

1 Artículo de investigación

2 Fecha de envío: 21 de noviembre de 2017.

Revista Mexicana de  
Ingeniería Biomédica

## 3 4 5 **Modelo Matemático de la Humedad Relativa para** 6 **Incubadora con Respirador Artificial**

### 7 **Mathematical Model of Relative Humidity for Incubator with Artificial** 8 **Respirator**

9 *Hebert Bernardo Román Linares*10 *Pontificia Universidad Católica del Perú*  
1112 **RESUMEN**

13 Los recién nacidos prematuros menores a las 29 semanas o de bajo peso necesitan un estricto control térmico ya  
14 que aún no tienen desarrollado sus órganos vitales, son colocados en incubadoras para su cuidado, con humedad  
15 relativa alta para evitar la pérdida sensible de agua. Una incubadora que no posea un sistema de humidificación  
16 que brinde hasta 95 % o 100 % de humedad relativa, o que no tenga un sistema de humidificación, será un  
17 equipo médico deficiente. Se está ejecutando el proyecto incubadora con respirador artificial cuyo propósito, es  
18 comprobar un nuevo concepto de atención integral para el neonato, ya que este integra un ventilador pulmonar y  
19 un humidificador, con la cual se realizará ensayos preclínicos. El objetivo de esta investigación fue formular un  
20 Modelo Matemático para la Humedad Relativa en el Habitáculo de Incubadora con Respirador Artificial,  
21 lográndose describir adecuadamente por la ecuación diferencial de primer orden y cuya solución en el tiempo, o  
22 en su forma expresada en la constante de tiempo, comparada con los datos experimentales tienen un error menor  
23 a 1%. Los resultados obtenidos con la segunda propuesta de humidificación demuestran que se puede controlar  
24 la humedad relativa controlando la temperatura del aire a la salida del humidificador y el flujo del aire  
25 impulsado por el compresor.

26 **Palabras clave: modelo matemático; humedad relativa; incubadora.**  
2728 **ABSTRACT**

29 Premature infants under 29 weeks of age or underweight need a strict thermal control since they have not yet  
30 developed their vital organs, they are placed in incubators for their care, with high relative humidity to avoid the  
31 sensitive loss of water. An incubator that does not have a humidification system that provides up to 95% or  
32 100% relative humidity, or that does not have a humidification system, will be a poor medical team. The  
33 incubator project with artificial respirator is being executed, whose purpose is to verify a new concept of  
34 integral care for the newborn, since this integrates a pulmonary ventilator and a humidifier, with which  
35 preclinical tests will be carried out. The objective of this research was to formulate a Mathematical Model for  
36 Relative Humidity in the Habitat of Incubator with Artificial Respirator, being able to adequately describe by  
37 the differential equation of first order and whose solution in time, or in its form expressed in the time constant,  
38 compared to the experimental data, they have an error of less than 1%. The results obtained with the second  
39 humidification proposal show that the relative humidity can be controlled by controlling the air temperature at  
40 the outlet of the humidifier and the air flow driven by the compressor.  
41

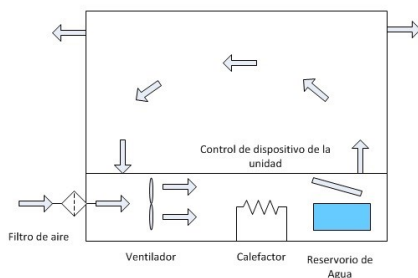
42 **Keywords: Mathematical model, RH , incubator.**

43

44 **INTRODUCCIÓN**

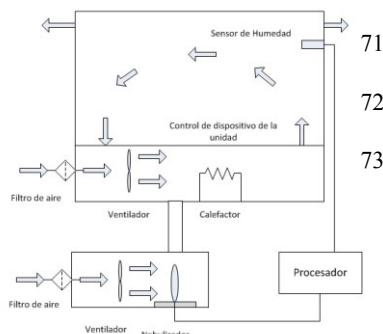
45 Los recién nacidos prematuros menores a las  
 46 29 semanas o de bajo peso necesitan un control estricto  
 47 de su ambiente térmico, ya que estos no tienen  
 48 desarrollado su sistema de termorregulación. En los  
 49 primeros días de vida, los neonatos están propensos a  
 50 perder el 20 % de la masa corporal, esto debido a la baja  
 51 humedad relativa al 40 % [1,2]. El uso de la incubadora  
 52 neonatal se ha convertido en un uso común en el  
 53 cuidado neonatal, pues mantienen la temperatura  
 54 corporal adecuada y una programación alta de la  
 55 humedad relativa disminuye la pérdida insensible de  
 56 agua en los neonatos prematuros [1- 4]. Una incubadora  
 57 neonatal es un equipo médico destinado a mantener un  
 58 microclima controlado. Los parámetros físicos que se  
 59 miden en una evaluación a una incubadora son:  
 60 Temperatura (°C), Humedad Relativa (%), Velocidad  
 61 del Flujo del aire (m/s) e Intensidad de Sonido (dB) [5].

62 Los sistemas de humidificación en las  
 63 incubadoras son dos: pasivo y activo [6]. En ambos  
 64 casos se produce vapor de agua mediante una  
 65 resistencia térmica, hacen una retroalimentación del aire  
 66 filtrado, calentado y humedecido, que circula por  
 67 interior de la incubadora, con la diferencia que al activo  
 68 se le adiciona un nebulizador. Ver figura 1 y 2.



69 **Figura 1 Sistema de Humidificación Pasiva**

70



74 **Figura 2 Sistema de Humidificación Activa**

75 Se ha encontrado modelos matemáticos para  
 76 la humedad relativa basados en ecuaciones diferenciales  
 77 de primer orden [7,8] con iniciativa de proponer una  
 78 nueva unidad de medida de la humedad en función de la  
 79 presión parcial del vapor de agua [8]. Otros modelos  
 80 matemáticos permiten controlar la humedad pero las  
 81 ecuaciones no tienen un significado físico, además son  
 82 propios de cada sistema de humidificación  
 83 implementado en las incubadoras. [9,10] Algunas  
 84 incubadoras controlan la humedad relativa variando el  
 85 área del conducto del aire húmedo que pasa al interior  
 86 de la incubadora, con sistema de humidificación  
 87 pasiva. [11]

88 Una evaluación de la humedad relativa en el  
 89 prototipo de incubadora desarrollado por el Grupo de  
 90 Investigación de Desarrollo de Equipos Médicos y  
 91 Sistemas (GIDEMS), el prototipo de Equipos Soporte  
 92 de Vida Neonatal (ESVIN), demostró que el prototipo  
 93 no puede mantener la humedad relativa y esta sigue  
 94 decayendo a valores menores a 50 %, cuando se  
 95 programó la temperatura a 37°C, volviendo un ambiente  
 96 seco.

97 Actualmente se está ejecutando un nuevo  
 98 proyecto denominado Incubadora con respirador  
 99 artificial, cuyo propósito, es comprobar un nuevo  
 100 concepto de atención integral para el neonato, ya que  
 101 este integra un ventilador pulmonar y un humidificador,  
 102 basado en las ideas vertidas en la patente [12]. Está  
 103 planificado que con este equipo realizar ensayos  
 104 preclínicos, en el futuro ensayos clínicos, para su  
 105 posterior fabricación y comercializar del equipo;  
 106 siguiendo todos las normas internacionales. Esta  
 107 incubadora integra en ella, un ventilador pulmonar y un  
 108 humidificador; es convertible, con una sola acción  
 109 manual pasa de incubadora abierta en cerrada y  
 110 viceversa, en aproximadamente en 2 segundos, tiene  
 111 baja pérdida de calor, esto debido a que cuenta con una  
 112 pared multicapas para el aislamiento del habitáculo  
 113 neonatal, estas son algunas de sus ventajas con respecto  
 114 a las incubadoras que se encuentran en el mercado [12].  
 115 En la Fig.6, se aprecia el prototipo de cúpula  
 116 implementado para los ensayos.

117 El objetivo de esta investigación es  
 118 desarrollar un modelo matemático para predecir la  
 119 humedad relativa en el interior de incubadora con  
 120 respirador artificial. Se implementó un sistema de

121 humidificación pasiva con el fin de evaluar a  
 122 formulación del modelo matemático, lográndose  
 123 predecir la humedad relativa con un error menor a 1%.  
 124 El desarrollo de esta incubadora ha permitido  
 125 comprobar que con este tipo de aislamiento no se  
 126 opaque el habitáculo.

127

## METODOLOGÍA

128

129 La formulación del modelo matemático para  
 130 la humedad relativa, fue resultado del método empírico  
 131 pues fueron analizados los datos con el programa Origin  
 132 Pro 2015, de los ensayos realizados con prototipos  
 133 implementados. Se utilizaron el Fluke 971 para medir la  
 134 humedad relativa y el Data Logger Omega 830 para las  
 135 mediciones de la temperatura; colocados en el centro  
 136 del interior del habitáculo a 10 cm sobre la base de la  
 137 cuna.

### Prototipos Experimentales

139 Se desarrollaron dos prototipos, cada uno con  
 140 sus respectivas propuestas de humidificación.

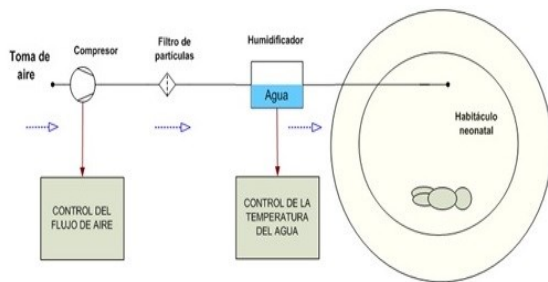
141

#### Primer prototipo (Primera propuesta de humidificación)

142

143

144 Esta propuesta propone controlar la  
 145 temperatura del agua en el humidificador y el flujo del  
 146 aire seco del compresor, variando una de ellas y  
 147 dejando constante la otra, o variando ambas variables se  
 148 puede controlar la humedad relativa, teniendo  
 149 precaución que la temperatura del aire húmedo que  
 150 ingresa a la incubadora no exceda  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  de la  
 151 temperatura del aire del habitáculo.



152 Figura 3. Esquema del primer prototipo del  
 153 Sistema de humidificación.

154 En la figura 3 se muestra como el aire es  
 155 succionado por el compresor para ser impulsado por

156 mismo hacia el habitáculo neonatal, pasando por el  
 157 humidificador aire filtrado. En la figura 4, se observa la  
 158 implementación del primer prototipo de humidificación,  
 159 se aprecia el humidificador colocado por la parte trasera  
 160 del habitáculo.

#### Segundo Prototipo (Segunda propuesta de humidificación)

161

162

163 En la Fig. 5, se muestra el esquema del  
 164 segundo prototipo de humidificación, el aire ingresa por  
 165 un filtro de partículas para luego pasar por un  
 166 acumulador, y llegar al compresor (es este que realiza la  
 167 succión del aire del medio ambiente) para luego pasar  
 168 por otro acumulador, continua su camino llegando al  
 169 humidificador, arrastra al vapor de agua presente y para  
 170 finalmente introducirlo en el habitáculo de la  
 171 incubadora. Este tipo de humidificación se denomina  
 172 pasiva.



173

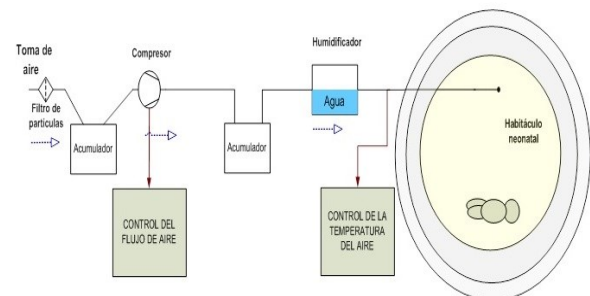
174

Figura 4. Primer prototipo de humidificación.

175 Se usó el humidificador Fisher & Paykel,  
 176 para humidificar el habitáculo neonatal pues este  
 177 permite manipularlo fácilmente, con varios niveles de  
 178 temperatura para el agua, aunque no tiene un  
 179 visualizador de la temperatura. Se colocó un sensor de  
 180 temperatura, en el corrugado, a la salida del aire  
 181 húmedo del humidificador.

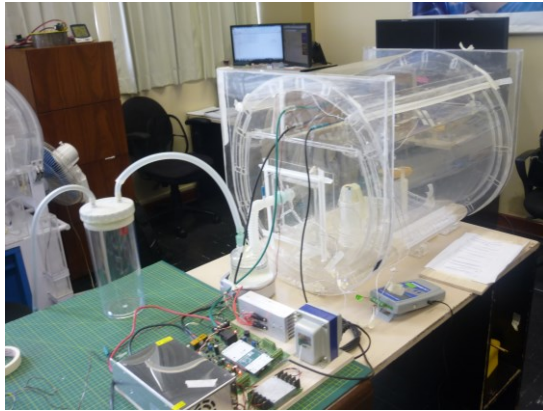
182 En la Fig. 5, se muestra la propuesta de  
 183 controlar la temperatura en el corrugado. Se logró  
 184 controlar el flujo del aire, con un variador de voltaje.  
 185 Los acumuladores dispuestos permitieron uniformizar el  
 186 flujo y disminuir el ruido sonoro del compresor.

187 Figura 5. Esquema del Sistema de  
 188 humidificación para incubadora.



189

190



191

192 Figura 6. Disposición de los materiales y  
193 equipos en el ensayo.

194

### 195 Formulación del Modelo Matemático

196 La Humedad o humedad absoluta, es la  
197 cantidad de masa de vapor de agua presente en una  
198 unidad de masa de aire seco.

199 
$$\omega = m_v / m_a \text{ (kg vapor de agua / kg de aire seco)} \quad (1)$$

200 En cuanto, la Humedad Relativa (HR), es la  
201 cantidad de humedad que el aire contiene ( $m_v$ ) respecto  
202 a la cantidad máxima de humedad que el aire puede  
203 contener a la misma temperatura ( $m_s$ ).

204 
$$\phi = m_v / m_s \text{ (\%)} \quad (2)$$

205 
$$\phi = (P_v V / R_v T) / (P_s V / R_v T) \text{ (\%)} \quad (3)$$

206 La Ec. (3), es otra forma de definir a la  
207 humedad relativa como la relación entre la *presión*  
208 *parcial de vapor de agua de un aire húmedo*  $P_v$  y la del  
209 vapor del agua pura a la misma temperatura que el aire  
210 húmedo  $P_s$ .

211 El comportamiento que exhiben el circuito  
212 RC y los cuerpos en caída libre con resistencia al aire,  
213 cada una sometida a una ley física, son modelados por  
214 una ecuación diferencial de primer orden (4) con  
215 condición inicial (5) al igual que estos fenómenos la  
216 humedad relativa también puede modelada bajo dichos  
217 argumentos matemáticos.

218

$$y' + ay = b \quad (4)$$

219

$$y(t=0) = y_0 \quad (5)$$

220 Donde la solución a la ecuación diferencial  
221 (4), con condición inicial (5) tiene una y solo una  
222 solución y viene dada por:

223 
$$y(t) = b/a + (y_0 - b/a) e^{-a(t-t_0)} \quad (6)$$

224 De la Ec. (6), cuando  $t_0 = 0$  se obtiene:

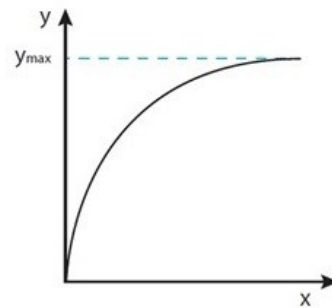
225 
$$y(t) = b/a + (y_0 - b/a) e^{-at} \quad (7)$$

226 Analizando esta Ec. (7), para cuando  $a > 0$ , a  
227 medida que la variable  $t \rightarrow \infty$ , el término exponencial  
228  $e^{-at}$  desaparecerá y la Ec. (7) será la siguiente:

229 
$$y(t) = b/a \quad (8)$$

230 La Ec. (8) es una solución estacionaria, es el  
231 máximo valor que asume la variable  $y$ , si esto modela  
232 algún fenómeno, se dice que el sistema alcanzó el  
233 equilibrio o llegó a estabilizarse. Ver figura 7.

234



235 Figura 7. Respuesta de una ecuación  
236 diferencial de primer orden con condición inicial cero.

237 Los primeros ensayos permitieron observar  
238 que la humedad relativa se veía afectada cuando se  
239 produce un cambio en las siguientes variables:  
240 Temperatura de la incubadora  $T$ , Flujo del aire seco  $f$   
241 (aire inyectado por el compresor), Temperatura del aire  
242 en la salida del Humidificador  $T_s$ , y Temperatura del  
243 agua del humidificador  $T_{H_2O}$ , y también se tomaron en  
244 cuenta la humedad relativa del ambiente  $H_r$ , y la  
245 Temperatura del ambiente  $T_a$ .

246 Para obtener el modelo se esperó que la  
247 temperatura de la incubadora  $T$ , se estabilice, es decir  
248 que mantenga su temperatura constante. En una unidad  
249 de cuidados intensivos (UCI) la temperatura  $T_a$ , y la  
250 humedad relativa  $H_r$ , son controladas como lo establece  
251 normas hospitalarias [13], es por ello que las  
252 consideramos como constantes a estas variables. Por

253 requerimiento del proyecto y por ensayos realizados  
 254 establecemos que el flujo del aire seco  $f$ , debe ser  
 255 constante y no debe exceder los 10 L/min y además en  
 256 los ensayos mantenemos constante la temperatura del  
 257 aire del humidificador  $T_s$ , para lograr una humedad  
 258 relativa requerida. Aunque no está incluida como  
 259 variable dentro del modelo, se trató de evitar aire  
 260 húmedo del habitáculo neonatal, informes de  
 261 evaluaciones de las incubadoras Girrafe y Ohmeda  
 262 [14,15] evidencian que la temperatura y la humedad  
 263 relativa decaen, cuando se abren las portezuelas de las  
 264 incubadoras y comprobándose también en ensayos  
 265 realizados, que si no tenemos un ambiente hermético no  
 266 lograremos la humedad relativa requerida, de esta  
 267 manera se mantendrá un volumen constante de 0.007  
 268  $m^3$ , que es el volumen del habitáculo que se desea  
 269 humidificar.

270 La humidificación del aire en el habitáculo de  
 271 la incubadora, puede escribirse matemáticamente  
 272 mediante la ecuación:

$$273 \quad H(t) = F(t, T_s, f, T_{H_2O}, H_r, T_a) \quad (9)$$

274 Donde:  $H$ : es la *Humedad Relativa* en el  
 275 habitáculo de la incubadora;  $t$ : es el *tiempo*;  $T$ : es la  
 276 *Temperatura de la incubadora*;  $T_s$ : es la *Temperatura*  
 277 *del aire húmedo* a la salida del humidificador;  $f$ : es el  
 278 *Flujo del aire*;  $T_{H_2O}$  es la *temperatura del agua*;  $H_r$ : es  
 279 la *humedad relativa del ambiente* y  $T_a$ : es la  
 280 *temperatura del ambiente*.

281 Basado en las conjeturas razonables  
 282 mencionadas anteriormente la ecuación anterior puede  
 283 reescribirse así:

$$284 \quad H(t) = F(t, T_s, f, T_{H_2O}, H_r, T_a) = F(t) \quad (10)$$

285 Esta ecuación puede escribirse como una  
 286 ecuación diferencial de primer orden

$$287 \quad F(t, H, H') = 0 \quad (11)$$

288 Podemos escribir la ecuación diferencial que  
 289 describe el comportamiento de la humidificación para el  
 290 habitáculo de la incubadora, con la siguiente:

$$291 \quad H' + aH = b \quad (12)$$

292 Con la condición inicial

$$293 \quad H(t = 0) = H_0 \quad (13)$$

294 Donde  $a$  y  $b$ , son constantes, y  $H_0$ , es la  
 295 humedad relativa inicial en el tiempo igual a cero. La

296 solución a la Ec. (26) con la condición inicial de la Ec.  
 297 (27) es:

$$298 \quad H(t) = b/a + (H_0 - b/a) e^{-a(t-t_0)} \quad (14)$$

299 Cuando se programe un valor de la humedad  
 300 relativa mayor a la inicial  $H > H_0$ , esta tenderá al valor  
 301  $b/a$ , este es el máximo valor que puede llegar a tomar.  
 302 La humedad relativa programada es la humedad relativa  
 303 máxima, representada como:

$$304 \quad H(t \rightarrow \infty) = b/a = H_{max} \quad (15)$$

305 El valor de la constante  $a$  de la Ec. (14), puede  
 306 hallarse de datos experimentales, como se muestra en la  
 307 tabla I. En este estudio la constante de tiempo es:

$$308 \quad \tau = 1/a \quad (16)$$

309 Por lo tanto, la Ec. (14) teniendo en cuenta las  
 310 ecuaciones (15) y (16) se podría escribir así:

$$311 \quad H(t) = H_{max} + (H_0 - H_{max}) e^{-1/\tau (t-t_0)} \quad (17)$$

312 Se plantea una suposición al modelo, que la  
 313 temperatura del aire del humidificador  $T_s$  sea  
 314 linealmente dependiente de constante del tiempo,  $\tau$ ,  
 315 donde  $c$  es una constante con unidades  $^{\circ}C / min$ , lo que  
 316 con llevaría a la Ec.:

$$317 \quad T_s = c \tau \quad (18)$$

318 Se observó experimentalmente que cuando la  
 319 temperatura del aire a la salida del humidificador  $T_s$ ,  
 320 varía en un  $1^{\circ}C$ , se produce una variación en la  
 321 humedad relativa ( $H$ ) en la incubadora de 10%, lo que  
 322 puede expresarse de la siguiente manera:

$$323 \quad \Delta 1^{\circ}C \cong \Delta 10\% \quad (19)$$

324 Generalizando la Ec. (32) se puede escribir:

$$325 \quad \Delta T_s \cong \Delta H \quad (20)$$

326 Esto permite establecer una ecuación lineal  
 327 para relacionar ambas variables físicas, donde  $m$  y  $k$ ,  
 328 son constante numéricas:

$$329 \quad H = mT_s + k \quad (21)$$

330

331

332

333

334 **RESULTADOS Y DISCUSIONES**

369

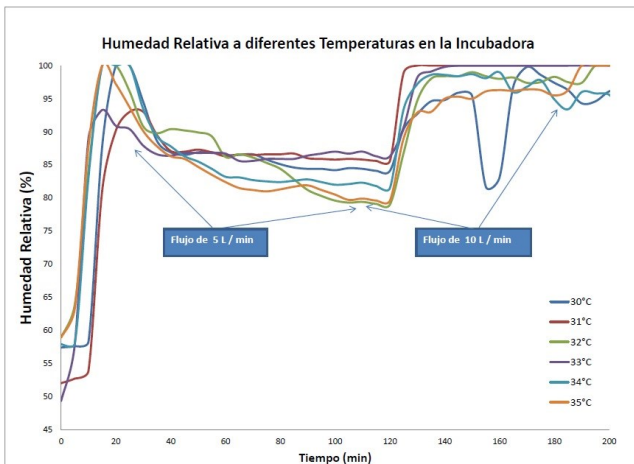
335 **Resultados de la primera propuesta de**  
 336 **humidificación**

370 Tabla 1. Ecuaciones para la humedad relativa para  
 371 un rango de temperatura de 30°C a 35°C para la  
 372 incubadora.

337 En la figura 8, es resultado de la  
 338 implementación del primer prototipo (figura 4) se  
 339 observa las curvas de la humedad relativa en el tiempo  
 340 para diferentes temperaturas en la incubadora, de 30°C  
 341 a 35°C, para temperaturas del agua en el humidificador,  
 342 y con diferentes flujos. Cuando la temperatura del agua  
 343 se programó entre 37°C a 43°C, los ensayos con el flujo  
 344 de 5 L/min solo lograron humedades relativas menores  
 345 a 90 %; y con flujo de 10 L/min, se pudo alcanzar en  
 346 ciertos casos humedad relativa al 100%. Se aprecia que  
 347 existen fluctuaciones, esto debido a que los equipos  
 348 controladores de la temperatura del agua en el  
 349 humidificador y del flujo de aire del compresor, fueron  
 350 inapropiados. Para el ensayo con la temperatura de la  
 351 incubadora a 30°C, no se administró flujo por el tiempo  
 352 de 10 min, esto produjo una disminución de  
 353 aproximadamente de 14% en la humedad relativa; este  
 354 efecto es equiparable a cuando se abren las  
 355 puertezuelas, como lo evidencia las evaluaciones a las  
 356 incubadoras Giraffe y Atom. [13, 14]

T (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	Ecuación para la humedad relativa (%)
31	35.73	$H(t) = 100 - 14.40 e^{-(1/1.94)(t-120)}$ $\tau = 1.94 \text{ min. } R^2 = 0.9999$
32	36.06	$H(t) = 98.26 - 18.99 e^{-(1/6.43)(t-120)}$ $\tau = 6.43 \text{ min. } R^2 = 0.9586$
33	36.54	$H(t) = 100.23 - 14 e^{-(1/7.15)(t-120)}$ $\tau = 7.15 \text{ min. } R^2 = 0.9468$
34	37.63	$H(t) = 98.59 - 16.84 e^{-(1/4.07)(t-120)}$ $\tau = 4.07 \text{ min. } R^2 = 0.9962$
35	37.9	$H(t) = 95.88 - 16 e^{-(1/6.50)(t-120)}$ $\tau = 6.50 \text{ min. } R^2 = 0.9806$

373



357 Figura 8. Humedad Relativa a diferentes  
 358 temperaturas en la incubadora, para flujos de 5 L/min y  
 359 10 L/min.

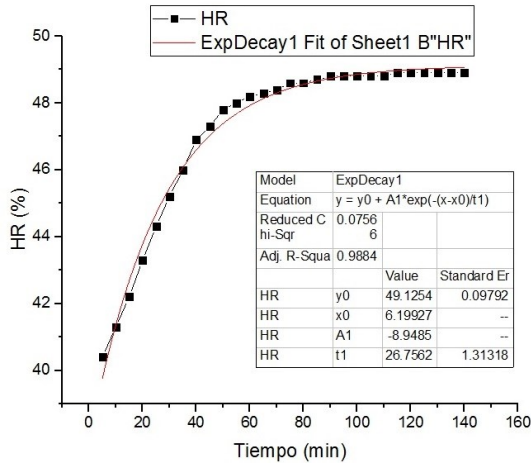
360 En la tabla 1, se muestra el modelamiento  
 361 para humedad relativa para el rango de temperaturas de  
 362 31°C a 35°C, se trabajó los datos solo en la parte de las  
 363 curvas de las temperaturas que se asemeja a la figura 7,  
 364 mostrando altos coeficientes de determinación (R<sup>2</sup>) para  
 365 las diferentes temperaturas. El valor de la constante de  
 366 tiempo “τ” tiene diferentes valores para la temperatura  
 367 del aire a la salida del humidificador, evidenciando que  
 368 no son numéricamente iguales.

374

375 **Resultados de la segunda propuesta de**  
 376 **humidificación**

377 La Fig. 12, presenta la evaluación de la  
 378 humedad relativa (línea continua azul) de la segunda  
 379 propuesta de humidificación, evaluada cuando la  
 380 temperatura de la incubadora (T) es de 36 °C,  
 381 mostrando que llega a estabilizarse en tres ocasiones,  
 382 esto debido al cambio en la temperatura del aire a la  
 383 salida del humidificador, con esto podemos controlar la  
 384 humedad relativa dentro del habitáculo. Para modelar se  
 385 extrajeron los datos experimentales por tramos y se  
 386 trabaja con estos, dándose a conocer en las fig. 9,10 y  
 387 11. En el Figura 9, los puntos negros (línea negra) son  
 388 los datos obtenidos experimentales de la humedad  
 389 relativa medida y la línea curva roja representa la  
 390 humedad relativa modelada, mostrando una reducción  
 391 estadístico chi-cuadrado de 0.07566, resaltando entre  
 392 ellas una muy alta correlación (adj. R-Squa= 0.9884).  
 393 Los errores estándares para y0 de 0.09792 y para t1 con  
 394 1.31318, no mostrando los errores estándares para x0 y  
 395 A1.

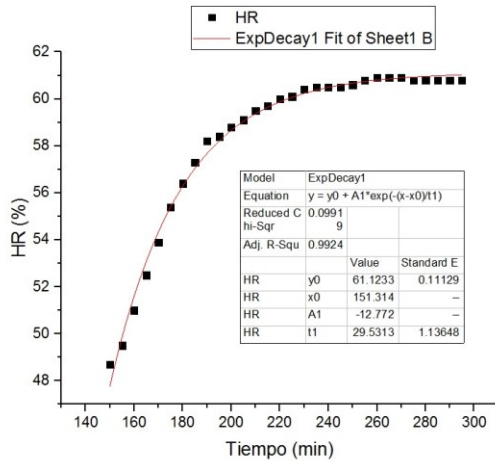
396  
 397



398 Figura 9. Modelado de la HR para T= 36 °C y  
399 Ts= 27.04 °C.

400 Se aprecia en el Fig. 10, la humedad medida y  
401 modelada tienen una reducción estadístico chi-cuadrado  
402 de 0.09919 y con un coeficiente de determinación de  
403 0.99248. Siendo estos los errores estándares para y0 y  
404 t1; 0.11129 y 1.13648, respectivamente.

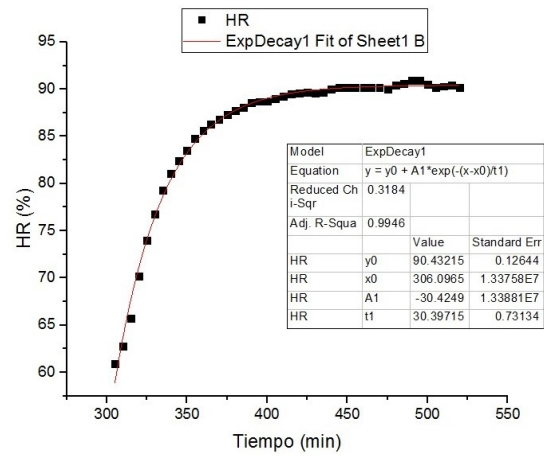
405



406 Figura 10. Modelado de la HR para T= 36 °C  
407 y 27.92 °C

408 El Fig. 11, se exhibe la humedad medida y  
409 modelada teniendo una reducción estadístico chi-  
410 cuadrado de 0.3184 y con un muy alto coeficiente de  
411 determinación de 0.9946. Los errores estándares para y0  
412 es 0.12644, para x0 es 1.337 E7, en A1 es 1.338 E7 y t1  
413 es 0.73134.

414



415 Figura 11. Modelado de la HR para T= 36 °C  
416 y Ts= 30.7 °C.

417 En la tabla 2, se presentan las ecuaciones para  
418 humedad relativa, es una recopilación de las ecuaciones  
419 proporcionadas del modelamiento que se ve en las  
420 figuras 9, 10 y 11. En esta misma tabla se aprecia que el  
421 valor de la constante c, es aproximadamente a 1  
422 °C/min. Esto verifica la suposición establecida por el  
423 modelo, Ts y τ, son numéricamente iguales. Los  
424 valores de la Ts, son obtenidos experimentalmente.

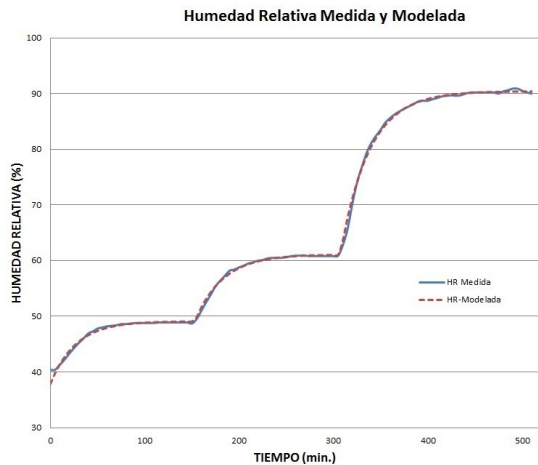
425

426 Tabla 2. Ecuaciones para la humedad relativa  
427 cuando la temperatura de la incubadora es 36°C.

Ts (°C)	Ecuación para la humedad relativa (%)
27.04	$H(t) = 49.12 - 8.95 e^{-(1/26.76)(t-6.20)}$ $\tau = 26.76 \text{ min. } R^2 = 0.9884$
27.92	$H(t) = 61.12 - 12.77 e^{-(1/29.53)(t-151.31)}$ $\tau = 29.53 \text{ min. } R^2 = 0.9919$
30.70	$H(t) = 90.43 - 30.42 e^{-(1/30.4)(t-306.09)}$ $\tau = 30.4 \text{ min. } R^2 = 0.9946$

428  
429

430 Después de hacer el modelamiento de la  
431 humedad relativa para cada una las temperaturas del  
432 humidificador, se enlazaron en una sola gráfica, como  
433 se aprecia en la Fig. 12. Posteriormente hacemos la  
434 comparación de la humedad relativa medida y la  
435 modelada, obteniendo un error es menor a 1%.

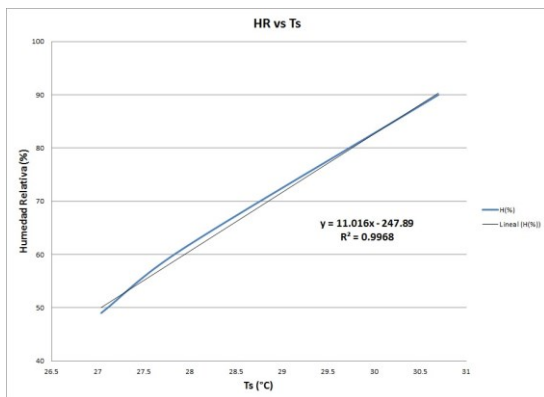


436 Figura 12. Comparación de la humedad  
437 relativa medida y modelada para la temperatura del  
438 habitáculo a 36 °C, con diferentes temperaturas del aire  
439 a la salida del humidificador, con flujo constante de 10  
440 L/min.

441 En la Fig. 13, se presenta la ecuación lineal, la  
442 relación entre la temperatura a la salida del  
443 humidificador y la humedad relativa, para la  
444 temperatura del habitáculo a 36 °C y a un flujo  
445 constante de 10 L/min. Aquí está la demostración como  
446 podemos controlar la humedad relativa en el habitáculo  
447 de la incubadora variando la temperatura del  
448 humidificador HC150 Fisher & Paykel, la confirmación  
449 es esta ecuación:

450 
$$H = 11.02 T_s - 247.9 \quad (22)$$

451



452 Figura 13. Relación entre la temperatura del  
453 aire a la salida del humidificador y la humedad relativa.

454 Los resultados de las investigaciones  
455 obtenidas por las ecuaciones en la tabla 2, en la  
456 ecuación 22, y presentadas en la figura 12, están a la par  
457 de otras investigaciones [8, 9,10] donde se han obtenido  
458 sobre impulsos en  $\pm 0.5\%$  para la humedad relativa [8]

459 gracias a la implementación de los controladores del  
460 flujo y de la temperatura (figura 5) se evitó esto los  
461 sobre impulsos en la humedad relativa (figura 12). Lo  
462 que se debe realizar es un

463 Falta hacer más ensayo para que la  
464 humidificación sea la apropiada para el neonato, un  
465 estudio de la transferencia de calor y masa en la  
466 incubadora será idóneo para futuras investigaciones.  
467 [16]

468

469

## CONCLUSIÓN

470 El Modelo Matemático para la Humedad  
471 Relativa en el Habitáculo de Incubadora con Respirador  
472 Artificial es descrito adecuadamente por la ecuación  
473 diferencial de primer orden (12) con la condición (13) y  
474 cuya solución en el tiempo es (14), o su forma  
475 expresada en la constante de tiempo de la ecuación (17).  
476 Se comprobó la suposición que la temperatura del aire  
477 del humidificador es linealmente dependiente de  
478 constante del tiempo, es decir son numéricamente  
479 iguales expresada en la ecuación (18), cuando se trabajó  
480 con la segunda propuesta de humidificación.

481 El modelo matemático con la segunda  
482 propuesta de humidificación demuestra que se puede  
483 controlar la Humedad relativa controlando la  
484 temperatura del aire a la salida del humidificador y el  
485 flujo del aire impulsado por el compresor, esto se  
486 demostró con la Ec. (22).

487

488

## AGRADECIMIENTO

489 Al programa Nacional de Innovación para la  
490 Competitividad y Productividad, Innóvate Perú del  
491 Ministerio de la Producción por financiar el Proyecto  
492 Incubadora con Respirador Artificial.

493

494

## REFERENCIAS

495 [1] Meritano, J.; Rolando, N. y otros “Comparación de  
496 dos Métodos para Reducir la Perdida Insensible de  
497 Agua en Recién Nacidos Prematuros de Muy Bajo  
498 Peso” Rev. Hosp. Mat. Inf. Ramón Sardá, Argentina,  
499 pp. 12-17, 2008.

500 [2] Molina J.; Roxana “Humedad Relativa Eficaz en la  
501 Incubadora y Pérdida de Peso en Recién Nacidos de

- 502 MBPN” Pasantía de Bioingeniería en la Pontificia  
503 Universidad Católica de Perú, 2012.
- 504 [3] Pieter J. J. Sauer , Huib J. Dane, Henk K. A. Visser  
505 “Influence of variations in the ambient humidity on  
506 insensible water loss and thermoneutral environment of  
507 low birth weight infants” Acta Pediatr. Scand, vol. 73,  
508 pp. 615-619, 1984. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1651-509>  
[2227.1984.tb09984.x](http://dx.doi.org/10.1111/j.1651-509.2227.1984.tb09984.x)
- 510 [4] V A Harpin, V. A. and Rutter, N. “Humidification  
511 of incubators” Archives of Disease in Childhood. Vol.  
512 60, 219-224, 1985.  
513 <http://dx.doi.org/10.1136/adc.60.3.219>
- 514 [5] Contreras y otros “Diseño de procedimientos para  
515 la calibración de incubadoras” Scientia et Technica Año  
516 XIV, Universidad Tecnológica de Pereira, pp. 437-442,  
517 2008.
- 518 [6] Oliveira, M. A. Sistema de Ensaio de Desempenho  
519 de Incubadora Neonatal. Tesis de Maestría, Universidad  
520 Federal de Santa Catarina, Brasil, pp. 13,14, 2007.
- 521 [7] Bouattoura, Djaaffar; Villon, Pierre y Farges,  
522 Gilbert. “Dynamic Programming Approach for  
523 Newborn’s Incubator Humidity Control” IEEE.  
524 Transactions on Biomedical Engineering, vol. 45, pp.  
525 48-55, 1998. <http://dx.doi.org/10.1109/10.650351>
- 526 [8] Abdiche M, Farges G, Delanaud S, Bach V, Villon  
527 P, Libert J.P. “Humidity control tool for neonatal  
528 incubator” Medical & Biological Engineering &  
529 Computing, Francia, vol. 36, pp. 241-245, 1998.  
530 <http://dx.doi.org/10.1007/BF02510752>
- 531 [9] Yasser Amer Al-Taweel “A Simulation Model of  
532 Infant - Incubator – Feedback System with  
533 Humidification and Temperature Control” Tesis de  
534 maestría en Ingeniería. Universidad de Tecnología de  
535 Auckland, Facultad de Ingeniería y Ciencias, pp. 37-46,  
536 2006.
- 537 [10] M. A. Zermani, E. F., & Mami, A. (s.f.).  
538 Multivariable Control Applied to Temperature and  
539 Humidity Case Study: Neonate incubator. 20th  
540 Mediterranean Conference on Control & Automation.  
541 Spain, pp. 1440-1445, 2012.
- 542 [11] Yasser Amer Al-Taweel “A Simulation Model of  
543 Infant - Incubator – Feedback System with  
544 Humidification and Temperature Control” Tesis de  
545 maestría en Ingeniería. Universidad de Tecnología de  
546 Auckland, Facultad de Ingeniería y Ciencias, pp. 37-46,  
547 2006.
- 548 [12] Bruno C. Solicitud de patente Incubadora  
549 Convertible con Cúpula de Baja Pérdida de Calor  
550 PCT/PE2016/000016, 2016.
- 551 [13] Asociación Española de Normalización y  
552 Certificación. “UNE 100713: Instalaciones de  
553 acondicionamiento de aire en hospitales” 2005.
- 554 [14] Medical Devices Agency “Evaluation Number  
555 02090 Neonatal Incubator/ Infant Radiant Warmer  
556 Ohmeda Giraffe Omnibed” 2002.
- 557 [15] Purchasing and Supply Agency “Evaluation  
558 Report 0561 Atom V-2100G Incubator-September”  
559 2005.
- 560 [16] Ginalski, Nowak and Wrobel “A combined study  
561 Science Direct- Medical Engineering & Physics 29  
562 (2007) 531-541.
- 563
- 564