

Aplicación de Métodos Multicriterio para la Selección de Materiales para Menaje de Cocinas de Inducción

J. Martínez¹, D. Vaca¹, M. Orozco¹, I. Montero¹, D. Carrión²

¹Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables, INER

Email: javier.martinez@iner.gob.ec; diego.vaca@iner.gob.ec;

marco.orozco@iner.gob.ec; andres.montero@iner.gob.ec

²Universidad Politécnica Salesiana

Email: diego.carrion@iner.gob.ec

Resumen

En esta investigación se presentan los resultados de la selección de materiales para menaje de cocinas de inducción, donde se ha tenido en cuenta la interrelación entre los requisitos de diseño, material y procesado del producto. Se han identificado las propiedades físicas que deben tener, junto con las restricciones para la salud, apariencia, costo de material y procesado, así como, la capacidad de adaptar los procesos de fabricación para realizar el menaje por parte de la industria de Ecuador. A continuación, se han identificado materiales candidatos que cumplen con los requerimientos anteriores como el caso del AISI 430 o los aceros electromagnéticos, así como, materiales que suelen utilizarse en el menaje. Por último, se han utilizado distintos modelos de selección de materiales como el método Pugh, Dominic y Pahl-Beitz, que permitieron elegir los mejores materiales para el proceso. Los resultados muestran la existencia de tres configuraciones de materiales candidatos como son: a) Acero inoxidable AISI 430 o AISI 436, acero inoxidable AISI 304 y capa antiadherente de teflón interior, b) Acero inoxidable AISI 430 o AISI 436 embutido en el fondo de una olla de aluminio y c) Hierro fundido con tratamiento de vitrificado.

Palabra clave—menaje, ollas, cocinas de inducción, métodos multicriterio, Paul-Beitz, Pugh, Dominic.

Abstract

This investigation shows results about materials selection for pans of induction cookers, which takes into account the interplay between the requirements of design, materials and product processing. It has identified physical properties, as well as, restrictions on the health, appearance, material and processing cost. Finally, it has studied the ability to adapt manufacturing processes by industry in Ecuador. As a result, it has established the candidate materials which meet the above requirements. This is the case of AISI 430 or electromagnetic steel, as well as materials typically used for induction utensils. Finally, it was used different selection models like Pugh, Dominic and Pahl - Beitz methods, which allowed choosing the best materials for the process. The results have shown that there are three settings as candidate materials: a) Stainless steel AISI 430 or AISI 436, AISI 304 steel and Teflon non-stick coating inside, b) AISI 430 or AISI 436 stainless steel which has been inlaid in an aluminum pan and c) Cast iron with vitrified treatment.

Index terms—induction cooker, induction cookware, pot, multicriteria analysis, Paul-Beitz, Pugh, Dominic.

Recibido: 18-08-2014, Aprobado tras revisión: 21-11-2014.

Forma sugerida de citación: Martínez, J.; Vaca, D.; Orozco, M.; Montero, I; Carrión, D. (2015). “Aplicación de Métodos Multicriterio para la Selección de Materiales para Menaje de Cocinas de Inducción”. Revista Técnica “energía”. No 11, Pp. 116-126.

ISSN 1390-5074.

1. INTRODUCCIÓN

Las cocinas eléctricas de inducción son equipos que aumentan la calidad de vida de una sociedad, mejorando el índice sobre el desarrollo humano (IDH), el índice de pobreza multidimensional (IPM), el bienestar de dicha sociedad y la eficiencia energética del sistema energético [1]. En el caso de Ecuador, la introducción de las cocinas de inducción en la sociedad se encuentra relacionado con los objetivos del Plan Nacional para el Buen Vivir [2].

En el caso particular del sistema energético de Ecuador se han realizado estudios para cuantificar los beneficios de la implantación de las cocinas de inducción [3], [4]. Se ha observado que eliminando el subsidio del estado al uso del gas licuado junto a una adecuación del déficit tarifario, y otorgando un subsidio a los primeros 100 kWh de los hogares insertos en el programa, el estado ahorraría 260,7 millones de US\$ al año. Si además se incluye el cambio de la matriz eléctrica en donde la generación sería mayoritariamente con energías renovables convencionales, el Estado se podría ahorrar el valor de hasta US\$ 906.5 millones al año. Lo normal es que el ahorro se encuentre entre los dos valores mencionados [3].

La cocina de inducción está constituida por una o varias zonas de inducción formadas básicamente por una bobina de hilos de cobre ancha y plana que es el corazón de la cocina. La corriente eléctrica que circula por esta bobina genera un campo electromagnético de tal intensidad que, al atravesar un material ferromagnético, genera en él un exceso de energía tal que se transforma en calor. El incremento de la temperatura es más rápido que en una cocina eléctrica convencional (de resistencia) o de gas [5].

La cocción de alimentos realizada por inducción presenta numerosas ventajas con respecto a los sistemas tradicionales, cabe destacar las siguientes características:

- **Mayor eficiencia energética**, el campo magnético inducido en el menaje y la ausencia de focos caloríficos de elevada temperatura reduce las pérdidas de calor con el ambiente.
- **La rapidez en el calentamiento** debido a que el material ferromagnético de la base del menaje tiene la capacidad de atraer y hacer pasar a través de ellos campos magnéticos, tan pronto como circula electricidad por la bobina, lo que produce que el menaje se caliente directamente y no la superficie.
- **Mayor seguridad**, no existe riesgo de sufrir quemaduras de la cocina, ni explosiones, debido a que no se produce llama.
- **Mayor facilidad de limpieza**, por poseer una superficie lisa elaborada en vitrocerámica.

- **Fáciles de operar** con mandos digitales.

Como principales desventajas tienen:

- **Tecnología más sofisticada** que las cocinas de resistencia eléctrica y de gas.
- **Cuidado al utilizarla**, para no rayar la vitrocerámica.
- **Precio**, las cocinas de varias zonas de inducción presentan un precio elevado, no siendo así en las cocinas de un solo inductor.

Para realizar la selección de materiales para el menaje, hay que tener en cuenta la interrelación entre los requisitos de diseño, material y procesado. Por ejemplo, no se debería realizar la selección de un material que tenga las mejores características en cuanto a velocidad de calentamiento del menaje, si luego las empresas fabricantes de menaje de Ecuador no pueden acceder al material y/o a la infraestructura suficiente para procesarlo, o el material pueda tener riesgos potenciales para la salud. Es por ello que la selección de materiales para el menaje de las cocinas de inducción es un tema muy amplio y complejo, por lo que el uso de distintos modelos de selección de materiales como el método Pugh, Dominic y Pahl-Beitz, permitirán elegir los mejores materiales para el proceso [6-8].

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La selección de materiales para una determinada aplicación tiene como primer paso identificar los requerimientos en el diseño. Para ello hay que identificar la función o el objetivo del sistema a diseñar. En este caso se trata del sistema cocina de inducción-menaje, y se quiere determinar qué tipo de menaje presenta la mejor relación costo-beneficio, entendiendo como beneficio los materiales que tienen una mejor eficiencia energética del sistema durante la cocción. Esto va a repercutir en un menor consumo energético, así como, una mayor inercia térmica (o velocidad de calentamiento) del menaje, que dará lugar a un menor tiempo durante la cocción. A continuación, el procedimiento para dar solución a los requisitos de diseño va a ser identificar y presentar el fundamento físico, para tener una buena comprensión del fenómeno físico y poder valorar cuales son las propiedades físicas más importantes. En el caso del menaje para cocinas de inducción van a ser muy importantes la permeabilidad magnética, la conductividad y las características del material para ser trabajado, como se verá en el siguiente apartado. Después se van a identificar materiales candidatos que tengan dichas características físicas para poder valorarlos. Es muy importante disponer de información completa sobre posibles materiales candidatos, para poder realizar la elección de

materiales adecuada. Además, se tendrán en cuenta las restricciones para el diseño como pueden ser restricciones para la salud, costo del material y analizar si la industria nacional puede adaptar sus procesos de fabricación a este tipo de menaje. Por último se hará una selección de materiales con matrices, siguiendo los procedimientos Pugh, Dominic y Pahl-Beitz, dependiendo del método de selección, será un método cualitativo o cuantitativo y tendrá en cuenta o no factores de peso en los criterios de selección. La selección se hace con matrices, en las filas se incluirán los criterios y los factores de peso mientras que las columnas contendrán los materiales candidatos, identificados con un una letra [7-8].

2.1. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Cuando se activa la cocina de inducción, por el menaje circula una corriente inducida que produce un calentamiento del material. A medida que se calienta el material, se produce la disipación de calor por efecto Joule. Es decir, desde el inductor se transfiere energía “electromagnética” que se convierte en energía “calorífica” directamente en el material a calentar. Ésta se realiza desde el interior hacia la superficie del material donde han sido creadas las corrientes inducidas, siendo el material el propio material conductor, de modo que no hay pérdidas de energía por este proceso de transmisión.

La potencia disipada debido al efecto Joule como resultado de las corrientes inducidas o de Foucault suele simplificarse a la fórmula $P=R \cdot i^2$, pero en este caso no puede aplicarse de manera directa porque la distribución de corriente no es uniforme. Para una distribución de corriente no uniforme se cumple [9]:

$$P = \pi \cdot d \cdot h \cdot H^2 \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot \mu \cdot f}{\sigma}} \cdot C \cdot F \quad (1)$$

d = diámetro del cilindro (m).

h = altura del cilindro (m).

H = intensidad del campo magnético (A/m).

σ = conductividad eléctrica (S/m).

μ = permeabilidad del medio (H/m).

f = frecuencia (Hz).

C = factor de acoplamiento.

F = factor de transmisión de potencia.

F y C son factores de corrección que dependen de la geometría de la carga y la distancia entre el inductor y la carga. Como resultado de la fórmula se tienen las siguientes conclusiones:

La potencia puede incrementarse debido a que es directamente proporcional a la intensidad del campo magnético (H), por lo que se puede incrementar al tener un mayor número de bobinas del inductor.

La características del material son muy importantes, especialmente la permeabilidad relativa μ y la conductividad eléctrica σ . Los materiales ferromagnéticos presentan estas características y permiten maximizar la transferencia de potencia a altas temperaturas en la carga con pocas pérdidas en la fuente. Se observa como las características de la pieza material son muy importantes como el diámetro d y la altura h .

2.2. PROPIEDADES FÍSICAS

Permeabilidad magnética: Es la capacidad de una sustancia o medio para atraer y hacer pasar a través de ella campos magnéticos. El grado de magnetización de un material en respuesta a un campo magnético, se denomina permeabilidad absoluta y se suele representar por el símbolo μ :

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (2)$$

B = inducción magnética existente en el material (T).
 H = intensidad de campo magnético que aparecen el interior de dicho material (A/m).

Para comparar entre sí los materiales, se entiende la permeabilidad magnética absoluta μ como:

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (3)$$

μ_r = permeabilidad magnética relativa.

μ_0 = permeabilidad magnética de vacío.

En la Tabla I se muestran valores de la permeabilidad para distintos materiales que suelen utilizarse en menaje para cocinas de inducción.

El valor de μ suele variar a medida que variamos el campo magnético B , por lo que suelen darse el intervalo de valores por los que varía la permeabilidad en el ciclo de histéresis. Se observa que los materiales ferromagnéticos presentan valores altos de permeabilidad magnética relativa y permiten maximizar la transferencia de potencia a altas temperaturas en la carga con pocas pérdidas en la fuente.

Conductividad eléctrica: La conductividad eléctrica es la aptitud de un material para dejar circular libremente las cargas eléctricas. La conductividad depende de la estructura atómica y molecular del material. Los metales son buenos conductores porque tienen una estructura con muchos electrones libres debido al enlace metálico o nube de electrones que permite su movimiento. La conductividad también depende de otros factores físicos del propio material y de la temperatura.

En la Tabla 1 se muestran valores de la conductividad térmica para distintos materiales que suelen utilizarse en menaje para cocinas. En la

formula (1) se observa que la conductividad eléctrica es una característica que empeora la eficiencia, por lo que será interesante tener materiales con una menor conductividad eléctrica como los aceros.

Conductividad térmica: Es la facilidad con que el material absorbe y transmite energía. Cuanto mayor sea la conductividad térmica del material, más rápido se calentará y se extenderá a las zonas no calentadas de la misma pieza de material.

En la Tabla 1 se muestran valores de la conductividad térmica para distintos materiales que suelen utilizarse

en menaje para cocinas. Se observa que existe una relación entre la conductividad eléctrica y térmica de los materiales debido a la estructura cristalina de los materiales. Para el menaje de las cocinas de inducción es conveniente contar con utensilios con una configuración, que permitan tener un material por el que circulen las corrientes inducidas con baja conductividad eléctrica, optimizando la potencia disipada por efecto Joule, como el acero y tenga a continuación una capa de material conductor como puede ser aluminio o cobre, que produzca una transmisión rápida y uniforme del calor por todo el menaje.

TABLA 1: Propiedades físicas de los materiales [10-11]

Material	Permeabilidad magnética relativa μ_r	Conductividad eléctrica $\sigma \cdot 10^7 (S/m)$	Conductividad térmica $\sigma_t (W/m \cdot K)$	Calor específico (J/kg·K)	Densidad (kg/m ³)
Cobre	0.999994	5.96	401	390	8900
Aluminio	1.000022	3.78	237	910	2600
Acero inoxidable austenítico (AISI 304 – AISI 316)	1.003 – 7	0.14	16	460	7930
Acero inoxidable ferrítico (AISI 430 - AISI 436)	1000 - 1800	0.15	16	460	7930
Acero al carbono	50 - 150	0.70	53	460	7850
Acero eléctrico-magnético B-FM (Acero con 1-5% Si)	4000 - 5000	0.22	68	460	7850
Hierro fundido	500 - 800	1.00	85	460	7800

Capacidad calorífica específica o calor específico: Es la cantidad de energía cinética interna almacenada en un material. La composición molecular de los materiales hace que la energía cinética molecular aumente con mayor o menor dificultad y almacene energía potencial molecular con mayor o menor dificultad. Los utensilios de cocina hechos de materiales con alta capacidad calorífica específica, necesitarán más tiempo para calentarse, pero también tendrán una importante cantidad de energía almacenada cuando estén calientes y la temperatura del material disminuirá más lentamente cuando se transfiera su energía.

La capacidad calorífica o capacidad térmica de un material es proporcional a su masa, con lo que una pieza de menaje con más masa tiene una mayor capacidad térmica, por lo que la densidad deberá ser conocida para hacer comparaciones entre los utensilios de cocina de diferentes materiales. Se observa en la Tabla I que si se multiplica el calor específico con la densidad, se tiene la capacidad calorífica por unidad de volumen. En el caso del acero, hierro fundido y cobre es aproximadamente 1,5 veces mayor que la de aluminio.

Difusividad térmica: Es una propiedad que indica a qué velocidad el calor se transferiría a través y hacia fuera del material. Es la conductividad térmica dividida por la capacidad de calorífica unitaria. En la Tabla II se presentan los valores de difusividad térmica de los materiales que suelen ser utilizados en las cocinas de inducción; se observa como el cobre y el aluminio tienen un orden de magnitud superior al del acero y el hierro fundido.

Reactividad: Es necesario asegurar que los materiales empleados en el menaje no perjudican, o afectan adversamente al sabor de la comida. Por esta razón es importante utilizar materiales no reactivos. Desafortunadamente, tanto el cobre como el aluminio

reaccionan fácilmente a los alimentos (el cobre, cuando se ingiere en cantidad o consistentemente, puede causar problemas en el hígado, el estómago y los riñones, así como anemia) [12-13]. Por otro lado, en cuanto al aluminio existe evidencia aunque no concluyente e información contradictoria, de que niveles anormales de aluminio en el cuerpo humano están asociados al Alzheimer. Los problemas se presentarían solo si el aluminio es absorbido por

el cuerpo humano, lo que es poco probable ya que entre el 75-95 % que ingiere el humano es insoluble. Además, el nexo entre la concentración de aluminio y los posibles problemas de salud aún no están claros [14]. El acero inoxidable, es el menos reactivo de todos los materiales populares utilizados en utensilios de cocina.

Capacidad para trabajar los materiales: La capacidad para trabajar un metal o “trabajabilidad” comúnmente se refiere a la facilidad con la que un material puede ser moldeado por flujo plástico sin la aparición de fracturas externas o internas, o la capacidad de deformación plástica del material, por encima del límite elástico sin la aparición de grietas. Este concepto incluye todos los términos relacionados con las operaciones de conformado de material como capacidad para ser forjado, laminado, extruido, embutición y conformado. Este parámetro puede analizarse en laboratorio mediante ensayos mecánicos, dependiendo de la aplicación suelen utilizarse en ensayos de tracción, ensayos de compresión, ensayos de torsión y ensayos de *cupping*.

La trabajabilidad depende de la microestructura del material, la temperatura aplicada, tratamientos térmicos o superficiales previos, la velocidad de deformación, la tensión aplicada y del estado tensional de la zona de deformación [15].

La capacidad para trabajar un material es una propiedad que es importante tener en cuenta para conocer si las empresas productoras de menaje pueden acceder a la infraestructura suficiente para poder procesarlo y para estimar los costos que éstas pueden tener en la producción de menaje. Por experiencia se conoce que el acero AISI 304, el cobre, el acero al carbono, el hierro fundido y el aluminio se embuten bien, pero para el resto de materiales no tienen propiedades buenas en embutición o no se han contemplado. Por otra parte, para embutir una plancha de acero ferromagnético en el fondo de una olla de aluminio, hará falta una prensa con una presión del orden de magnitud superior con respecto, al de embutir una olla de acero AISI 304 al que le ha se le suelde acero ferromagnético en la base.

TABLA 2: Propiedades de los materiales [10-11]

Material	Difusividad térmica 10^{-6} (m ² /s)	Módulo de Young E [GPa]	Límite elástico σ_y [MPa]	Tensión de rotura σ_R [MPa]	Precio (\$/T)	Resistencia a la corrosión
Cobre	80	120	32	210	10000	En presencia de aire y agua se vuelve verde y se ennegrece.
Aluminio	92	45	17	45	3500	Buena resistencia al aire, agua y aceite ¹
Acero inoxidable austenítico (AISI 304 – AISI 316)	4	190-215	380	460-1100	4500	Excelente resistencia al aire, agua y aceite ² .
Acero inoxidable ferrítico (AISI 430 – AISI 436)	8	190-215	380	460-1100	4000	Buena resistencia al aire, agua y aceite ¹
Acero al carbono	250	210	200-300	750	1000	Se corroe en el agua y en el aire
Acero eléctrico-magnético B-FM (Acero con 1-5% Si)	15	190-210	315-500	400-1100	2500	Se corroe en el agua y en el aire
Hierro fundido	22	210	135	195	500	Se corroe en el agua y en el aire

¹ Pérdida de peso inferior a 25 mg/dm² durante 24 h.

² Pérdida de peso inferior a 250 mg/dm² durante 24 h.

En cuanto a los tratamientos térmicos o superficiales se pueden variar las propiedades del material. No obstante se aconseja realizar tratamientos térmicos, o superficiales del material, o poner antiadherentes y/o pinturas al principio del procesado, porque generalmente no afecta al proceso productivo y la integración del proceso suele ser sencilla.

La variable más importante para calcular será la tensión aplicada, ya que para deformar algunos materiales un determinado valor será necesario tener en cuenta su curva de tensión-deformación y los parámetros importantes como su límite elástico, su tensión de rotura y módulo de Young. En la Tabla II aparecen los valores de los materiales de Módulo de Young, límite elástico, tensión de rotura y temperatura de fusión de los materiales. Se observa

como el aluminio y el cobre tienen menores límites elásticos, menores módulos de Young y temperaturas de fusión lo que les hará ser más fáciles de trabajar con ellos a bajas temperaturas.

Disponibilidad de los materiales en Ecuador:

Es importante tener en cuenta la producción de materiales en el Ecuador y determinar si el menaje puede fabricarse íntegramente con materiales que tenga el país o si por el contrario será necesario que los fabricantes de menaje tengan que importar material.

En el caso del acero se han publicado informes sobre este tema por el Instituto Nacional de Preinversión (INP) [16] y Acelor-Mital Ecuador [17], con resultados similares. De ellos se desprende que Ecuador es un país importador de productos

siderúrgicos, no es productor de planchón, que será necesario para la producción de planchas circulares para los menajes de inducción, por lo que tendrá que importar el material. Ecuador tampoco es un país productor de aluminio, siendo el origen de las importaciones países como Argentina, Francia, Venezuela, EEUU y Canadá [18].

En cuanto a la producción de cobre, durante el 2013 se pretende comenzar la explotación de cobre, en los campos en donde opera la compañía Ecuacorriente, es decir en los proyectos Mirador y San Carlos, ubicados en las provincias de Morona Santiago y Zamora-Chinchipec. Por lo que sería factible tener cobre para el menaje de las cocinas de inducción que haya sido extraído en el país, desafortunadamente es caro y el menaje debe tener en su composición de material ferromagnético y el cobre no lo es.

Precio de los materiales: El precio del material es una variable que afecta directamente al precio del menaje, cuanto mayor sea el precio de los materiales y el procesado de éstos, mayor será el precio del producto final. En la Tabla 2 aparecen los precios de los materiales en US\$ por Tonelada, se observa como el acero es el más barato de todos ellos por Tonelada, no obstante el Aluminio es unas tres veces menos denso, lo cual le hace ser competitivo.

Resistencia a la corrosión: Es la capacidad que tiene un material para retrasar su deterioro como consecuencia del ataque electroquímico por el entorno que le rodea.

En la Tabla 2 se observa el comportamiento en cuanto a resistencia a la corrosión de los materiales al aire, agua y aceite, no obstante estos materiales pueden reaccionar con respecto a determinados ácidos.

Apariencia: En general el consumidor desconoce las características del producto, por lo que la elección entre dos productos con precios similares suele realizarse por la apariencia. Es por ello que los productos finales deben tener una apariencia brillante.

3. RESULTADOS

3.1. MÉTODO “PUGH”

El método *Pugh* es similar a las listas de las ventajas y desventajas. Éste se utiliza para evaluar de mejor manera las opciones dentro de un proceso de diseño de producto. Este método consiste en categorizar y cuantificar los criterios de diseño, material, proceso, etc. a evaluar basándose en su importancia, lo que permite obtener una selección adecuada. Esta metodología se describe en 4 pasos aplicados sobre el criterio que considere el diseñador. Los pasos son los siguientes:

1. Se asigna un valor puntual a cada criterio de diseño, material, producto, etc., considerando la importancia que tenga sobre los demás parámetros. La escala seleccionada está comprendida entre dos valores 1 y 3 de menos a más importante.
2. Las alternativas de configuración de materiales se evalúan con respecto a cada uno de los criterios, asignando mayor cantidad de valores positivos (+), negativos (-) hasta un máximo de 3, a aquello que presenten características favorables, no aceptables. También aparece el neutro (0).
3. Luego se realiza la sumatoria de los valores positivos, negativos y neutros que fueron asignados a cada alternativa. Previamente multiplicados por el factor de importancia del criterio.
4. Una vez realizada la sumatoria, se selecciona la alternativa que presente el mayor resultado positivo.

En la Tabla 3 se observan los materiales candidatos del proceso de selección, que se han elegido para comparar el efecto de distintas configuraciones de materiales y distintos tratamientos antiadherentes y de resistencia a la corrosión. Existen distintas patentes europeas y norteamericanas donde se especifica el proceso de unión del menaje y los tratamientos posteriores del menaje hasta que está terminado. Éstos influyen en el precio final del producto, por lo que se han tenido en cuenta en el dato del precio para el análisis [19-21].

En la Tabla 4 se presenta la matriz de ponderación con los criterios de diseño y las valoraciones para los materiales candidatos. Estas propiedades se han evaluado para cada uno de los materiales con los valores de la metodología *Pugh*.

3.2. MÉTODO “DOMINIC”

El procedimiento “*Dominic*” es un método cualitativo de selección de materiales, que considera factores de peso en los criterios de selección. La selección se hace con matrices, en las filas se incluirán los criterios y los factores de peso, mientras que las columnas contendrán los materiales candidatos, identificados con un una letra. A continuación se construye otra matriz donde se exponen claramente los criterios de prioridad en las columnas y la evaluación individual en las filas.

TABLA 3: Materiales candidatos del proceso de selección

Materiales candidatos del proceso de selección
A: Hierro fundido
B: Hierro fundido con tratamiento de vitrificado
C: Acero inoxidable AISI 430 o AISI436
D: Acero inoxidable AISI 430 o AISI436 y aluminio
E: Acero eléctrico-magnético B-FM
F: Acero eléctrico-magnético B-FM con capa cerámica antiadherente interior y una capa exterior de vitrificado
G: Acero electromagnético B-FM y acero inoxidable AISI 304 o AISI 316. Se le aplica una capa antiadherente cerámica interior y una capa exterior de vitrificado
H: Acero electromagnético B-FM, aluminio y capa antiadherente de teflón
I: Acero inoxidable AISI 430 o AISI436, acero AISI 304 o AISI 316 y capa antiadherente de teflón interior
J: Acero electromagnético B-FM, cobre y capa cerámica antiadherente

En la Tabla 5 se tiene la matriz de ponderación con las propiedades, los criterios y las valoraciones para los materiales candidatos. Estas propiedades se han evaluado para cada uno de los materiales con calificaciones que van desde excelente hasta inaceptable, pasando por bueno, razonable y pobre. En la Tabla 6 se tiene la matriz de evaluaciones generales, con los resultados. Los materiales candidatos son los mismos que aparecen en la Tabla 4.

3.3. MÉTODO “PALH BEITZ”

Este método consiste en separar el diseño del producto en diseño de módulos funcionales separados, por lo que lo que es necesario identificar una jerarquía de funciones para el producto. Para cada módulo se pueden considerar de forma independiente y de él

saldrán interacciones progresivas de limitaciones que irán relacionadas en jerarquía.

La principal ventaja de este enfoque es la simplificación del proceso de diseño de producto posterior, a partir de los módulos individuales. La principal desventaja de este método es que mediante la reducción de las posibilidades de intercambio funcional, a menudo da lugar a un aumento de la complejidad global del producto y de su proceso productivo. Esto puede resultar en problemas de fabricación, tales como un mayor número de piezas.

A continuación se explica una breve descripción de la metodología:

1. Enumerar los criterios de evaluación. En esencia, se realiza una lista de los factores de diseño. Esta lista debe ser concisa pero abarca el mayor número de problemas posible. Los criterios deben ser expresados en forma que sea posible asignar valores numéricos de 0 a 1, donde 0 es muy pobre y un valor cercano a 1 es excelente.
2. Asignar los factores de ponderación para los criterios de evaluación. Los factores de ponderación son valores numéricos de 0 a 1. Expresan la importancia relativa del criterio para la evaluación global. Su suma debe ser igual a 1. La construcción de un árbol jerárquico objetivo puede ser útil durante este paso. Los pesos en cada nivel de cada objetivo deben sumar 1.
3. Asignar medidas operativas para cada criterio de evaluación. Los parámetros se asignan a cada criterio. Estas son expresiones de lo que se mide. Por ejemplo, para el menaje de las cocinas un criterio importante para que se pueda realizar es el costo de producto. Éste dependerá de otros criterios relacionados como son el costo del material y el costo para su producción en masa.

TABLA 4: Matriz de evaluación del método Pugh: Criterios de diseño y valores para los materiales candidatos

Criterio de diseño	Valor	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Permeabilidad magnética	3	+	+	++	++	+++	+++	+++	+++	++	+++
Reactividad	3	---	++	++	+++	---	++	++	---	+++	+++
Precio / Apariencia	3	+++	+	---	+	-	---	-	-	++	---
Difusividad térmica	2	+	+	+	++	++	++	++	+++	++	+++
Conductividad eléctrica	2	++	++	++	+++	++	++	++	+++	+++	+++
Resistencia a la corrosión	2	--	++	+	++	--	++	++	++	++	-
Límite elástico σ_y (MPa)	2	+++	+++	++	++	++	++	++	++	++	++
Módulo de Young E (GPa)	1	++	++	-	++	-	-	++	++	++	-
Tensión de rotura σ_R (MPa)	1	++	++	-	++	-	-	+	+	++	-
+		28	32	24	40	21	31	34	33	43	34
0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-		13	0	11	0	14	11	3	12	0	13
Resultado		15	32	13	40	7	20	31	21	43	21

TABLA 5: Matriz de Criterio del método Dominic: Criterios y valoraciones para los materiales candidatos

Propiedad Física	Prioridad	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Permeabilidad magnética	Alta	Razo.	Razo.	Bueno	Bueno	Excel.	Excel.	Excel.	Excel.	Bueno	Excel.
Reactividad	Alta	Inacep.	Bueno	Bueno	Excel.	Inacep.	Bueno	Bueno	Inacep.	Excel.	Excel.
Precio / Apariencia	Alta	Excel.	Razo.	Inacep.	Razo.	Pobre	Inacep.	Pobre	Pobre	Bueno	Inacep.
Difusividad térmica	Moderada	Razo.	Razo.	Razo.	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno	Excel.	Bueno	Excel.
Conductividad eléctrica	Moderada	Bueno	Bueno	Bueno	Excel.	Bueno	Bueno	Bueno	Excel.	Excel.	Excel.
Resistencia a la corrosión	Moderada	Pobre	Bueno	Razo.	Bueno	Pobre	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno	Pobre
Límite elástico σ_y (MPa)	Moderada	Excel.	Excel.	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno
Módulo de Young E (GPa)	Baja	Bueno	Bueno	Pobre	Bueno	Pobre	Pobre	Bueno	Bueno	Bueno	Pobre
Tensión de rotura σ_R (MPa)	Baja	Bueno	Bueno	Pobre	Bueno	Pobre	Pobre	Razo.	Razo.	Bueno	Pobre

- Asignar valores numéricos de evaluación a los criterios individuales. Se realiza las representaciones numéricas de la "bondad" de una característica. Normalmente se utiliza un sistema de calificación de la categoría 0 o 10.
- Obtener una evaluación global. Se han de tener en cuenta los pesos asignados en la etapa 4 y los valores numéricos de la etapa 2. Una evaluación global del concepto o producto, se puede conseguir mediante la suma de las multiplicaciones de los pesos y los valores.
- Comparar y contrastar las distintas alternativas. Cuanto mayor sea el valor total ponderado, mejor será la alternativa propuesta.
- Se han de considerar la posibilidad de incertidumbres en el sistema anterior.

TABLA 6: Matriz de evaluaciones generales (Método Dominic). Evaluación global: Todos los resultados por encima de la línea continua gruesa, excelente. Todos los resultados por encima de la línea discontinua, bueno. Todos los resultados por encima de la línea discontinua de puntos y líneas, razonable. Todos los resultados por encima de la línea de puntos, pobre

Evaluación Individual	Criterio de Prioridad		
	Alta	Moderada	Baja
Excelente	ADEFGHIJ	ABDHHIJ	
Bueno	BCCDFGII	ABBCCDD EEEEFFGGGGHHIII	AABBD DGHH
Razonable	ABBD	ABCC	HG
Pobre	EGH	AEJ	CCEEF EJJ
Inaceptable	ACEFHJ		

En la Fig. 1 se muestra el árbol de objetivos del método de Beitz. En la primera consideración se ha tenido en cuenta las propiedades de la permeabilidad magnética μ , la difusividad térmica, la salud que se divide en la reactividad y la resistencia a la corrosión

y el bajo costo de fabricación, que se divide en el costo de los materiales y la capacidad de producción en masa, ésta a su vez se divide en capacidad para ser embutido y el acabado del producto o su apariencia.

En la Tabla VII aparece la matriz de decisión y evaluación de los materiales candidatos. Dichos materiales candidatos son los mismos que aparecen en la Tabla IV. En los resultados de la tabla se ha puesto el valor con el peso, esto es el valor que va de 0 a 10 multiplicado por el peso que aparece en la cuarta columna, por tanto el resultado del material está evaluado sobre 10.

4. DISCUSIÓN

Con los resultados obtenidos de los tres métodos de análisis se puede decir que el método más excluyente de los tres es el método *Dominic*, mientras que el método *Pugh* y el método *Pahl Beitz* dan unos resultados más integradores del producto. Mientras que en el método *Dominic* hay opciones de configuraciones de materiales para el producto, donde se observan resultados inaceptables para la resistencia a corrosión o el precio, en el caso del método *Pahl Beitz* todos los datos tienen resultados mejores que el aprobado que sería el 5.

Los materiales que tienen resultados que se sitúan por encima de la línea de razonable en el caso del método *Dominic* y que obtienen las mejores notas en los métodos *Pugh* y *Paul Beitz*, son B, D e I; estas tres configuraciones serían interesante a la hora de realizar un producto para menaje de cocina de inducción. Las configuraciones de materiales A, E y H pueden tener problemas de corrosión del menaje de forma prematura, es por ello que se desechan. Este problema se podría tener en la configuración I si en vez de tener acero AISI 304 en el cuerpo del menaje se tuviera, acero AISI 201 y AISI 202.

En el caso de la configuración de material C, éste no es un material que se embuta fácilmente, con lo que puede generar altos costos en la producción.

Acerca de las configuraciones F y J, no se cuenta con experiencia en el proceso de embutición para materiales de cocinas por lo que habría que realizar un estudio previo y esta actividad encarecería el proceso de producción.

La configuración de material G podría ser la configuración para el menaje más prometedora, no obstante su proceso productivo sería más caro debido al proceso de estampación o soldadura para unir los dos aceros y el proceso de vitrificado.

El hierro fundido con tratamiento de vitrificado tiene mejores resultados que el material sin vitrificar. En general, esto ocurre en cada uno de los materiales, debido a que se obtienen unos mejores resultados a corrosión y frente a la salud.

5. CONCLUSIONES

El material que presenta los mejores resultados para las propiedades de alta prioridad según los métodos de selección *Dominic* y *Pugh* es el material

I. A continuación sería la configuración D, debido a que sería necesario una prensa de mayor presión en el proceso productivo, para estampar el disco de acero en el fondo de aluminio. Por último la configuración de material B tiene unos resultados razonables, pero peores que los dos anteriores, esto se debe en parte a que el proceso de vitrificado encarece el proceso productivo.

Hay que llevar cuidado con los materiales que tengan teflón o aluminio ya que se puede incurrir en un problema para la salud y la deformación del menaje. Es preferible tener una capa antiadherente cerámica, aunque encarece alrededor de un 15-20 % el proceso de pintura antiadherente.

Dependiendo si se van a cocer alimentos con agua o con aceite, será más sencillo o más complicado que se adhieren los alimentos, con lo cual serán necesarios unos requerimientos en cuanto a reactividad más o menos ambiciosos y con ello una capa de antiadherente.

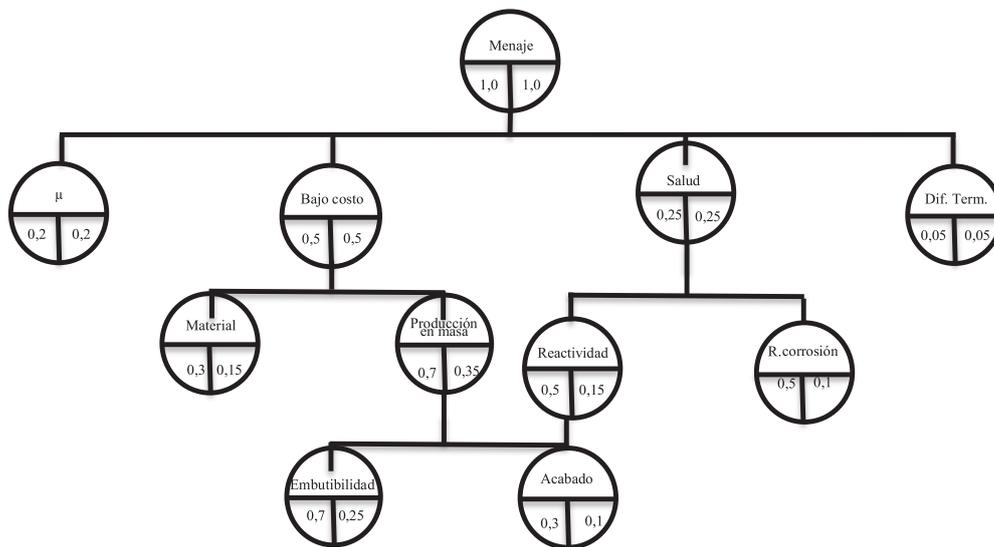


Figura 1: Árbol de objetivos del método Pahl Beitz

TABLA 7: Matriz de decisión y evaluación de los materiales del método Pahl Beitz

Criterios				A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Primera consideración	Nº	Criterios de evaluación	Peso	Valor con peso	Valor con peso	Valor con peso	Valor con peso	Valor con peso	Valor con peso	Valor con peso	Valor con peso	Valor con peso	Valor con peso
Permeabilidad magnética μ	1	Permeabilidad magnética μ	0,2	1	1	1,4	1,4	1,8	1,8	1,8	1,8	1,4	1,8
Bajo Costo	2	Material	0,15	1,35	0,75	1,05	0,9	0,9	0,3	0,45	0,45	1,05	0,3
	3	Embutibilidad	0,25	2	2	0,75	1,5	0,75	0,75	1	1,25	1,75	0,75
	4	Acabado	0,1	0,7	0,8	0,7	0,8	0,6	0,8	0,8	0,8	0,7	0,8
Difusividad térmica	5	Difusividad térmica	0,05	0,25	0,25	0,3	0,4	0,4	0,4	0,35	0,4	0,3	0,4
	6	Reactividad	0,125	0,75	1	0,75	0,875	0,75	1	1	1	1	1
Salud	7	R. corrosión	0,125	0	1	0,75	1	0	1	1	1	1	0,5
	Resultado				6,05	6,8	5,7	6,875	5,20	6,05	6,4	6,7	7,2

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ministerio de Electricidad y Energía Renovable de Ecuador (MEER) y a la Secretaría Nacional de Planificación (SENPLADES) por el financiamiento para la realización de esta investigación en el marco de ejecución del proyecto “Estudio sobre menaje para cocinas de inducción eléctrica y requerimientos de la red para incorporación masiva de cocción eficiente” y a la Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT) por el financiamiento de Becas Prometeo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PNUD. 2011. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, “Informe sobre el Desarrollo Humano”, pp 1-201.
- [2] Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo, Plan Nacional de Desarrollo. 2013, “Plan Nacional para el Buen Vivir 2013-2017”. *República de Ecuador*, pp-1-131.
- [3] Muñoz Vizhñay, J. 2013. “Análisis de la incidencia del uso de cocinas eléctricas de inducción”, *Empresa eléctrica regional del sur S.A. Loja*, pp 1-14.
- [4] MEER Ministerio de electricidad y energías renovables. 2011. “Estudio sobre menaje para cocinas de inducción eléctrica y requerimientos de la red para incorporación masiva de cocción eficiente”, pp 2-15.
- [5] Wong, A. K. K., N. K. Fong. 2013. “Experimental Study of Induction Cooker Fire Hazard”, *Procedia Engineering*, vol. 52, pp. 13 – 22.
- [6] Path, G. and Beitz W. 1984. “Engineering Design”. *The Design Council*. pp 119-138
- [7] Justel Lozano, D. Pérez Bartolomé E. et al. 2007. “Estudio de métodos de selección de conceptos”. *XI congreso internacional de ingeniería de proyectos*, Lugo, 26-28 Septiembre, pp 1-5.
- [8] Binz H., Reichle M. 2005. “Evaluation method to determinate the success potential and the degree of innovation of technical product ideas and products”. *International Conference on Engineering Design, ICED 05*, Melbourne, August 15-18, pp 1-4.
- [9] Donald G. Fink, Donald Christiansen, 1989. “Electronics engineers’ handbook”, *McGraw-Hill, - Technology & Engineering*, pp 116-120.
- [10] ASM Handbook. 1978. “Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys” *ASM International*, pp 1-1586
- [11] ASM Metals Handbook, 1989. “Volume 2: Properties and Selection : Nonferrous Alloys and Pure Metals” *ASM International*, pp 1-1482
- [12] Ala A, Walker AP, Ashkan K, Dooley JS, Schilsky ML, 2007. “Wilson’s disease”, *Lancet* 369 (9559), pp 397–408.
- [13] Abusaad I., Mohammed S. N., Ogilvie C. M., Ritchie J., Pohl K. R. E., Docherty Z., 1999. “Clinical expression of Menkes disease in a girl with X;13 translocation” *AJMG* 87, pp 354-359.
- [14] Stahl T., Taschan H. and Brunn H. 2011 “Aluminium content of selected foods and food products” *Environmental Sciences Europe*, pp 23-37
- [15] Dieter, G. E., Kuhn, H.A. 2003. “Handbook of Workability and Process Design”, pp 1-389
- [16] Instituto Nacional de Preinversión. 2010. “Estudio básico de la industria siderúrgica en el Ecuador”, Quito, pp 1-2.
- [17] Acelor-mital, 2012. “La siderurgia en el Ecuador”, Quito, pp 1-5.
- [18] Banco Central del Ecuador 2012, “Importaciones y exportaciones de acero en Ecuador”
- [19] Dr. Carlos Assumpcao. 2005. “European patent application EP 1514952 A1”, pp 1-7
- [20] Kenji Watanabe et al. 2008. “European Patent Specification EP 2173139 B1” pp 1-5
- [21] Ming-Sheng, L. 2012. “United States Patent Application Publication. US 2012/0111872 A1”, pp 1-4



Javier Martínez Gómez.- Nació en Madrid, España en 1983. Ha recibido su título de Ingeniero Industrial de la Universidad Carlos III de Madrid en 2008; de Master en Ciencia e Ingeniería de Materiales de la Universidad

Carlos III de Madrid en 2010; y su título de Doctor en Ciencia e Ingeniería de Materiales de la Universidad Carlos III de Madrid en 2013. Sus campos de investigación están relacionados con Menaje para cocinas para inducción y Materiales para paredes en reactores de Fusión. Actualmente trabaja como Investigador Postdoc Prometeo del proyecto “Estudio Sobre el Menaje para Cocinas de Inducción Eléctrica y Requerimientos de la Red para Incorporación Masiva de Cocción Eficiente” en el Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables.



Diego Esteban Vaca Paredes.- Nació en Quito, Ecuador en 1979. Ha recibido su título de Ingeniero Mecánico en la Universidad de la Fuerzas Armadas en 2003. Estudió Master en Sustainable Energy Technology en la

Universidad de Delf en 2013. Actualmente trabaja como líder de proyecto de energía solar y menaje para Cocinas de Inducción en el Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables. También es Profesor de la Universidad Tecnológica Equinoccial.



Marco Andrés Orozco Salcedo.- Nació en Tulcán, Ecuador en 1979. Recibió su título de Ingeniero Automotriz en la Universidad de la Fuerzas Armadas en 2005. En la actualidad se encuentra en proceso de obtención de su título

de Master en Diseño, Producción y Automatización Industrial en la Escuela Politécnica Nacional. Actualmente se desempeña como Analista Técnico del proyecto “Estudio Sobre el Menaje para Cocinas de Inducción Eléctrica y Requerimientos de la Red para Incorporación Masiva de Cocción Eficiente” en el Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables.



Iván Andrés Montero Izquierdo.- Nació en Cuenca, Ecuador en 1975. Ha recibido su título de Ingeniero Mecánico en la Universidad Técnica Salesiana en 2000. Estudió un MBA

con especialización en empresas energéticas en la Universidad Antonio Nebrija en 2006. Ha recibido su título de Ph.D. Technologies of Air-Conditioning and Energy Efficiency in Buildings en la Universitat Rovira i Virgili en 2012. Actualmente es Coordinador General Técnico en el Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables. Sus campos de investigación están relacionados con captadores solares térmicos de concentración, enfriadoras de absorción y simulación térmica de edificios.



Diego Francisco Carrión Galarza.- Nació en Quito, Ecuador en 1981. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico en la Universidad Politécnica Salesiana en 2010. En la actualidad se encuentra en

proceso de obtención de su título de Master en Energías Renovables en la Universidad de la Fuerzas Armadas. Actualmente se desempeña como Analista Técnico del proyecto “Estudio Sobre el Menaje para Cocinas de Inducción Eléctrica y Requerimientos de la Red para Incorporación Masiva de Cocción Eficiente” en el Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables; y también es Profesor de la Universidad Politécnica Salesiana.