

Construcción y validación de una microturbina para un ciclo binario de 10 kWe

Héctor Miguel Aviña Jiménez

Como parte de los desarrollos de grupo iiDEA en el aprovechamiento de la energía geotérmica de baja entalpía para la generación de electricidad, se planteó utilizar los remanentes energéticos de las industrias, ya sea líquido o vapor, en un Ciclo Binario Modular (CBM) de baja temperatura (> 90 °C). Para ello se estableció una participación conjunta con la empresa Especialistas en Turbopartes S. A. de C. V. IISGCONV-065-2014, a fin de realizar la validación conceptual y técnica del desarrollo tecnológico. Esta investigación es parte del CeMIE-Geo, proyecto 207032 CONACyT-SENER.

Las iteraciones en el concepto, diseño y evaluación computacional han permitido caracterizar los equipos principales del CBM como la bomba, el expansor y los intercambiadores de calor, en un rango de funcionamiento amplio. Dichos equipos se muestran en la figura 1. En este sentido, el expansor (microturbina) presentó un área de oportunidad importante, con el cual se pretende incrementar la eficiencia global del ciclo, por tanto, la potencia generada.



Figura 1. Ensamble del CBM

Por la temperatura y el flujo de operación, así como por las revoluciones que alcanzaría la microturbina, se seleccionó un diseño radial *outflow* que gira a 6000 rpm llamada ROT 05. Como primera etapa, y para verificar el análisis dimensional de la microturbina, se realizó un prototipado rápido mediante equipos de manufactura aditiva. Estos modelos permitieron mejorar el sistema de acoplamiento mecánico, y llevar a cabo análisis de tolerancias dimensionales en el ensamble del rotor, estator, generador eléctrico y soportes del sistema. En la figura 2 se observa el ensamble del modelo impreso.



Figura 2. Modelo didáctico de la microturbina

Figura 3. Ensamble de la microturbina

Posteriormente, se manufacturó el expansor en aluminio 6061. Las primeras piezas fueron el rotor y el estator, así como los soportes del generador. Después se ensamblaron los componentes antes mencionados con el generador eléctrico tipo brushless de imanes permanentes con capacidad de 5 kW de potencia. En la figura 3 se muestra el desarrollo de los trabajos de izquierda a derecha. La última pieza es la carcasa o *housing*, fabricada en acero inoxidable 316, la cual contendrá el ensamble del turbogenerador y servirá de medio para la conducción del fluido de trabajo. Finalmente, se realizó el sellado del equipo mediante acoplamiento flexibles en los extremos de la carcasa.

Ya con la microturbina ensamblada, se aplicaron las pruebas de validación. La primera fue del rodamiento de la turbina, con la finalidad de observar las condiciones de giro, momentos de inercia, velocidad máxima alcanzable, tolerancias y vibraciones. Para ello se instaló una línea de suministro de aire comprimido, fijando de manera vertical la carcasa en un bastidor de rodaje.

Como resultado se ajustó y calibró el ensamble de la microturbina, disminuyendo el claro entre el rotor y el estator cuatro milésimas de pulgada, evitando rozamiento entre las partes. Así como la alineación del motor en el arreglo final para eliminar balanceos durante el giro, se alcanzó una velocidad de 3300 rpm con una presión de aire de 30 psi, registrando el nivel de vibración producido a esa velocidad. La visualización y el registro de resultados se observan en la figura 4.



Figura 4. Registro de vibraciones de la microturbina

Las pruebas siguientes corresponden a la carga eléctrica para obtener las curvas de voltaje contra la velocidad del generador eléctrico, empleando el mismo flujo de aire comprimido como fluido motriz. Para ello se instaló un interruptor termomagnético, un apagador eléctrico y una resistencia eléctrica. Estos componentes se dimensionaron de acuerdo al voltaje generado a las 4 500 rpm de la turbina (15 Vrms) y a una potencia de 100 W, 300 W, 500 W y 1000 W.

Se incluyó un osciloscopio para comparar el voltaje registrado en cada fase del generador eléctrico y así tener una referencia de comparación con el multímetro, además de registrar valores como la frecuencia de las señales.

La prueba consistió en llevar gradualmente al generador a la velocidad máxima que se obtendría empleando una batería Lipo de 10 celdas de 37 volts, la cual, de acuerdo con las especificaciones de este equipo, resulta de 6 364 rpm. Este ascenso en la velocidad del generador, se llevó a cabo a intervalos de flujo controlados, registrando parámetros de interés como la presión de línea, la presión de admisión de la turbina, los voltajes entre cada una de las fases así como las frecuencias de éstas, la velocidad del generador, etc.

En la tercera prueba para la obtención de la potencia disponible en el fluido motriz, fue necesario la medición del flujo de trabajo, por lo que se hizo el arreglo para la conexión de un rotámetro en el sistema de la microturbina. Dado que el rotámetro que se requiere en la línea de admisión de aire a la turbina debe resistir las 110 libras, y un flujo de 2 500 litros por minuto (lpm), aproximadamente, y el rotámetro con el que se contó fue de 300 lpm y 100 libras de capacidad, se hizo una configuración para instalarlo en la descarga de la turbina, ya que en esta zona se tiene menor presión y no se compromete la resistencia del equipo. De esta manera, es posible medir el flujo a bajas revoluciones como se observa en la figura 5.

Se hicieron pruebas preliminares para medir el flujo de trabajo, sin embargo, se llegó a la máxima capacidad del rotámetro (300 lpm) con una apertura de válvula de 30%, flujo insuficiente para vencer la inercia de la microturbina y poder comenzar a rodarla. Aunado a lo anterior, las conexiones de la descarga presentaron fugas de aire, por lo que se requirió sellar completamente las uniones empleando silicón para motores. Una vez solucionado el problema de fugas se empleó aire comprimido para realizar las mediciones de carga de la turbina incorporando un filtro regulador de presión. El arreglo final de la prueba se presenta en la figura 6.



Figura 6. Arreglo de conexión para las pruebas de flujo



Figura 5. Arreglo para medir el flujo de aire en la descarga de la microturbina

Con los resultados de las mediciones se realizaron los cálculos termodinámicos de la energía disponible en el fluido, dichos resultados confirman una potencia disponible de 10 W empleando el flujo de aire comprimido, considerando además, una eficiencia de la turbina de 35%. Con base en estos resultados, se recomienda el uso de compresores de mayor capacidad para poder obtener una potencia mayor de la microturbina; sin embargo, con estas pruebas se pudo relacionar la velocidad de giro, el voltaje generado, la carga eléctrica conectada, la potencia de salida de la máquina, la cantidad de flujo de aire requerido, entre otros factores adicionales, en un rango bajo de revoluciones y a baja carga. Como trabajos adicionales, se pretende realizar estas pruebas cambiando el fluido de trabajo por refrigerante R245fa, esperando obtener mayores potencias de generación.