.246	-0.146	146.000%
		Tiempo de exhalación	1.333	1.254	0.079	5.950%
95	15	Respiraciones por minuto	15	15	0	0.000%
		Periodo	4.000	3.984	0.016	0.400%
		Tiempo de inspiración	1.233	1.086	0.147	11.922%
		Tiempo de espera	0.1	0.234	-0.134	134.00%
		Tiempo de exhalación	2.667	2.664	0.003	0.1125%
	20	Respiraciones por minuto	20	20	0	0.000%
		Periodo	3.000	2.982	0.018	0.600%
		Tiempo de inspiración	0.900	0.744	0.156	17.333%
		Tiempo de espera	0.1	0.282	-0.182	182.00%
		Tiempo de exhalación	2.000	1.956	0.044	2.200%
	30	Respiraciones por minuto	30	30	0	0.000%
		Periodo	2.000	2.004	-0.004	0.200%
		Tiempo de inspiración	0.567	0.504	0.063	11.111%
		Tiempo de espera	0.1	0.246	-0.146	146.00%
		Tiempo de exhalación	1.333	1.254	0.079	5.926%

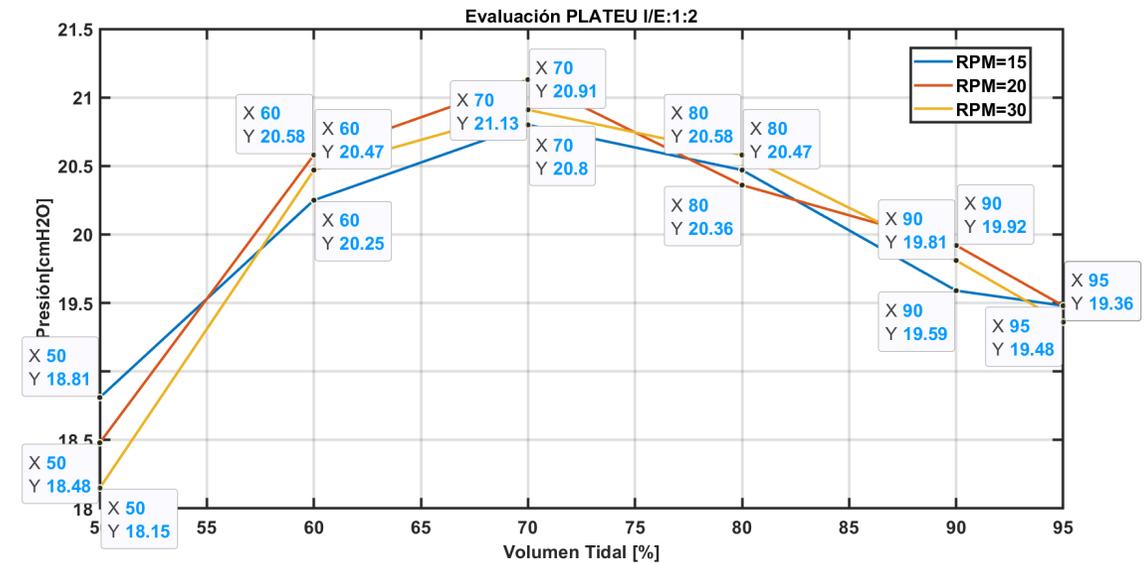
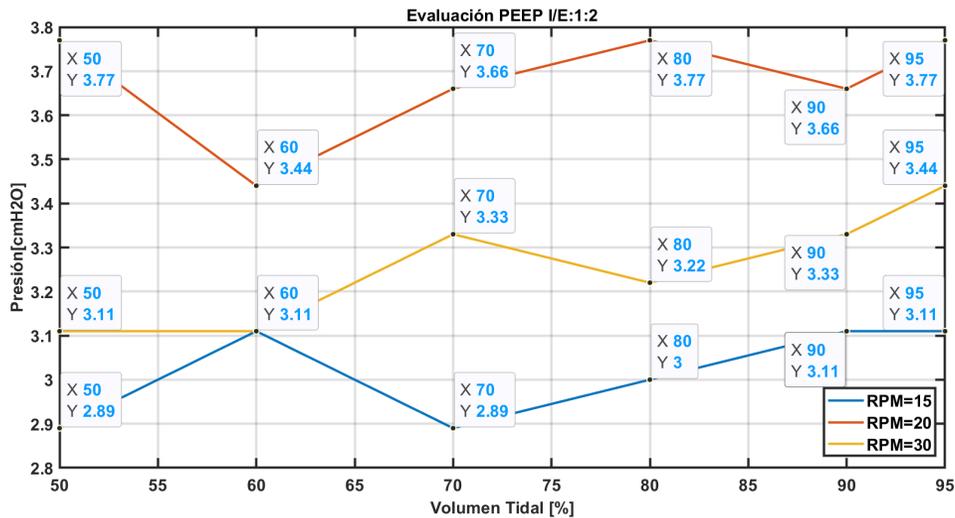
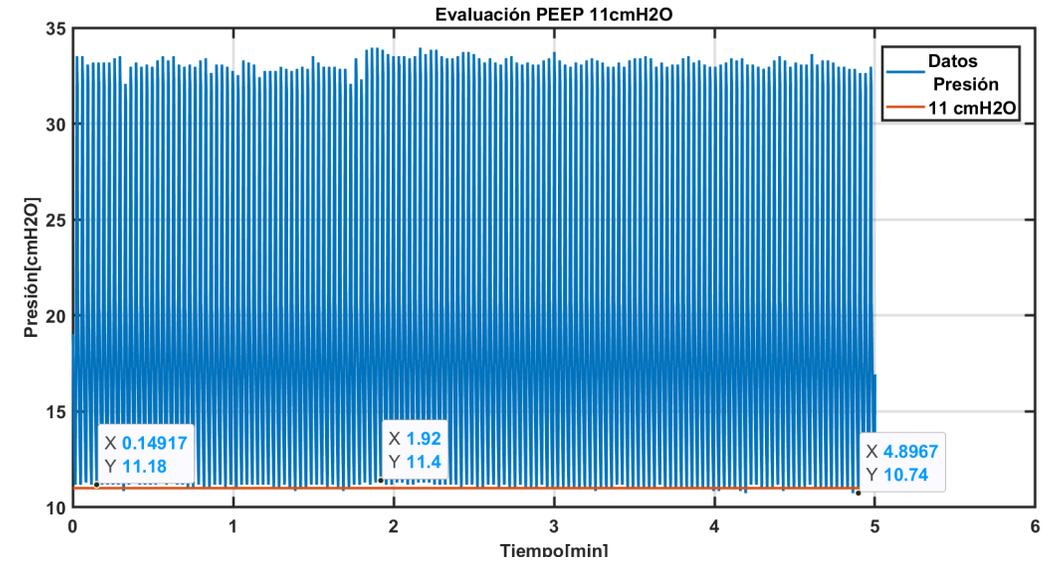
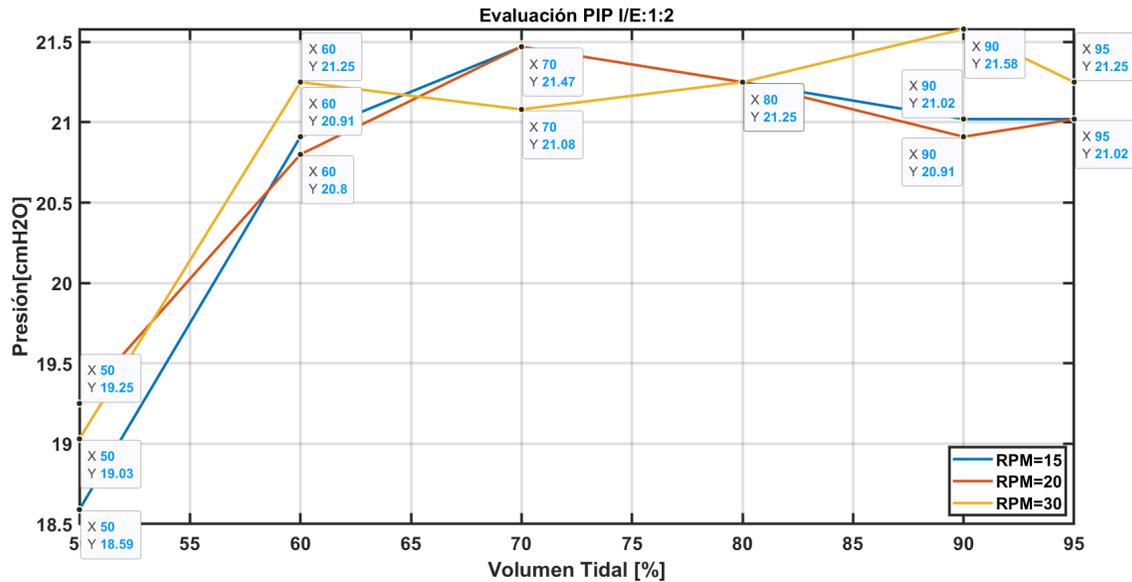


Volumen Tidal	Respiraciones por minuto	Parámetro	Valor Teórico	Valor Obtenido	Valor teórico – Valor obtenido	Error [%]
90	15	Respiraciones por minuto	15	15	0	0.000%
		Periodo	4.000	3.996	0.004	0.100%
		Tiempo de inspiración	0.700	0.648	0.052	7.429%
		Tiempo de espera	0.1	0.150	-0.050	50.000%
		Tiempo de exhalación	3.200	3.198	0.002	0.062%
	20	Respiraciones por minuto	20	20	0	0.000%
		Periodo	3.000	3.000	0.000	0.100%
		Tiempo de inspiración	0.500	0.498	0.002	0.400%
		Tiempo de espera	0.1	0.198	-0.098	98.000%
		Tiempo de exhalación	2.400	2.304	0.096	4.000%
	30	Respiraciones por minuto	30	30	0	0.000%
		Periodo	2.000	1.998	0.002	0.100%
		Tiempo de inspiración	0.300	0.252	0.048	16.000%
		Tiempo de espera	0.1	0.150	-0.050	50.000%
		Tiempo de exhalación	1.600	1.596	0.004	0.250%
95	15	Respiraciones por minuto	15	15	0	0.000%
		Periodo	4.000	4.002	-0.002	0.050%
		Tiempo de inspiración	0.700	0.654	0.046	6.571%
		Tiempo de espera	0.1	0.198	-0.098	98.000%
		Tiempo de exhalación	3.200	3.150	0.050	1.562%
	20	Respiraciones por minuto	20	20	0	0.000%
		Periodo	3.000	3.000	0.000	0.000%
		Tiempo de inspiración	0.500	0.498	0.002	0.400%
		Tiempo de espera	0.1	0.204	-0.104	104.000%
		Tiempo de exhalación	2.400	2.298	0.102	4.250%
	30	Respiraciones por minuto	30	30	0	0.000%
		Periodo	2.000	1.998	0.002	0.100%
		Tiempo de inspiración	0.300	0.252	0.048	16.000%
		Tiempo de espera	0.1	0.150	-0.050	50.000%
		Tiempo de exhalación	1.600	1.596	0.004	0.250%

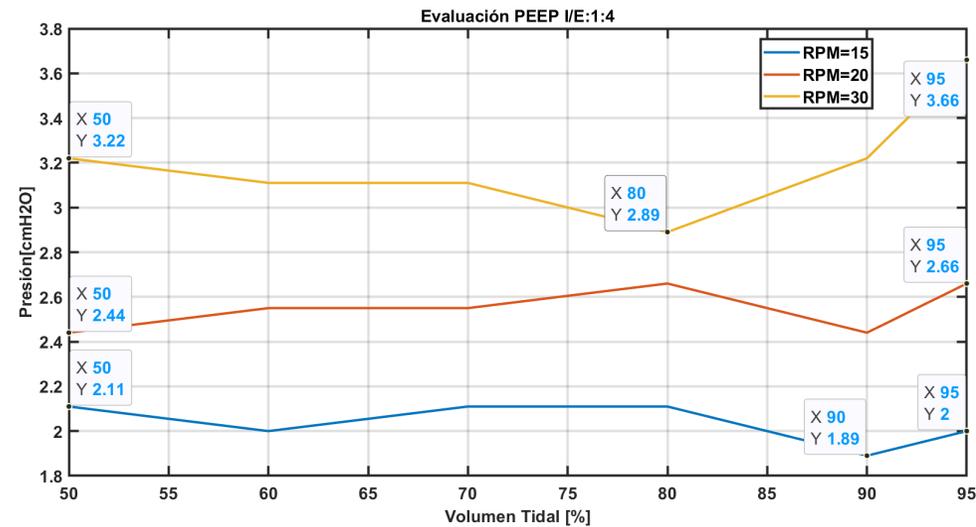
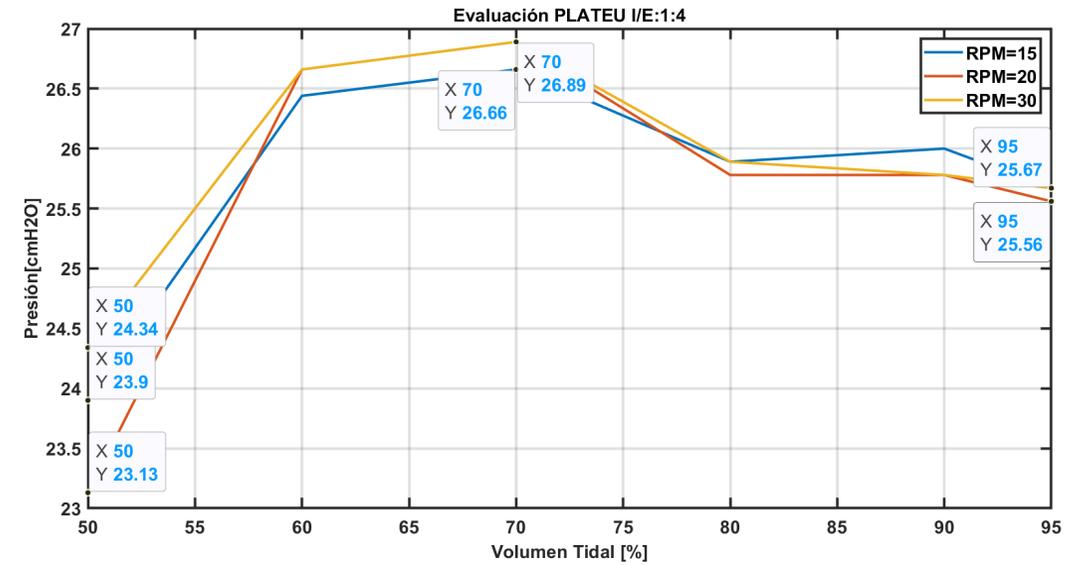
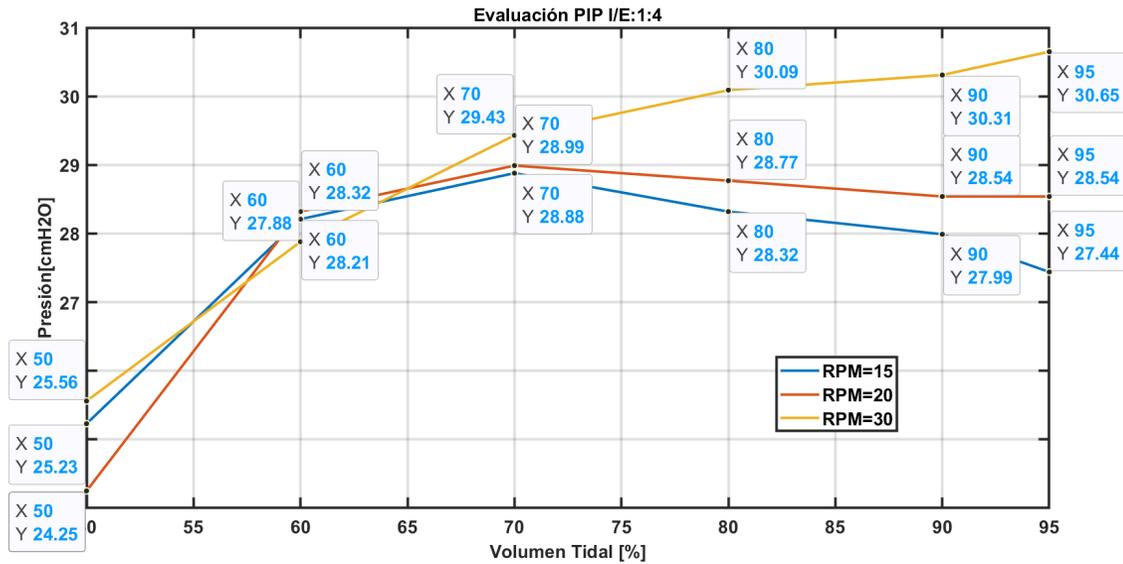


Evaluación de funcionamiento

Pulmón de prueba 1

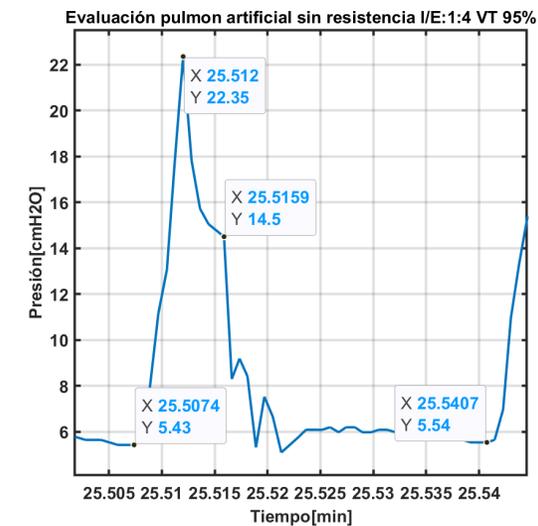
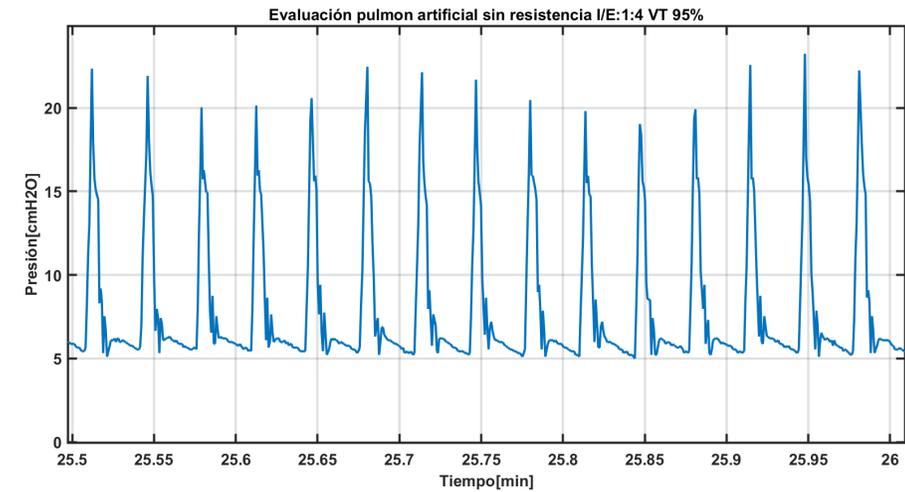


Evaluación de funcionamiento Pulmón de prueba 1



Evaluación de funcionamiento Pulmón Artificial

The screenshot displays a comprehensive medical simulation interface. On the left, there are controls for patient appearance (eyes, mouth, nose) and a 'Wide open' setting. The central area shows a respiratory system diagram labeled 'Assisted' with parameters for Resistance % (0 to -100) and Compliance % (0 to -100). On the right, a large panel displays vital signs: HR 80, Pulse 80, SpO2 98, TperI 36.1, ABP 120/80 (93), PAP 25/12 (16), cO2 5.6, etCO2 34, awRR 12, NIBP 120/80 (93), Manual TDF 100, and etO2 16. A session log at the bottom right details events such as 'Start CPR', 'Start ventilations', and 'Stop CPR'.

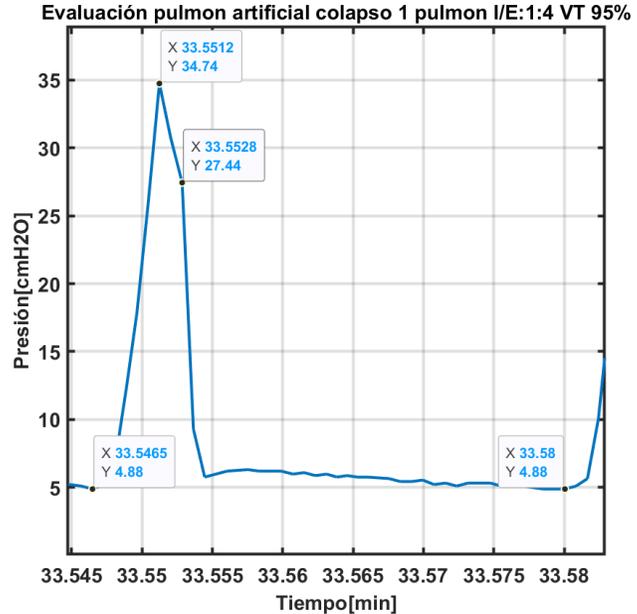
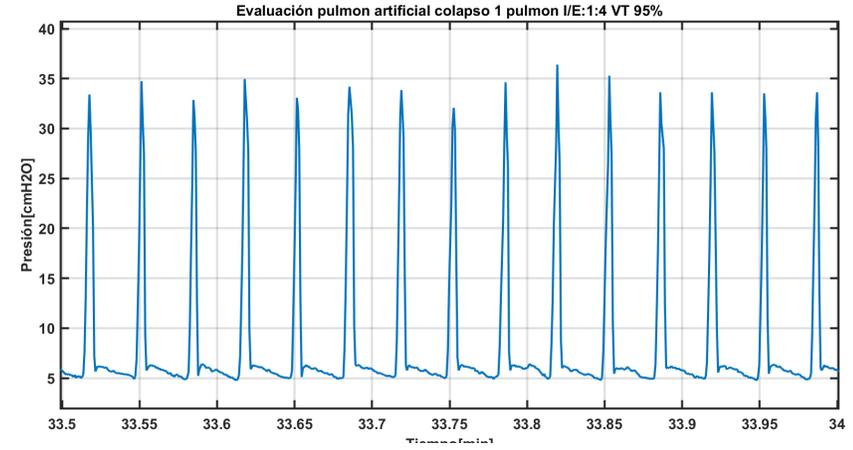


Parámetro	Valor Teórico	Valor Obtenido	Error [%]
Respiraciones por minuto	30	30	0 %
Periodo	2	1.998	0.1 %
Tiempo de inspiración	0.3	0.276	8 %
Tiempo de espera	0.1	0.234	134 %
Tiempo de exhalación	1.6	1.488	7 %



Evaluación de funcionamiento Pulmón Artificial

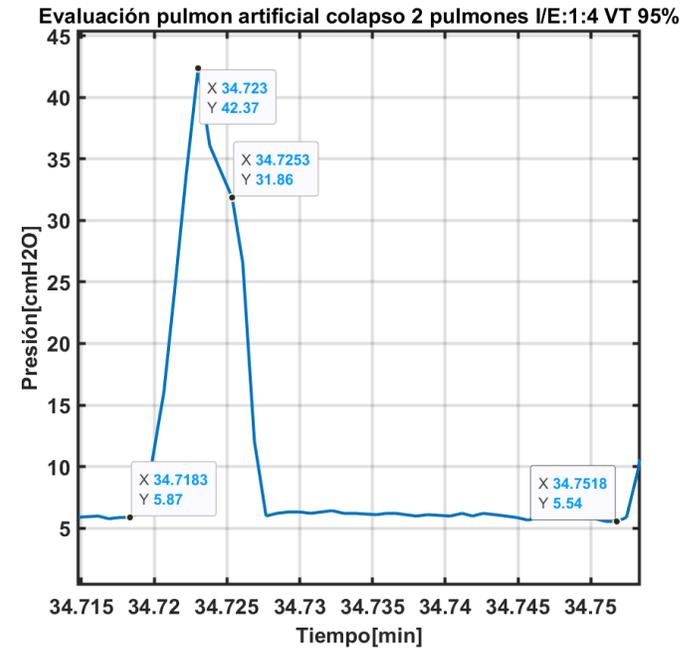
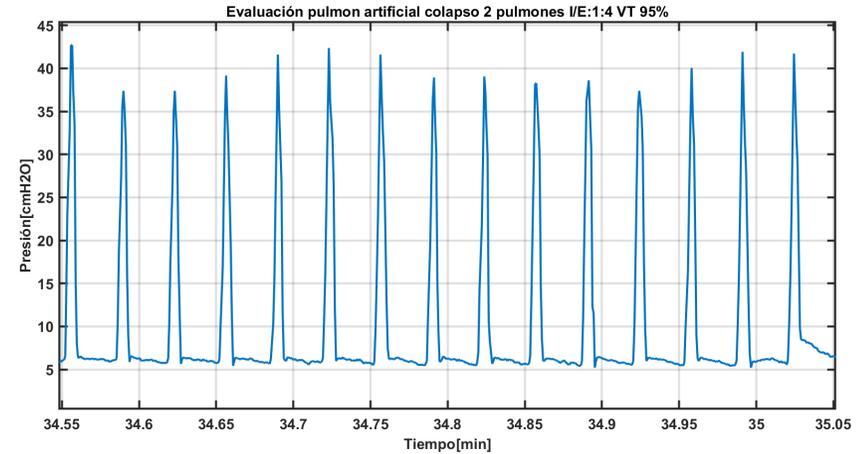
The screenshot displays a comprehensive medical simulation interface. On the left, there are controls for body sounds (Heart, L Lung, R Lung, Bowel) and vocal sounds (Coughing, etc.). The center features a patient's face and a diagram of the lungs with 'Assisted' ventilation. The right side shows a large panel of vital signs: HR 80, Pulse 79, SpO2 98, Tperi 36.1, ABP 120/80 (93), Tblood 37.2, PAP 25/12 (16), c.o. 5.6, etCO2 34, awRR 12, NIBP Manual 120/80 (93), Manual TOP% 100, etO2 16, and TOF 4. A session log at the bottom right details simulation events like 'Stop CPR' and 'Start ventilations'.



Parámetro	Valor Teórico	Valor Obtenido	Error [%]
Respiraciones por minuto	30	30	0 %
Periodo	2	2.01	0.1 %
Tiempo de inspiración	0.3	0.282	6 %
Tiempo de espera	0.1	0.096	4 %
Tiempo de exhalación	1.6	1.632	2 %

Evaluación de funcionamiento Pulmón Artificial

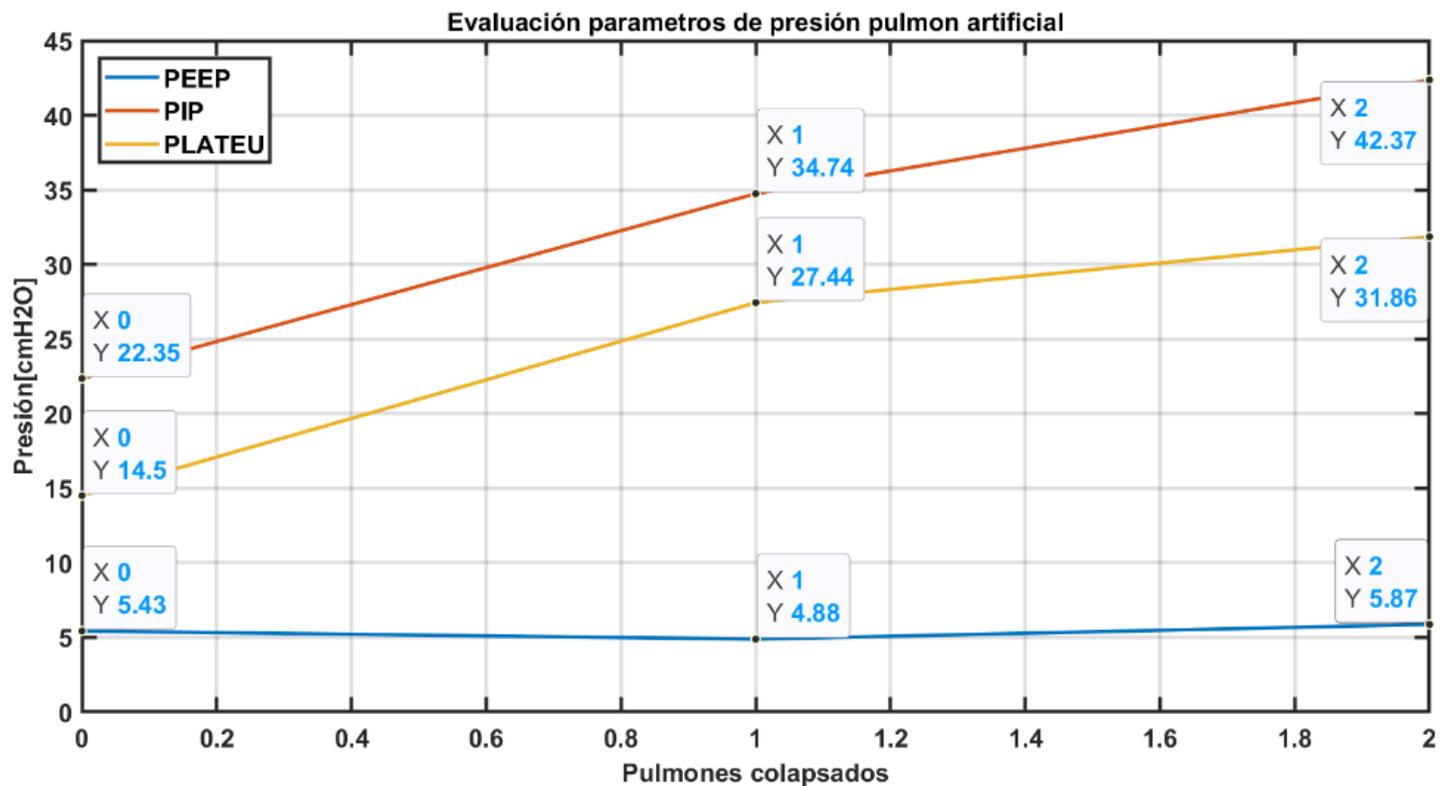
The screenshot displays a comprehensive medical simulation interface. On the left, there are controls for body sounds (Heart, L Lung, R Lung, Bowel) and Korotkoff volume. The center features a patient monitor with a large digital display showing vital signs: HR 80, SpO2 98, ABP 120/80 (93), PAP 25/12 (16), etCO2 34, and Manual TOF% 100. Below the monitor is a session log with entries for 'Stop CPR', 'Check right pedal pulse', 'Start ventilations', and 'Stop ventilations'. The bottom of the interface includes a play/pause button and a timer showing 45:26.



Parámetro	Valor Teórico	Valor Obtenido	Error [%]
Respiraciones por minuto	30	30	0
Periodo	2	2.01	0.2 %
Tiempo de inspiración	0.3	0.282	6 %
Tiempo de espera	0.1	0.138	38%
Tiempo de exhalación	1.6	1.59	0.625



Evaluación de funcionamiento Pulmón Artificial



Conclusiones

- Como se puede apreciar en la Tabla 35 y Tabla 36, la diferencia de costos entre estas dos versiones es de \$ 53.10. En lo que corresponde a funcionalidad, no hay ninguna diferencia ya que ambos poseen el mismo algoritmo de control para el respirador emergente. La única diferencia radica en la interfaz gráfica y la cantidad de periféricos que se usan en la versión de Arduino, como es el display LCD I2C, los potenciómetros y el pulsador mientras que el ESP32 usa únicamente la pantalla Nextion. Esta diferencia es notable ya que la versión de ESP32 es más factible su mantenimiento que la versión con Arduino.
- El costo del respirador emergente con la fabricación mecánica ya sea en Arduino o ESP32, no supera los \$1200, un valor bajo al estimado que se propuso de \$2000.
- Al momento de evaluar, se caracterizaron los mejores sensores para la instrumentación del respirador emergente, en el caso de los sensores de presión debido a la criticidad de estos se importó, y se calibro con respecto a una señal patrón, lo que nos permitió tener datos fidedignos para caracterizar y verificar las características del respirador emergente.



Conclusiones

- Se logro implementar la instrumentación electrónica del respirador emergente, en parámetros como el periodo y RPM donde se tiene un error bajo, debido a las consideraciones del ciclo Homing, las características de error que se posee son debido al tornillo sin fin implementado en la parte mecánica que proporciona un juego mecánico de 0.3 segundos, lo que se debe tener en consideración para los ciclos de respiración.
- Se logro verificar la programación y la ventilación establecida en un pulmón de prueba, se generó el estado de asistido dentro del pulmón, en donde se validó el estado de asistido hasta en un 66% de resistencia en dos pulmones colapsados.
- Se logro cumplir con los parámetros de respiraciones y la entrega constante de aire en porcentajes de volumen tidal debido al correcto posicionamiento de los sensores y a programación de los pasos del motor. Con respecto al ciclo I/E se comprobó la afección del juego mecánico del tornillo sin fin, el cual proporciona un retraso de la señal al momento de generar la acción de los brazos, este retraso es de 0.3 segundos, para la aplicación del trastorno de deficiencia aguda el recomendado para parámetros como el tiempo de espera se considera un tiempo menor a 0.5 segundos por lo tanto es necesario considerar el mismo para la programación.



Recomendaciones

- Se recomienda en futuros proyectos donde se utilice este respirador, considerar ajustes en el área mecánica para que el motor pueda trabajar a 20 Nm o hacer uso de otro motor que pueda trabajar en ese nivel de torque.
- Se recomienda que los ejes del respirador sean cambiados, ya que el juego mecánico que tiene el respirador provoca desfases altos entre lo teórico y lo real de los tiempos de inspiración, expiración y el tiempo de pausa.
- Se recomienda si se realiza el uso de otro motor a pasos utilizar un motor a pasos con lazo cerrado, con esto se asegura que el motor no pierda pasos y que entregue el porcentaje de volumen tidal solicitado.
- Se recomienda acoplar un mecanismo de movimiento para la estructura mecánica del respirador, ya que este es muy pesado y el usuario que lo vaya a transportar le causara molestias musculares.

