

EXERGIA DEL AIRE COMPRIMIDO

RESUMEN

Se presenta la revisión y el análisis del concepto de *exergía sin flujo* aplicado al aire comprimido. El comportamiento del trabajo útil máximo que se puede obtener del aire comprimido es evaluado en función de sus propiedades termodinámicas y de la temperatura y la presión del medio ambiente. Se establece la importancia de realizar el análisis energético de los sistemas neumáticos teniendo en cuenta la segunda ley de la termodinámica.

PALABRAS CLAVES: Exergía sin flujo, Aire comprimido, Neumática.

ABSTRACT

A review and analysis of non-flow exergy concept applied to compressed air is presented. The performance of maximum work, which can be obtained from compressed air, is evaluated as function of its properties and environment temperature and pressure. The importance of second law energetic analysis in order to study the pneumatics systems is established.

KEYWORDS: *Non-flow Exergy, Air compressed, Pneumatic.*

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas neumáticos de potencia fluida constituyen una tecnología relevante en el desarrollo de la automatización de los procesos industriales, y a pesar de algunas desventajas como sus costos energéticos de operación y el ruido generado, continuarán ocupando un puesto privilegiado en la evolución industrial.

Las consideraciones energéticas en los sistemas neumáticos toman cada vez más importancia en la situación actual que requiere la utilización racional de la energía. Los procesos de conversión energética del aire comprimido en la neumática son más complejos en relación con la oleohidráulica, y se ha establecido que la eficiencia energética de los sistemas neumáticos es muy baja en comparación con los sistemas eléctricos y los sistemas oleohidráulicos, y puede tener valores más bajos del 20% [6]. Lo anterior constituye una potencialidad de ahorro energético en cuanto se continúe la investigación en torno al desempeño de los diferentes componentes y su sinergia dentro de los sistemas neumáticos.

Los métodos tradicionales de análisis de sistemas energéticos basados en la primera ley de la termodinámica no incluyen la propiedad denominada *exergía*¹, la cual es sinónimo de calidad de la energía, es fruto del segundo principio de la termodinámica, y tiene gran influencia debido a que las transformaciones energéticas que ocurren en los diferentes componentes de un sistema neumático ocasionan la degradación de la capacidad para realizar trabajo útil. A pesar de su larga

¹ El término *exergía* fue propuesto por Rant en 1956 como una nueva palabra para la capacidad de trabajo usada antes por Bosnjakovic en 1938 [8].

Fecha de recepción: 01Junio de 2004

Fecha de aceptación: 23 Julio de 2004

YAMID ALBERTO CARRANZA S.

Profesor Auxiliar. M. Sc., I. M.
Facultad de Tecnologías
Escuela de Tecnología Mecánica
U. T. P.
yamidc@utp.edu.co

ALVARO HERNÁN RESTREPO V.

Profesor Auxiliar. M. Sc., I. M.
Facultad de Ingeniería Mecánica
U. T. P.
arestrep@utp.edu.co

JUAN ESTEBAN TIBAQUIRÁ G.

Profesor Asistente. M. Sc., I. M.
Facultad de Ingeniería Mecánica
U. T. P.
juantiba@utp.edu.co

historia, el análisis exergético coincide siempre con periodos de crisis energética, a lo cual vale la pena sumar que la crisis significa también oportunidad para el desarrollo de mejoras tecnológicas, involucrando el compromiso de los profesionales dedicados a la tecnología, la ciencia y la ingeniería.

Debido a que el aire comprimido es la sustancia de trabajo y la fuente de potencia fluida en los sistemas neumáticos, y teniendo en cuenta que el estudio de las transformaciones energéticas, en el caso de los cilindros, es poco [1], se lleva a cabo una discusión de la *exergía* del aire comprimido considerado como sistema cerrado, y se analiza cómo la segunda ley de la termodinámica puede conllevar a un análisis más relevante en la conversión energética en los sistemas neumáticos.

El trabajo presentado constituye un estudio recapitulativo que forma parte de los objetivos del proyecto de investigación *Análisis Exergético en Sistemas de Potencia Fluida*², y está en concordancia con la necesidad y oportunidad de investigación en relación con los sistemas de potencia fluida en nuestro medio [5].

2. ENERGÍA DEL AIRE COMPRIMIDO

La primera ley de la termodinámica establece que la energía de un sistema aislado debe conservarse y que la producción de trabajo puede suceder únicamente si no existe un estado de equilibrio absoluto. Para la

² *Análisis Exergético en Sistemas de Potencia Fluida*: proyecto de investigación de la propuesta académica presentada por el autor Yamid Alberto Carranza Sánchez a la Escuela de Tecnología Mecánica U.T.P., enero de 2004.

generación de trabajo es necesario que la presión o la temperatura de los distintos cuerpos que conforman el sistema no sean iguales. Este es precisamente el caso de un sistema de aire comprimido en el cual, es posible que su temperatura sea igual a la del medio circundante, pero la existencia del aire a una presión diferente a la presión del medio, hace que éste tenga una capacidad para efectuar un trabajo, por ejemplo, el desplazamiento de un pistón hasta que la presión se iguale a la presión del medio circundante, punto en el cual se alcanza el equilibrio mecánico.

El contenido energético E total de un sistema permanece constante, y éste presenta dos importantes componentes [2]: la energía disponible para realizar trabajo E_d , y la energía no disponible E_{nd} :

$$E = E_d + E_{nd} \quad (1)$$

La energía, definida como capacidad para realizar trabajo, es un concepto íntimamente ligado a la reversibilidad o irreversibilidad de los procesos a través de los cuales ésta energía es convertida en trabajo. Las irreversibilidades ocasionan la creación de energía no disponible, y por ende, la destrucción de la energía disponible. Entre las irreversibilidades más significativas cabe mencionar los efectos de fricción, los cuales son importantes en el caso de la neumática, y la diferencia de temperatura asociada a la transferencia de calor. Entre menores sean las irreversibilidades, mayor será la cantidad de trabajo útil producido debido a que se reduce el incremento en la energía no disponible.

Lo anterior resalta la importancia de no considerar el contenido energético de los sistemas como criterio fundamental para evaluar el desempeño de las transformaciones, sino que se debe tener en cuenta la irreversibilidad de los procesos asociados como indicador preponderante de la eficiencia de la conversión energética.

3. EL CONCEPTO DE EXERGIA APLICADO AL AIRE COMPRIMIDO CONSIDERADO COMO SISTEMA CERRADO

3.1 Trabajo Útil Máximo Del Aire Comprimido

La *exergía* o energía disponible está definida como el trabajo útil máximo que puede obtenerse a partir de un contenido de energía E . Si se permite que el aire comprimido conservado en una cámara y considerado como sistema cerrado, y en un estado inicial con presión absoluta P y temperatura T , realice una sucesión de cambios de estado de manera reversible hasta alcanzar las condiciones del medio ambiente P_o y T_o , se tendrá entonces el trabajo máximo, sin flujo, que el sistema puede producir:

$$w_{m\acute{a}x} = (u - u_o) - T_o(s - s_o) \quad (2)$$

donde:

u es la energía interna del sistema en el estado inicial.

s es la entropía del sistema en el estado inicial.

T_o, u_o, s_o : es la temperatura, la energía interna y la entropía, respectivamente, del sistema cuando se encuentra en equilibrio con el medio ambiente.

Una parte del trabajo máximo se realiza contra el medio ambiente a presión P_o , por lo tanto, el trabajo útil máximo o exergía e del aire comprimido (por unidad de masa) está dada por:

$$e = (u - u_o) - T_o(s - s_o) - P_o(v - v_o) \quad (3)$$

En la anterior ecuación, v y v_o son el volumen del sistema en la condición inicial y en el estado final de equilibrio con el medio circundante, respectivamente.

Para el caso del aire comprimido resulta más práctico expresar la ecuación (3) en función de la temperatura y presión, debido a su fácil medición. Haciendo uso de la definición de entalpía, $h = u + Pv$, se puede establecer:

$$e = \frac{RTP_o}{P} + u - h_o - T_o(s - s_o) \quad (4)$$

A partir de la ecuación (4) y bajo los conceptos de calor específico y cambio de entropía para gas ideal, se establece la ecuación (5) [3], expresión base del análisis y la discusión de la presente revisión:

$$e = RT_o \left[\ln \frac{P}{P_o} + \frac{TP_o}{T_o P} + \frac{\frac{T}{T_o} - k - k \ln \frac{T}{T_o}}{k - 1} \right] \quad (5)$$

La constante del aire R y la relación de calores específicos k , pueden ser consideradas constantes sin incurrir en errores significativos.

3.2 Comportamiento De La Exergía Del Aire Comprimido

3.2.1 Influencia De Las Condiciones Del Medio

La ecuación (5) establece que la exergía es función de las propiedades termodinámicas de la sustancia de trabajo y del medio circundante. En este caso, el aire comprimido constituye la sustancia de trabajo. En la revisión en torno a la mencionada ecuación, se considerará la variación de las propiedades del ambiente P_o y T_o , de acuerdo a la altura sobre el nivel del mar, de la presión absoluta de la sustancia de trabajo P y de la temperatura de la sustancia

de trabajo T ; con el propósito de verificar su influencia en la exergía del aire comprimido.

La figura 1, obtenida a partir de (5), presenta el comportamiento de la exergía y la presión del medio según la altura del lugar en el cual operará la sustancia de trabajo. En esta, se considera que las propiedades del aire comprimido son constantes e iguales a 700 kPa de presión absoluta y 300 K de temperatura, valores que están dentro de rangos de operación de los sistemas neumáticos. En la tabla 1, se muestra el comportamiento de las propiedades del medio, presión y temperatura, en función de la altura sobre el nivel del mar. La temperatura T_o es determinada a partir de la ecuación (6) [7]:

$$T_o = T_a - \hat{a} z \tag{6}$$

T_a es la temperatura estándar a nivel del mar, cuyo valor es 288,15 K³, y \hat{a} es el gradiente vertical de temperatura, cuyo valor es 0,00650 K/m. La presión del medio es determinada mediante:

$$P_o = P_{ref} * e^{\left[\frac{-gz}{RT_o} \right]} \tag{7}$$

La presión atmosférica de referencia P_{ref} tiene un valor de 101,33 kPa y es la presión a nivel del mar, $z=0$.

z [m]	P_o [kPa]	T_o [K]	z [m]	P_o [kPa]	T_o [K]
0	101,3	288,2	1600	83,2	277,8
200	98,9	286,9	1800	81,1	276,5
400	96,6	285,6	2000	79,0	275,2
600	94,3	284,3	2200	77,0	273,9
800	92,0	283,0	2400	75,0	272,6
1000	89,8	281,7	2600	73,0	271,3
1200	87,5	280,4	2800	71,1	270,0
1400	85,4	279,1	3000	69,2	268,7

Tabla 1. Variación de la presión y la temperatura del medio en función de la altura sobre el nivel del mar.

Una elevación de 3000 metros sobre el nivel del mar conlleva a la disminución de la presión y la temperatura del medio en aproximadamente 32% y 5%, respectivamente, en comparación con las propiedades a nivel del mar, lo cual redundará en un incremento en el trabajo útil máximo de la sustancia de trabajo, e , del 22%, según la figura 1.

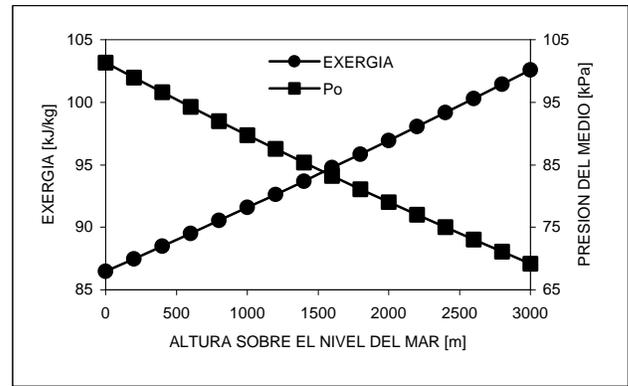


Figura 1. Variación de la exergía y de la presión del medio en función de la altura sobre el nivel del mar. Condiciones del aire comprimido: T=300 K y P=700 kPa.

La ecuación (5) se plantea nuevamente como la ecuación (8) y sus términos se presentan en la figura 2 con el propósito de observar la influencia de los mismos en el valor de la exergía.

$$e = RT_o \ln \frac{P}{P_o} + R \frac{TP_o}{P} + RT_o \left[\frac{\frac{T}{T_o} - k - k \ln \frac{T}{T_o}}{k-1} \right] \tag{8}$$

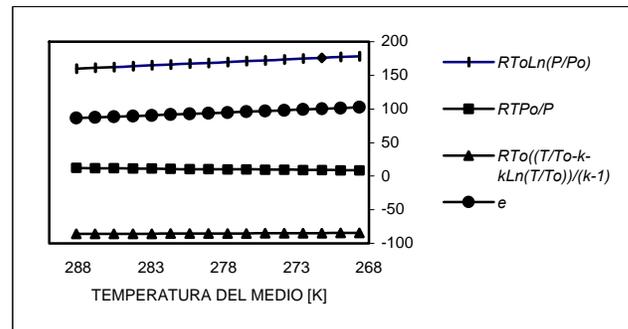


Figura 2. Magnitud de los componentes de la exergía e [kJ/kg]. Condiciones del aire comprimido: T=300 K y P=700 kPa.

A continuación se analizan los términos del miembro derecho de la igualdad en la ecuación (8):

Los dos primeros representan la exergía de presión y el tercer término representa la exergía térmica.

La temperatura del medio afecta de manera proporcional los términos de la expresión (8), excepto el segundo término, el cual representa la cantidad $P_o v$, pero tiene un valor poco significativo debido al reducido volumen específico del aire comprimido en las condiciones iniciales.

El primer término de (8) representa la influencia de la relación de las presiones entre el aire comprimido y el

³ Las propiedades consideradas nivel del mar corresponden a la atmósfera estándar de Estados Unidos de América [7].

medio en la variación de entropía del sistema, y es posible aseverar, que para las condiciones establecidas de la sustancia de trabajo, la presión del medio es relevante en la exergía total puesto que, como se mencionó anteriormente, una disminución de la presión del medio de aproximadamente el 30% conlleva a un incremento en la exergía del sistema del 30%.

El tercer término de la ecuación (8) representa, en buena medida, la variación de la entropía en función de la temperatura del medio. Aunque el valor puntual de la temperatura ambiental es considerable en el valor de la exergía total, el cambio de la temperatura del medio no repercute considerablemente, en virtud que una reducción de temperatura no afecta de manera considerable el término de exergía térmica para las condiciones dadas.

La figura 3 permite explicar gráficamente la influencia de la temperatura del medio en el trabajo útil máximo. Cabe resaltar, que el trabajo útil máximo se alcanza cuando los procesos para llegar al estado final de equilibrio con el medio, siguen caminos reversibles, es decir, procesos adiabáticos y/o procesos de transferencia de calor a temperatura igual a T_o . En la figura mencionada, a partir de un estado inicial i , se presentan dos posibles estados finales en equilibrio termodinámico con el medio, 1 y 2 , a temperaturas del medio T_{o1} y T_{o2} , respectivamente. Se puede observar que el camino reversible para efectuar la transformación desde i hasta 1 es siguiendo inicialmente la adiabática $i-a$ y luego la isoterma $a-1$, y de manera similar para 2 , con los procesos $i-c$ y $c-2$.

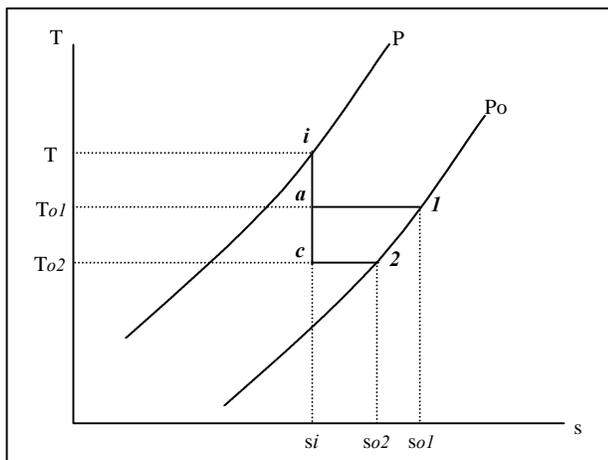


Figura 3. Representación de la transformación reversible del aire comprimido en el diagrama Temperatura-Entropía, teniendo dos temperaturas del medio T_{o1} y T_{o2} .

Del proceso $i-a-1$ con T_{o1} , se permite verificar que la variación de entropía ($s1-s_o$) es mayor que en el caso del proceso $i-c-2$ con T_{o2} . Acorde con la figura 3, el término $T_o(s-s_o)$ de la ecuación (4) representa la posibilidad de tener una sustancia de trabajo con exergía en mayor o menor cantidad. En el caso de T_{o1} el aporte a la exergía es mayor, debido a que su valor y el cambio

de entropía asociado son mayores, en comparación con T_{o2} .

3.2.2 Influencia De Las Condiciones Del Aire Comprimido

En las figuras 4 y 5 está representado el comportamiento de la exergía de la sustancia de trabajo de acuerdo a la variación de su temperatura y su presión. Las condiciones del medio se suponen constantes e iguales a 101,33 kPa y 288,15 K, para la presión y la temperatura, respectivamente. Un incremento en la temperatura del 10% genera una disminución de la exergía de aproximadamente el 7%, y una relación de presión del aire comprimido a la presión del medio (P/P_o) de aproximadamente 1100/100, conlleva a que la exergía se eleve desde cero hasta 1125 kJ/kg, un aporte mucho más significativo en comparación con la influencia de la temperatura.

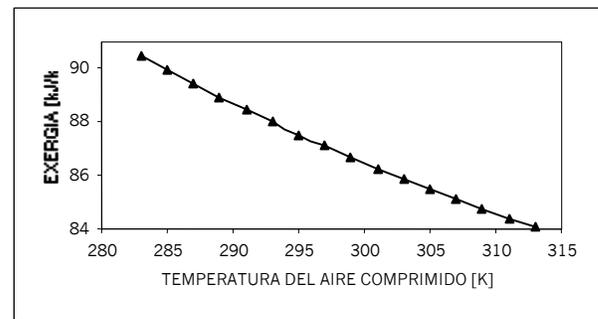


Figura 4. Variación de la exergía en función de la temperatura del aire comprimido. Condiciones del medio: $T_o=288,15$ K y $P_o=101,33$ kPa.

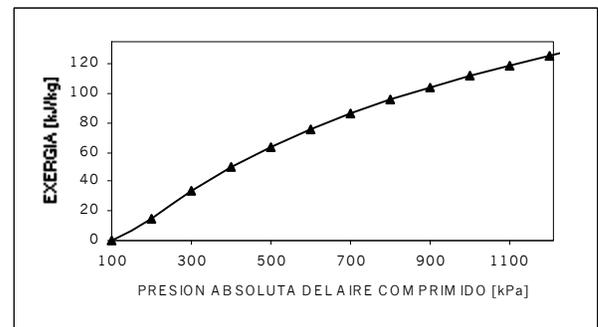


Figura 5. Variación de la exergía en función de la presión del aire comprimido. Condiciones del medio: $T_o=288,15$ K y $P_o=101,33$ kPa.

Para el caso del aire comprimido, el cual es refrigerado en la compresión y luego en su tratamiento con el fin de acondicionarlo, su temperatura se mantiene generalmente en valores muy cercanos a la temperatura del medio, lo cual conlleva a no brindar mayor importancia a la exergía térmica.

Se plantea que para unas condiciones definidas del aire comprimido, por ejemplo en el tanque acumulador del sistema, y bajo el supuesto de realización de procesos reversibles o ideales, es posible esperar un trabajo máximo en los actuadores. Si a lo anterior se suma el hecho que durante todo el proceso, de transmisión, control y utilización del aire comprimido, ocurren diferentes irreversibilidades, se obtendrá un trabajo menor que el trabajo máximo posible.

3.3 Eficiencia De Segunda Ley De La Termodinámica Para Procesos De Utilización Del Aire Comprimido [8]

El análisis de primera ley basado en los cambios de energía interna no resulta suficiente para la evaluación de los procesos al emplear aire comprimido. La inclusión de la exergía, como valor de la capacidad máxima para realizar trabajo, es una manera más racional para el análisis de la eficiencia de conversión energética.

La eficiencia de segunda ley ζ_{II} está dada por la ecuación (9) y representa la relación entre la producción de exergía e_p y la entrada de exergía e_e :

$$h_{II} = \frac{e_p}{e_e} * 100\% \quad (9)$$

La Tabla 2 presenta la información de una aplicación de aire comprimido en la que un acumulador con la sustancia de trabajo a unas condiciones establecidas, suministra el aire comprimido a un actuador que opera bajo unas condiciones mínimas. El medio ambiente se supone a $P_o=100$ kPa y $T_o=300$ K.

Se considera que el actuador operará hasta que la presión del acumulador alcance los 700 kPa. De esta manera se producirá por parte del actuador una salida de trabajo:

$$W_{real} = \dot{A}m * w_{real} \quad (10)$$

donde:

W_{real} es la salida total de trabajo real del actuador, [kJ].

w_{real} es la salida de trabajo real del actuador por unidad de masa, [kJ/kg]

$\dot{A}m$ es la masa de aire comprimido que utiliza el actuador en el periodo de operación [kg]

La producción de exergía del sistema neumático en cuestión es igual al valor de la salida total de trabajo real del actuador, y la entrada de exergía corresponde al trabajo útil máximo cuando el aire comprimido del acumulador alcanza el equilibrio termodinámico con el medio a través de una sucesión de procesos reversibles, es decir, es igual a la exergía de la sustancia de trabajo.

CONDICION	VALOR
Presión absoluta del aire del acumulador [kPa]	1000
Temperatura del aire en el acumulador [K]	300
Volumen del acumulador [m ³]	1
Presión absoluta de operación del actuador [kPa]	700
Salida de trabajo del actuador [kJ/kg]	74

Tabla 2. Propiedades y condiciones de los elementos del sistema neumático analizado con la eficiencia de segunda ley.

La Tabla 3 presenta los resultados de las cantidades analizadas. La exergía de entrada es calculada a partir de la ecuación (8) y se resalta la no existencia de exergía térmica debido a la igualdad de temperaturas entre la sustancia de trabajo y el medio.

Es importante considerar el potencial de trabajo útil cuando el aire comprimido está a 700 kPa, el cual es referido a exergía restante al final de la Tabla 3. A pesar que el actuador no puede emplear el aire a la presión mencionada, debe buscarse la posibilidad de aprovechar esta exergía, en caso contrario se estaría contribuyendo a la destrucción de la energía disponible para producir trabajo lo cual va en contra de las políticas actuales de uso racional de la energía.

Masa inicial en el acumulador [kg]	11,6
Masa final en el acumulador [kg]	5,8
Producción de exergía W_{real} [kJ]	429,0
Entrada de exergía [kJ/kg]	120,8
Entrada de exergía [kJ]	1402,6
Eficiencia de segunda ley [%]	31
Exergía restante a 700 kPa [kJ/kg]	93,7

Tabla 3. Resultados del análisis de segunda ley de la aplicación del aire comprimido.

La tendencia actual de implementar de medidas de eficiencia energética radica, en el caso de los sistemas neumáticos, en evaluar la distribución energética a lo largo de todo el sistema neumático y llevar a cabo un estudio de estratificación de las diferentes irreversibilidades con el propósito de evitar, en la mayor medida, la degradación de la energía disponible.

A pesar que este importante tópico del análisis de eficiencia de segunda ley al diseño y la evaluación de los sistemas neumáticos, no tiene una marcada difusión de información, al menos en nuestro ámbito regional y nacional, se considera que es un potencial de investigación y desarrollo tecnológico que debe ser tenido en cuenta si se considera una de las propuestas por parte del Ministerio de Minas y Energía, en la que se menciona un ambicioso programa de reducción de pérdidas y uso racional de la energía con el cual se espera en el año 2010 tener una reducción en la demanda de aproximadamente 2000 GWh .

4. CONCLUSIONES

Resulta relevante y pertinente abordar con mayor ímpetu el análisis energético de los sistemas neumáticos debido a que su baja eficiencia constituye un potencial de reducción de pérdidas de energía.

El trabajo útil máximo del aire comprimido depende de la altura de operación del sistema neumático sobre el nivel del mar, debido a la variación de las condiciones termodinámicas del medio ambiente.

La exergía del aire comprimido tiene una dependencia más marcada en relación con la variación de la presión de la sustancia de trabajo que con su temperatura.

La eficiencia basada en la segunda ley de la termodinámica representa una manera más racional de evaluar el desempeño de los sistemas neumáticos puesto que valora la máxima capacidad para efectuar trabajo que tiene el aire comprimido.

5. BIBLIOGRAFÍA

[1] CAI, Maolin., FUJITA, Toshinori., y KAGAWA, Toshiharu. *Simulation of energy distribution in pneumatic cylinder actuating system*. Proceedings of JSST, 2000, 209-212.

[2] HUANG, Francis F. *Ingeniería termodinámica*. México: Compañía Editorial Continental, S. A., 1994.

[3] KAGAWA, T., CAI, M.I., FUJITA, T., y TAKEUCHI, M. *Energy consideration of pneumatic cylinder actuating system*. The 6th International Symposium on Fluid Control, Measurement and Visualization, Sherbrooke (QC) Canada, August, 2000.

[4] KIRILLIN, V. A., SICHEV, V. V., y SHEINDLIN, A. E. *Termodinámica técnica*. Moscú: Editorial MIR, 1986.

[5] LIZCANO A., Waldo. *Potencia fluida: oportunidad de investigación y desarrollo en nuestro medio*. SCIENTIA ET TECHNICA. Mayo 2002, No. 19, Páginas 77 a 82.

[6] MITSUOKA. *The status and tendency of driving systems*. Journal of the Japan Hydraulics and Pneumatics Society, 19-6, 436/443, 1988.

[7] MUNSON, Bruce., YOUNG, Donald. y OKIISHI, Theodore. *Fundamentos de Mecánica de Fluidos*. México: Editorial Limusa, S. A. – Grupo Noriega Editores, 1999.

[8] RUSSELL, Lynn D., y ADEBIYI, George A. *Termodinámica clásica*. México: Addison Wesley Longman de México S. A., 2000.

[9] SERRANO, N., Antonio. *Neumática*. España: Thomson Editores – Paraninfo S.A., 1996.

[10] VICHNIEVSKY, R. *Termodinámica técnica*. Barcelona: Editorial Labor, S. A., 1978.