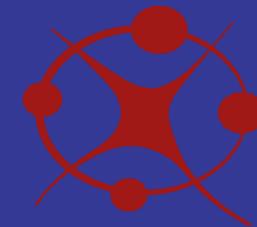




Universidad Nacional de San Luis  
Facultad de Ciencias Físico, Matemáticas y Naturales  
Departamento de Electrónica



Proyecto Final de Carrera de Ingeniería Electrónica con OSD

***“Diseño e Implementación de un Módulo de  
Adquisición y  
Tratamiento de Variables para Controlador de  
Respirador”***

Autor

Cristian Ramiro Gitto

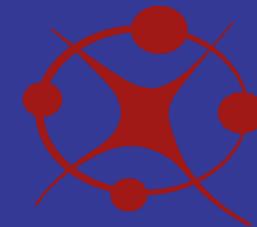
Director

Ing. Carlos Federico Sosa Páez

Abril de 2023

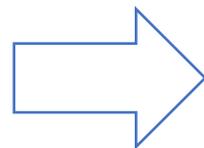


# Introducción

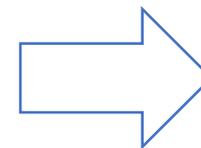


## Motivación

**Coronavirus  
COVID-19**



**Falta de equipos médicos, insumos, etc.**

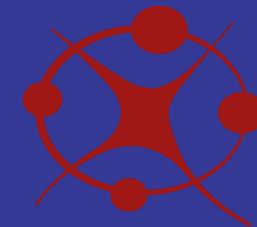


**Generó:**

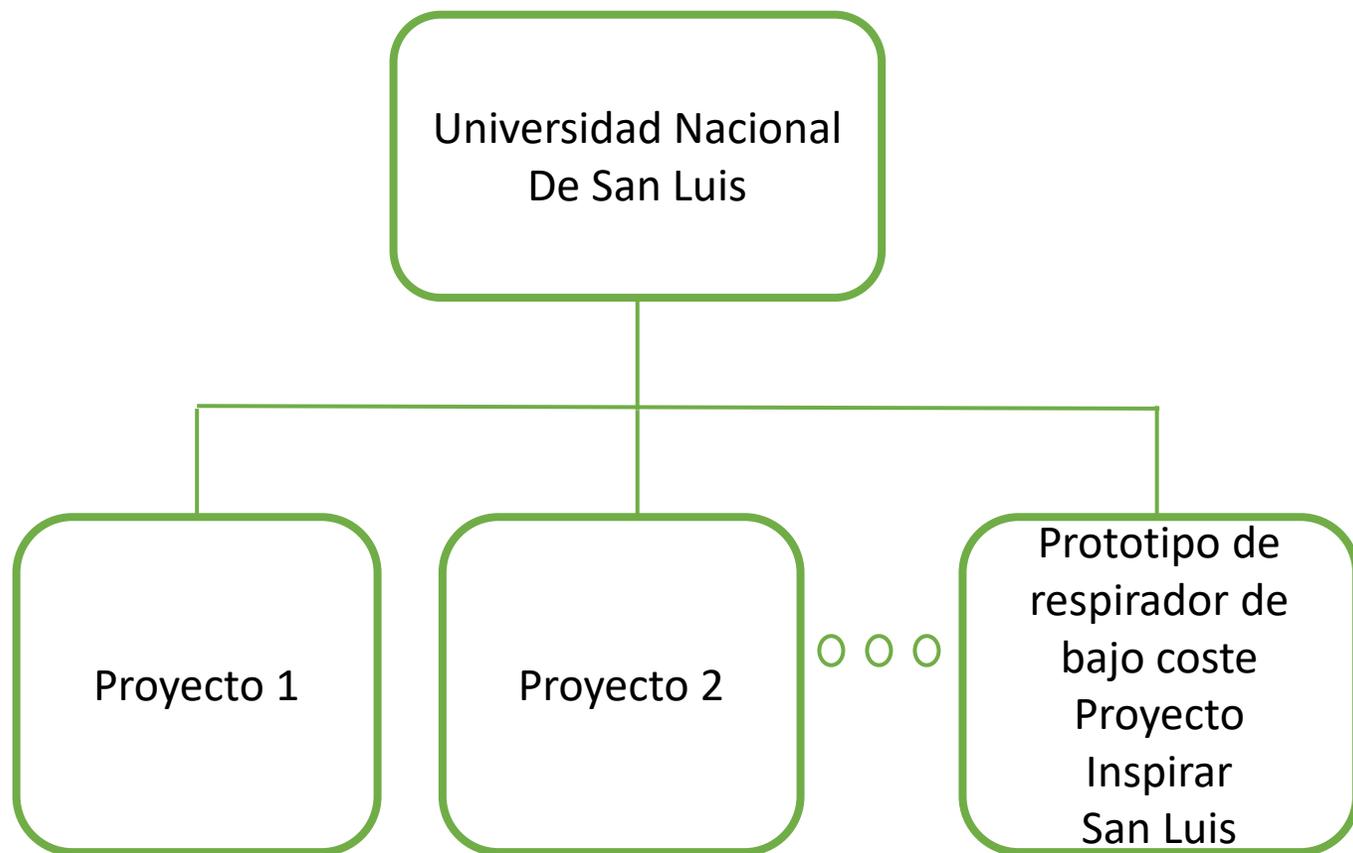
**Iniciativas globales  
de  
colaboración**



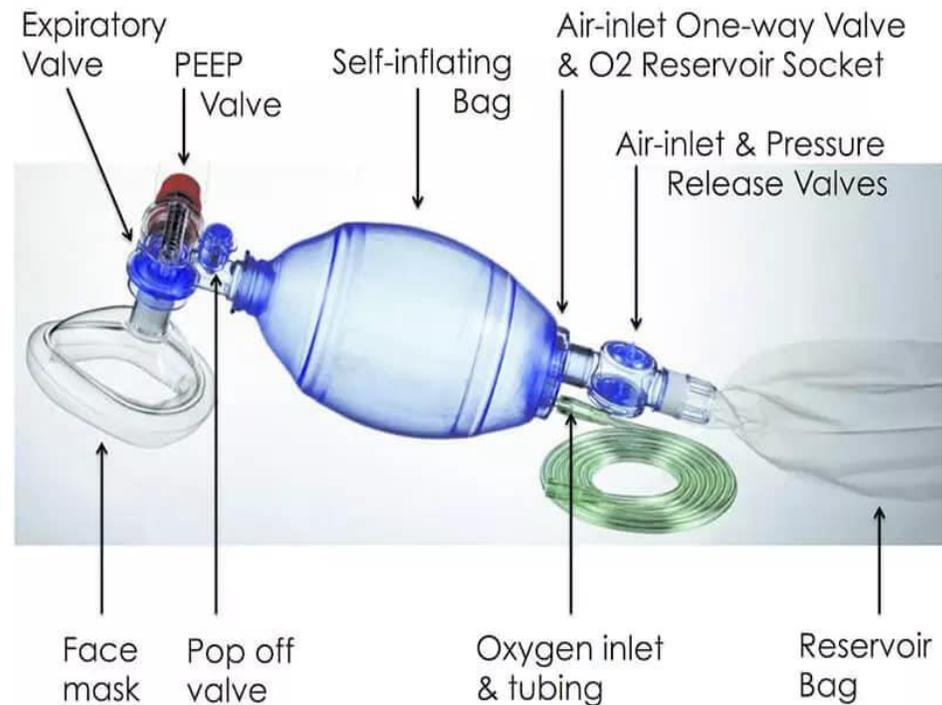
# Introducción



## Motivación

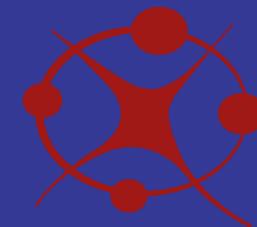


## Proyecto Inspirar Automatización de Ambu

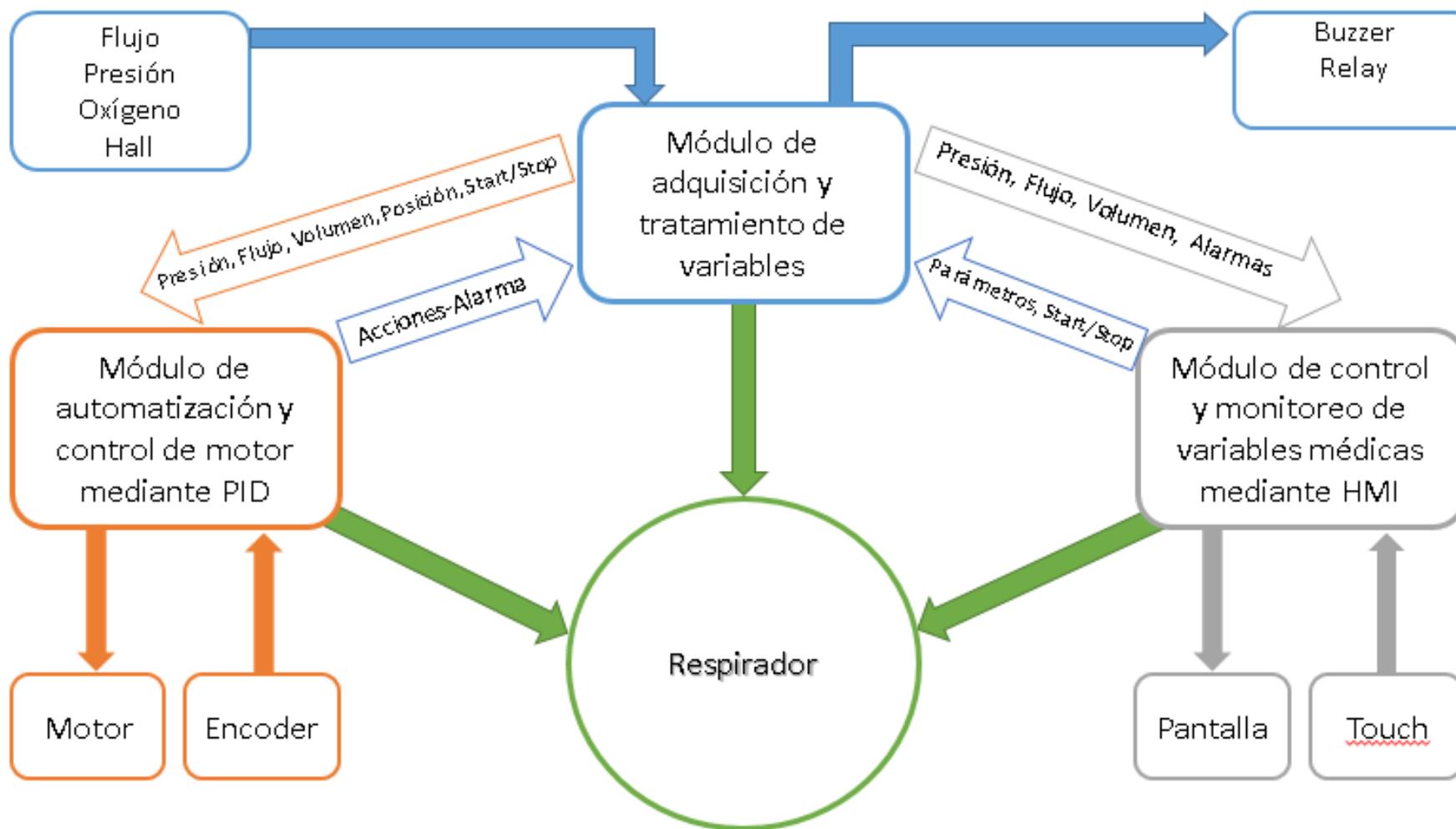




# Introducción



## Motivación





# Objetivos



- Estudio de antecedentes globales y de normativas nacionales.
- Realizar la lectura de variables respiratorias.
- Emitir alarma sonora.
- Comunicación con los demás módulos.
- Diseño de PCB para el prototipo de respirador de bajo coste.
- Análisis de costos.

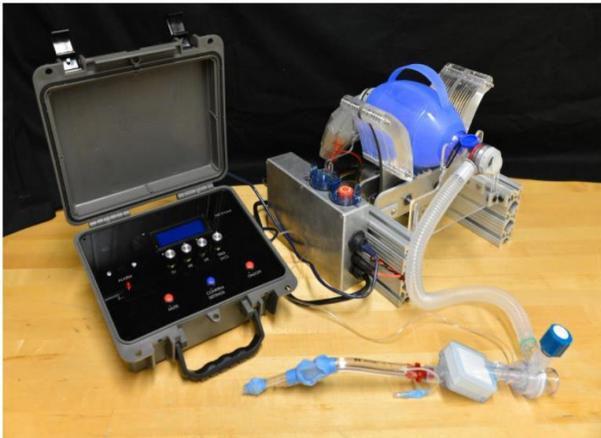


# Desarrollo

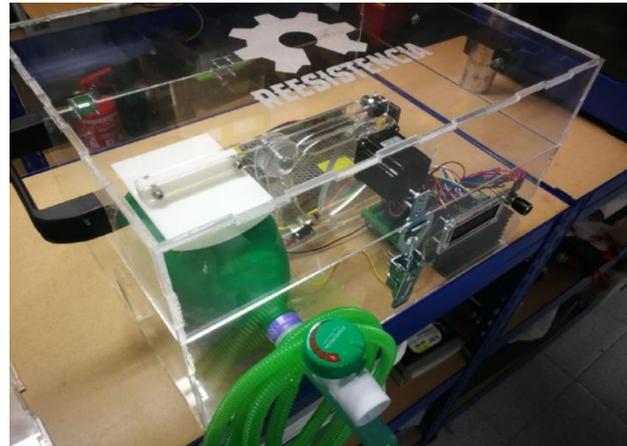


## Antecedentes y normativas de homologación

Emergency Ventilator MIT

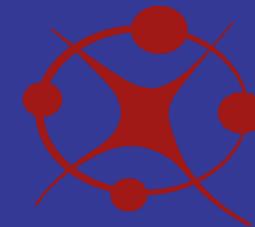


Reesistencia 23





# Desarrollo



## Antecedentes y normativas de homologación

Modos de funcionamiento respirador de bajo costo:

Modo Controlado

- Control por presión.
- Control por volumen.

Modo Asistido

- Control por volumen asistido.

Modo Reclutamiento Alveolar

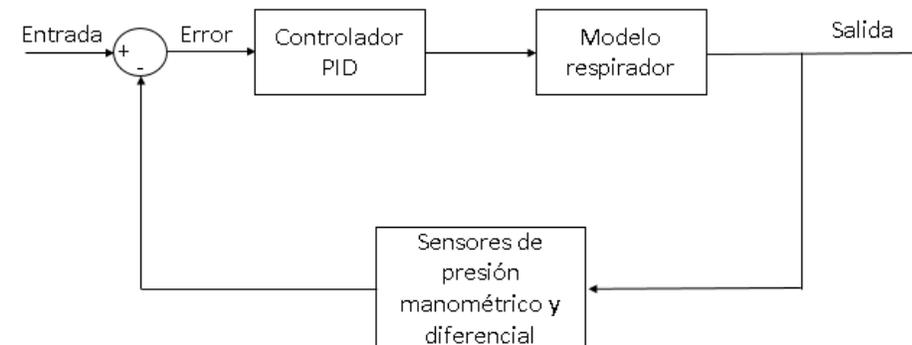
Requiere de



Lectura de variables respiratorias:

Lectura de presión (cmH<sub>2</sub>O),  
flujo (L/min) y volumen  
(mL)

de los gases entregados al  
paciente.





# Desarrollo



## Sensor de presión manométrico

**Honeywell**



**ABPLANT001PG2A**

Sensor Honeywell ABPLANT001PG2A5		
Características	Valor	Descripción
Tipo de salida	Digital	Ancho de 16 bits: 2 bits de estado 14 bits de datos
Tipo de medición	Manométrica	La salida es proporcional a la diferencia entre la presión aplicada y la presión atmosférica
Rango de medición	0 a 1 Psi	Equivalente a 0 a 70,30 cmH <sub>2</sub> O
Operatividad en medios líquidos	SI	El sensor puede utilizarse en gases que posean humedad y que puedan ser corrosivos.
Tensión de alimentación	3 a 5 Vdc	
Protocolo de comunicación	I <sub>2</sub> C y SPI	
Tiempo de respuesta	0.46 ms	
Resistencia de pull-up	1 K $\Omega$	Resistencia de pull-up para protocolo de comunicación
Ciclo de vida	1 millón de ciclos de presión	
Precisión	0.25%FSB	FSB depende de la tensión de alimentación
Error total	1.25%FSB	



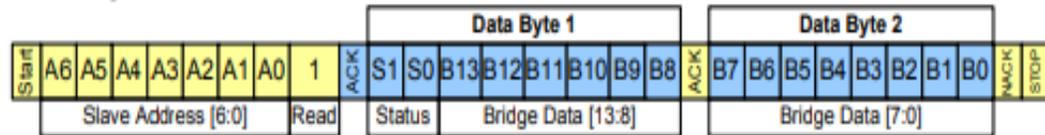
# Desarrollo



## Sensor de presión manométrico

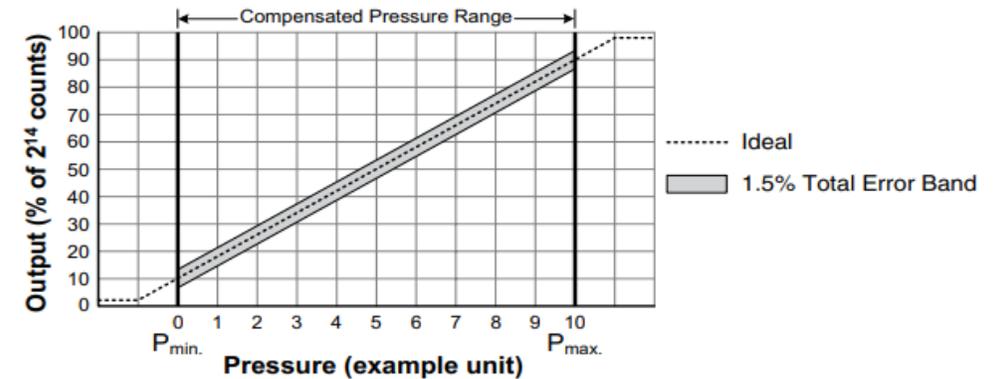
Comunicación por I<sub>2</sub>C.

### Two Byte Data Readout



Función de transferencia.

Digital Versions

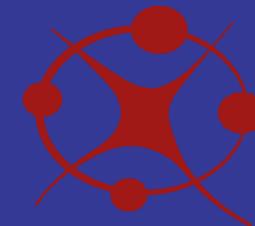


$$\text{Output (\% of } 2^{14} \text{ counts)} = \frac{80\%}{P_{\text{max.}} - P_{\text{min.}}} \times (\text{Pressure}_{\text{applied}} - P_{\text{min.}}) + 10\%$$

$$\text{Presión} = \frac{(\text{Output} - \text{Output}_{\text{min}}) * (P_{\text{max}} - P_{\text{min}})}{(\text{Output}_{\text{max}} - \text{Output}_{\text{min}})} + P_{\text{min}} \text{ [Psi]}$$



# Desarrollo



## Sensor de presión diferencial

**SENSIRION**



**SDP 810**

Parámetro	Símbolo	Condición	Mín.	Típico	Máx.	Unidades
Tensión de alimentación	Vdd		2.7		5.5	V
Nivel Power-up / down	Vpor		2.3	2.5	2.7	V
Corriente consumida	Idd	Midiendo			5.5	mA
		Estado inactivo			1.1	mA
		Modo bajo consumo			1	uA

Parámetro	SDP8xx-500Pa	SDP8xx-125Pa
Rango de medida	-500 a 500 Pa (-2 a 2 inH <sub>2</sub> O)	-125 a 125 Pa (-0.5 a 0.5 inH <sub>2</sub> O)
Precisión tipo zero point	0.1 Pa	0.08 Pa
Precisión tipo span	3% de la lectura	3% de la lectura
Repetibilidad tipo zero point	0.05 Pa	0.04 Pa
Repetibilidad span	0.5% de la lectura	0.5% de la lectura
Variación tipo span debido a variación de temperatura	< 0.5% de la lectura cada 10°C	< 0.5% de la lectura cada 10°C
Estabilidad de offset	<0.05 Pa/año	<0.05 Pa/año
Tiempo de respuesta	<3ms	
Resolución	16 bit	
Calibrado para	Aire, Nitrógeno	
Compatibilidad de medios	Aire, Oxígeno, Nitrógeno sin condensación	
Rango de compensación de temperatura	20°C a +85°C	

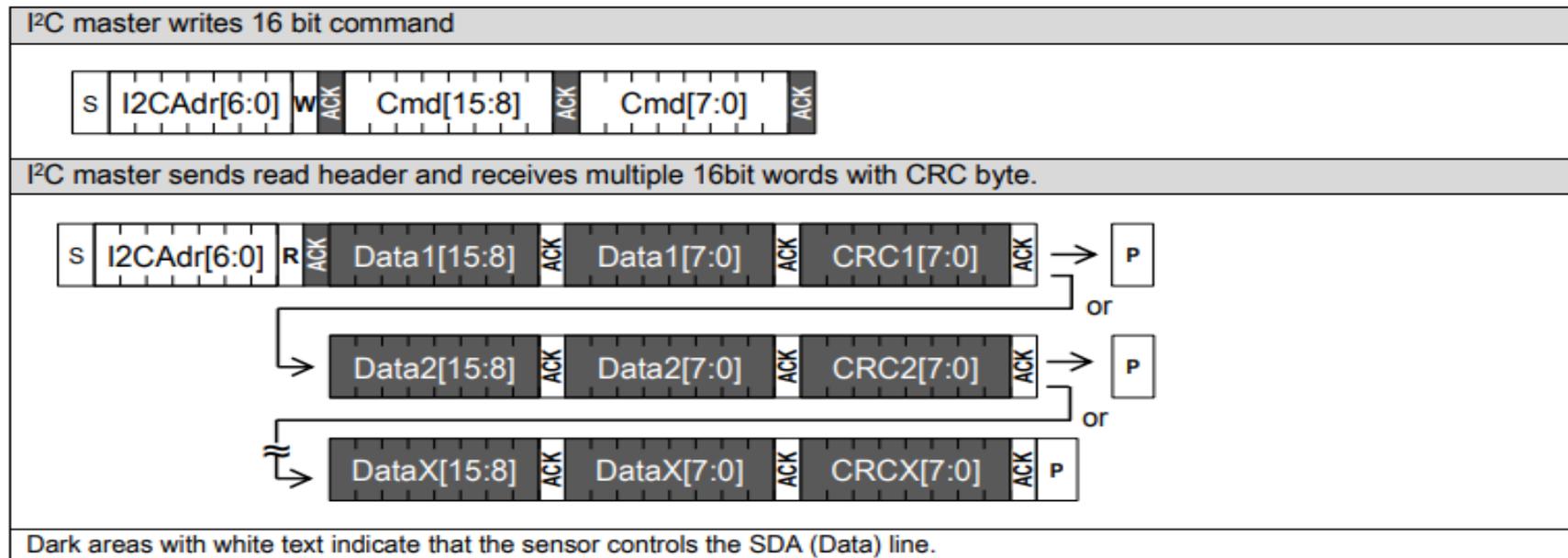


# Desarrollo



## Sensor de presión diferencial

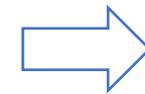
Comunicación por I<sub>2</sub>C.





## Sensor de presión diferencial

Comando elegido	Lectura consecutiva	Descripción
Medición continua	Byte1: DP 8msb Byte2: DP 8lsb Byte3: CRC Byte4: Temp 8msb Byte5: Temp 8lsb Byte6: CRC Byte7: Factor de escala 8msb Byte8: Factor de escala 8lsb Byte9: CRC	Después de iniciar un comando de medición continua la medida puede ser obtenida. La temperatura y el factor de escala no necesitan ser leídos continuamente. El factor de escala es para la presión diferencial dada en Pascales.



$$\textit{Presión diferencial [Pa]} = \frac{\textit{Salida del sensor}}{\textit{Factor de escala}}$$

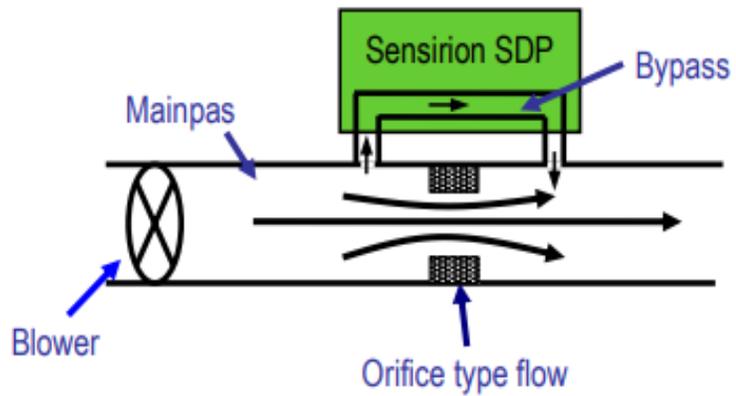


# Desarrollo

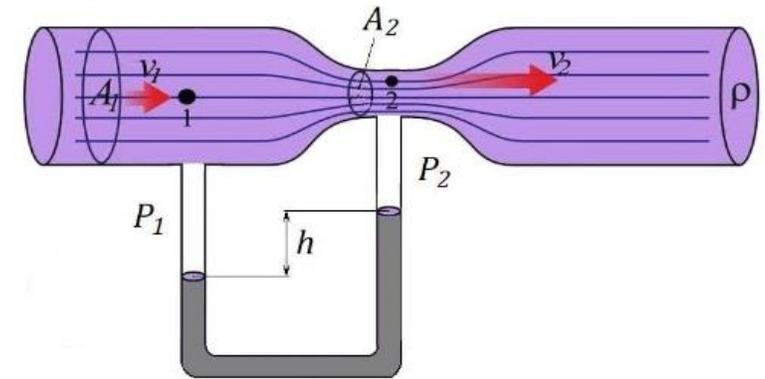


## Sensor de presión diferencial

Principio de funcionamiento medición de flujo.



Venturi como elemento de restricción.





# Desarrollo



## Sensor de presión diferencial

Principio de Bernoulli:

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2$$

Relación velocidad/caudal:

$$Q_1 = v_1 * A_1 \text{ y } Q_2 = v_2 * A_2$$

Caudal en función de  $\Delta P$ :

$$Q_2 = A_2 * \sqrt{\frac{2 * (\Delta P)}{\rho * (1 - N)}} \text{ [m}^3\text{/s]}$$

$$Q = Q_2 * 60000 \text{ [l/min]}$$



Volumen a partir del caudal:

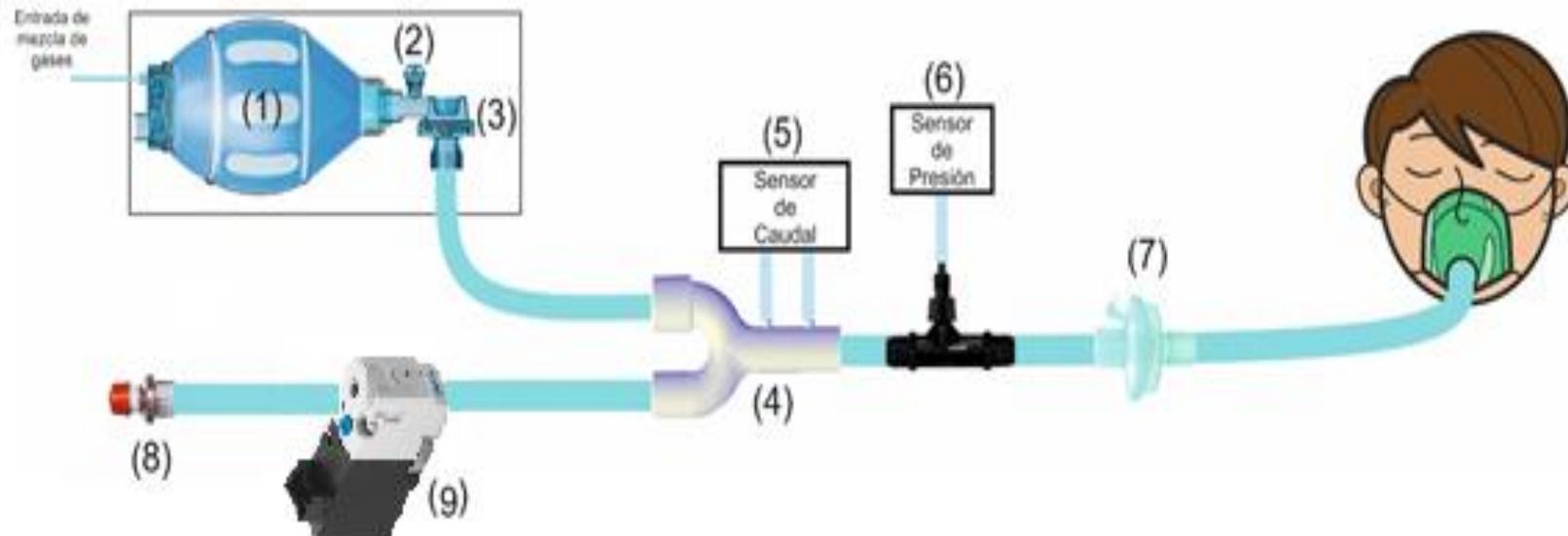
$$V = \int_a^b Q(t) * dt \quad [a, b] \text{ periodo de medición}$$



# Desarrollo



## Circuito neumático



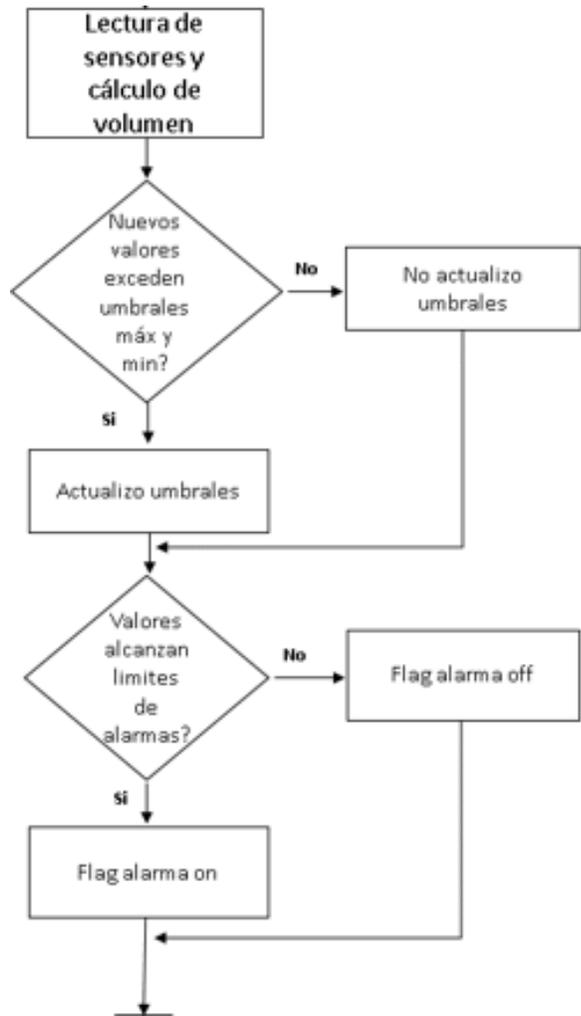
- (1) Ambu.
- (2) Válvula de seguridad.
- (3) Válvula antiretorno.
- (4) Tubo Venturi.
- (5) Sensor de flujo.
- (6) Sensor de presión.
- (7) Filtro bacteriológico.
- (8) Válvula PEEP.
- (9) Electroválvula.



# Desarrollo



## Alarmas del respirador de bajo costo



A partir de la medición de los parámetros de presión y flujo, se estiman los valores máximos y mínimos.

Estos valores se contrastan con los límites definidos en las alarmas.

En caso de alarma, se activa una alerta sonora y se pone en alto un flag.

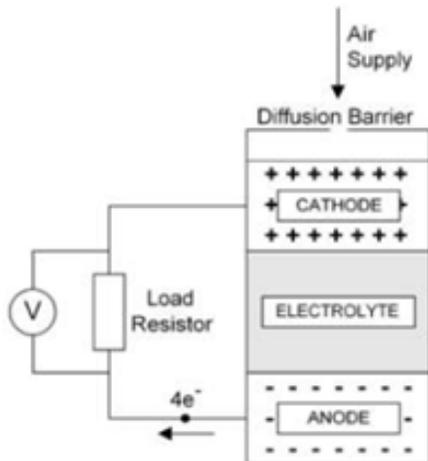


# Desarrollo



## Sensor de oxígeno

# Honeywell



Rango de Medición	0 % a 100 % de concentración de oxígeno
Ciclo de vida nominal	≥ 500.000% horas de volumen oxigeno
Salida a concentración ambiente	9 mV a 13 mV
Interface eléctrica	3.5 mm mono phone Jack
Error de linealidad	3 % relativa
Tiempo de respuesta	< 5 s al 90% del valor final
Rango de presión	0.6 bar a 2 bar
Temperatura de operación	0 °C a +50 °C
Compensación de temperatura	Compensación por NTC embebida.
Deriva de salida a largo plazo	< - 15 % relativo sobre ciclo de vida
Carga recomendada	≥ 10 KOhms
Tiempo de calentamiento	< a 30 minutos después de reemplazar el sensor

*\*No apto para medición de concentración de oxígeno entre respiraciones.*

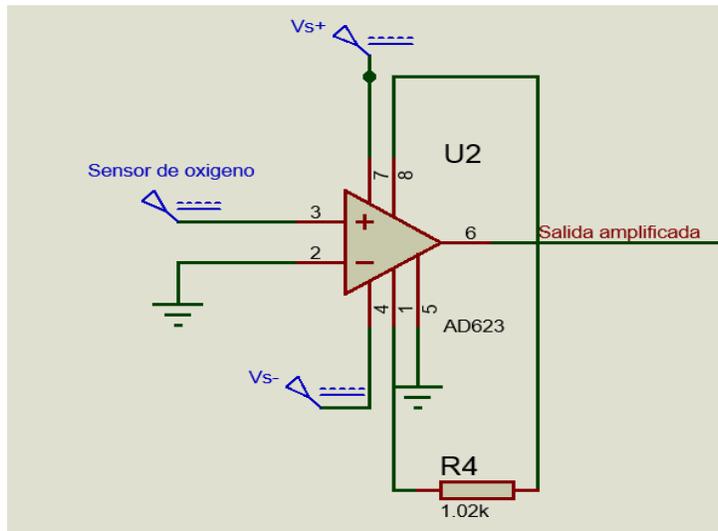


# Desarrollo



## Sensor de oxígeno

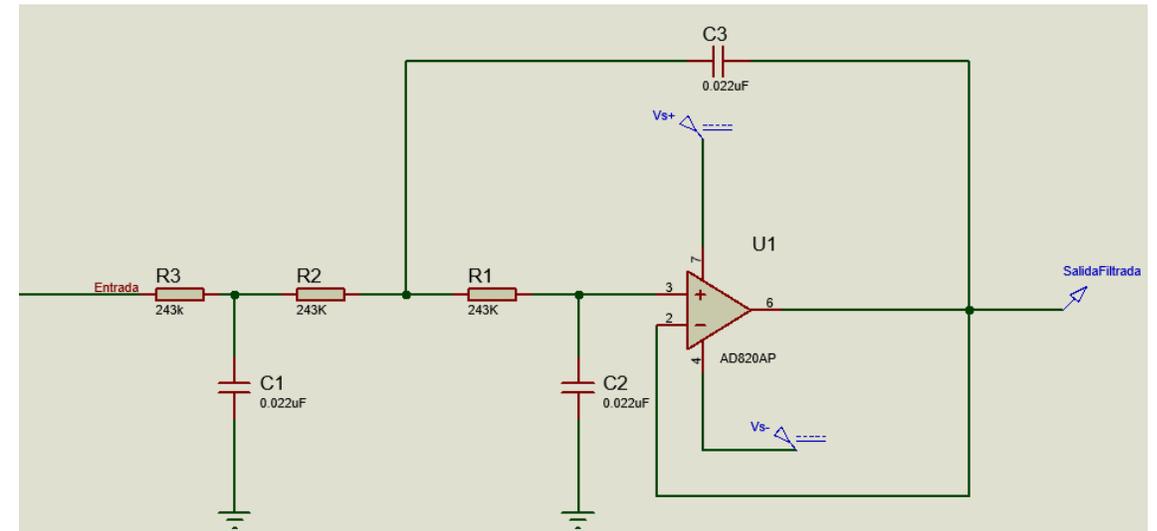
### Amplificación.



A.I AD623 de Analog Devices

Salida de sensor en mV.  
Entrada ADC en el rango de 0 a 5 V.  
Amplificación de 100 veces.

### Filtro P.B activo 3<sup>er</sup> Orden Butterword.



A.O AD820 de Analog Devices

Filtrado de señal previo a ingreso a ADC.  
Filtro con  $F_c = 10$  Hz.

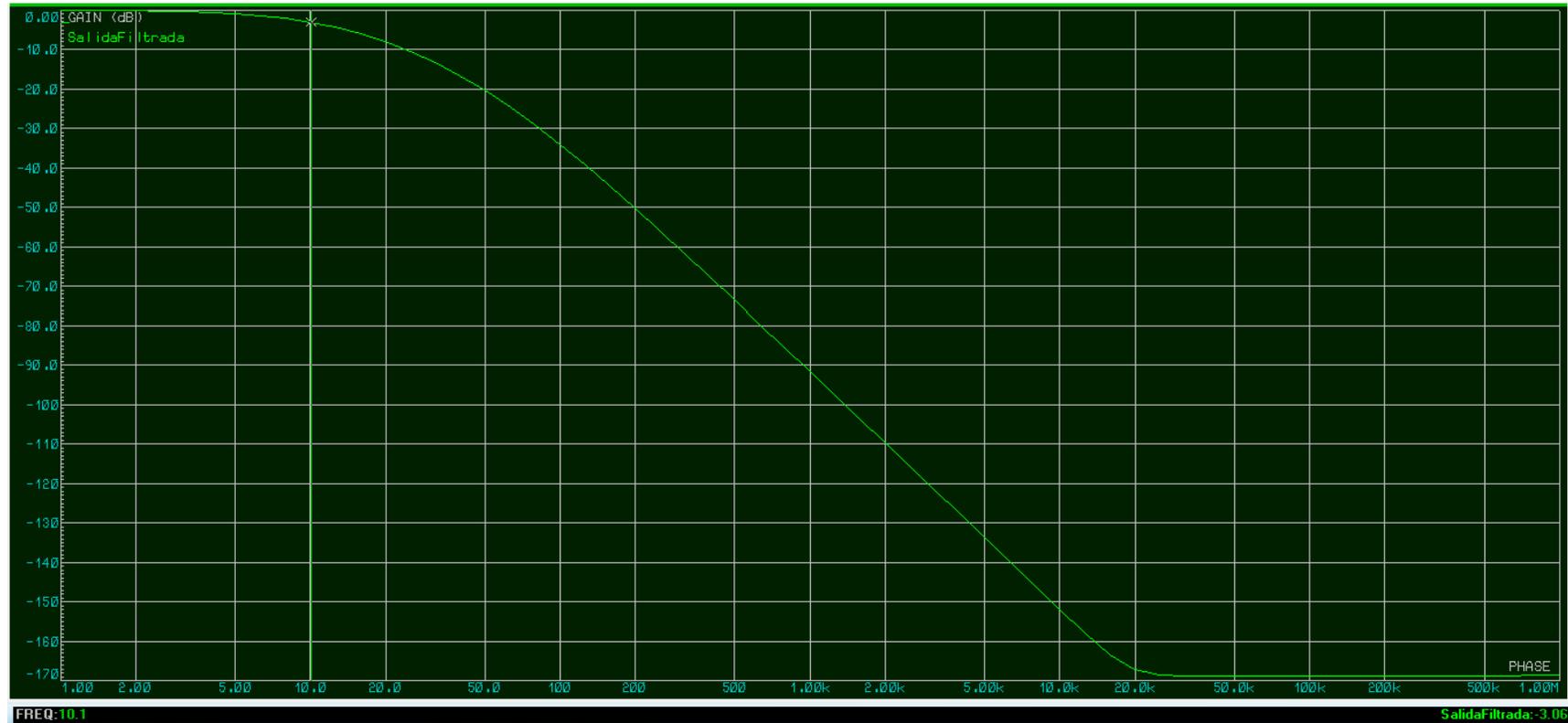


# Desarrollo



## Sensor de oxígeno

Diagrama de Bode del filtro.

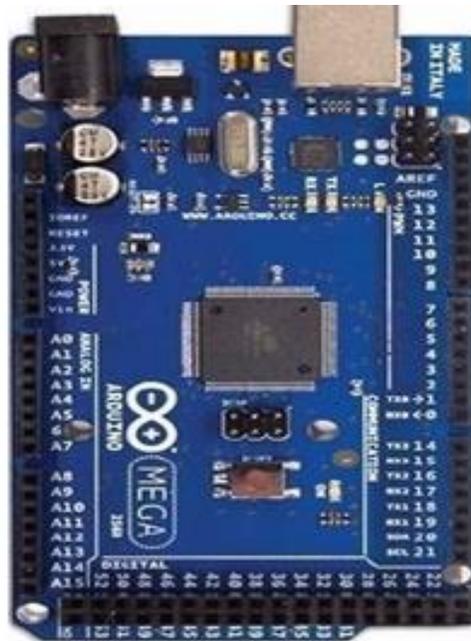




# Desarrollo



## Placa Arduino Mega 2560



En ella se ejecuta el firmware de:

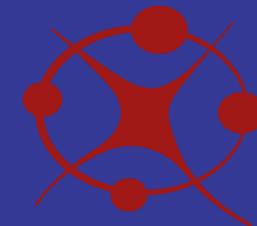
- Módulo de adquisición y tratamiento de variables.
- Módulo de automatización y control de motor mediante PID.

A ella se conecta todo el hardware del proyecto inspirar.

Lenguaje de programación empleado: C++

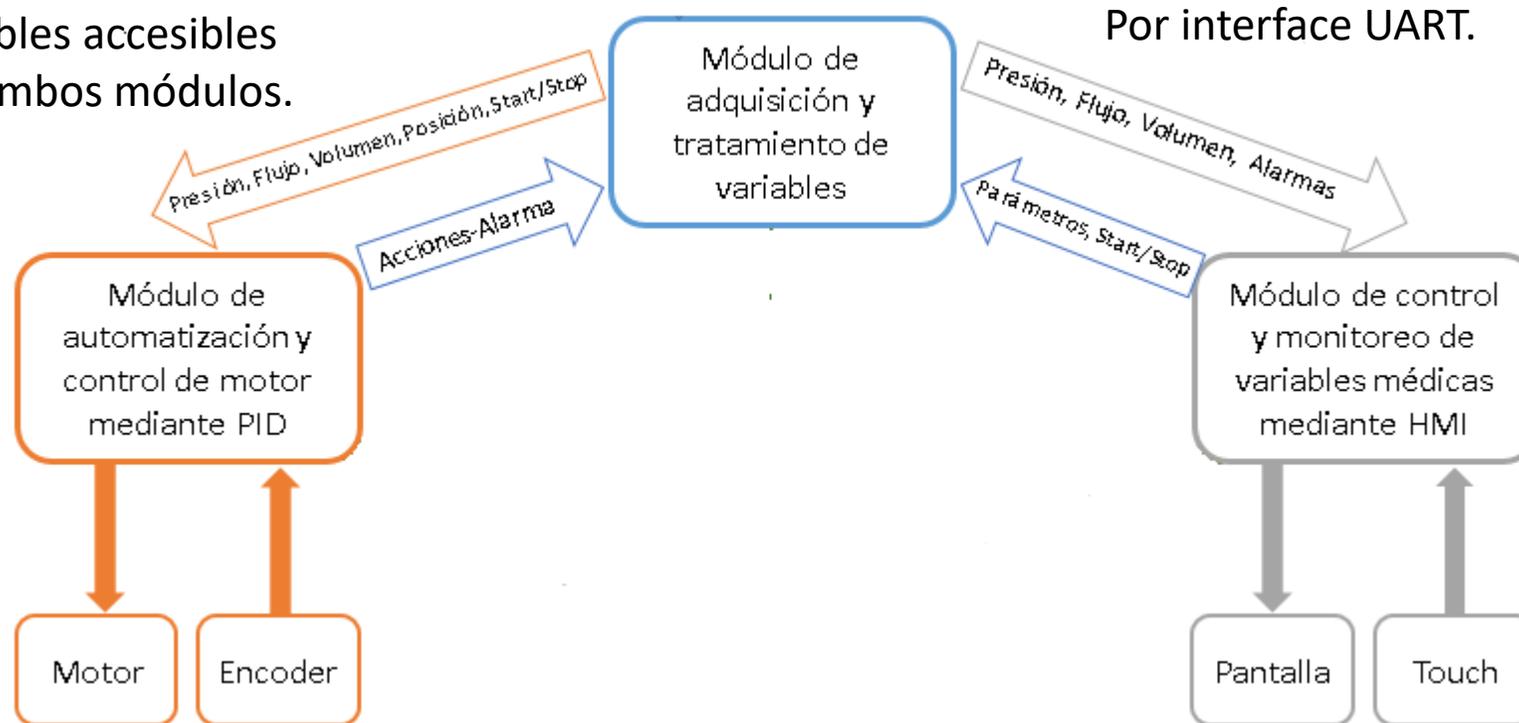


# Desarrollo



## Comunicación con demás módulos

Mediante firmware.  
Variables accesibles  
por ambos módulos.

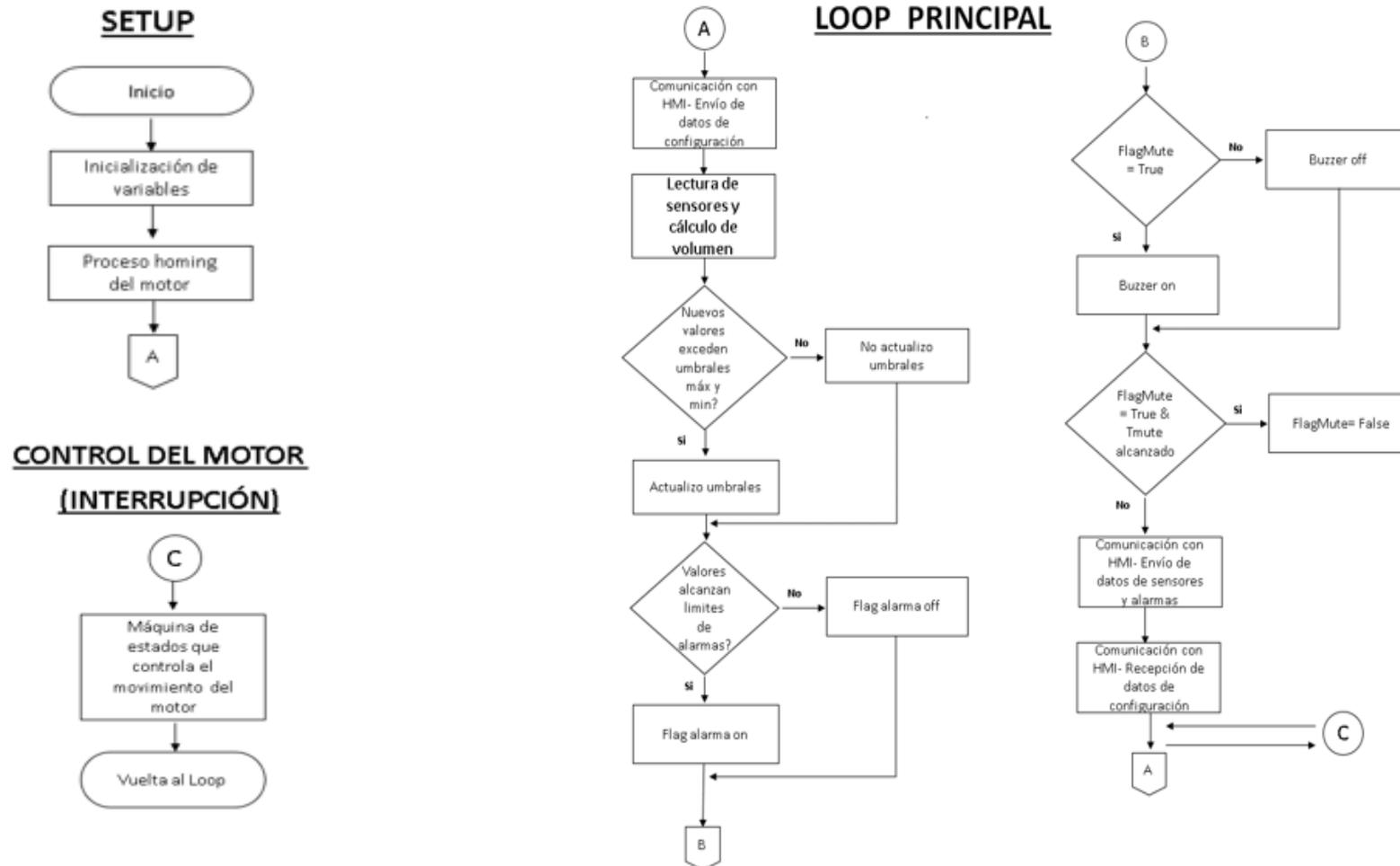




# Desarrollo

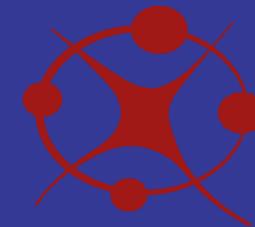


Diagrama de flujo del firmware que corre la placa Arduino Mega.



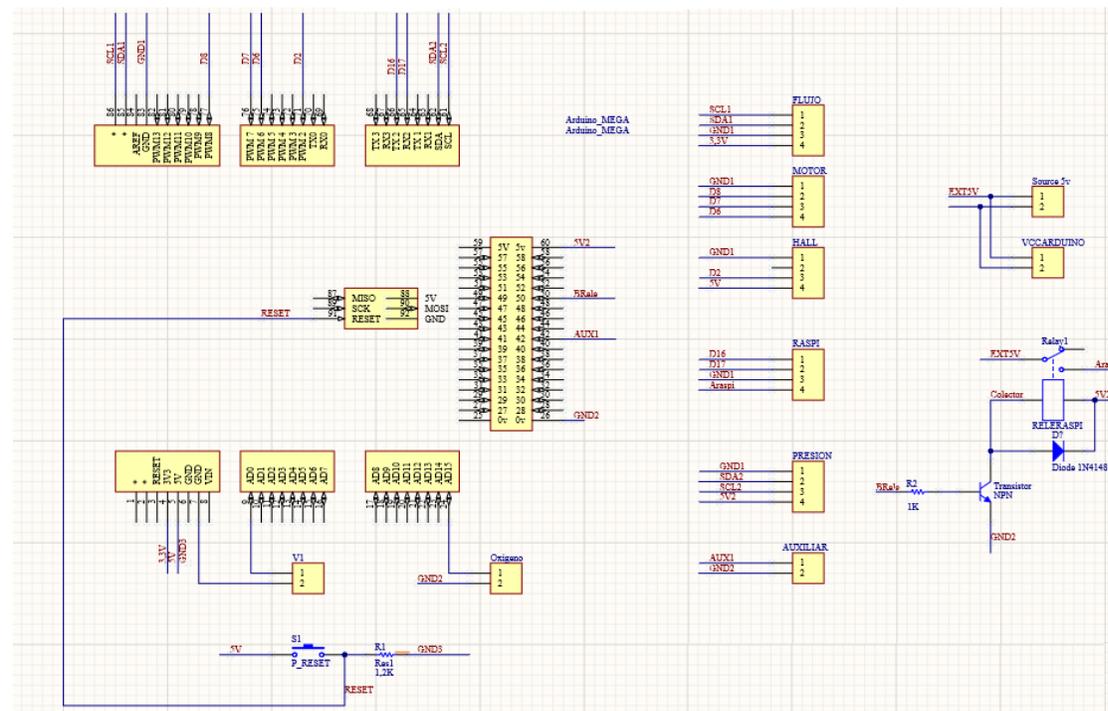
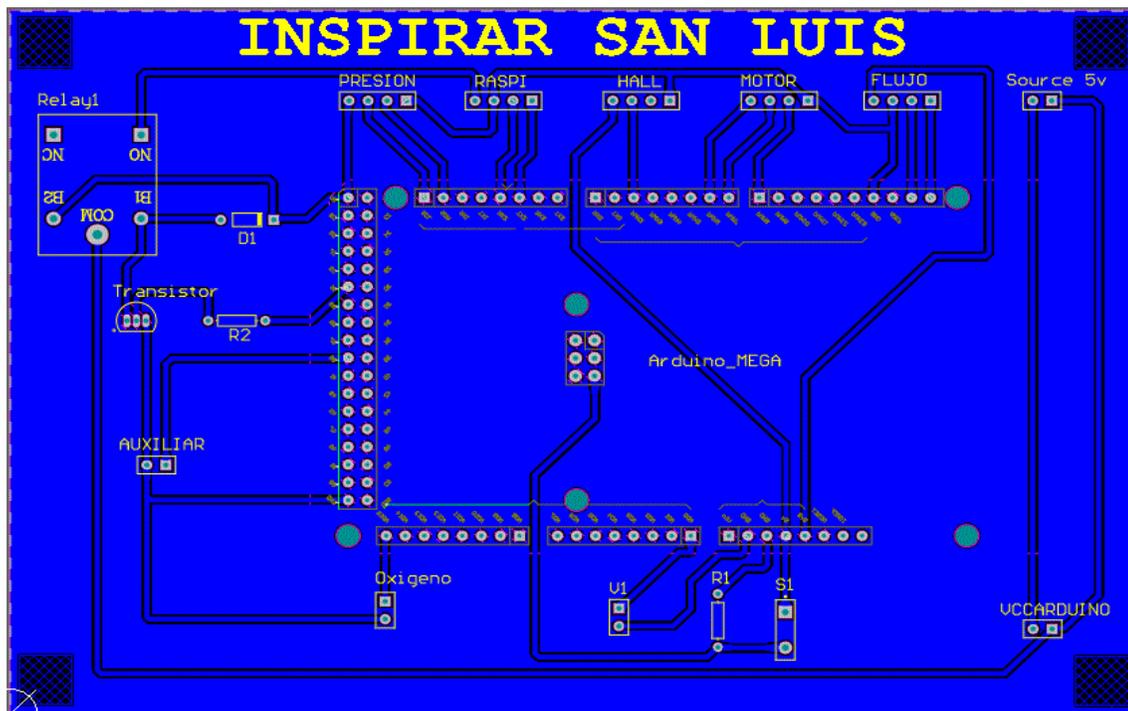


# Desarrollo



## Placa PCB

PCB diseñado mediante software Altium Designer 20.0.13.





# Desarrollo



## Análisis de costos proyecto Inspirar

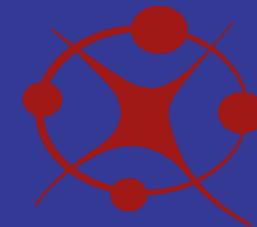
Item	Cantidad	Costo unitario en pesos	Costo total en pesos	Costo total en dólares	Item	Cantidad	Costo unitario en pesos	Costo total en pesos	Costo total en dólares
<b>Componentes Electrónicos</b>					<b>Componentes PCB</b>				
Driver H557 y motor paso a paso NEMA 24	1	\$ 16.240,00	\$ 16.240,00	USD 140,00	Pin Molex macho/hembra	11	\$ 38,26	\$ 420,84	USD 3,63
Arduino Mega 2560 rev.3	1	\$ 5.141,95	\$ 5.141,95	USD 44,33	Rollo de estaño 60/40, 0.8mm x 250g	1	\$ 4.000,00	\$ 4.000,00	USD 34,48
Rasoberry pi4 de 1Gb Ram+ Memoria flash de 2Gb	1	\$ 24.485,49	\$ 24.485,49	USD 211,08	Placa PCB simple faz	1	\$ 1.224,27	\$ 1.224,27	USD 10,55
Fuente RS-25-5	1	\$ 2.900,00	\$ 2.900,00	USD 25,00	Cables varios	1	\$ 459,10	\$ 459,10	USD 3,96
Fuente de RS-600-24	1	\$ 10.712,40	\$ 10.712,40	USD 92,35	<b>Accesorios neumáticos</b>				
Sensor de presión manométrico Honeywell ABPLA NT001 PG 245	1	\$ 2.270,84	\$ 2.270,84	USD 19,58	Ambu+ manguera oxígeno	1	\$ 1.377,31	\$ 1.377,31	USD 11,87
Sensor de presión diferencial Sensirion SDP810	1	\$ 3.132,00	\$ 3.132,00	USD 27,00	Circuito respiratorio adultos	1	\$ 856,99	\$ 856,99	USD 7,39
Sensor de efecto Hall	1	\$ 183,64	\$ 183,64	USD 1,58	Válvula PEEP	1	\$ 612,14	\$ 612,14	USD 5,28
Buzzer	1	\$ 244,85	\$ 244,85	USD 2,11	Manguera cristal 8mm *	3	\$ 61,21	\$ 183,64	USD 1,58
Switch N.O	2	\$ 153,03	\$ 306,07	USD 2,64	Manguera cristal 4mm *	2	\$ 26,02	\$ 52,03	USD 0,45
Relay simple inversor bobina 5Vcc	1	\$ 275,46	\$ 275,46	USD 2,37	Derivación en "Y" para manguera de 8mm	2	\$ 336,68	\$ 673,36	USD 5,80
Transistor BCS47	1	\$ 30,61	\$ 30,61	USD 0,26	<b>Insumos para impresión 3D</b>				
Resistencias 1/8 W	2	\$ 15,30	\$ 30,61	USD 0,26	Rollo de filamento PLA para impresión x kg	2	\$ 2.448,55	\$ 4.897,10	USD 42,22
Diodo 1N4001	1	\$ 24,49	\$ 24,49	USD 0,21	<b>Estructura</b>				
Electroválvula MPH1	1	\$ 8.700,00	\$ 8.700,00	USD 75,00	Carcasa exterior de metal 4mm	1	\$ 1.775,20	\$ 1.775,20	USD 15,30
Pantalla LCD 7"	1	\$ 7.008,97	\$ 7.008,97	USD 60,42	Esqueleto interior de policarbonato de 10mm	1	\$ 6.121,37	\$ 6.121,37	USD 52,77
Cable HDMI a micro HDMI	1	\$ 459,10	\$ 459,10	USD 3,96	Tornillo rosca M4 x 10mm	13	\$ 30,61	\$ 397,89	USD 3,43
Cable USB tipo A a microUSB tipo B	1	\$ 397,89	\$ 397,89	USD 3,43	<b>Otros insumos</b>				
					Conector 220V / 3 pines IEC320 C14 con interruptor y fusible	1	\$ 581,53	\$ 581,53	USD 5,01
					Adaptador doble USB tipo A H/H	1	\$ 183,64	\$ 183,64	USD 1,58
					Pintura epoxi blanca / litro	1	\$ 1.530,34	\$ 1.530,34	USD 13,19
					<b>Mano de obra x hora</b>				
					Armado de acrílicos	12	\$ 1.250,00	\$ 15.000,00	USD 127,43
					Pintado de carcasa de metal	2	\$ 1.000,00	\$ 2.000,00	USD 17,17
					Armado de PCB	8	\$ 1.250,00	\$ 10.000,00	USD 85,71
					<b>Item</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo unitario en pesos</b>	<b>Costo total en pesos</b>	<b>Costo total en dólares</b>
					Impresión 3D de piezas	24	\$ 1.250,00	\$ 30.000,00	USD 257,14
					Montaje de componentes, pruebas, etc	76	\$ 1.250,00	\$ 95.000,00	USD 813,56
					<b>Subtotal en pesos \$</b>			<b>\$ 607.211,26</b>	
					<b>Subtotal en dólares USD</b>				<b>USD 5.253,91</b>
					<b>Costo final en dólares USD</b>				<b>USD 4.545,39</b>

Costo total proyecto Inspirar:  
USD 4.585

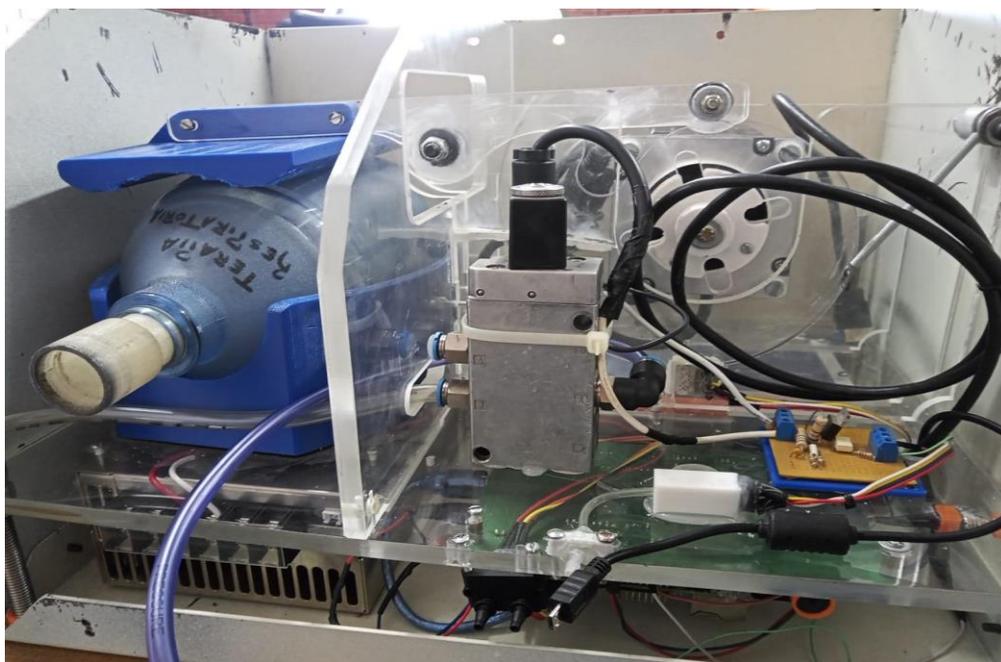
Costo aprox. Respirador comercial:  
USD 10.000



# Resultados



Ensamblado de todos los componentes y unión de los tres módulos.





# Resultados



## Comunicación con los demás módulos.



Con módulo HMI:

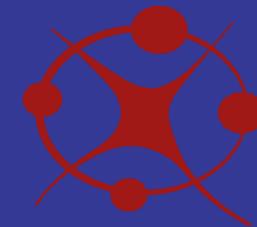
- Visualización gráfica de los de presión, flujo y volumen.
- Visualización numérica de parámetros respiratorios.
- Reconocimiento de flags enviados a HMI.
- Iconos cambian de color y nombre (Start/Stop).

Con módulo de automatización y control:

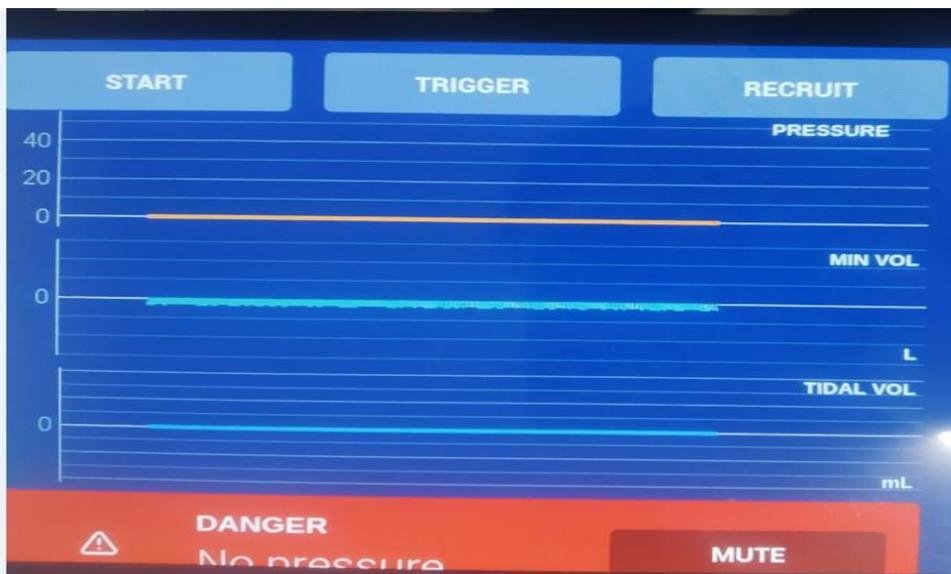
- Prueba de Start, Stop y modo de control.



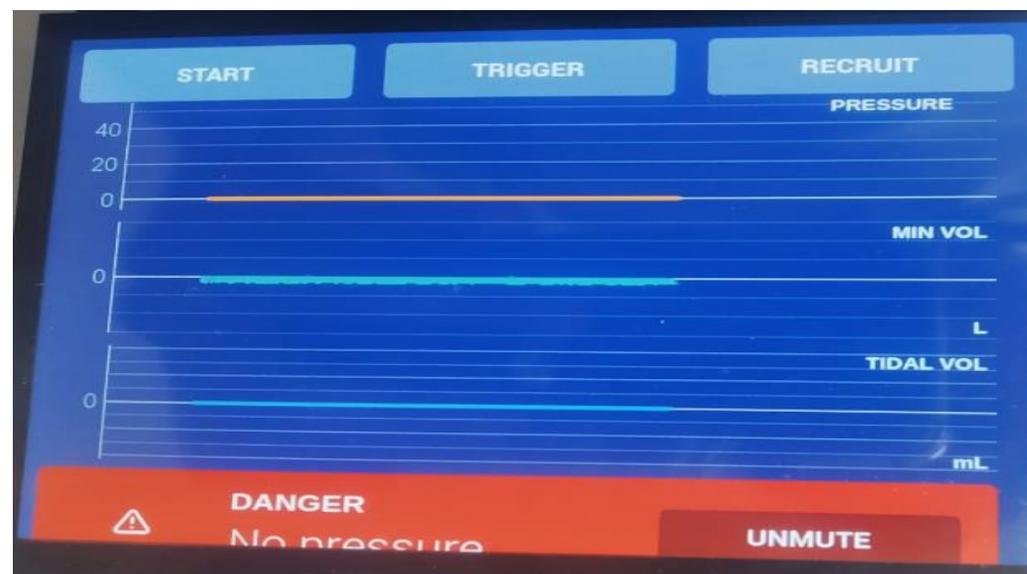
# Resultados



## Visualización de alarmas



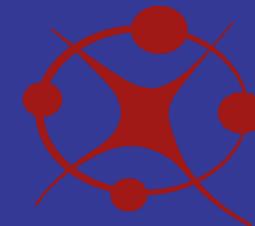
Alarma no silenciada.



Alarma silenciada.



# Resultados



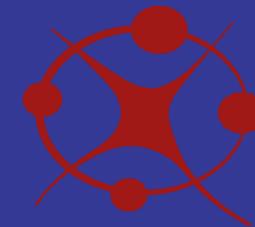
## Proceso de homologación respirador de bajo coste

Requisito	Cumplimiento	SI	NO	Observaciones
<b>Generales</b>				
Disposición ANMAT 2319/02			X	Se debe registrar la empresa o institución educativa.
Disposición ANMAT 3289/13			X	El prototipo no fue desarrollado en un laboratorio con los requerimientos de sanidad requeridos (Sala limpia libre de polvo, etc.).
Formulario de Registro			X	Se requiere cumplimiento de Disposición ANMAT 2319/02.
Etiquetas	X			El prototipo posee etiquetas que indican: -Conexión circuito inspiratorio. -Conexión circuito espiratorio. -Puerto de los sensores de presión y flujo. -Conexión eléctrica. -Ingreso de muestra de gases.
Informe técnico			X	La elaboración del informe técnico completo dependió de los resultados de laboratorio.
Decisión del Riesgo	X			Elaborado en el Módulo de Control.
<b>Reportes completos de ensayos de laboratorio</b>				
IEC 60601-1-1	X			Debido a su forma constructiva el prototipo posee atenuación de Clase I con conexión a tierra. Podría mejorarse con una doble atenuación de forma de lograr una categoría Clase II.
IEC 60601-1-2				El ensayo de compatibilidad electromagnética no ha sido efectuado. <sup>1</sup>
ISO 80601-2-12	X			El prototipo cumple los requerimientos básicos de ventilador de cuidados críticos: modo de control por presión y modo de control por volumen.
IEC 60601-1-3	X			Se ha previsto de alarma con en sobre y baja presión, como así también con un bajo volumen tidal. Los alarmas corresponden a los dos modos de control (por presión y por volumen).
ISO 10993	X			La mayoría de los componentes que se encuentran en el circuito respiratorio son aptos para uso médico. <sup>11</sup>
IEC 60601-2-33	X			Se ha previsto de un módulo externo para la medición de la concentración de oxígeno de entrada. No posee alarma ante concentración de oxígeno incorrecta. Requiere atención del usuario.

Tabla de seguimiento de requisitos de habilitación para respiradores comerciales según ANMAT que cumple/no cumple el prototipo de proyecto Inspirar.



# Resultados



## Medición concentración de oxígeno

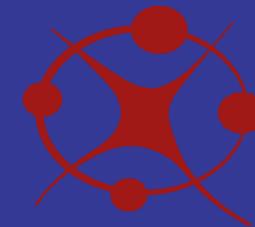
No fue posible la implementación del mismo debido:

- Falta de stock de la celda de oxígeno.
- Precios altos al momento del desarrollo.
- Transición de empresas.





# Conclusiones



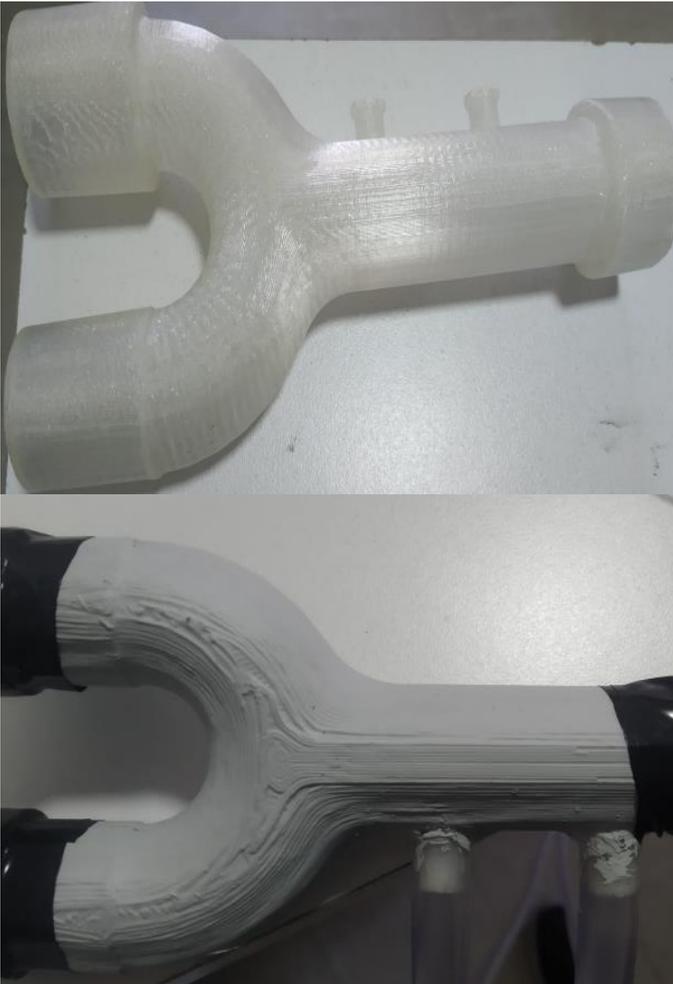
- Cumplir la lectura de los parámetros esenciales de presión, flujo y volumen (salvo concentración de oxígeno).
- Lograr la comunicación efectiva entre los módulos lo que requirió de coordinación y organización para el desarrollo de las mismas.
- Diseño, fabricación y adaptación de componentes a pesar de las limitaciones existentes.
- Se aplicaron conocimientos de electrónica digital, electrónica analógica, física, interfaces, microcontroladores, etc.
- Se adquirieron conocimientos de un campo tan diverso como la medicina, y sus derivaciones para este caso particular.
- Se pusieron en práctica las habilidades de gestión, compras y análisis de costos para lograr un respirador de bajo coste.



# Mejoras



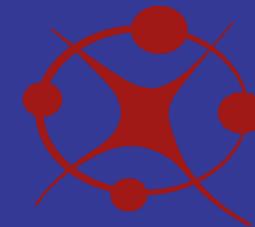
## Impresión Venturi con impresora 3D.



- Superficie texturada, presenta fugas y no es factible de esterilizar por lo que no es apto para uso médico.
- Para solucionar fugas, se pintó la pieza con laca para terminación de impresiones 3D.
- Para resolver el problema de compatibilidad médica, se aconseja el uso de impresión con resina.



# Mejoras



## Implementación de medición de concentración de oxígeno

- Investigar otros modelos de sensores de otros fabricantes.

## Culminar proceso de homologación respirador de bajo coste

- Realizar ensayos de laboratorio.
- Consultar con Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) sobre procedimientos a seguir.



# Mejoras



## Electroválvula neumática



**Festo MHP1.**

- Dificultades para conseguir.
- Presión de trabajo de 0 a 4 bar.
- Indicada para uso en respiradores.



**Festo MFH-5-1/4.**

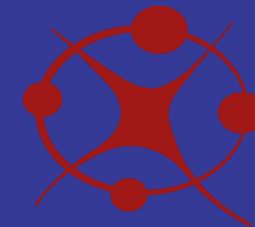
- Uso para accionamientos neumáticos en industria.
- Presión de trabajo 2.2 a 8 bar.
- No indicada para uso en respiradores.
- Fácil de conseguir.

**El uso de una electroválvula no adecuada impide llegar a las presiones y volumen requeridos.**

**Esto afecta a las mediciones.**



# Mejoras



## Validación de medidas por medio de analizador de flujo



Analizador de flujo Fluke VT900A.

- Medición de presión, flujo y volumen.
- Almacenamiento de pruebas.
- Pulmón de prueba con variaciones de parámetros para simular paciente.





¿PREGUNTAS?



**¡GRACIAS!**