



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

EL RESPIRATRON 1
Ventilador electromecánico
básico con modalidad
invasiva y no invasiva

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniera Eléctrica Electrónica

P R E S E N T A

María Luisa Gudiño Lemus

DIRECTOR DE TESIS

Ing. José Luis Rodríguez Pérez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| AGRADECIMIENTOS | 1 |
| 1. INTRODUCCIÓN | 3 |
| 1.1. ANTECEDENTES | 3 |
| 1.2. OBJETIVO | 4 |
| 1.3. TIPOS DE VENTILADORES | 4 |
| 1.4. RESUMEN | 6 |
| 2. CONSIDERACIONES Y PARÁMETROS PARA DISEÑO | 7 |
| 3. SISTEMA NEUMÁTICO | 10 |
| 3.1. SUMINISTRO DE GASES | 10 |
| 3.2. CIRCUITO NEUMÁTICO INTERNO Y VENTILADOR-PACIENTE | 11 |
| 4. SISTEMA ELECTRÓNICO | 15 |
| 4.1. ELECTRÓNICA DE CONTROL | 15 |
| 4.2. ALARMAS | 17 |
| 4.3. FUENTE DE PODER | 19 |
| 4.4. TABLERO DE CONTROL | 20 |
| 5. ENSAMBLE | 22 |
| 5.1. CHASIS | 22 |
| 5.2. COMPRESOR Y COMPLEMENTOS | 23 |
| 5.3. UNIDAD NEUMÁTICA | 23 |
| 5.4. FUENTE DE PODER | 24 |
| 5.5. TARJETAS ELECTRÓNICAS DE CONTROL Y ALARMAS | 24 |
| 5.6. TABLERO DE CONTROL | 25 |
| 5.7. GABINETE | 25 |
| 5.8. EQUIPO TERMINADO | 26 |

| | |
|---|----|
| 6. EXTRACTO DEL INSTRUCTIVO | 27 |
| 6.1. RECONOCIMIENTO DE PARTES | 27 |
| 6.2. ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA | 32 |
| 6.3. OPERACIÓN EN MODO NO INVASIVO | 32 |
| 6.4. OPERACIÓN EN MODO INVASIVO | 34 |
| 6.5. INTERPRETACIÓN Y MANEJO DE ALARMAS | 35 |
| 7. RESULTADOS | 37 |
| 8. CONCLUSIONES | 43 |
| 9. REFERENCIAS | 44 |
| 10. GLOSARIO | 45 |

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por la vida y por las oportunidades que puso a lo largo de mi camino.

A mis papás, María Luisa y Ramón, por formarme en valores y principios, por su ejemplo como personas, por su apoyo y confianza, por creer en mí a pesar de las dificultades en el camino.

Al Ing. José Luis Rodríguez, por permitirme colaborar en su equipo de trabajo, en el desarrollo de diversos proyectos en el Instituto de Ingeniería. Desde que inicié el servicio social y hasta su dirección, en la realización de esta tesis.

Gracias por su paciencia, por alentarme y apoyarme siempre. Gracias por sus enseñanzas y conocimientos transmitidos.

A la Dra. Rosa María Ramírez, Directora del Instituto, al Dr. Arturo Palacio, Subdirector del Instituto, por todo su apoyo y por hacer posible este proyecto y todas las condiciones para poder desarrollarlo.

Al Dr. Jesús Manuel Dorador, por su extraordinaria coordinación en el Proyecto Ventiladores PAPIIT.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, que considero mi segunda casa y en donde realicé mi desarrollo académico como ingeniera en las aulas de su Facultad de Ingeniería.

Gracias también al Instituto de Ingeniería, en donde he continuado desarrollándome y formándome como ingeniera. Gracias a quienes me apoyaron dentro de mi estancia en esta institución.

Gracias a cada uno de Ustedes que han sido pilares a lo largo de mi formación académica, la cual, finalmente puede verse realizada con el desarrollo de este trabajo.

La presente tesis se desarrolló en el marco del proyecto PAPIIT IV100320

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

A fines del año 2019 surge en China el coronavirus SARS-CoV-2, causante de la enfermedad COVID-19, el cual, se propagó de manera acelerada a nivel mundial al grado de ser declarado como pandemia por la Organización Mundial de la Salud.

El creciente número de personas infectadas, generó necesidades especiales en los centros de atención hospitalaria, incrementando la necesidad de insumos, servicios, personal capacitado y equipos de alta especialización, llevando a los sistemas de salud a un inminente colapso y escasez de productos, entre los que se encuentran los ventiladores electromecánicos.

La existencia de ventiladores fue insuficiente y se debió entre otros factores, a que el abastecimiento es básicamente dependiente del extranjero, lo que redundó, tanto en escasez, como en carestía.

Por ello, surgieron grupos de ingenieros que buscaron desarrollar diversos equipos que ayudaran a enfrentar la emergencia sanitaria. De esta manera, el desarrollo de diseños propios asociado a equipos tales como los ventiladores electromecánicos, permiten establecer las bases para iniciar el camino hacia una independencia nacional en el desarrollo tecnológico de instrumental médico de primera necesidad. Esto nos da pauta para plantear el siguiente objetivo.

1.2. OBJETIVO

El objetivo de este trabajo es diseñar y desarrollar en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, un ventilador electromecánico, que permita proporcionar una mejor manera de respirar, tanto a personas contagiadas por covid-19, como a aquellas con cualquier otra afección por la cual hayan disminuido sus capacidades respiratorias. De este modo, podemos ayudarles a incrementar la probabilidad de sanación.

1.3. TIPOS DE VENTILADORES

Un ventilador electromecánico es un equipo médico utilizado para apoyar la función respiratoria de una persona cuando no puede hacerlo adecuadamente por cuenta propia. La misión del ventilador es inyectar aire enriquecido con oxígeno a los pulmones de una persona y retirarle el gas exhalado. Esta mezcla de aire enriquecido debe ser filtrada previamente y acondicionada en temperatura.

Los ventiladores mecánicos pueden ser operados a presión positiva y a presión negativa.

los de presión negativa, también conocidos como pulmón de acero, generan una presión subatmosférica. este tipo de ventilador fue pionero en su tipo y consiste en una cámara o cilindro sellado herméticamente, en cuyo interior se introduce al paciente hasta el cuello, de manera hermética. al quedar la vía aérea expuesta a la presión atmosférica, dentro de la cámara se genera una presión subatmosférica alrededor del tórax, con lo cual se produce un gradiente de presión suficiente para producir un flujo de aire y realizar la función de respiración.



Figura 1. Pulmón de acero

sin embargo, los ventiladores a presión negativa quedaron en desuso y fueron reemplazados por los ventiladores a presión positiva, en los que se aplica presión supraatmosférica al interior de la vía aérea para producir la expansión pulmonar.

la impulsión del aire en los ventiladores a presión positiva, generalmente es a través de mecanismos tales como el ambú, el pistón, la turbina o el compresor.

se clasifican en invasivos y no invasivos, de acuerdo al tipo de interfaz usada en la vía aérea y a la función que realiza.

si la interfaz es externa, como una mascarilla o cánula nasal, el ventilador es no invasivo y el paciente es quien realiza la acción respiratoria.

Mientras que, si se requieren elementos que se introduzcan al sistema respiratorio del paciente como un tubo endotraqueal, el ventilador es de tipo invasivo. En este caso, el paciente puede o no marcar la función respiratoria.

1.4. RESUMEN

El contenido de la tesis, se presenta a lo largo de 10 capítulos.

En el capítulo 1 se muestran los antecedentes que motivaron a realizar el proyecto, así como su objetivo.

Después, en el capítulo 2, se abordan las consideraciones para el diseño del ventilador.

En el capítulo 3, se aborda lo relativo al sistema neumático: el suministro de gases y los circuitos de ventilación.

En el capítulo 4 se muestra lo referente al sistema electrónico dividido en cuatro partes: la electrónica de control, las alarmas, la fuente de poder y el tablero de control.

El capítulo 5, presenta el ensamble del equipo.

Después, el capítulo 6 aborda el extracto del instructivo del ventilador.

Los capítulos 7 y 8 están dedicados a los resultados y conclusiones respectivamente.

En el capítulo 9 se muestran las referencias para desarrollar el trabajo y finalmente, el capítulo 10, expone un breve glosario de términos relacionados con la ventilación mecánica.

2. CONSIDERACIONES Y PARÁMETROS PARA DISEÑO

Se pretende desarrollar un ventilador que trabaje a presión positiva, que funcione de manera invasiva y no invasiva y que aplique para personas adultas e infantiles.

Además, que pueda utilizarse dentro de la Unidad de Terapia Intensiva de un hospital, pero también, que pueda utilizarse durante el transporte.

Por ser el primer prototipo de esta línea, se le nombró RESPIRATRON 1. Por lo que en adelante se le mencionará de esta manera.

Durante el diseño del Respiratron 1, destacaron tres criterios fundamentales: la seguridad, la funcionalidad y la estética y acompañaron cada una de las decisiones tomadas a lo largo de este trabajo.

Su orden es fundamental. La seguridad del ventilador es el criterio más importante, puesto que, si el equipo realiza funciones erráticas, pueden existir consecuencias importantes.

En segundo lugar, se analizó la funcionalidad, íntimamente relacionada con la ergonomía. Esto, para lograr que el equipo sea manejado adecuadamente, de manera sencilla, rápida, clara y sin confusiones.

Por último, la estética también se consideró como un elemento importante y determina su imagen y su presencia.

Para su construcción, se buscaron materiales con suficiente resistencia mecánica, elasticidad, duración y que permitan ciertas facilidades para mantenerlos limpios y para maquinarlos o moldearlos.

Además, que químicamente sean inertes o casi inertes, para evitar contaminar los gases mediante alguna reacción química entre ellos.

En la tabla 1 se mencionan los valores y parámetros más importantes para el diseño.

| MODO INVASIVO | |
|---|---|
| PARÁMETRO | VALOR |
| Frecuencia respiratoria (FR) | 3 a 30 rpm |
| Presión Positiva al Final de la Espiración (PEEP) | 3 a 20 mbar |
| Presión inspiratoria máxima ($PI_{máx}$) | 40 a 80 mbar |
| Fracción Inspirada de oxígeno (FiO_2) | 21 a 90% |
| Flujo inspiratorio | 5 a 80 lpm con alimentación de gases externa. |
| Relación I:E | 1:9 a 9:1 |
| Alimentación de gases | Externas de aire y oxígeno |
| Alimentación eléctrica | 127 VAC 12 VDC externo Batería interna |
| Duración de la batería interna | 6 horas de uso |

Tabla 1. Parámetros para diseño para modo invasivo

| MODO NO INVASIVO | |
|---|---|
| PARÁMETRO | VALOR |
| Frecuencia respiratoria (FR) | Flujo continuo |
| Presión inspiratoria | 5 a 20 mbar |
| Fracción Inspirada de oxígeno (FiO ₂) | 21 a 80% con compresor 21 a 90% alimentación de gases externa |
| Flujo inspiratorio | 5 a 16 lpm alimentado por compresor 5 a 80 lpm con alimentación de gases externa |
| Alimentación de gases | Externas de aire y oxígeno Por compresor y concentrador de oxígeno |
| Alimentación eléctrica | 127 VAC 12 VDC externo Batería interna |
| Duración de la batería interna | 6 horas de uso / Con alimentación externa. 2 horas de uso / Con alimentación interna. |

Tabla 2. Parámetros de diseño para modo no invasivo

3. SISTEMA NEUMÁTICO

3.1. SUMINISTRO DE GASES

El suministro de gases es el sistema que provee aire y oxígeno al RESPIRATRON 1, dichos gases deben poseer la calidad suficiente para la aplicación.

Fundamentalmente, el oxígeno es un gas altamente reactivo, lo tenemos en el aire en una proporción de 20.7%, en la línea de oxígeno en 100% y en el circuito ventilador paciente en cualquier valor intermedio.

Por ello, es necesario cuidar tanto el origen de los gases, como los detalles de compatibilidad física y química entre los gases, y los materiales usados.

Usualmente, el abastecimiento de aire y oxígeno proviene de cilindros cargados a alta presión, con valores alrededor de 2500 PSI (150 a 250 kg/cm²) para ambos gases. Generalmente, los cilindros son equipados con un regulador de presión ajustable, el cual recibe la presión alta del tanque, la reduce y la regula a un valor medio, usualmente entre 40 y 70 PSI.

La línea de presión media, es utilizada para llevar el suministro de gas entre el cilindro y la toma cercana al lugar del paciente, cuando estos se encuentran alejados. En este sitio, se utiliza otro regulador para reducir de presión media a baja, comúnmente, la presión baja se maneja en un valor menor a 10 PSI.

Este tipo de instalación se utiliza en los lugares donde se requieren los gases, como la Unidad de Cuidados Intensivos de los hospitales que desemboca en la toma de pared de baja presión.

Para el Respiratron 1, se requiere una presión entre 1.4 y 3 PSI en cada una de sus entradas, la de aire y la de oxígeno respectivamente.

El sistema de abastecimiento al RESPIRATRON 1, es compatible con la mayoría de las tomas de pared de un hospital y también con los cilindros de aire y oxígeno.

Por otra parte, el tipo de conexiones para cada gas, es distinto para evitar una confusión y según el código americano de colores, las mangueras de gas son COLOR AMARILLO para AIRE y COLOR VERDE para OXÍGENO.

3.2. CIRCUITOS NEUMÁTICO INTERNO Y VENTILADOR PACIENTE

El circuito neumático interno se refiere a la trayectoria que siguen las líneas neumáticas y demás elementos dentro del Respiratron 1. Del mismo modo, el circuito ventilador paciente es la línea flexible que conecta al ventilador con el paciente.

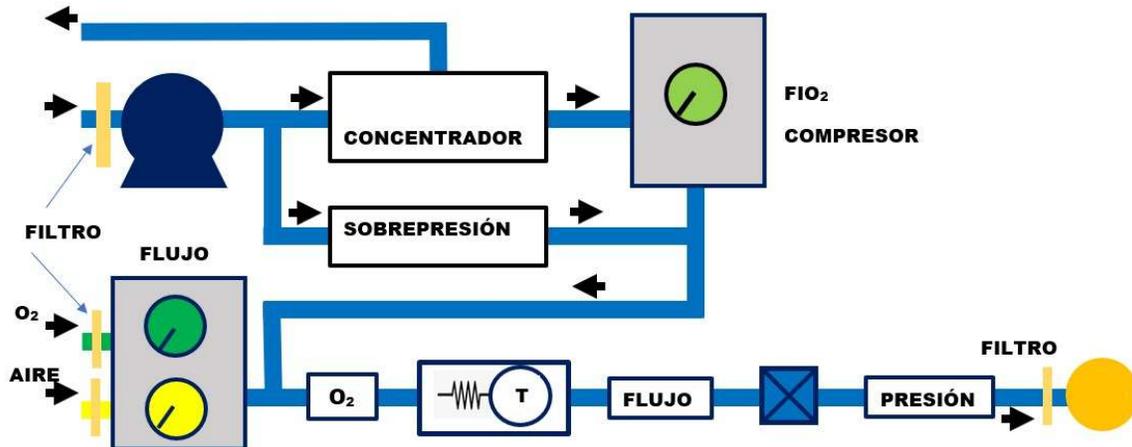


Figura 2. Diagrama del Respiratron 1 en modo no invasivo

En la figura 2 se muestra el sistema neumático en modo no invasivo. El abastecimiento de gases puede ser de dos maneras diferentes, por líneas externas provenientes de tanques o por un compresor interno.

Cuando la entrada es por líneas externas, estas deben de conectarse en las entradas correspondientes, la verde, portadora de oxígeno y la amarilla, portadora de aire. A través de filtros de entrada son conectadas a un mezclador de gas con control de flujo independiente para formar la mezcla de aire enriquecido con oxígeno, para determinar el flujo total y la FiO_2 .

En adelante, la mezcla de gas pasa a través de un sensor de oxígeno, un sensor de temperatura con su calentador, un sensor de flujo, una válvula solenoide, un sensor de presión y un filtro, para llegar al circuito ventilador paciente y finalmente, al paciente.

La manera de conectarse, es mediante una mascarilla abierta sobre nariz y boca. La exhalación sale directamente de la mascarilla.

El Respiratron 1 dispone de un método alternativo para alimentar el aire oxigenado. Si no se dispone de tanques de gas, se puede utilizar aire local filtrado e impulsado por un compresor

de aire grado médico, de diafragma, de dos cabezas y libre de aceite. Se incluye un dispositivo que separa el oxígeno y el nitrógeno del aire. Así podemos alimentar al paciente con aire enriquecido con oxígeno. El dispositivo, junto con algunas modificaciones que realizamos, permite determinar la FiO_2 y el flujo de la mezcla.

Cuando el ventilador utiliza el compresor interno, el flujo total se limita a 20 lpm, por ello y por el nivel de confiabilidad del suministro, lo utilizamos únicamente en modo no invasivo.

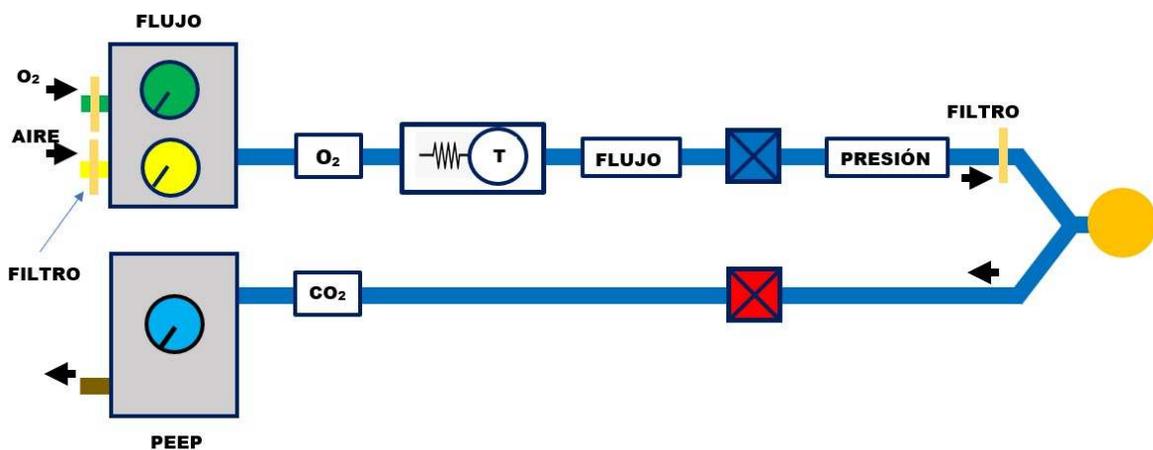


Figura 3. Diagrama del Respiratron 1 en modo invasivo

En la figura 3 se muestra el sistema neumático en modo invasivo. Aquí el suministro de gases es exclusivamente externo. Igual que en el caso del modo no invasivo, pasa por la unidad de mezclado, posteriormente a través del sensor de oxígeno, del sensor de temperatura con su calentador, luego por el sensor de flujo, por la primera válvula solenoide, por el sensor de presión y por un filtro, para llegar al circuito ventilador paciente y finalmente, al paciente.

La manera de conectarse, es mediante una cánula endotraqueal.

Por su parte, el gas de la exhalación se conduce por otra rama del circuito ventilador paciente que también se conecta al Respiratron 1, incluye una trampa para líquidos y se conecta al ventilador en la terminal correspondiente, pasa por la válvula solenoide de exhalación, por el sensor de CO₂ y, por último, la descarga se hace a través de una llave dosificadora de flujo que establece el nivel de PEEP.

La línea de descarga, se sumerge en un recipiente con una solución antiséptica.

4. SISTEMA ELECTRÓNICO

4.1. ELECTRÓNICA DE CONTROL

La ELECTRÓNICA DE CONTROL es la encargada de manejar todas las funciones del ventilador y ha sido diseñada para operar en dos modos: la ventilación no invasiva y la invasiva.

- Ventilación no invasiva.

Cuando el Respiratron 1 trabaja en este modo, se selecciona la entrada de gases externa o por compresor. La sincronización ventilador paciente no es necesaria, ya que el flujo en el circuito ventilador paciente, es constante y se ha simplificado a una sola rama, la de inspiración. En esta modalidad el equipo cierra la válvula de espiración y abre la de inspiración, y evalúa la presión, el flujo, la temperatura y la FiO_2 de la mezcla inspiratoria.

- Ventilación invasiva.

En el modo invasivo, el circuito ventilador paciente está completo en sus dos ramas. Las válvulas de inspiración y espiración operan de manera intermitente. Se evalúa la presión, el flujo, la temperatura, la FiO_2 de la mezcla inspiratoria y el nivel de CO_2 en la rama espiratoria.

Controla todas las funciones de ventilación. Define la frecuencia respiratoria, la relación I:E (Inspiración/Espiración) y las presiones de trabajo, que corresponden a la presión inspiratoria máxima (PI_{máx}) y a la presión positiva al final de la espiración (PEEP), accionando los actuadores del sistema neumático para adecuar los flujos de aire de acuerdo a los requerimientos humanos. El valor de estos parámetros lo determina el usuario.

A continuación, se muestra un diagrama de bloques de la unidad de control.

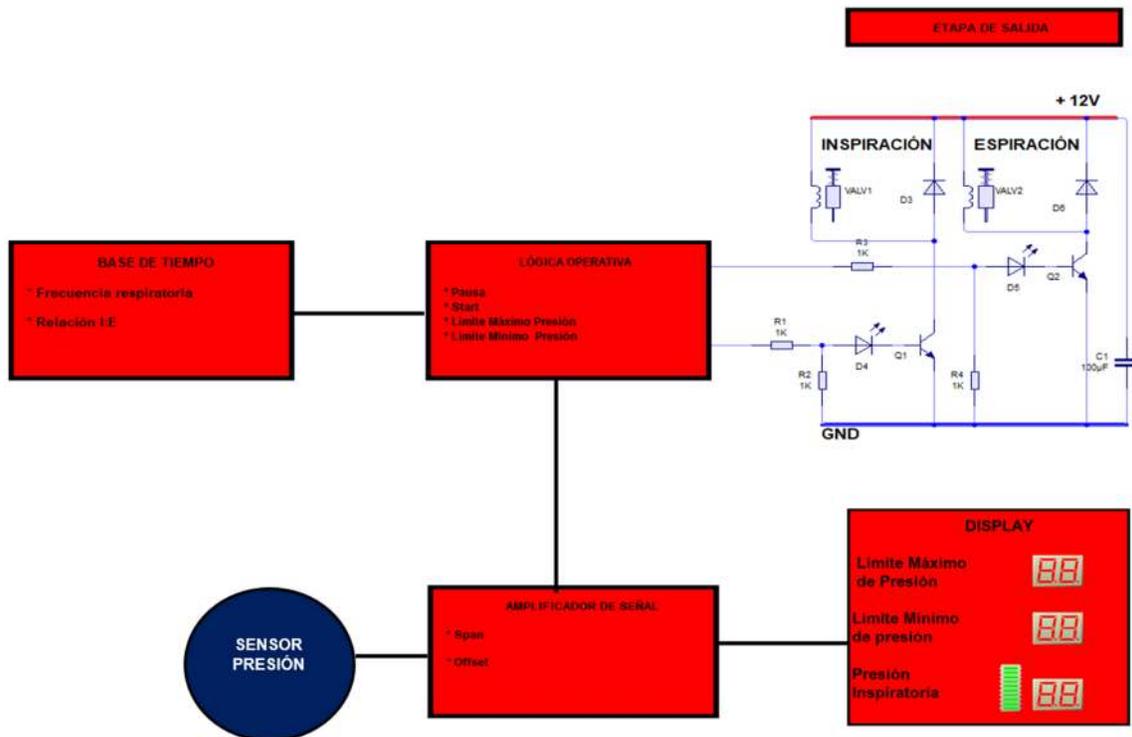


Figura 4. Diagrama de bloques de la Unidad de Control

En el diagrama, se puede reconocer en la parte superior izquierda, la base de tiempo. Ésta determina la frecuencia ventilatoria y la relación I:E. La configuración utilizada corresponde a un oscilador de buena estabilidad.

Adicionalmente, se emplearon componentes pasivas de alta calidad (capacitores y resistencias) con tolerancias del 1%.

Por otra parte, se tiene un amplificador diferencial para procesar la señal del sensor de presión y adecuarla al nivel útil para el display indicador de presión y para los detectores de límites de presión de la unidad lógica operativa.

En la Unidad Lógica Operativa, se determinan los límites de la presión máxima y mínima por el usuario, los cuales se leen en su correspondiente display, determinando con sus valores el rango dinámico de la presión inspiratoria.

Otro bloque, consiste en la etapa de salida o etapa de potencia, en donde se encuentran dos transistores con su respectivo circuito de polarización e indicador led para manejar a las electroválvulas de inspiración y espiración.

Su funcionamiento, se encuentra monitoreado por la unidad de alarmas que se describe a continuación.

4.2. ALARMAS

La electrónica de alarmas, tiene la función de vigilar que cada una de las tareas relacionadas con la respiración se realice correctamente y en caso de que se altere alguna, el equipo debe emitir un aviso.

Las alarmas que se indican en el Respiratron 1 son:

- Apnea
- Presión máxima
- Presión mínima
- Batería baja
- Alarma acústica desconectada

Estas alarmas se presentan de manera visual en el tablero de control, indicando con claridad cuál es la causa que la dispara.

Adicionalmente, existe una alarma acústica para ser escuchada a distancia. Esta alarma puede apagarse momentáneamente por un periodo de tres minutos presionando la tecla correspondiente en el panel de control y posteriormente, se reactiva por sí sola, esto solamente en caso de que el motivo de la alarma siga activo. La razón de apagar la alarma acústica, es permitirle al personal médico resolver el problema sin estar escuchándola, sin embargo, el circuito electrónico no permite apagarla de manera definitiva para evitar que accidentalmente se quede apagada.

Paralelamente, se dispone de dos puertos de alarma ubicados en la parte trasera del Respiratron 1.

El primero consiste en un puerto aislado, con salidas NA, NC, y COM. Estas líneas permiten conectarse con cualquier sistema utilizado por el hospital.

Por otra parte, un segundo puerto no aislado, presenta pines de salida: tierra, +12 V, +5 V y señal de alarma. En este puerto, se puede conectar un dispositivo de transmisión inalámbrica (por bluetooth o algún otro sistema), para enviar esta señal de alarma a un celular, tableta o cualquier otro equipo.

4.3. FUENTE DE PODER

La fuente de poder es la encargada de mantener activo al ventilador y de ésta depende que todos los circuitos se encuentren debidamente energizados. Por ello, es fundamental que el abastecimiento eléctrico al ventilador sea continuo y confiable.

La fuente diseñada, tiene tres maneras de alimentarse: por la línea de 127 VAC, por una fuente externa de 12 VDC como la de un automóvil y por su propia batería interna.

Cuando el ventilador está conectado a la línea de 127 VAC, la energía pasa por el interruptor S1A (encendido principal), pasa por fusibles y un circuito limitador de voltaje y supresor de picos. Posteriormente, llega a un filtro contra interferencia de alta frecuencia (RFI). En este punto, alimenta a dos circuitos, una fuente de 127 VAC a 12 VDC que da energía al ventilador y otra de 127 VAC a 18 VDC con un circuito para cargar automáticamente a la batería interna. Refiérase al diagrama de la figura 5.

Por otra parte, si no existe energía en la toma de 127 VAC, el ventilador se alimenta por la entrada de 12 VDC externa, se considera correcta una tensión entre 11.5 y 16 VDC. Se complementa con un circuito protector contra polaridad equivocada.

Por último, si no existe ninguna de las dos opciones anteriores de alimentación, el selector abastece al ventilador por su propia batería interna.

Posteriormente al selector de alimentación, se encuentra el interruptor S1B, para cortar el suministro de energía en DC y es la otra mitad del interruptor de encendido principal, que a su vez, alimenta al circuito de control y alarmas del Respiratron 1, el cual incluye reguladores de voltaje en su entrada.

La batería interna es un paquete que suma 24 Ah, se carga con un dispositivo de 3 A por lo que requiere hasta 8 horas para tener carga completa. Cuando el Respiratron 1 opera en modo invasivo, su consumo es de 1.3 A, al igual que en modo no invasivo alimentado por tanques. Esto implica una duración de la batería de un poco más de 18 horas.

Cuando se utiliza el compresor en el modo no invasivo, la duración se reduce a 3 horas 45 minutos.

De acuerdo con los ajustes de parámetros, podría incrementarse ligeramente el consumo de energía y en consecuencia, reducir la duración de la batería.

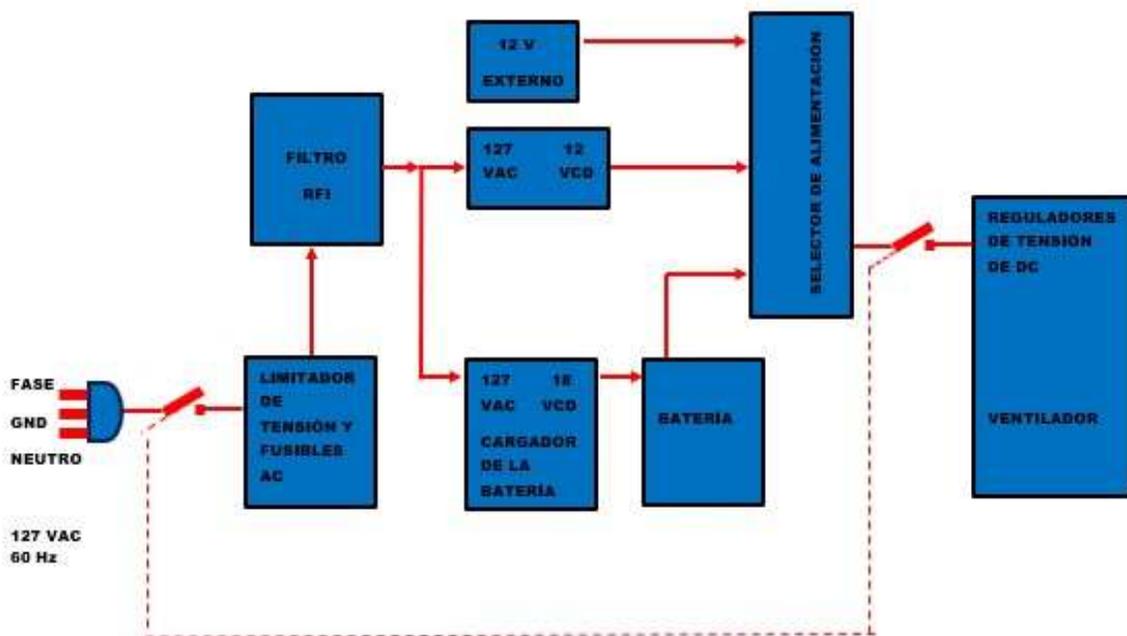


Figura 5. Diagrama de bloques de la fuente de poder

4.4. TABLERO DE CONTROL

El tablero de control en su mayoría se encuentra en la parte frontal del equipo y una parte complementaria en la cara trasera. El de la parte frontal, tiene una inclinación con relación

a la horizontal, de 45°, para mejorar la ergonomía tanto del manejo, como de visualización de los displays. En la parte alta se encuentran las pantallas de visualización y en la parte baja, los mandos de control, para permitir su manipulación sin obstruir visualmente las pantallas. Del mismo modo, se considera el tamaño de los letreros en el tablero, gráficas y demás mensajes, de un tamaño que puedan ser apreciados claramente a una distancia entre 30 y 80 cm. Así el usuario, puede localizar rápidamente y accionar los mandos correspondientes.

El tablero frontal de control, tiene en la parte superior izquierda los displays de funcionamiento general y alarmas. A su derecha, una pantalla que grafica la presión respiratoria y también, en una segunda gráfica, el ECG del paciente.

En la parte inferior del mismo plano, está la mayoría de los controles y ajustes del Respiratron 1. Por debajo de este plano y también orientado al frente, se encuentran dos conexiones neumáticas para el circuito paciente.

Por otra parte, en la cara trasera existe un tablero menor en donde se conectan los gases externos de alimentación, sus respectivas válvulas de control de flujo, la línea de descarga final, junto con una válvula de control del PEEP.

También se encuentra el interruptor principal de encendido y el interruptor de la compresora interna.

Adicionalmente, se encuentran los conectores de alimentación para 127 VAC, para 12 VDC y los dos puertos de comunicación. Así como el compartimiento de baterías.

5. ENSAMBLE

5.1. CHASIS

El chasis es la estructura que soporta cada uno de los elementos del RESPIRATRON 1 y está fabricada de aluminio con diferentes dobleces, cortes y perforaciones. Se encuentra recubierto por el gabinete externo.

La idea es tener una estructura suficientemente rígida para albergar todas las partes, pero suficientemente ligera para que el equipo pueda transportarse con facilidad.

Además, se encuentra seccionado para ordenar funcionalmente los diferentes bloques del RESPIRATRON 1, de acuerdo a los requerimientos de cada uno.

El chasis se encuentra modulado en su base, en cuatro secciones y una quinta en su parte superior. De izquierda a derecha, viendo de frente al ventilador la primera de estas secciones soporta al compresor, la siguiente sección aloja a la unidad neumática, la tercera a la fuente de poder, la cuarta a las tarjetas electrónicas de control, por último, en la parte superior se encuentra ubicada la parte principal del tablero de control, cabe aclarar que existe otra parte auxiliar del tablero de control en la cara trasera del ventilador y está formado por la cara trasera de cada módulo.

Cada una de estas secciones se describen a continuación.

5.2. COMPRESOR Y COMPLEMENTOS

La primera sección del chasis soporta al compresor y sus accesorios, y se encuentran contenidos en un espacio de 24 x 17 cm de base y 25 cm de alto. Lo ubicamos en el extremo izquierdo y es el elemento más significativo para dar las dimensiones de la pared lateral del gabinete.

El compresor es impulsado por un motor ubicado en una plataforma colocada dentro de una cámara de aluminio y se encuentra suspendido mediante unos resortes para reducir vibraciones en el chasis.

Esta cámara se encuentra internamente recubierta de un material para absorber ruido, de esta manera logramos que su operación sea prácticamente silenciosa.

Además, cuenta con un ventilador eléctrico para mantener la temperatura adecuada dentro de la cámara.

5.3. UNIDAD NEUMÁTICA

La unidad neumática se encuentra ubicada en la parte central izquierda del chasis, en su cara trasera, se incluyen las conexiones de entrada de aire y oxígeno, la de salida de gas exhalado, así como sus tres válvulas de ajuste de flujo correspondientes.

En su cara frontal, las conexiones del circuito paciente.

5.4. FUENTE DE PODER

La fuente de poder se encuentra ubicada en la parte central derecha del chasis.

En la parte trasera presenta los conectores de alimentación de 12 VDC y de 127 VAC respectivamente.

5.5. TARJETAS ELECTRÓNICAS DE CONTROL Y ALARMAS

Se refiere a la tarjeta que controla el funcionamiento del ventilador y la tarjeta de alarmas.

Se encuentran ubicadas en la parte extrema derecha del chasis.

Su acceso para instalar, revisar y calibrar, es retirando la tapa trasera del gabinete. Esta ubicación protege a las tarjetas de posibles derrames de líquidos desde el exterior y optimiza las rutas de conexión a todos los elementos relacionados.

5.6. TABLERO DE CONTROL

El Respiratron 1 dispone de dos tableros de control, el principal, ubicado en el panel frontal y el auxiliar, en la cara trasera. El primero de ellos, es un bloque rectangular formado por los indicadores de estatus, alarmas y gráficas. Además, cuenta con una zona de controles al usuario. El conjunto, se instala en la parte superior del chasis y se asoma en una ventana del gabinete.

El tablero auxiliar, realmente está formado por varias ventanas en la cara trasera del gabinete, en donde se aprecian las carátulas de conexiones, válvulas y algunos controles.

5.7. GABINETE

El gabinete del Respiratron 1, es la parte externa que recubre al chasis y está construido en PVC laminado.

Lo forman tres piezas principales de plástico. La superior-frontal, la trasera y la inferior. Complementado por dos caras laterales y algunos refuerzos internos. La trasera y la inferior, son desmontables para tener acceso a los elementos internos.

El conjunto chasis-gabinete funciona como una estructura de alta resistencia mecánica, permite alojar de manera adecuada y ordenada a todos los elementos que forman el ventilador.

5.8. EQUIPO TERMINADO

El Respiratron 1 ya ensamblado, se muestra en la figura 6.

Sus dimensiones son 70 cm de ancho, 30 cm de alto y 41 cm de fondo.



Figura 6. Equipo terminado

6. EXTRACTO DEL INSTRUCTIVO

6.1. RECONOCIMIENTO DE PARTES

Una de las condiciones importantes para el uso del Respiratron 1, es conocer perfectamente cada elemento que conforma al equipo para poder manipularlo de forma correcta, segura y eficiente.

En la figura 7, se muestra el frente del Respiratron 1 y los elementos que lo conforman, mientras que en la figura 8 se describe el panel trasero del equipo.

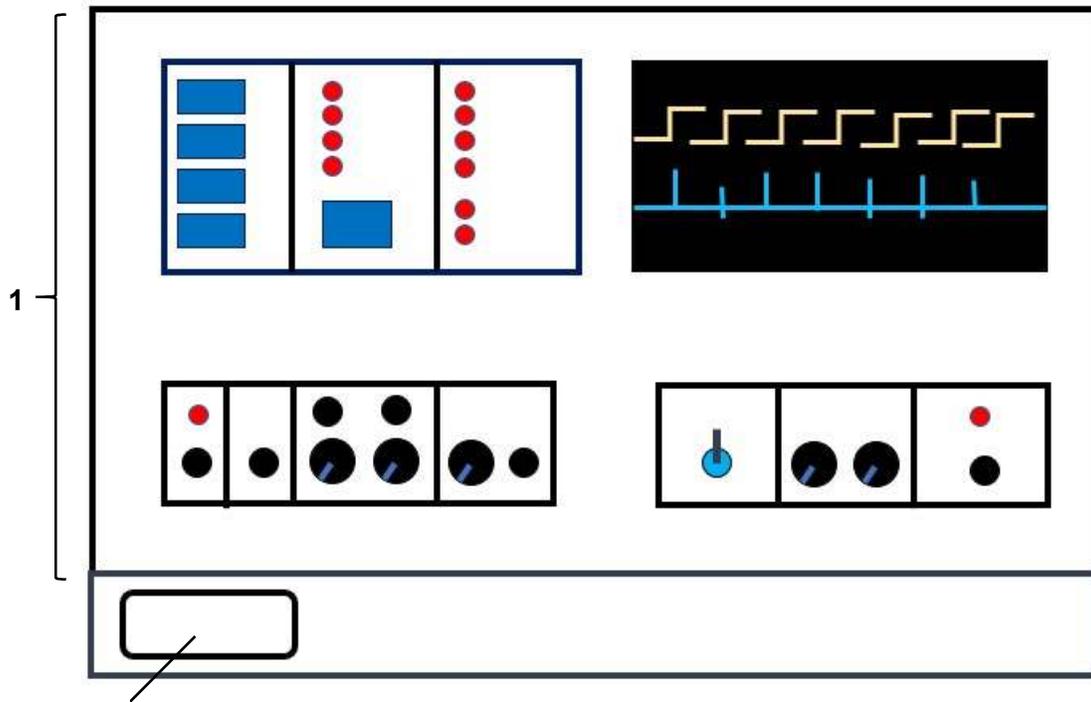


Figura 7. Frente del Respiratron 1

1. Panel de control frontal
2. Puerto circuito paciente

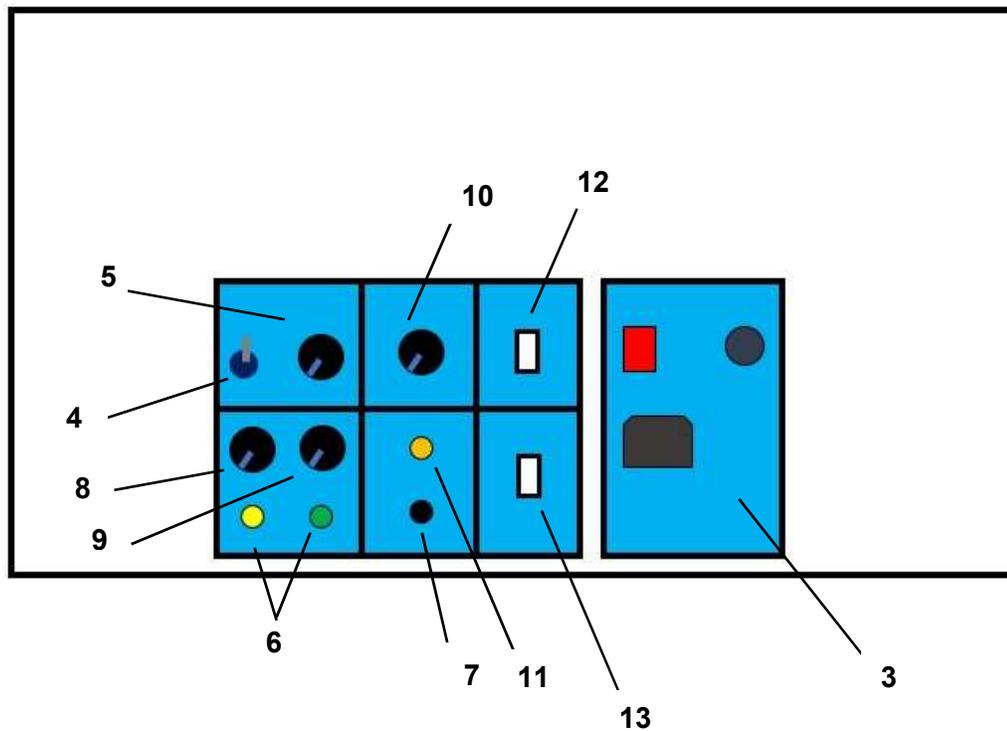


Figura 8. Panel trasero del Respiratron 1

3. Bloque de alimentación 127 VAC, 12 VDC, interruptor principal on/off
4. Interruptor del compresor interno
5. Válvula FiO₂ para el compresor interno
6. Conexiones para aire y oxígeno
7. Conexión de descarga de la espiración
8. Control de flujo para aire
9. Control de flujo para oxígeno
10. Válvula PEEP
11. Conexión de salida N₂
12. Puerto inalámbrico
13. Puerto aislado

Del mismo modo, en la figura 9 se muestra el panel frontal. Se observa en la parte superior del panel, los displays de funcionamiento y la pantalla para mostrar las gráficas de respiración y electrocardiograma simultáneamente.

La pantalla muestra las gráficas en colores diferentes y a cada una, se le puede ajustar su escala. Podemos medir su amplitud, periodo, semiperiodo de inhalación y exhalación, así como memorizar pantalla.

Por su parte, el lado izquierdo de la pantalla nos muestra la concentración de CO₂ en ppm, el porcentaje de O₂ en el aire (FiO₂), la temperatura del aire y la presión en mbar en la línea hacia el paciente, la presión máxima permitida y la mínima (PEEP).

También se indica si está alimentado por batería, por una línea externa de 12 VDC o por la línea de 127 VAC. Además, se despliega en barra y numéricamente, el nivel de carga de la batería.

Por último, existe una lista de alarmas que se manifiestan tanto visual como acústicamente.

En la parte inferior del mismo panel, del lado izquierdo, se encuentran los controles que ajustan la presión máxima y mínima, así como la temperatura del gas de inhalación. También, la tecla que desconecta la alarma acústica, su efecto, dura únicamente 3 minutos y se vuelve a activar la vigilancia.

En el lado derecho, se define el modo operativo, invasivo o no invasivo. Así como las variables de respiración: frecuencia respiratoria y la relación I:E.

Por último, existen dos teclas de pausa ubicadas una a cada lado del tablero en los extremos izquierdo y derecho respectivamente. Cuando se presionan simultáneamente, la función pausa se activa y el ventilador se detiene. Se encuentra listo para iniciar el ciclo respiratorio, sincronizándose con la respiración del paciente.

La razón de que sean dos teclas, que deban accionarse simultáneamente y que se encuentren separadas, es evitar que la pausa se dispare accidentalmente.

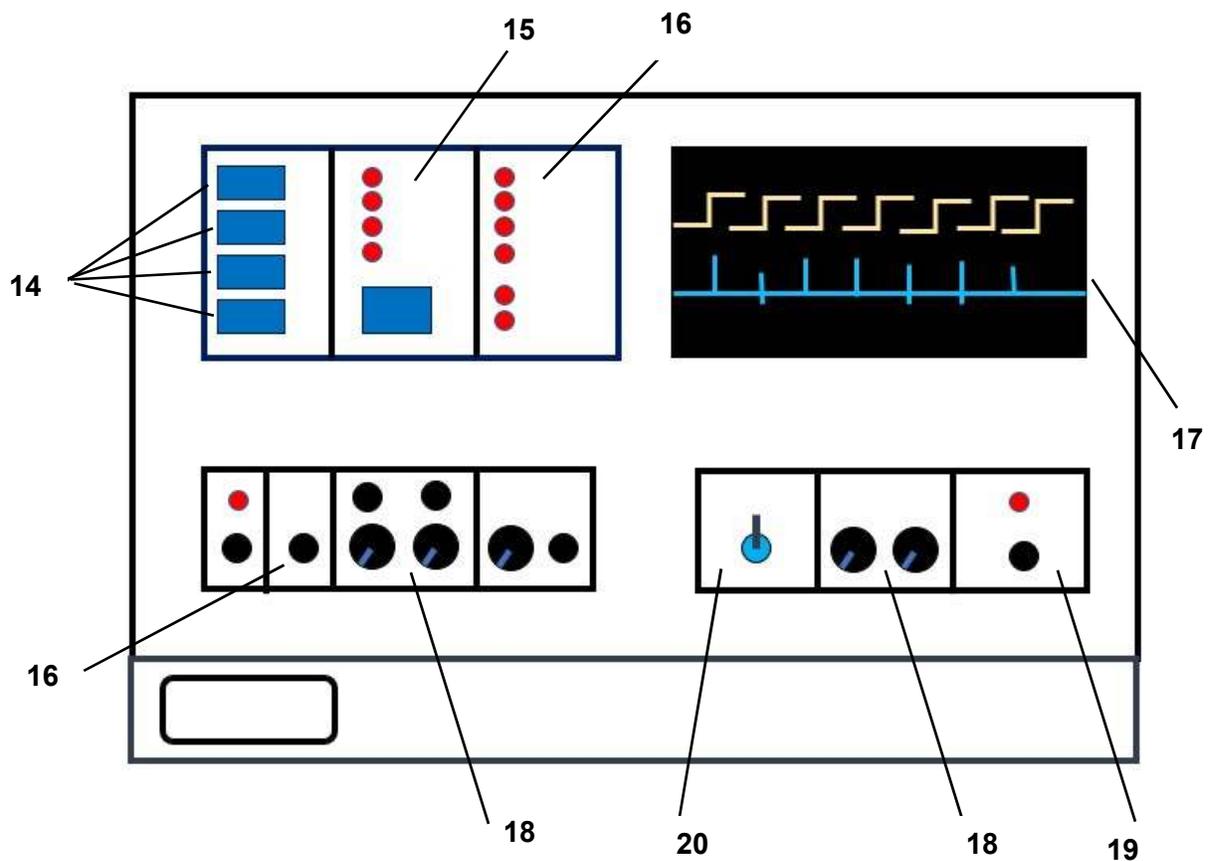


Figura 9. Panel frontal del Respiratron 1

- 14. Visualización de valores de parámetros
- 15. Alimentación eléctrica
- 16. Alarmas
- 17. Pantalla para visualizar gráficas
- 18. Ajuste de parámetros
- 19. Pausa
- 20. Modalidad

6.2. ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA

El equipo puede ser alimentado de tres maneras y automáticamente prioriza su selección. En caso de que estén disponibles las tres, se prefiere la entrada de 127 VAC, en su ausencia, la toma externa de 12 VDC y por último, la batería interna.

Cuando la alimentación es por la línea de 127 VAC, la batería se carga automáticamente y permite operar simultáneamente al Respiratron 1. Si se alimenta por la línea de 12 VDC, el ventilador funciona, pero no carga la batería.

En ausencia de ambas entradas, opera con batería. El cambio entre los tres modos de alimentación, en cualquier orden, se realiza de manera ininterrumpida.

6.3. OPERACIÓN EN MODO NO INVASIVO

1. Ubique el equipo en el lugar de uso, sobre una mesa sólida a una altura cómoda para operarlo y leer los indicadores. A una distancia cercana al paciente.
2. Limpie con una sustancia adecuada para esterilizar la parte externa del RESPIRATRON 1.
3. Conecte el equipo a la toma de 127 VAC o 12 VDC.
4. Encienda el equipo mediante el interruptor principal ubicado en el panel trasero y revise que la batería se encuentra debidamente cargada.
5. Presione la tecla para silenciar alarmas cada 2 minutos, durante el proceso de instalación.

6. Seleccione la tecla en MODO NO INVASIVO en el PANEL DE CONTROL FRONTAL.
7. Defina si el ventilador opera con tanques externos o con el compresor interno.
8. Si es por tanques externos, revise sus presiones. Retire la tapa protectora de cada línea de entrada y salida de gases. Límpielas y esterilícelas con una sustancia adecuada. Conecte la manguera amarilla a la entrada de aire y la verde, a la de oxígeno. Ajuste las presiones de servicio entre 1.4 y 3 psi.
9. Ajuste las válvulas de flujo de aire y oxígeno ubicadas en la cara trasera, para ello, observe en el panel frontal el indicador de flujo y el de FiO₂.
10. En el caso del abastecimiento sea por compresor, cierre las válvulas de flujo de aire y oxígeno. Encienda el interruptor del compresor y ajuste el nivel de FiO₂-compresor, todos ubicados en el panel trasero.
11. Defina la temperatura de los gases.
12. Conecte las líneas del circuito ventilador paciente al RESPIRATRON 1.
13. Utilice una mascarilla NIV adecuada para niño o adulto según sea el caso.
14. Conecte al paciente.
15. Mantenga vigilancia continua.

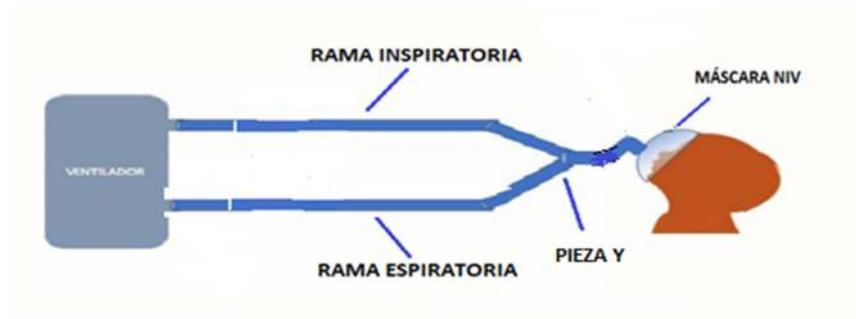


Figura 10. Conexión circuito de ventilación modo no invasivo

6.4. OPERACIÓN EN MODO INVASIVO

1. Ubique el equipo en el lugar de uso, sobre una mesa sólida a una altura cómoda para operarlo y leer los indicadores. A una distancia cercana al paciente.
2. Limpie con una sustancia adecuada para esterilizar la parte externa del RESPIRATRON 1.
3. Conecte el equipo a la toma de 127 VAC o 12 VCD.
4. Encienda el equipo mediante el interruptor principal ubicado en el panel trasero y revise que la batería se encuentra debidamente cargada.
5. Presione la tecla para silenciar alarmas cada 2 minutos, durante el proceso de instalación.
6. Seleccione la tecla en MODO INVASIVO en el PANEL DE CONTROL FRONTAL.
7. Revise que la presión disponible en los tanques sea suficiente para trabajar. Retire la tapa protectora de cada línea de entrada y salida de gases. Límpielas y esterilícelas con una sustancia adecuada. Conecte la manguera amarilla a la entrada de aire y la verde, a la de oxígeno. Con los reguladores, ajuste las presiones de servicio entre 1.4 y 3 psi.
8. Calibre la temperatura de los gases en el panel frontal, también la frecuencia respiratoria, relación I:E, $PI_{MÁX}$ y PEEP.
9. Posteriormente, ajuste los valores de flujo de aire y oxígeno, mediante las válvulas ubicadas en la cara trasera, para ello, observe en el panel frontal los indicadores de flujo y FiO_2 .
10. Conecte las líneas del circuito ventilador paciente al RESPIRATRON 1. Pero no conecte al paciente.
11. Coloque en el paciente una cánula endotraqueal para niño o adulto según sea el caso.
12. Presione simultáneamente las dos teclas de pausa, el equipo detendrá su ciclo respiratorio.
13. Conecte las líneas del circuito ventilador paciente a la cánula endotraqueal.
14. El ventilador debe iniciar el ciclo ventilatorio inmediatamente, sincronizándose con la respiración del paciente.
15. Ya con el paciente conectado, afine las variables respiratorias, revisando signos vitales.
16. Mantenga vigilancia continua.



Figura 11. Conexión del circuito de ventilación modo invasivo

6.5. INTERPRETACIÓN Y MANEJO DE ALARMAS

Las alarmas que presenta el Respiratron 1 son una parte esencial en su funcionamiento, ya que alertan oportunamente al personal médico calificado, sobre cualquier alteración o mal funcionamiento.

Estas alarmas se presentan de manera visual en el tablero de control, indicando con claridad cuál es la causa que la dispara.

Adicionalmente, existe una alarma acústica para ser escuchada a distancia. Esta alarma, puede ser silenciada presionando tecla correspondiente en el panel de control, aunque después de 3 minutos se volverá a activar en caso de que continúe el motivo que la activó.

Las alarmas pueden ser disparadas si se presentan cualquiera de las siguientes condiciones:

- Apnea
- Presión máxima
- Presión mínima
- Batería baja
- Alarma acústica desconectada

Se tiene también dos puertos de alarmas, se encuentran ubicados en la parte trasera del Respiratron 1.

El primero, para conectarse a la línea de alarma del hospital, es un puerto aislado con salidas NA, NC y COM.

El segundo puerto, es no aislado, con conexiones de tierra, +12 V, +5 V y señal de alarma. Para utilizarse con un transmisor inalámbrico (como bluetooth, o algún otro sistema).

7. RESULTADOS

Partiendo de la idea de verificar en el Respiratron 1 los valores de los parámetros planteados en el capítulo 2, así como su correcto funcionamiento, se realizaron una serie de pruebas a nivel laboratorio, apoyados en el desarrollo de equipo e instrumentos de medición.

Las pruebas a la fuente de poder, se realizaron para evaluarla ante diversas condiciones de tensión. Primero se evaluó la sobretensión en la entrada de 127 VAC. Para esta prueba, se sustituyó el ventilador por un foco como resistencia de carga a la salida de la fuente.

El circuito fue alimentado a través de un Variac, incrementando el voltaje de alterna. Al llegar a 96 VAC la fuente empezó a operar adecuadamente y en 148 VAC, se desconectó, el varistor interno limitó la tensión, provocando que se fundiera uno de los fusibles y se quedara sin energía, esto significa que si el RESPIRATRON 1 ocupase el lugar del foco, estaría alimentado siempre que el voltaje de entrada se encuentre entre 96 y 148 VAC, es decir, a 127 VAC +14% / -24%. Sin embargo, cuando la tensión de alimentación sale de los límites de +/- 10% (114.3 a 139.7 V), una alarma avisa el error en el voltaje de alimentación.

De manera similar, se realizó una prueba para la entrada de 12 VDC, encontrando que opera correctamente desde 10.2 hasta 16.5 VDC, lo que significa que es 12 VDC +38% y -15%. Cuando esta tensión de alimentación sale del rango entre 10.5 y 16.1 V, una alarma avisa el error en el voltaje de alimentación.

Se verificaron los límites de la FR, de la I/E, presiones mínimas y máximas, el ajuste de pendiente de presión de entrada y de salida y artificialmente, se provocaron cada una de las fallas de la unidad de alarmas. En todos los casos, la alarma avisó oportunamente.

El RESPIRATRON 1 es un ventilador que trabaja bajo el principio de presión positiva, con las siguientes características:

| MODO INVASIVO | | |
|---|---|--|
| PARÁMETRO | VALOR PROPUESTO | VALOR OBTENIDO |
| Frecuencia respiratoria (FR) | 3 a 30 rpm | 2.7 a 33 rpm |
| Presión Positiva al Final de la Espiración (PEEP) | 3 a 20 mbar | 1.9 a 21.4 mbar |
| Presión inspiratoria máxima (PI _{máx}) | 40 a 80 mbar | 38.9 a 98.7 mbar |
| Fracción Inspirada de oxígeno (FiO ₂) | 20.7 a 90% | 20.7 a 99% |
| Flujo inspiratorio | 5 a 80 lpm con alimentación de gases externa. | 0 a 82 lpm |
| Relación I:E | 1:9 a 9:1 | 1:9.2 a 9.2:1 (9.8 a 90.2%) |
| Alimentación eléctrica | 127 VAC 12 VDC externo Batería interna | 127 VAC 12 VDC externo Batería interna |
| Duración de la batería interna | 6 horas de uso | 18 horas |

Tabla 3. Parámetros de diseño obtenidos en modo invasivo

| MODO NO INVASIVO | | |
|---|--|---|
| PARÁMETRO | VALOR PROPUESTO | VALOR OBTENIDO |
| Presión inspiratoria | 5 a 20 mbar | 5 a 42 mbar |
| Fracción Inspirada de oxígeno (FiO ₂) | 20.7 a 76% con compresor 20.7 a 90% alimentación de gases externa | 20.7 a 81% con compresor 20.7 a 99% alimentación de gases externa |
| Flujo inspiratorio | 5 a 16 lpm alimentado por compresor 5 a 80 lpm con alimentación de gases externa | 5 a 21 lpm alimentado por compresor 0 a 82 lpm con alimentación de gases externa |
| Alimentación eléctrica | 127 VAC 12 VDC externo Batería interna | 127 VAC 12 VDC externo Batería interna |
| Duración de la batería interna | 6 horas de uso / Alimentado por tanques 2 horas de uso / Alimentado por compresor | Alimentado por tanques: 18 horas Alimentado por compresor: 3 horas 45 minutos |

Tabla 4. Parámetros de diseño obtenidos en modo invasivo

A continuación, se muestran algunos de los equipos y accesorios desarrollados para complementar al Respiratron 1.

El sensor de concentración de CO_2 y el de O_2 , en la foto, midiendo cada uno el nivel del aire, ambos se diseñaron para incluirlos dentro del Respiratron 1.

También se ve un simulador mecánico de pulmón que ayudó a realizar algunas de las pruebas de desempeño.



Figura 12. Sensor de CO_2 midiendo la concentración en el aire en ppm



Figura 13. Sensor de O₂ midiendo la concentración en el aire en %

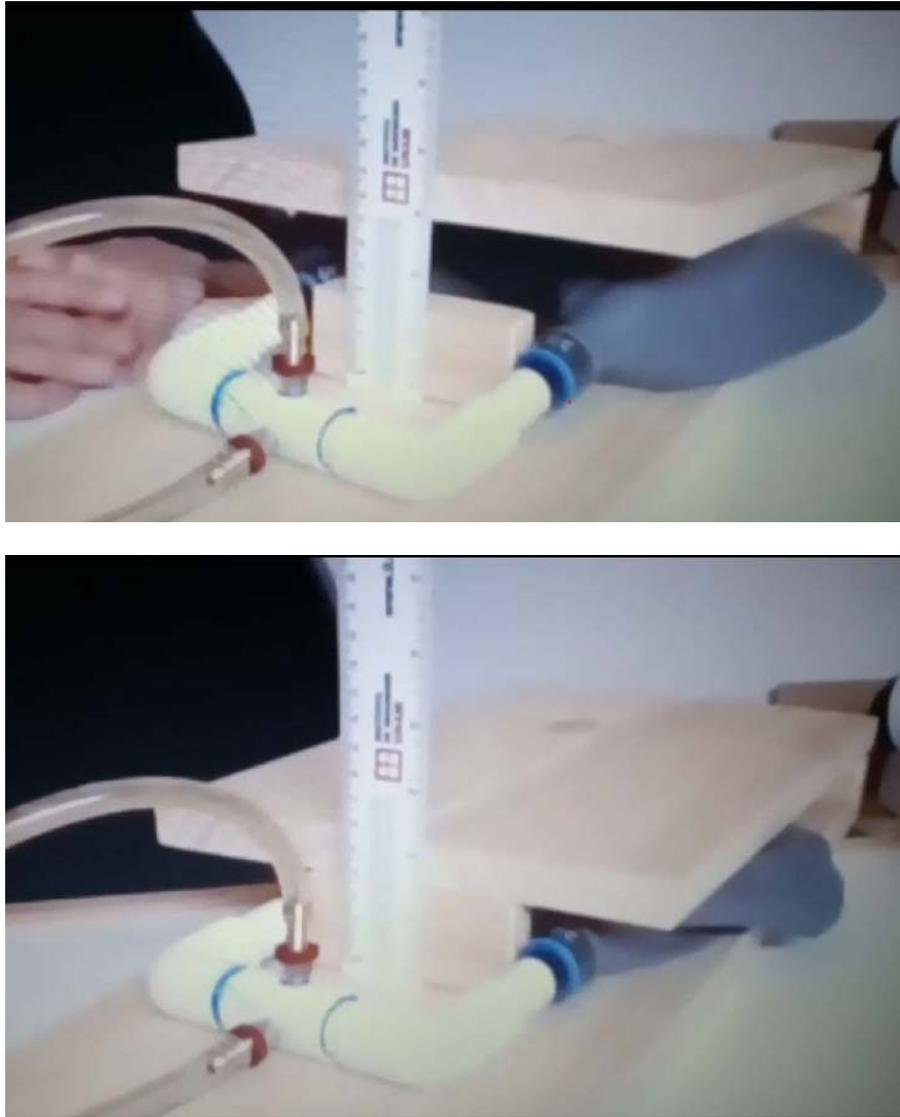


Figura 14. Simulador mecánico de pulmón para apoyar en las pruebas de desempeño

8. CONCLUSIONES

- Hemos aprendido a hacer un ventilador electromecánico que, al momento, está completo y funcionando correctamente. Sin embargo, si continuamos trabajando en el tema, seguramente en unos años más, lograríamos un diseño superior. Mientras más tiempo le dediquemos, siempre aprenderemos y estaremos en posibilidad de perfeccionarlo.
- Se puede decir que este proyecto ha sido exitoso y que además, dio pie para lograr otros desarrollos que inicialmente no estaban contemplados.
- Este proyecto deja las bases y la experiencia para el desarrollo y organización de nuevos proyectos afines.
- Se observó que utilizando electrónica con elementos discretos y de baja integración, se puede lograr un resultado funcional y confiable y además, bajo las circunstancias en que se trabajó, con gran dificultad para adquirir componentes, se logró resolver y agilizar la etapa inicial de diseño.
- Conocer las directrices para desarrollar este proyecto, me permitió ampliar mis horizontes en el campo del diseño. Aprendí que un diseño se debe realizar de manera integral, en donde se priorice la seguridad, sobre la funcionalidad y se complemente con la estética. Conceptos que fueron claramente aplicados en este desarrollo.
- De acuerdo con las tablas 3 y 4, los valores obtenidos en ella, son suficientes para proporcionar apoyo respiratorio a una persona.

9. REFERENCIAS

- Malvino, A.P. (1983). *Principios de electrónica*. México: Mc Graw Hill
- Coughlin, R.F. & Driscoll, F.F. (1982) *Circuitos integrados lineales y amplificadores operacionales*. México: Prentice Hall.
- Floyd, T.L. (2008). *Dispositivos electrónicos*. México: Pearson Educación.
- Boylestad, R.L & Nashelsky, L. (2009). *Electrónica: Teoría de dispositivos y circuitos*. México: Pearson Educación.
- Mims, F. M. (1983). *Getting Started in Electronics*. United States of America: Radio Shack.
- Mims, F. M. (1982). *Enginner's Notebook: Integrated circuit applications*. United States of America: Radio Shack.
- Floyd. T.L. (2006). *Fundamentos de sistemas digitales*. Madrid: Pearson Educación.
- Sedra.A. S. *Circuitos microelectrónicos* (1999). México: Oxford University Press.
- Pallás, R. (2018). *Sensores y acondicionadores de señal*. México: Alfaomega.
- Bueche, F.J. & Hetch, E. (2007). *Física general Schaum*. México: Mc Graw Hill.
- Kaufman, M. & Seidman, A. H. (1982). *Manual para ingenieros y técnicos en electrónica*. México: Mc Graw Hill.
- Poor, H. (2018). *Basics of mechanical ventilation*. New York: Springer.
- Hasan, A. (2010). *Understanding mechanical ventilation*. India: Springer.
- Ramos, L.A. & Benito, S. (2012). *Fundamentos de ventilación mecánica*. Barcelona: Marge Medica Books.
- Secretaría de Salud. (2006). *Guía tecnológica No 26: Ventilador Invasivo (GMDN 15613)*.

10. GLOSARIO

CAPACIDAD PULMONAR TOTAL: Es el volumen máximo que puede ingresar a los pulmones tras un esfuerzo inspiratorio máximo (aproximadamente 5,800 ml). Se obtiene sumando la capacidad vital más el volumen residual.

ESPIRACIÓN: Fase pasiva de la respiración contraria a la inspiración en la cual se saca el aire que fue introducido al pulmón.

FLUJO INSPIRATORIO: Velocidad con la que se inyecta el volumen tidal del ventilador a los pulmones. Es el volumen circulante (l) dividido entre el tiempo inspiratorio (min) y determina la duración de la inspiración y en conjunto con la frecuencia respiratoria establecen la relación I/E.

FRACCIÓN INSPIRADA DE OXÍGENO (FiO₂): Concentración o proporción de oxígeno en la mezcla de aire inspirado.

FRECUENCIA RESPIRATORIA (FR): Número de veces que respira una persona en un minuto, depende de la edad y patología.

INSPIRACIÓN: Fase de la respiración durante la cual se introduce aire a los pulmones.

PRESIÓN ESPIRATORIA MÁXIMA (PE_{máx}): Es la presión máxima producida durante la espiración.

PRESIÓN INSPIRATORIA MÁXIMA ($PI_{m\acute{a}x}$): Es la máxima presión alcanzada en vías aéreas al finalizar la fase inspiratoria.

PRESIÓN POSITIVA AL FINAL DE LA ESPIRACIÓN (PEEP): Corresponde a la presión (cmH₂O) que permanece en los alveolos al final de la espiración, evitando la caída a cero de la presión de la vía aérea al final de la fase espiratoria

RELACIÓN DE INSPIRACIÓN-ESPIRACIÓN (I:E): Es el periodo de tiempo desde el inicio de una respiración hasta el comienzo de la siguiente, medido en segundos. La relación entre la duración de la inspiración y la espiración (I:E) está determinada por el tiempo inspiratorio (flujo inspiratorio, pausa inspiratoria, volumen circulante) y la FR.

TIEMPO INSPIRATORIO (T_i): Determina la duración de la inspiración y en conjunto con la frecuencia respiratoria establecen la relación I:E.

VOLUMEN CORRIENTE (V_c): Es la cantidad de aire que ingresa a los pulmones en cada inspiración o que sale en cada espiración.

VOLUMEN MINUTO: Es el volumen de aire que se suministra por minuto o bien el producto de la frecuencia respiratoria por el volumen corriente.