

ALGORITMOS PARA EL CONTROL DE PARÁMETROS VENTILATORIOS EN EQUIPOS MECÁNICOS EMERGENTES

Miño Carlos¹., Cuaycal Andrés²., Quiroga Josue³., Gómez Karen⁴., Portilla Karla⁵
calolomino@gmail.com¹, andres.cuaycal@epn.edu.ec², josueesteban_12@hotmail.com³,
karen.gomez@ingbiotec.com⁴, karlapaola_portilla@yahoo.es⁵
<https://orcid.org/0000-0001-6664-2215>¹, <https://orcid.org/0000-0002-6425-9930>², <https://orcid.org/0000-0001-6819-56743>³, <https://orcid.org/0000-0003-0824-48624>⁴, <https://orcid.org/0000-0002-3069-42565>⁵.

¹Universidad Tecnológica Israel, Ingeniería Electrónica Digital y Telecomunicaciones

^{2,5}Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

³Universidad Politécnica Salesiana, Facultad de Ingeniería Electrónica

⁴Universidad Manuela Beltrán, Facultad de Ingeniería Biomédica.

Recibido (12/05/20), Aceptado (22/05/20)

Resumen: En este trabajo se presentan algoritmos para el control de parámetros requeridos en equipos de ventilación mecánica, considerando la emergencia sanitaria ocasionada por COVID-19. Estos algoritmos permiten el control de variables como el pico de presión inspiratoria (PIP), Presión Positiva al Final de la Espiración (PEEP), Frecuencia Respiratoria (FR), Tiempo Inspiratorio (Ti), Pausa Inspiratoria (Pause ins), Sensibilidad de Disparo (Trigger), Apnea en Modo Espontáneo (Apnea). El conjunto de estos parámetros ventilatorios se han implementación de un equipo de carácter emergente que permite asistir a pacientes con deficiencia respiratoria aguda.

Palabras Clave: Ventilador mecánico, Presión Positiva al Final de la Espiración (PEEP), Presión límite (PIP), COVID-19.

VENTILATORY CONTROL ALGORITHMS IN EMERGING MECHANICAL EQUIPMENT

Abstract: This work presents algorithms for the control of parameters required in mechanical ventilation equipment, considering the health emergency caused by COVID-19. These algorithms allow the control of variables such as Peak inspiratory pressure (PIP), Positive end-expiratory pressure (PEEP), Respiratory Frequency (FR), Inspiring Time (Ti), Inspiring pause (Pause ins), Trigger Sensitivity, Apnea in Spontaneous Mode (Apnea). All these ventilatory parameters have been implemented by an emergent team that allows assisting patients with acute respiratory deficiency.

Keywords: Mechanical Ventilator, Positive end-expiratory pressure (PEEP), Peak inspiratory pressure (PIP), COVID-19.

I. INTRODUCCIÓN

Durante el proceso de soporte vital por ventilación mecánica, es necesario el control de ciertos parámetros que garanticen el correcto funcionamiento de estos equipos. En el diseño de ventiladores de carácter emergente, se deben desarrollar algoritmos que permitan configurar el trabajo del equipo de acuerdo al criterio profesional. Estos parámetros son descritos a continuación.

A. Ventilador Mecánico

Un ventilador pulmonar artificial es un equipo médico diseñado para forzar una mezcla de gases (oxígeno y aire comprimido seco) en los pulmones con el fin de saturar la sangre con oxígeno y eliminar el dióxido de carbono de los pulmones.

El ventilador se puede usar tanto para la invasión (a través de un tubo endotraqueal insertado en las vías respiratorias del paciente o a través de la traqueotomía) como para la ventilación no invasiva de los pulmones, a través de una máscara. Los ventiladores modernos son equipos médicos de alta tecnología los cuales proporcionan soporte respiratorio para el paciente tanto en volumen como en presión. [1,2].

B. Parámetros de control ventilatorio

Los parámetros comunes a todos los modos de operación del ventilador son: Frecuencia respiratoria (FR), Presión positiva al final de la espiración (PEEP) [3], Presión inspiratoria máxima (PIP), Tiempo inspiratorio (Ti), Relación inspiración/espiración (I/E), Pausa inspiratoria, Sensibilidad de disparo (Trigger), Volumen Corriente (VC).

La Frecuencia respiratoria (FR), es la cantidad de respiraciones por minuto o, más formalmente, la cantidad de movimientos indicativos de inspiración y espiración por unidad de tiempo. En la práctica, la frecuencia respiratoria se determina, contando la cantidad de veces que el cofre sube o baja por minuto. El objetivo de medir la frecuencia respiratoria es determinar si las respiraciones son normales, anormalmente rápidas (taquipnea), anormalmente lentas (bradipnea) o inexistentes (apnea) [4].

La Presión positiva al final de la espiración (PEEP), indica la presión residual en el sistema respiratorio luego de la espiración, evitando crear un vacío en el mismo y prepararlo para la siguiente inspiración. Para mantenerla en el paciente, se usa una válvula que crea resistencia con umbral en la rama espiratoria del circuito. Esta resistencia permite la salida de gas sólo cuando éste supera una presión prefijada impidiendo que la presión en vías aéreas llegue a cero, su función es mejorar la oxigenación [5,6]. Está indicada en el Síndrome de

Distress Respiratorio del Adulto (SDRA) y en el Edema Agudo Pulmonar (EAP) Cardiogénico. Como desventajas de la aplicación de esta presión, se disminuye el gasto cardíaco, lo que puede producir sobredistensión y barotrauma. [2]

Presión inspiratoria máxima (PIP), es el nivel más alto de presión aplicado a los pulmones durante la inhalación [1]. En ventilación mecánica, el número refleja una presión positiva en centímetros de presión de agua (cmH₂O). En la respiración normal, a veces puede denominarse presión máxima inspiratoria (IPO), que es un valor negativo [7].

La presión inspiratoria máxima aumenta con cualquier resistencia de la vía aérea [8]. Los factores que pueden aumentar la PIP, son el aumento de las secreciones, el broncoespasmo, la mordida en el tubo de ventilación y la disminución de la distensibilidad pulmonar. La PIP nunca debe ser crónicamente superior a 40 (cmH₂O) a menos que el paciente tenga síndrome de dificultad respiratoria aguda [9,10].

Tiempo inspiratorio (Ti) es el tiempo a lo largo del cual hay un flujo inspiratorio hacia los pulmones. En este lapso se genera presión efectiva. Por lo general debe tener una relación con el tiempo espiratorio (relación I:E).

Relación inspiración/espiración (I/E), Es la fracción de tiempo que se dedica a la inspiración y la espiración en cada ciclo respiratorio. Habitualmente se utiliza una relación I/E de 1/2 a 1/3. La programación de la relación I/E es muy diferente según el modelo de respirador [11], [12]. En unos se programa la FR y la relación I/E; en otros, el Ti y el espiratorio en segundos; en otros, la FR y el porcentaje de Ti y de Te en porcentaje, y en otros, la FR y el Ti en segundos.

El Tiempo posterior al tiempo inspiratorio se denomina Pausa inspiratoria, en el cual ocurre un cierre de las válvulas tanto inspiratoria como espiratoria del ventilador mecánico [13], produciendo de esta manera que el volumen inspiratorio se mantenga por un lapso de tiempo en los pulmones [14].

La Sensibilidad de disparo o Gatillaje (Trigger) corresponde al esfuerzo umbral que debe hacer el paciente para que el ventilador entregue un período ventilatorio (en este caso una respiración asistida). Este valor umbral es lo que se conoce como sensibilidad. Según el mecanismo de gatillaje, los ventiladores (o sus modalidades) pueden ser controlados por Flujo o presión de acuerdo al requerimiento clínico. [16],[17]

Volumen corriente (VC), Es la cantidad de gas que el respirador manda al paciente en cada respiración. Se programa en las modalidades de volumen y en modalidades de doble control. Lo habitual es programar un VC

de 7–10ml/ kg (excepto en recién nacidos y pacientes con enfermedad pulmonar hipoxémica, en que se programan volúmenes menores). Hay que tener en cuenta que algunos respiradores compensan automáticamente el volumen de las tubuladuras (volumen de compresión) y otros no, por lo que, con el mismo volumen programado, el volumen efectivo puede ser diferente.

Modo de ventilación controlada por presión (VCP) es una modalidad común tanto en adultos como en pediatría. Normalmente está disponible tanto en ventilación obligatoria continua con control de presión (PC-CMV) como en ventilación obligatoria intermitente con control de presión (PC-IMV), que también es una característica de otros modos de uso común. Un profesional clínico establecerá la presión inspiratoria máxima para ayudar en la distensión de los alvéolos. Sin embargo, el volumen administrado puede variar debido a la capacidad respiratoria intrínseca del paciente, el cumplimiento torácico, la resistencia de las vías respiratorias e incluso otros ajustes del ventilador, como la relación I:E y el tiempo de elevación.[1].

II.DESARROLLO

Basado en criterios sobre el manejo de equipos de ventilación mecánica, y considerando los criterios del apartado anterior, se desarrollaron e implementaron los algoritmos que se presentan a continuación y que corresponden al desarrollo del ventilador “SURKAN”, de diseño y fabricación ecuatoriana.

A continuación, se presentan los algoritmos utilizados para el control de los parámetros de ventilación.

La PIP que se proporciona hacia los pulmones debe ser suficiente para expandirlos sin ocasionar daños al tejido pulmonar y es controlada por el algoritmo de la Figura 1. En cuyo proceso, se inicia leyendo el estado del ciclo, cuyo valor de 1, indica inspiración y 0, espiración. La presión sensada hace referencia a la presión obtenida del sensor de inspiración ubicado en la línea de entrada de aire al paciente. Esta presión es utilizada en conjunto con la presión configurada para el cálculo del error que ingresa al controlador PID que regula la apertura y cierre de la válvula de inspiración.

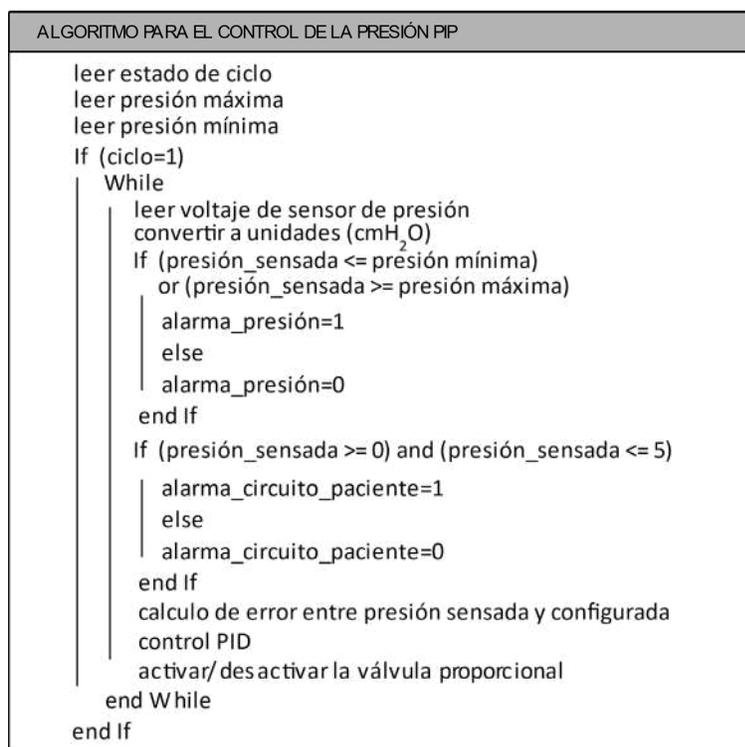


Figura 1. Algoritmo de control de la presión PIP

La PEEP es la encargada de mantener una presión residual que se en los pulmones luego del proceso de espiración. En la Figura 2 se puede visualizar el algoritmo empleado para controlar la PEEP. Se inicia leyendo el ciclo cuyo valor es 0 para la espiración. A continua-

ción, se lee continuamente la presión del pulmón la espiración y en el momento en que se alcance la presión PEEP, se cierra la válvula de espiración lo que permite mantener una presión residual en el pulmón.

```

ALGORITMO PARA EL CONTROL DE LA PRESIÓN PEEP

leer estado de ciclo
If (ciclo=0)
  While
    leer voltaje de sensor de presión
    convertir a unidades (cmH2O)
    comprar entre presión sensada y configurada
    If (presión_sensada <= presión configurada)
      cerrar válvula espiratoria
    end If
  end While
end If

```

Figura 2. Algoritmo para el control de la presión PEEP

Se consideró la FR, solamente para el cálculo de los tiempos de inhalación, pausa inspiratoria y espiración en cada ciclo, considerando la actualización de estos valores sin el uso de un bucle. En la Figura 3 se puede visualizar el algoritmo empleado para identificar la FR y los cálculos correspondientes.

Así pues, se divide la frecuencia para 60 obteniendo el tiempo completo en segundos en la cual debe eje-

cutarse un ciclo inhalatorio-espiratorio. Posteriormente, restamos dicho resultado del tiempo inhalatorio que es ingresado por el usuario para conseguir el tiempo espiratorio.

Adicionalmente el usuario puede configurar una pausa inspiratoria en cada ciclo, si es así, esta pausa será calculada y restada del tiempo inspiratorio igualmente configurado.

```

ALGORITMO PARA EL CONTROL DE LA FRECUENCIA RESPIRATORIA

leer la frecuencia respiratoria
leer el tiempo inspiratorio
leer pausa inspiratoria
tiempo ciclo=frecuencia respiratoria/60
tiempo espiratorio=tiempo ciclo - tiempo inspiratorio
If (pausa inspiratoria > 0)
  tiempo espiratorio= tiempo inspiratorio - pausa inspiratoria
end If

```

Figura 3. Algoritmo para el control de la Frecuencia Respiratoria, tiempo inspiratorio y Pausa inspiratoria

El tiempo T_i y la pausa inspiratoria, son parámetros dependientes de la frecuencia respiratoria configurada a través de la interfaz con el usuario. En la Figura 3 se puede visualizar el algoritmo empleado para identificar el tiempo inspiratorio y la pausa inspiratoria.

Para el control del (Trigger) se utiliza el algoritmo mostrado en la Figura 4 y es sensible al esfuerzo del paciente para respirar y según el cual, el equipo le asiste iniciando el ciclo inspiratorio. El algoritmo comienza

con la lectura del ciclo con valor de 0 para la espiración, posteriormente, realiza la lectura continua de la presión del pulmón y si ésta es menor al valor configurado de Trigger, se inicia el ciclo de inspiración. Además, se configura una variable que tome en cuenta la existencia de apnea, y se inicia un contador de tiempo. Si el paciente deja de respirar por su propia cuenta se producirá una alarma.

```

ALGORITMO PARA ACTIVAR EL DISPARO (TRIGGER)

leer estado de ciclo
leer trigger
leer apnea
If (ciclo=0)
  leer voltaje de sensor de presión
  convertir a unidades (cmH2O)
  comparar presión_sensada con presión_trigger
  If (presión_sensada <= presión_trigger)
    detener ciclo de espiración
    iniciar ciclo inspiratorio
    apnea = 1
    alarma_paciente_respirando=1
    contador de segundos=0
  else
    contador de segundos
    If (contador=apnea)
      alarma_paciemnte_respirando=0
      apnea=0
    end If
  end If
end If
end If

```

Figura 4. Algoritmo para activar el disparo Trigger.

III.METODOLOGÍA

Para el desarrollo inicialmente se desplegó la lógica de programación por cada uno de los procesos a controlar por separado [18]. Se empezó con el control de las válvulas de apertura y cierre según los tiempos de inspiración, pausa inspiratoria y frecuencia respiratoria, obteniendo el tiempo de espiración mediante cálculos.

Para el acondicionamiento de los sensores usados para este fin se tuvo en cuenta; uno para presión neta a la inspiración, dos sensores que entregan un diferencial de presión los cuales permiten la estimación del valor de flujo inspiratorio y espiratorio, finalmente un sensor de nivel de oxígeno FiO₂. Se utilizó un convertidor análogo digital para obtener sus valores en voltaje, que luego son transformados a valores de presión, flujo o niveles de oxígeno respectivamente.

Se inició el control, empezando con el valor de presión obtenida y por medio de un control PID [19] para controlar la PIP. Adicionalmente se configuró el parámetro PEEP y por comparación con el valor del sensor, se controló dicho valor en el equipo. De similar manera, el trigger o sensibilidad de disparo, se configuró de tal manera que al detectar un esfuerzo de respiración por parte del paciente, éste, genera una presión negativa que es detectada por el sensor de presión y es posible iniciar, dependiendo el nivel de esta sensibilidad, un nuevo ciclo respiratorio comandado por el paciente.

clo respiratorio comandado por el paciente.

Una vez que se ha controlado de manera independiente cada uno de los parámetros de ventilación requeridos, se integró todo en un solo código a ejecutarse. Manejando procesos independientes pero que se comunican entre sí para un control completo de los parámetros en el equipo y evitar retardos en operación.

El desarrollo realizado tomó en cuenta el criterio de expertos en el uso de las alarmas, las mismas que se incorporaron dependiendo de los valores obtenidos por cada sensor y estos, no se encuentran en el rango especificado, activan alarmas de carácter visible y sonora en el equipo. Las alarmas incorporadas son por presión alta y baja, desconexión del circuito paciente, cuando el paciente intenta realizar respiraciones espontáneas y niveles críticos de FiO₂.

IV.RESULTADOS

Los algoritmos de control mostrados en la Sección III se desarrollaron tomando en cuenta la facilidad de implementación en una plataforma embebida y la interfaz del usuario. De acuerdo a consideraciones propias de la ventilación mecánica controlada por presión y con recomendación de médicos se eligieron y probaron los rangos de los parámetros de control. Los algoritmos propuestos son fácilmente implementables en una pla-

taforma embebida y se comprobó su eficiencia en un ventilador mecánico emergente mostrando resultados satisfactorios tomado en cuenta las pruebas realizadas en pulmones artificiales y en simuladores humanos de alta fidelidad. A continuación se muestran los parámetros de ventilación con sus respectivos rangos de trabajo.

El algoritmo presentado en la Figura 1 permitió configurar la PIP en un rango de 5 hasta 40 cmH₂O. con ayuda del algoritmo de la figura 2 se configuró la PEEP en un rango de 5 hasta 25 cmH₂O.

El algoritmo mostrado en la Figura 3 permite configurar la FR en un rango de 5 hasta 40 rpm, el tiempo inspiratorio en un rango es de 0.1 hasta 3 segundos, mientras que la pausa inspiratoria variaría entre 25% hasta 75 %.

EL control de activación del disparo Trigger, se logró con el algoritmo de la figura 4, actuando cuando se determina en un rango de -0.5 hasta -2.5 cmH₂O. Se tomó en cuenta una presión negativa ya que ésta se da al instante que el paciente realiza un esfuerzo para la inspiración.

Los algoritmos de control mencionados a lo largo del documento fueron probados en el ventilador mecánico emergente mostrado en la Figura 5. Este ventilador cuenta con los componentes electrónicos, mecánicos y neumáticos para la correcta implementación de los algoritmos mostrados en el presente trabajo.



Figura 5. Ventilador mecánico emergente “SUR-KAN”

V.CONCLUSIONES

Los algoritmos descritos en el presente trabajo muestran un buen desempeño en el control de las variables dentro de los rangos descritos con anterioridad y logrando un adecuado control por presión del ventilador.

El uso de un controlador PID, para alcanzar la PIP solicitada por el usuario, permite seguir la referencia en un tiempo menor a se ha utilizado un controlador PID permitiendo alcanzar el parámetro de presión a un valor adecuado de acuerdo al tiempo de inspiración seleccionado.

Los parámetros de PEEP, FR, Ti y Trigger, al ser controlados en procesos separados, permiten realizar el modo de ventilación mecánica asistido/controlado por presión. La inclusión de los sensores mencionados a más de ellos, sirven de base para futuras implementaciones de control por volumen que será implementado en trabajos futuros.

REFERENCIAS

- [1]V. García, A. Sandoval., C. Días., C. Salgado., " Ventilación mecánica invasiva en EPOC y asma Invasi- ve mechanical ventilation in COPD and asthma.", Researchgate, Enero 2017.
- [2]F. Gutierrez, "Ventilación mecánica", Acta Médica Peruana, vol. 28, no. 2, Junio 2011.
- [3]M. Sánchez, M. Quintana, D. Palacios, V. Hortiguela, C. Schulk, J. Garcia, A. Canabal, M.J. Pérez, A. Velasco, M.A. Arrense, "Relación entre el gradiente alveolo-arterial de oxígeno y la PaO₂/FiO₂ introduciendo la PEEP en el modelo.", Medicina Intensiva, vol. 36, no. 5, Junio- Julio 2012.
- [4]JJ.Marini, AP. Wheeler. "Respiratory monitoring. Critical" Care Medicine. The Essentials., 2010.
- [5]C. M. Reina, "Ventilación mecánica controlada y asistida y controlada.", Science Direct, vol. 59, pp. 82-85, 2003.
- [6]P. Jouviet, C. Farges, G. Hatzakis, A. Monir, F. Lesage, L. Dupic, "Weaning children from mechanical ventilation with a computer-driven system (closed-loop protocol): a pilot study." *Pediatr Crit Care Med.*, pp. 425-432, 2007.
- [7]A. Güldner, T. Kiss, A. Serpa Neto, SN Hemmes, JCanet, Spieth PM, "Intraoperative protective mechanical ventilation for prevention of postoperative pulmonary complications: a comprehensive review of the role of tidal volume, positive end-expiratory pressure, and lung recruitment maneuvers." *Anesthesiology.* 2015.
- [8]J. Shults, J. Martsma, S. Slutsky, O. Gajic. "What tidal volumes should be used in patients without acute lung Injury?.", ASA Publications: *Anesthesiology*, vol.106, 2007.
- [9]A. Carrillo, J. Lopez, "Parameters of mechanical ventilation.", National Library of medicine, Julio 2003.
- [10]F. Aranda, J. Aliste, F. Altermatt, J.P. Álvarez, F. Bernucci, "Recomendaciones para el manejo de pacientes con COVID-19 con indicación terapéutica de venti-

lación mecánica que eventualmente son conectados a máquinas de anestesia.”, Revista Chilena de Anestesia, vol.49, no.3, 2020.

[11]Grace K, “The Ventilador: selection of mechanical ventilators.” Critical Care Clinics, Vol. 14, no. 4, Octubre 1988.

[12]J.A. Farias, I. Alía, A. Retta, F. Olazarri, A. Fernández, A. Esteban, “An evaluation of extubation failure predictors in mechanically ventilated infants and children.”, Intensive Care Med., pp. 752-757, 2002.

[13]M. El-Khatib, G. Jamaledine. “A new oxygenation index for reflecting intrapulmonary shunting in patients undergoing open-heart surgery”. Chest. 2004.

[14]J. Lopez, A. Carrillo,”Ventilación mecánica: indicaciones, modalidades y programación y controles.”, GE Healthcare, vol. 6, no. 6, 2008.

[15]F. Gutiérrez, “Diagnóstico, Monitoreo y Soporte

Inicial del Paciente con Insuficiencia Respiratoria Aguda”; Simposio: Atención Inicial Del Paciente Crítico Para No Especialistas (Parte 1). Revista Acta Médica Peruana, no. Especial, 2011.

[16]A. Garnero, H. Abbona, F. Gordo-Vidal y C. Hermosa-Gelbard, “Modos controlados por presión versus volumen en la ventilación.”, Medicina Intensiva, Doima, pp. 7, 2012.

[17]D. Arellano, “Ventilación mecánica: Generalidades y Modalidades tradicionales.”, Kinesiología, 2006.

[18]R. Guerequeta y A. Vallecillo, “Técnicas de diseño de algoritmos”, Servicio de Publicaciones de la Universidad de Málaga, 1998.

[19]L. Samet, N. Masmoudi, M. Kharrat y L. Kamoun, “A digital PID controller for real time and multi loop control: a comparative study”, IEEE XPLORE, Septiembre 1998.

RESUMEN CURRICULAR



Carlos Miño, Ingeniero en Electrónica Digital y Telecomunicaciones "Universidad Tecnológica Israel" Ecuatoriano. Intereses enfocados en Electrónica, Programación, Sistemas embebidos.



Karen Gómez Ambrosio, Ingeniera Biomédica “Universidad Manuela Beltrán” Colombiana. Intereses enfocados en Desarrollo, producción y mantenimiento de Equipo médico.



Andrés Cuaycal, Ingeniero Electrónica y Control de la “Escuela Politécnica Nacional” Ecuatoriano. Intereses enfocados en sistemas embebidos y robótica.



Karla Portilla, Ingeniera Electrónica y Control de la “Escuela Politécnica Nacional” Ecuatoriana. Intereses enfocados en mantenimiento de equipamiento médico.



Josué Quiroga, Ingeniero Electrónico “Universidad Politécnica Salesiana” Ecuatoriano. Intereses enfocados en Simulación Médica, Electrónica, Biomédica.