



## TRABAJO TEORICOEXPERIMENTAL

Diseño de ánodo y tobera de una antorcha universal de plasma para proyectar hidroxiapatita

*Design of anode and nozzle of a plasma universal torch for hydroxyapatite projection*

René – Collazo Carceller  
Adrián – Díaz Romero  
César – Cisneros Ramírez

Carlos – Lariot Sánchez  
Joel – Morales Salas

**Recibido:** septiembre de 2013

**Aprobado:** mayo de 2014

### Resumen/ Abstract

La importancia de mejorar la calidad de vida a personas de la tercera edad, así como a las afectadas por accidentes, hizo que la comunidad científica internacional se volcara a la búsqueda de soluciones en esta dirección. Con la intención de alcanzar mejores resultados en el proceso de proyección de la hidroxiapatita HAP-200, de origen cubano, utilizada para el recubrimiento de prótesis médicas, se presentó una metodología para el rediseño del ánodo y la tobera de una antorcha de plasma universal. Ésta permitió, a través de consideraciones apoyadas en la eficiencia térmica de este dispositivo, la Teoría de la Termodinámica, la de los Fluidos, las experiencias, acumuladas anteriormente sobre otros diseños, realizados a este dispositivo y la valoración económica, realizar, el estudio de las características proyectivas de ésta, sino, y la no adquisición de este tipo de equipo por importación, permitiendo, además, un ahorro considerable, desde este punto de vista.

**Palabras clave:** antorcha, argón, hidroxiapatita, plasma, proyección.

*The importance of improving the live quality to the person of thirds age and, those affecting by accident, made that the international scientific community worked to fine out the solution in that direction and try to help the peoples. In order to improve better projection results to the Cuban original hidroxiapatita HAP- 200, employed in recovering medical devise, used in invalid persons, was presenting the methodology for redesign of the anode and the nozzle of the universal plasma torch. This was established through the considerations of the Thermal Efficiency of this equipment, the Thermodynamic, the Flues Theories, the gartered experiences, about others designs, made to this before and the economical evaluation. It allows not only the study of its projective characteristics and, also, do not acquire this by the importation, guarantying, by this way, to save money, from this point of view.*

**Key words:** torch, argon, hydroxyapatite, plasma, projection.

### INTRODUCCIÓN

La necesidad existente de remplazos para diferentes partes del cuerpo humano, es una realidad provocada por los accidentes de trabajo, del tránsito y el envejecimiento natural de la población. Si a esto se le suma, que la cantidad de donantes no es suficiente para la creciente demanda, no se hace difícil entender el por qué la comunidad científica internacional ha declarado la importancia de crear recursos para dar solución a un inconveniente como éste.

El recubrimiento de un material con hidroxiapatita es un proceso complejo y de él depende, en gran parte, el éxito clínico del implante. Cuba posee diferentes centros de investigaciones, que se han dedicado a desarrollar biomateriales, para aplicaciones médicas. En el mercado se comercializan prótesis ortopédicas recubiertas de hidroxiapatita por ser el compuesto más parecido al componente mineral de los huesos [1-2]. Ésta es reconocida por el organismo como propio, puede crecer en contacto con ella, evitando la formación de la cápsula fibrosa. Actualmente este biomaterial, que ostenta la supremacía en el mercado nacional, se encuentra distribuido en toda la red hospitalaria existente en el país.

Una de las técnicas de recubrimientos más utilizada en el mundo es la proyección por plasma térmico atmosférico de partículas de hidroxiapatita sobre aleaciones metálicas. Esta proyección se realiza a través de una antorcha de plasma, capaz de proyectar partículas de estas sobre el implante metálico, formando un recubrimiento. Debido a las características de la hidroxiapatita cubana, tanto desde el punto de vista de su composición, como morfología, se hace necesario un estudio de las características de proyección, para lograr una buena osteointegración. Para esto, es preciso estudiar el comportamiento de la variación de ciertos parámetros de la antorcha, como: el flujo de gas Argón, la distancia entre el cátodo y el ánodo, los diámetros y longitudes de este último, las potencias utilizadas, la entrega de la misma, la eficiencia térmica de la antorcha, la velocidad del plasma, así como, su capacidad de refrigeración [2-3].

Es una realidad que internacionalmente se cuenta con un considerable arsenal de métodos, dedicados a estudiar la influencia de los parámetros del proceso de proyección en las características del depósito. Si bien esto es así, las condiciones de la hidroxiapatita cubana, por su composición y los rangos de granulometría, anteriormente expuesto, exigen de su estudio particular. Por otro lado, los fabricantes no exponen con profusión las características de estos dispositivos de proyección, para realizar su reproducibilidad [4].

El diseño y construcción de tales antorchas es un complejo problema en el que inciden varias disciplinas de las ingenierías como: electricidad, transferencia de calor, mecánica de fluidos, metalografía y diseño mecánico [5]. Considerando lo expuesto anteriormente, se decidió conformar una propuesta metodológica para la construcción de una antorcha con características universales, a través de un ánodo y una tobera desmontable, capaz de cubrir el intervalo de los parámetros antes mencionados.

## ASPECTOS FUNDAMENTALES DEL DISEÑO DE LA ANTORCHA DE PLASMA

### Cálculos de la eficiencia térmica

El balance energético en la antorcha de proyección por plasma es definido, como la energía ganada por el gas formador de plasma, que a su vez es la diferencia entre la potencia eléctrica de entrada y las pérdidas totales en el enfriamiento y externas. Lo anterior puede ser expresado en la siguiente ecuación (1):

$$Q_T = Q_{electrodo} + Q_G \quad (1)$$

Donde:

$Q_T$ ,  $Q_{electrodos}$ ,  $Q_G$ , son las energías de entrada, de pérdida y en el plasma, respectivamente ver ecuación (2):

$$Q_{electrodos} = m_{agua} c_{p,agua} (t_f - t_i) \quad (2)$$

Donde:  $m_{agua}$  es la masa del refrigerante en (kg/s),  $c_{p,agua}$  es el calor específico, 4.187 kJ/kgK,  $T_f$  y  $T_i$  son las temperaturas del agua refrigerante con la antorcha trabajando y apagada (K), respectivamente. Ver ecuación (3):

$$Q_G = m_g (H_g - H_{og}) \quad (3)$$

Donde:  $H_{og}$  es la entalpía del gas formador de plasma entrante (J/kg),  $H_g$  es la entalpía del plasma (J/kg),  $m_g$  es la razón de flujo másico del gas formador de plasma  $1.26 \cdot 10^{-10}$  (kg/s).

La eficiencia electrotérmica es dada por la ecuación (4):

$$\eta = \frac{(H_g - H_{og}) \dot{m}_g}{VI} * 100 \quad (4)$$

Donde:  $V$  es el voltaje de la fuente igual a 60 V,  $I$  es la corriente de la fuente (A).  
La entalpía del gas formador de plasma entrante, fue calculada por la ecuación (5):

$$H_{og} = c_p * T \quad (5)$$

Donde:  $C_p$  es el calor específico (2.5 kJ/kgK),  $T$  es la temperatura del gas (11000K).  
Sustituyendo las ecuaciones (2), (3) y (4) en (1) y luego despejando se obtiene la ecuación(6), para la entalpía del gas de plasma:

$$H_g = H_{og} + \frac{VI - m_{agua} C_p (T_f - T_i)}{m_g} \quad (6)$$

Donde:  $m_{agua}$  es la razón de flujo másico del refrigerante (kg/s),  $C_p$  es el calor específico del refrigerante (kJ/kgK).  
Así queda definida la metodología para calcular la eficiencia térmica de la antorcha. Las pérdidas se determinan en el ánodo que es quien transfiere calor al agua y este calor se puede determinar midiendo la temperatura del agua a la entrada y la salida de la antorcha. La entalpía del gas de plasma fue calculada, utilizando los términos de la tabla 1.

Tabla 1. Valores usados para el cálculo de la entalpía del gas de plasma.						
	$m_g$ (kg/s)	$H_{og}$ (kJ/kg)	$VI$ (kW)	$\rho_{argón}$ kg/m <sup>3</sup>	$T_f - T_i$ (K)	$C_p$ (J/kg K)
Argón	0,001335	$2.7 \cdot 10^4$	12	1,78	-	2500
Agua	0,1375	-	12	1000	11	4180

La entalpía del gas de plasma resultó ser  $2.7 \cdot 10^4$  kJ/kg, con este valor fue calculada la eficiencia térmica de la antorcha, la cual alcanzó un valor de 50%.

#### Cálculos de la termotransferencia del ánodo con el portacátodo

Basado en la teoría de transferencia de calor, se realizó un estudio aplicado a la propuesta del diseño del ánodo a partir de la antorcha anterior, mostrada en la figura 1, en la cual operan los siguientes parámetros:

- Gas formador de plasma: Argón
- Gas de arrastre: Argón
- Flujo del gas de plasma: 20 a 60 l/min
- Flujo del gas de arrastre: 2-5 l/min
- Eficiencia térmica: 50 a 60%
- Temperatura de Plasma: 10 000 a 15000K
- Tamaño de partículas: 100 a 200  $\mu$ m

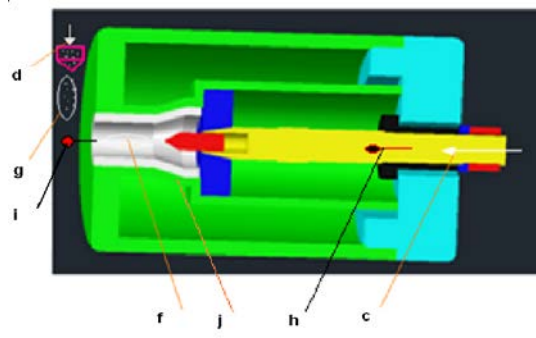


Fig. 1. Vista en corte del diseño de la antorcha de plasma, c- flujo del gas de plasma, d- flujo del gas de arrastre, f- temperatura del plasma, g- tamaño de las partículas, h- energía de entrada, i-energía de salida, j- porta- ánodo.

El diámetro exterior de la zona de interés en el análisis es de 20mm, la longitud es de 21mm y asumiendo que está conformado por cobre de 99% debido a su excelente conductividad, eléctrica y térmica como se muestra en la figuras 2 y 3.

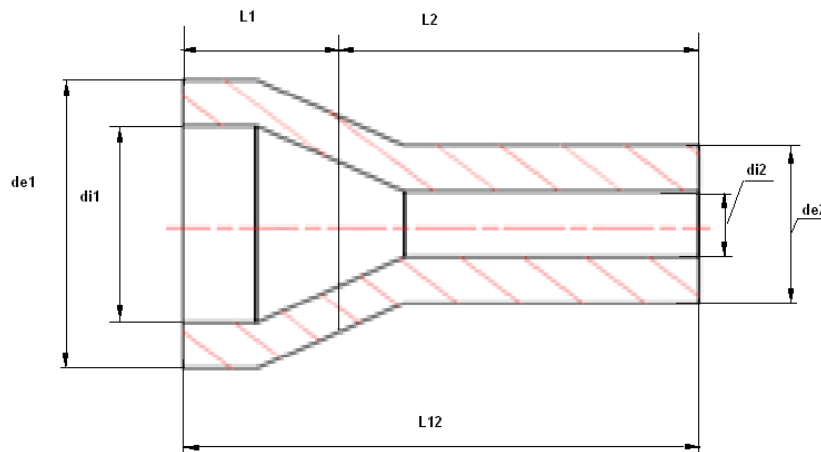


Fig. 2. Ánodo real.



Fig. 3. Ánodo equivalente.

Para el análisis se trabajó con un cilindro equivalente de diámetro interior y exterior igual a: vea las ecuaciones (7) y (8).

$$d_{\text{int,eq}} = \frac{d_{i1}L_1 + d_{i2}L_2}{L_{1+2}} = 9.42\text{mm} \quad (7)$$

$$d_{\text{ext,eq}} = \frac{d_{e1}L_1 + d_{e2}L_2}{L_{1+2}} = 17.43\text{mm} \quad (8)$$

Donde:  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_{1+2}$  son las longitudes de cada una de las partes de la antorcha;  $d_{i1}$ ,  $d_{i2}$ ,  $d_{e1}$  y  $d_{e2}$  son los diámetros interior y exterior de cada una de las partes de la antorcha. De esta manera, se realizan particiones radiales en el área transversal de dicho cilindro, como se muestra en la figura 4.

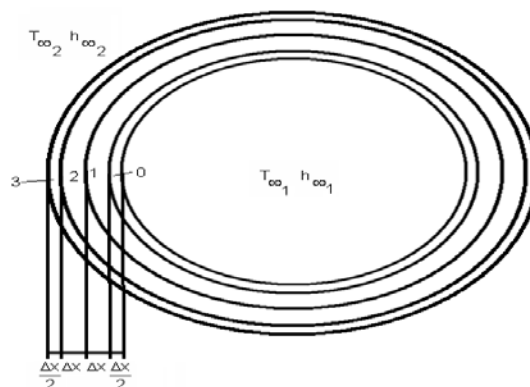


Fig. 4. Partición del ánodo equivalente.

### Determinación de las expresiones para el cálculo de las temperaturas

Partiendo de la primera ley de la termodinámica, se tiene la ecuación (9), [6].

$$Q = \Delta U + L \quad (9)$$

Donde:  $Q$  es el calor (W),  $\Delta U$  es la variación de energía interna (W) y  $L$  es el trabajo (W).

En vista que el trabajo realizado se considera despreciable entonces todo el calor intercambiado se emplea en variar la energía interna, lo cual viene reflejado en la ecuación (10):

$$Q = \Delta U = m_{agua} C_{agua} \Delta T_{agua} = \rho_{cobre} V_{cobre} C_{cobre} \frac{(T_i^{t+1} - T_i^t)}{\Delta \tau} \quad (10)$$

Despejando el flujo de agua se tiene la ecuación (11).

$$m_{agua} = \frac{\rho_{cobre} V_{cobre} C_{cobre} (T_i^{t+1} - T_i^t)}{C_{agua} \Delta T_{agua}} \quad (11)$$

Donde:  $m_{agua}$  es el flujo de agua (kg/s),  $C$  es la capacidad calorífica (kJ/kgK),  $V$  es el volumen ( $m^3$ ),  $T$  es la temperatura (K),  $\Delta \tau$  es el tiempo de operación (s),  $\rho_{cobre}$  es la densidad ( $Kg/mm^3$ ),  $T_i^t$  es la temperatura de la pared interior del ánodo en el instante  $t=0$  (K),  $T_i^{t+1}$  es la temperatura de la pared interior del ánodo en el instante  $t \neq 0$  (K),  $\Delta T_{agua}$  es la variación de temperatura del agua (K).

### Balance de energía para la partición 0

El balance de energía en la partición 0 viene dado por la ecuación (12). El primer término de la izquierda representa el calor intercambiado entre el flujo de gases y la superficie interior del la antorcha. El segundo término de la izquierda representa el calor por conducción en la partición 0 y el término de la derecha es la variación de la energía interna de dicha partición.

$$h_1 (T_{\infty 1} - T_0) A_i + \frac{KA_i (T_1 - T_0)}{\ln(R_1/R_i)} = \rho V_0 C \frac{(T_0^{t+1} - T_0^t)}{\Delta \tau} \quad (12)$$

Donde:  $h_1$  es el coeficiente de convección de calor (W/mk),  $T_{\infty 1}$  es la temperatura interior del ánodo (K),  $T_0$  es la temperatura de la partición 0 (K),  $T_1$  es la temperatura de la partición 1 (K),  $T_0^T$  es la temperatura de la partición 0 en el instante inicial,  $t=0$  (K),  $T_0^{t+1}$  es la temperatura de la partición 0 en un instante  $t \neq 0$  (K),  $R_1$ , radio de la partición 1 (mm),  $R_i$  radio interior del ánodo (mm),  $K$  es la conductividad térmica del material de la antorcha (W/mk),  $A_i$  es el área de la sección transversal interior del ánodo ( $mm^2$ ),  $V_0$  es el volumen de la partición 0 ( $mm^3$ ),  $C$  es la capacidad calorífica del material de la antorcha (kJ/kgK),  $\Delta t$  es el tiempo de operación (s) y  $\rho$  es la densidad del material de la antorcha ( $Kg/mm^3$ ). Usando la teoría de la conducción del calor en una pared cilíndrica se puede plantear que la cantidad de calor  $Q$  que pasa a través de todo el área de la pared del cilindro (con radio  $r$  y espesor de la pared  $dr$ ) por unidad de tiempo, según la ley de Fourier [6], viene dada por la ecuación (13).

$$Q = -KS \frac{dt}{dr} \quad (13)$$

Donde:  $K$ , coeficiente de conducción calorífica,  $S$ , área de la pared del cilindro ( $mm^2$ ),  $dt$  es la diferencia de temperatura (K),  $dr$  es la diferencia de radios entre las particiones ( $mm^2$ ).

En el proceso de diseño de esta antorcha se tuvo en cuenta la teoría de la conductividad térmica en aras de mejorar el enfriamiento del ánodo, elemento de gran importancia en la estabilidad térmica del proceso y de la proyección de un haz de polvo de hidroxiapatita lo más concéntrico posible. Para esto se usó la ecuación (7), determinando que el nuevo diseño de este elemento quedaría desprovisto del antiguo porta-ánodo, representado en la figura 1, por el elemento j, permitiendo con esta nueva geometría, representada en la figura 5, la posibilidad de poder evacuar una mayor cantidad de calor hacia el refrigerante en un mismo intervalo de tiempo, si se tiene en cuenta la reducción del espesor de pared,  $(dr)$ , que experimentó 'este por el solo hecho de la eliminación de dicho porta ánodo.

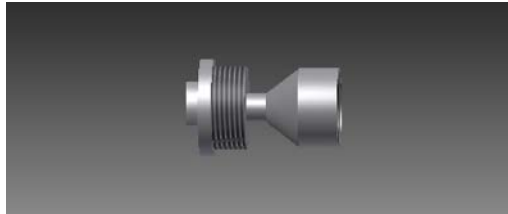


Fig. 5. Rediseño del ánodo.

El calor que atraviesa la pared del tubo, durante una hora, es directamente proporcional a la diferencia de temperaturas entre las caras de la pared, al coeficiente de conducción calorífica y a la longitud del tubo y, a la vez, inversamente proporcional al logaritmo natural de la relación entre el radio exterior y el radio interior del tubo, como se expresa en la ecuación (14).

$$Q = (t_1 - t_2) \frac{2\pi LK}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (14)$$

Donde:  $Q$  es el calor que atraviesa la pared (W),  $t$  es la temperatura particional (K),  $t_2$  es la temperatura en la partición 2 (K),  $L$  es la longitud del tubo (mm),  $K$  es la conductividad térmica (W/mK),  $r_1$  es el radio de la partición 1 (mm),  $r_2$  es el radio de la partición 2 (mm).

#### Determinación del diámetro y la cantidad necesaria de agujeros

De igual forma que el ánodo garantiza la intercambiabilidad en el sistema, para permitir el estudio de los parámetros de proyección en las características del depósito, la tobera lo realiza de igual forma, al posibilitar el uso de diferentes tipos de estas, según su diseño.

Teniendo el flujo másico necesario a la salida, como dato, se procede a determinar el área de los agujero a través de la ecuación (15), [7-8].

Para  $N = x$

$$A_{p2} = \frac{\dot{m}_{p2}}{\rho C} \quad (15)$$

El flujo másico viene dado por la ecuación (16):

$$\dot{m}_{p2} = \frac{\dot{m}}{x} \quad (16)$$

Donde:  $N$  es la cantidad de agujeros,  $A_p$  es el área de la sección transversal de los agujeros ( $m^2$ ),  $C$  es la velocidad del fluido (m/s),  $m$  es el flujo másico (kg/s),  $m_{p2}$  es el flujo másico por agujero,  $\rho$  es la densidad del gas ( $kg/m^3$ ) y  $x$  es la cantidad de agujeros. El diámetro se determina por la ecuación (17):

$$d_{px} = \sqrt{\frac{4A_{p2}}{\pi}} \quad (17)$$

Donde:  $d_{px}$  es el diámetro de los agujeros (mm),  $A_{p2}$  es el área de la sección transversal los agujeros ( $m^2$ ).

### Cálculo económico

Para el cálculo económico se hace uso de la ecuación (18):

$$C_f = C_d + C_{ir} \quad (18)$$

Donde:  $C_f$  es el costo total de fabricación (CUC),  $C_d$  es el costo directo (CUC) y  $C_{ir}$  es el costo indirecto (CUC)

### Cálculo de costos directos

Los costos directos se determinan aplicando la ecuación (19):

$$C_d = M_p + S_b + S_c + S_s + C_e \quad (19)$$

Donde:  $M_p$ , materia prima (**36,36** CUC),  $S_b$ , salario básico (**5,80** CUC),  $S_c$ , salario complementario (**0,53** CUC),  $S_s$ , aporte al seguro social (**0,63** CUC),  $C_e$ , consumo de energía (**37** CUC).

### Costos indirectos

Los costos indirectos están incluidos en los costos de transportación (t), costos de taller (T), costos de mantenimiento (M), costos de dirección y otros. Una de las formas de apreciar los costos indirectos es a través del coeficiente de amortización de costos indirectos mediante la ecuación (20):

$$C_{ir} = 1.15 * \sum S_B \quad (20)$$

Donde:  $C_i$  son los costos indirectos (CUC),  $S_B$ , salario básico total (CUC).

$$C_i = 1,15 \cdot 5,80 = 6,67 \text{ [CUC]}$$

$$C_f = 80,32 + 6,67 = 88,99 \text{ [CUC]}$$

## RESULTADOS

1. Se concibió el balance energético de la antorcha y la formulación para la determinación de la energía del plasma y la eficiencia electrotérmica, llegando a ser estas de 5.67kW y 47% respectivamente.
2. Basado en la teoría de transferencia de calor, se realizó un estudio del diseño del ánodo, realizando particiones radiales en el área transversal a ésta. De esta forma, se determinaron las expresiones de cálculo de la temperatura en la pared del ánodo, a través del balance energético y el flujo másico de agua para la refrigeración de la antorcha, siendo la misma de 888,84 K. Lo anterior permitió prever cualquier daño en la pared del ánodo por el efecto de la temperatura en ésta y en cuánto ha de aumentarse el flujo másico de agua para atenuar el mismo.
3. Teniendo en cuenta, como dato, el flujo másico de gas, a la salida de la tobera se procede a determinar el área y el número de agujeros para las posibilidades de diseño de la tobera, en este caso, se determinaron 4 agujeros con 0,10 mm de diámetro. Esto permitirá evaluar el comportamiento del flujo del gas Argón en el haz de plasma.
4. Finalmente, el cálculo económico arrojó un costo de fabricación de 88,99 [CUC], para el uso de los siguientes valores de diseño mostrados en la tabla 2.

Tabla 2. Valores de diseño.	
ELEMENTO DE DISEÑO	VALORES DE USO
Flujo de gas formador de plasma (Argón)	20 – 60 l/min
Flujo de gas de arrastre (Argón)	2- 5 l/min
Eficiencia térmica	52 %
Temperatura del Plasma	10000 <sup>o</sup> K
Tamaño de partículas	100 – 200 $\mu$ m
Distancia de proyección	50 – 200 mm

## DISCUSIÓN

Apoyado en consideraciones sobre la Eficiencia Térmica, la Teoría de la Termodinámica se logró concebir una metodología para el diseño de dicha antorcha.

La temperatura en la pared, del ánodo de cobre, mostró comportamientos por debajo de los 900 K, lo que acredita la fiabilidad de los resultados obtenidos al compararlos con los obtenidos en [9].

El cambio de diseño lejos de afectar la componente económica la mejora, pues la operatividad se hace menos compleja, y la cantidad de material, aunque no es significativa, disminuye.

La posibilidad de contar con esta metodología para realizar el diseño de dicha antorcha y lograr un efecto económico provechoso, permitió no depender de la propuesta del mercado internacional.

## CONCLUSIONES

Se logró establecer, apoyado en consideraciones sobre la eficiencia térmica, la teoría de la Termodinámica, la de Mecánica de los Fluidos y valoraciones económicas, una metodología para el diseño de un modelo nuevo de antorcha con características universales, la cual permitirá caracterizar nuestra hidroxiapatita, alcanzando mejores resultados en el proceso de proyección.

Se logró, a través de la comparación de los resultados de este trabajo y los expuestos en [9] reafirmar lo positivo del cambio propuesto en el nuevo diseño del ánodo, ya que, este último, presenta un diseño más sencillo, que, al reducir el espesor de pared, permite evacuar una mayor cantidad de calor hacia el refrigerante, mejorando la estabilidad térmica del proceso, lográndose, por esta vía, un arco más concéntrico, que no dañe las paredes del ánodo.

Se obtuvo un diseño menos complejo, que permite el trabajo de la antorcha, para el tiempo de proyección, sin afectaciones térmicas en la que se alcanza una temperatura de 888,84 K, más fiable con una eficiencia del 52%, además de que se emplea menos cantidad de material, lo cual le da un efecto económico provechoso en comparación con la importada, si se tiene en cuenta que el costo de la misma es de 88,99 CUC y en el mercado internacional es, dependiendo del diseño, de aproximadamente 2000 dólares.

## REFERENCIAS

- [1]. Faig-Martí, J.; Gil-Mur, F.J., "Los recubrimientos de hidroxiapatita en las prótesis articulares". *Revista Española de Cirugía Ortopédica y Traumatología*, ELSEVIER, 2008, vol.52, n.2, p. 113-120, Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/S1888-4415\(08\)74805-7](http://dx.doi.org/10.1016/S1888-4415(08)74805-7), ISSN 1888-4415.
- [2]. Prevosto, L.; *et al.*, "On the influence of the nozzle length on the arc properties in a cutting torch". *Journal of Physics: Conference Series*, IOPScience, 2009, vol.166, n.1, p. 012021-012021-4, Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/166/1/012021>, ISSN 1742-6596.
- [3]. Prevosto, L.; *et al.*, "On the physical origin of the nozzle characteristic and its connection with the double-arc phenomenon in a cutting torch". *Journal of Applied Physics*, AIP, 2009, vol.105, n.1, p. 013309-013309-6, Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3041636>, ISSN 0021-8979.
- [4]. Jesseela, S.; Sobhan, C.B., "Numerical modeling of annular flow with phase change in a microchannel". *International Journal of Thermal Sciences*, ELSEVIER, 2015, vol.89, p. 87-99, Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2014.10.017>, ISSN 1290-0729.
- [5]. Shangzhao, S.; Jiann-Yang, H., "Plasma spray fabrication of near-net-shape ceramic objects". *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, Scientific Research, 2003, vol.2, n.2, p. 145-150, &#91;consultado: septiembre de 2007&#93;, Disponible en: <http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=20262>, ISSN 2327-4085.
- [6]. Bergman, T.L.; *et al.*, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 7th ed., United States of America: John Wiley & Sons, Inc, 2011, ISBN-13: 978-0-470-50197-9.



- [7]. Lee, Y.J.; *et al.*, "Fluid flow and heat transfer investigations on enhanced microchannel heat sink using oblique fins with parametric study". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, ELSEVIER, 2015, vol.81, p. 325-336, Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.10.018>, ISSN 0017-9310.
- [8]. Yarin, L.P.; *et al.*, *Fluid Flow, Heat Transfer and Boiling in Micro-Channels*. Springer, 2009, p. 145-185, 195-252, ISBN-13: 978-3-540-78754-9.
- [9]. García de la Figal, J.; *et al.*, "Simulación de antorcha de plasma". *Revista Cubana de Ingeniería*, 2010, vol.1, n.3, p. 25-30, ISSN 2223-1781, Disponible en: <http://rci.cujae.edu.cu/index.php/rci/article/view/26/27>

## AUTORES

### **René Collazo Carceller**

Ingeniero Mecánico Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Departamento de Tecnología y Construcción de Maquinado, TCM, Facultad de Ingeniería Mecánica. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba.

e-mail: [collazo@mecanica.cujae.edu.cu](mailto:collazo@mecanica.cujae.edu.cu)

### **César Cisneros Ramírez**

Ingeniero Mecánico, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Centro de Estudios de Tecnologías Energéticas Renovables, CETER, Facultad de Ingeniería Mecánica. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba.

e-mail: [cesar@ceter.cujae.edu.cu](mailto:cesar@ceter.cujae.edu.cu)

### **Joel Morales Salas**

Ingeniero Mecánico. Máster en Ciencias, Profesor Auxiliar, Centro de Estudios de Tecnologías Energéticas Renovables, CETER, Facultad de Ingeniería Mecánica. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba.

e-mail: [jmorales@ceter.cujae.edu.cu](mailto:jmorales@ceter.cujae.edu.cu)

### **Carlos Lariot Sánchez**

Ingeniero Mecánico, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Instituto de Materiales y Reactivos, IMRE. Universidad de la Habana, La Habana, Cuba.

e-mail: [carloslariot@yahoo.es](mailto:carloslariot@yahoo.es)

### **Adrián Díaz Romero**

Ingeniero Mecánico, Profesor Instructor, Departamento de Tecnología y Construcción de Maquinado, TCM, Facultad de Ingeniería Mecánica. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba.