

Introducción

Desde su prácticamente total desaparición de las líneas ferroviarias en las décadas de los cincuenta y sesenta, la locomotora de vapor ha seguido una discreta pero continua evolución que merece la pena revisar, con el objeto de determinar el estado actual de este tipo de tecnología, qué es lo que puede aportar a las líneas y en qué condiciones.

Para comprender las causas de la sustitución de la locomotora de vapor por tracción diesel, se debe considerar lo ésta vino a aportar:

- Facilidad en la conducción.
- Mando múltiple.
- Ciclo termodinámico más afinado. Diseño en base a éste.
- Series estandarizadas.
- Combustible barato. Posteriormente el precio se incrementó.
- Imagen de modernidad.

Frente a estos aspectos, la locomotora de vapor clásica, salvo unidades o series especiales, presentaba un ciclo termodinámico no muy afinado, poca operatividad y elevados tiempos de mantenimiento, como principales inconvenientes. (Al margen de estos aspectos, se debe hacer notar que la sustitución de locomotoras de vapor por tracción diesel no siempre estuvo acompañada por una mejora en las capacidades de tracción).

Hoy en día, a la vista de realizaciones recientes, y de los cambios que son previsibles en el panorama energético procede hacer una revisión de la locomotora de vapor que la técnica actual permitiría construir.

1. SITUACIÓN ENERGÉTICA ACTUAL.

Actualmente hay dos grandes vías de estudio en la obtención de potencia. Por una parte, el control de las emisiones; el creciente consumo de energía y la preocupación social

por el entorno hacen que buena parte de los esfuerzos se encaminen al control de los contaminantes.

Un segundo aspecto es el de los combustibles. Dado el carácter limitado de los recursos, parece evidente que se deben ir introduciendo progresivamente los biocombustibles, para los cuales se están desarrollando tecnologías específicas de combustión que progresivamente van limando algunos problemas que se encuentra en su proceso. En este sentido, en el plazo de una década, es previsible que se hayan producido cambios de importancia.

Dentro del apartado de las emisiones contaminantes los grandes agentes a controlar son: la materia particulada, los óxidos de azufre, los óxidos de nitrógeno, el CO₂ y CO, entre otros. Las emisiones de CO₂ se reducen aumentando la eficiencia de los ciclos de potencia. El CO es generalmente producto de una combustión incompleta, y por tanto, mal reglada. La emisión de azufre depende del contenido del mismo en el combustible empleado. Los óxidos de nitrógeno, NO_x, se forman en función del tipo de combustión y de las condiciones en que se desarrolle la misma. En general, se puede decir que se ve facilitada por altas temperaturas y elevados excesos de aire.

Es sobre este contaminante sobre el que se centran los mayores esfuerzos de control, por su peligrosidad y por el hecho de ser uno de los que más posibilidades de control ofrece.

2. TRACCIÓN DIESEL Y TRACCIÓN VAPOR.

Se realiza a continuación un breve estudio del estado del estado del arte en tracción diesel y un análisis más profundo de las posibilidades que ofrece la tracción vapor según el concepto actual, con el objeto de valorar las posibilidades de esta última.

2.1. Situación actual en tracción diesel.

Se puede afirmar que en los últimos años ha habido una revolución en la tecnología de los motores diesel de tracción que ha conducido a una drástica reducción en los consumos mediante el empleo de turbocompresor de geometría variable, inyección directa y el empleo de la gestión electrónica. Hoy en día se llegan a conseguir consumos de 140-145g/CV h y rendimientos del 35%.

Paralelamente, se han conseguido reducción en el nivel de emisiones, pero no se ha alcanzado ni mucho menos el grado de perfeccionamiento obtenido con los consumos.

En general, se puede decir que los motores diesel mantienen una emisión contenida de CO pero la propia forma de trabajar del motor diesel, altas temperaturas de llama y exceso de aire en la combustión, facilitan enormemente la formación de NOx.

Dada el gran interés por contener las emisiones de NOx, se han realizado numerosos ensayos con motores diesel funcionando con otro tipo de combustibles.

Se muestran a continuación los resultados obtenidos en algunos de ellos. Los datos que se presentan están tomados de la revista Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, vol 122, enero 2000.

En un primer ensayo, sustituyendo el 99% del gasoil por gas natural licuado, manteniendo un mínimo porcentaje de gasoil para el control del encendido en el interior del cilindro, se obtuvieron reducciones considerables en las emisiones de NOx, objetivo principal del ensayo, pero se pudo constatar una importante pérdida de potencia del motor y el aumento en las concentraciones de otras sustancias contaminantes, aunque de menor importancia de la del NOx. En la gráfica siguiente se muestran los resultados obtenidos.

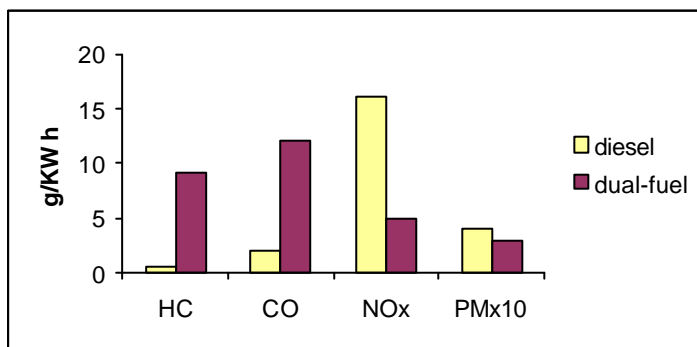


figura 1: resultados locomotora diesel dual-fuel

En otro ensayo, y tomando datos de la misma revista, en 1993 se ensayó con gas natural licuado al 100% como combustible. Se obtuvieron unos buenos resultados pero se debe hacer notar que la potencia de la locomotora, una MK 1200 C motorizada con un Caterpillar 3516G, que rinde normalmente 1.900 Kw de potencia sólo desarrolló 1.000 Kw al utilizar gas natural como combustible.

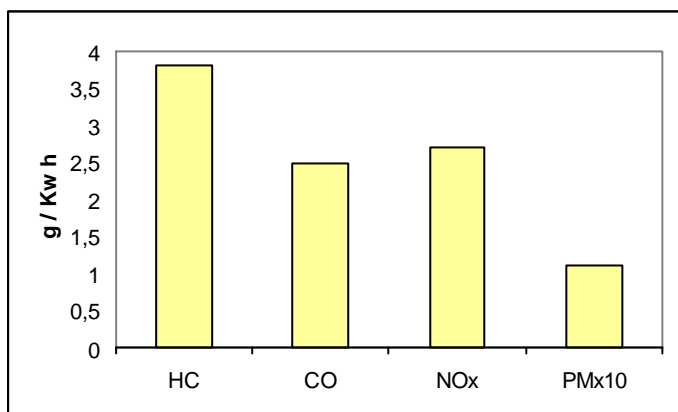


figura 2: resultados locomotora diesel gas

También ha sido ensayada la reducción de los óxidos de nitrógeno mediante la adición de metilamina a los gases de escape pero ha resultado una solución muy cara y difícil de mantener.

2.2. Un nuevo concepto de locomotora de vapor.

Estudios y realizaciones recientes han puesto de manifiesto que varias de las desventajas e inconvenientes que la tracción vapor presentaba en el pasado pudieran estar superadas y que este tipo de tecnología ofrece unas interesantes posibilidades para la obtención de buenos rendimientos acompañados de unas mínimas emisiones contaminantes.

Los argumentos que se exponen a continuación están basados en realizaciones recientes en tracción vapor, estudios de viabilidad, estado de la tecnología y opiniones de expertos en el tema del vapor. Se describe a continuación las características de la locomotora de vapor que podría construirse a día de hoy analizando cada uno de sus aspectos.

2.2.1. El ciclo termodinámico

Es un aspecto fundamental y determinante en los resultados finales del conjunto. Un ciclo termodinámico perfeccionado acompañado de la eliminación de consumos improductivos supone un ahorro de costes de hasta un 50% respecto a la locomotora de vapor clásica, según palabras de uno de los mayores expertos en tracción vapor, el Sr. Livio Dante Porta.

Las características más relevantes del ciclo que se podría implementar actualmente pasan por:

- La eficiencia del ciclo está determinada por la diferencia de temperaturas a las que el foco frío absorbe calor y la temperatura a la que lo cede el foco caliente; interesa que esta sea lo menor posible. Entonces la presión de timbre de la caldera estaría entorno a los 25 Kg/cm², elevada pero sin comprometer las propiedades de los materiales, para elevar así la temperatura a la que se absorbe calor, llegando a trabajar con una temperatura del vapor superior a los 450°C.
- Cuidado diseño de los conductos de vapor para evitar pérdidas de carga. Esto supone amplios conductos, evitar espacios muertos etc.
- Expansión multietapa (sistema Compound) con recalentamiento intermedio. Esto supone una ampliación del ciclo teórico del vapor.
- Utilización del vapor de escape para precalentar el agua de admisión a la caldera y el aire de la combustión.
- Aislamiento térmico llevado al extremo de todas las superficies calientes: caldera, cilindros y cajas de vapor. Evitar pérdidas de calor va a suponer, además de incrementar el rendimiento otras ventajas que luego se comentarán.
- El escape. Los modernos escapes Lempor permiten un magnífico control de la combustión a la vez que minimizan las contrapresiones, lo que tiene una influencia muy importante en el rendimiento del ciclo de potencia.

En un estudio de viabilidad para una locomotora de vapor en Cuba está previsto obtener un rendimiento de un 15% quemando bagazo, un desecho sólido de la producción de azúcar; utilizando una tecnología superior y un combustible líquido o gaseoso se puede alcanzar un rendimiento superior.

2.2.2. Caldera

La combustión en caldera permite una gran versatilidad en la utilización de diferentes combustibles. Permite además mayor control sobre las condiciones de la combustión con lo que consiguen obtener unos valores de emisiones más ajustados.

Se podría trabajar con todo tipo de combustibles. Desde los tradicionales combustibles fósiles, gasoil, carbón y gas natural, hasta con biocombustibles, que es previsible comiencen a tomar mayor importancia y presencia en los procesos de obtención de potencia.

El sistema de combustión para sólidos denominado “Sistema de Combustión de Producción de Gas”, desarrollado por el Ingeniero Livio Dante Porta asegura un alto rendimiento en el quemado de combustibles sólidos, minimizando los inquemados y la emisión de materia particulada. Básicamente, se trata de una combustión “escalonada”, que asegura un quemado completo del combustible y menores emisiones contaminantes que los sistemas tradicionales utilizados en este tipo de tracción.

Tubos para el intercambio de calor aleteados y rugosos para aumentar el coeficiente de transferencia de calor y reducir su longitud, permiten un diseño más compacto de la caldera.

El mantenimiento queda prácticamente anulado por el eficiente tratamiento del agua de alimentación. Se prevé que no haya que realizar absolutamente ninguna operación de limpieza de incrustaciones ni obturaciones de los tubos en toda la vida de la locomotora.

Una caldera limpia unido a un tiro regular, proporcionado por los perfeccionados escapes que existen en la actualidad, que evitan fatigas en los materiales por cambios bruscos de temperatura, prometen un mínimo de operaciones de reparación en la caldera.

En la caldera se hace fundamental un profundo estudio del aislamiento de la misma de cara a minimizar las pérdidas de calor durante los periodos de inactividad.

La casa SLM ha desarrollado un novedoso sistema para mantener la presión de la caldera y levantar presión mediante resistencias eléctricas cuando la locomotora (de reducido tamaño) se encuentra estacionada. Este modo de trabajo permite programar la puesta en funcionamiento automática de modo que la disponibilidad de la máquina pueda ser inmediata.

2.2.3. Mecanismo motor

La disposición pasaría por ser de tres o cuatro cilindros Compound, los de alta diseñados para trabajar a unos 20 Kg/cm², si la caldera trabajase a los 25 Kg/cm² mencionados, con recalentamiento intermedio con objeto de conseguir una máxima eficiencia del conjunto. Esta disposición de cilindros permite un buen equilibrado de las masas alternativas lo que conduce a reducidas vibraciones.

La simplicidad de estos motores con un reducido número de piezas móviles asegura una reducida tasa de averías y de mantenimiento.

La tecnología actual en cuanto a rozamientos permite asegurar una perfecta estanqueidad del vapor, superior al millón de kilómetros en el mejor de los casos.

Los cilindros estarán diseñados para conseguir una máxima eficiencia adiabática con el empleo de aislamientos térmicos lo más completos posible.

2.2.4. Ergonomía y estética

Este es uno de los aspectos más descuidados en el pasado. Hoy en día es posible una configuración completamente diferente de la locomotora de vapor.

En el caso de utilizar combustibles líquidos o gaseosos, es perfectamente viable una configuración bicabina, de aspecto muy similar al de una locomotora diesel o eléctrica, de similares medidas. Debido a los ajustados consumos, los acopios de agua y combustible serían transportables en la propia unidad, con lo cual no precisaría del tender. Se llevaría a cabo un cuidadoso estudio de la aerodinámica del conjunto, de cara a evitar resistencias aerodinámicas por una parte, y evitar recalentamientos mecánicos por otra.

La comodidad en la conducción de la locomotora será un aspecto fundamental. Todos los mandos serán operables desde el puesto de conducción y en posición sentada. Se sustituye la clásica palanca del regulador por una válvula “todo o nada”, con el objeto de evitar defectos en la conducción de la locomotora y de simplificar el trabajo del maquinista. La conducción de la locomotora se realizará mediante la maniobra de distribución.

Debido a los actuales sistemas de control y regulación automáticos la conducción se puede realizar perfectamente con agente único y sin ningún tipo de esfuerzo físico.

La cabina de conducción perfectamente aislada térmicamente de todos los focos de calor.

2.2.5. Esfuerzo de tracción

Los modernos sistemas de adhesión, junto con los sistemas mecánicos de control antipatinaje permiten una superior agilidad de la locomotora en capacidad de arrastre sin suponer variación en el régimen de funcionamiento del conjunto; es decir, se mantiene constante el rendimiento, el nivel de emisiones etc.

2.2.6. Integración en la red

Con la adopción del mando múltiple, la integración de una locomotora de este tipo sería total. Se podrían acoplar los mismos sistemas de señalización que en cualquier otra máquina, así como el sistema de vigilancia “hombre muerto”, equipo de radiotelefonía y registrador de datos de la conducción.

En cuanto al personal, la locomotora será de fácil conducción; como se ha explicado anteriormente, las maniobras están simplificadas y las condiciones de utilización estarán al mismo nivel de comodidad que en cualquier otra locomotora.

El exhaustivo aislamiento de la caldera y otros elementos hace que este tipo de locomotora pueda estar en condiciones de funcionamiento en tiempos mínimos, con lo que queda relevado a un segundo plano el clásico inconveniente de tener que esperar a levantar presión suficiente para poder operar.

Como se ha comentado en el apartado de la caldera, la posibilidad de programar el precalentamiento de la caldera supone un gran avance en cuanto a disponibilidad de la locomotora.

2.2.7. Mantenimiento

Este es uno de los grandes defectos de la locomotora de vapor clásica. El empleo de cojinetes suponía una constante atención a su engrase. La caldera era un elemento que precisaba especial atención por la dificultad en mantenerla limpia de incrustaciones producidas por las sales y los barros disueltos en el agua de alimentación, las corrosiones y por las obturaciones de los tubos ocasionadas por la fusión de las cenizas.

Los nuevos sistemas de combustión y el tratamiento del agua de alimentación de la caldera va a suponer mantenimiento nulo de la caldera. Está previsto un tratamiento interno del agua de alimentación que permite trabajar con un rango muy amplio de calidades sin que esto redunde en una mayor atención y preocupación por el estado de la caldera. Experiencias llevadas a cabo con aguas de muy baja calidad y tratamiento interno muy similar al TIA francés, aseguran, que con un simple tratamiento de purgas de la caldera, ésta se encuentra en perfectas condiciones de funcionamiento sin precisar ningún tipo de desincrustación o limpieza.

Por otra parte, el empleo de rodamientos de rodillos sellados, que no precisan engrase posterior, va a reducir las operaciones de engrase a los cilindros únicamente; este engrase se realiza mecánicamente.

La relativa simplicidad del aparato motor y su reducido número de piezas móviles, comparado con otros tipos de tracción hacen prever reducidos tiempos de mantenimiento en este apartado.

2.2.8. Aspectos medioambientales

En principio, para que un proyecto de este tipo se pueda considerar notable en el sentido de bajo impacto medioambiental debería cumplir tres condiciones: posibilidad de utilizar fuentes renovables de energía, alto rendimiento y mínimo nivel de emisiones contaminantes.

Tres son los aspectos más destacables del proyecto en este sentido.

- Altos rendimientos

Los altos rendimientos alcanzables implican bajos consumos de combustible, lo que redundará en un bajo índice de emisiones globales (aparte de las emisiones específicas por Kw h desarrollado). Se estima que el rendimiento sea del 15-16%, estando previstos unos límites en el futuro del 21% en el caso de locomotoras con ciclos convencionales y del 27% con el empleo de locomotoras de ciclo cerrado.

- Versatilidad en la utilización de combustibles

Como se ha explicado en el apartado dedicado a la caldera, las posibilidades en la utilización de diferentes combustibles son muy variadas. Se puede aprovechar la tecnología existente en el desarrollo de calderas de todos tipos para adaptar la combustión al combustible más conveniente según avance el grado de implantación de otros combustibles más neutros para el medio ambiente.

La locomotora cubana antes mencionada, LVM 800, está previsto que trabaje con biomasa obtenida de un producto de desecho.

- Bajo nivel de emisiones

Como ejemplo de este apartado, en la gráfica siguiente están expresados los niveles de emisiones de una locomotora de vapor de la casa SLM que utiliza gasoil como combustible. Los datos están acompañados de las emisiones que produce una locomotora diesel con un motor del año 1992.

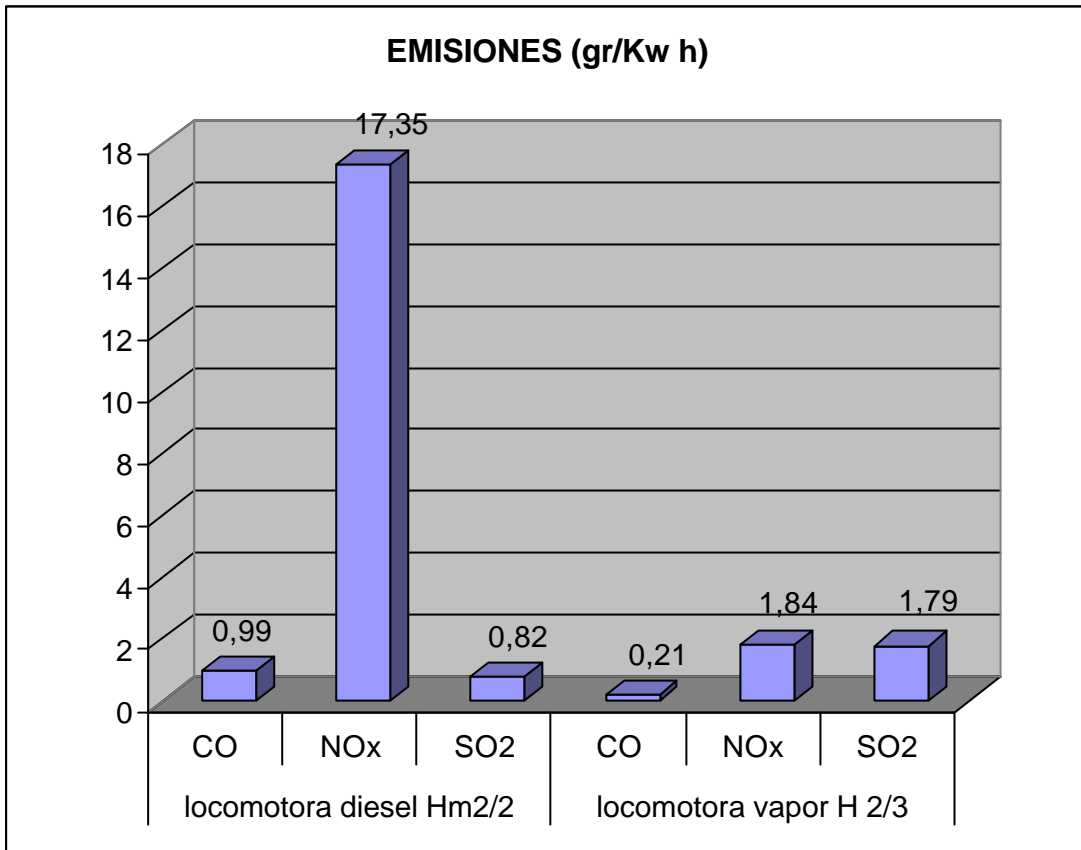


Figura 2: comparativa emisiones tracción diesel-vapor

Se puede apreciar que la emisión de óxidos de nitrógeno es casi 10 veces inferior en el caso de la locomotora de vapor. La emisión de CO es casi 5 veces menor y el valor de emisiones de óxido de nitrógeno es algo superior debido al combustible empleado.

Si se empleara gas natural en la locomotora de vapor como combustible, la emisión de óxido de azufre probablemente sería nula ya que generalmente el contenido en azufre del gas natural es nulo, dependiendo de la procedencia.

Otro aspecto a considerar es el de la contaminación acústica. Se puede decir que es mínima cuando la locomotora se encuentra detenida en condiciones de marcha. No hay elementos rozantes en movimiento que provoquen grandes niveles sonoros. Esta circunstancia no ocurre en locomotoras diesel, que aún girando al ralentí generan un nivel de decibelios considerable.

2.2.9. Construcción de la locomotora

Las elevadas cifras de eficiencia antes mencionadas suponen un ratio muy alto de potencia-peso, superior a 50 HP por tonelada, lo que implica una relativa simplicidad en

la construcción debido a que la reducción en el consumo de energía se traduce en una reducción del tamaño de todo el equipamiento que le es proporcional: caldera, depósitos de combustible, peso de combustible y agua...

En cuanto a la construcción de la locomotora hay una gran parte de mecánica general, que no precisa de una industria ferroviaria específica, aunque también existen empresas dedicadas a este tipo de construcciones, como la casa SLM u otras dedicadas específicamente al desarrollo de elementos de locomotoras.

Los componentes electrónicos que pudieran controlar los servomecanismos de distribución, adhesión y otros, serían de nueva concepción ya que hasta el momento no parecen estar implementados en ninguna locomotora de las analizadas en este estudio.

Los costes de construcción, a falta de datos más precisos y sin una estimación real de los costes de equipos electrónicos de control, deben ser inferiores a los de una locomotora diesel de similar potencia siempre dependiendo del lugar de fabricación y del grado de sofisticación de los medios tecnológicos empleados.

3. CONSTRUCCIONES RECIENTES.

A continuación se detallan brevemente las principales características de tres locomotoras de vapor de reciente construcción, que reflejan en mayor o menor medida, las características mencionadas en el capítulo anterior.

3.1. La locomotora H2/3 de SLM

Se trata de una pequeña locomotora utilizada en líneas turísticas de cremallera de zonas de alto valor ecológico en Austria y Suiza. Estas locomotoras fueron entregadas en 1992.

Funcionando con gasoil y motorización de simple expansión logran una alta eficiencia y mínimas emisiones contaminantes, mostradas en la tabla de emisiones del capítulo de “nuevo concepto de locomotora de vapor”, como producto de su cuidado diseño y la refinada tecnología empleada en su construcción.

La locomotora funciona con vapor recalentado sin expansión multietapa utilizando fuel como combustible e incluyendo en el ciclo un precalentador del agua de admisión a la caldera, que eleva la temperatura de 20°C a 90°C a un régimen de 49 l/min con vapor de

escape a 120°C. La caldera trabaja a 16 Kg/cm². Los cilindros trabajan a 15 Kg/cm² y con una temperatura de vapor recalentado de 420°C.

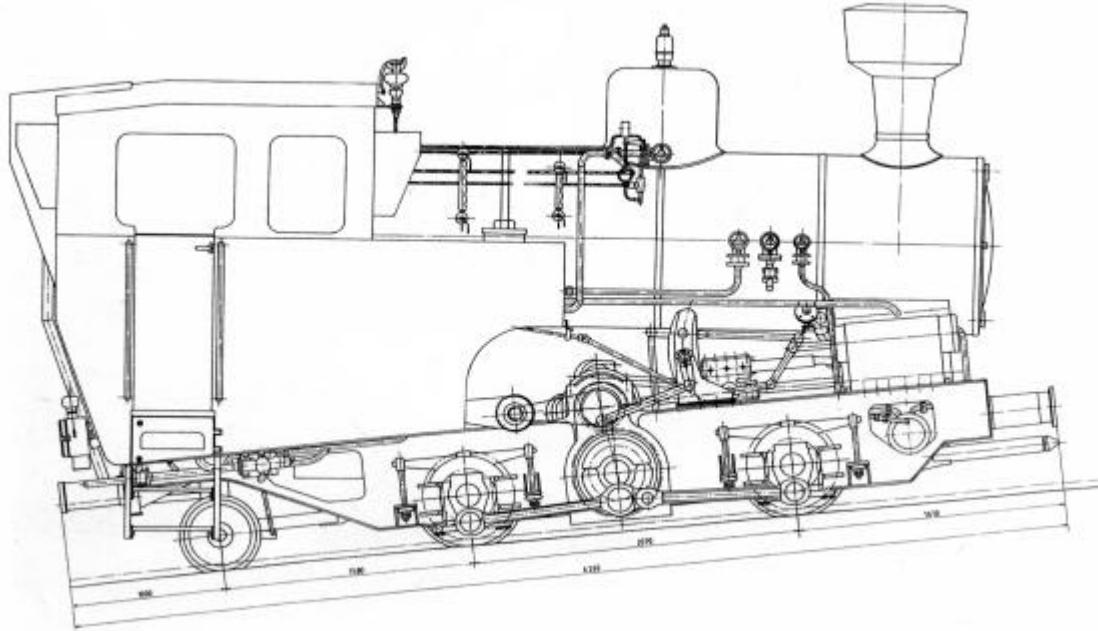


Imagen: locomotora H2/3 de SLM

Están preparadas para alcanzar las condiciones de funcionamiento en un tiempo mínimo mediante un exhaustivo aislamiento térmico de la caldera unido a la posibilidad de incorporar precalentadores eléctricos que permiten programar los encendidos de la locomotora de tal manera que ésta se encuentre en condiciones de funcionamiento en 10-15 minutos tras el encendido de los quemadores.

Las condiciones de utilización son muy cómodas gracias al engrase mecánico centralizado y conducción por agente único.

3.2. La locomotora Red Devil

Se trata de una locomotora reconstruida por David Wardale en los años ochenta, demostrando que una máquina construida a finales de los años cincuenta no estaba, ni mucho menos, cerca de explotar todas las posibilidades que ofrece el vapor, argumento éste esgrimido por los detractores del vapor.



Imagen: locomotora Red Devil de los ferrocarriles sudafricanos

La locomotora fue reconstruida, dotándola de precalentador de agua de admisión, sistema de combustión de Producción de Gas, doble escape Lempor, consiguiéndose un ahorro del 38% en combustible, una disminución del 27 % en el consumo de agua y una potencia sostenida de 4.000 CV, incrementando en un 50% la conseguida por la locomotora original, lo que significó un récord de potencia en vía métrica.

El rendimiento calculado estuvo próximo el 12%, a pesar de trabajar un carbón de bajo poder calorífico.

Al margen del equipamiento antes mencionado, hay que hacer notar que en la locomotora se implementaron multitud de cuidados detalles, básicamente los mencionados en el apartado dedicado al aprovechamiento del ciclo teórico del vapor, que permitieron conseguir estos magníficos resultados.

3.3. Locomotora LVM 800

Se trata de un reciente proyecto que se está realizando en Cuba para la construcción de una locomotora de vapor, funcionando con bagazo, residuo sólido de la producción del azúcar.

La situación económica cubana precisa una solución económica y sostenible frente al elevado costo que supone para el ferrocarril cubano la operación con tracción diesel, por los gastos que significa en combustible y las dificultades en las operaciones de mantenimiento.

En este contexto, se ha llevado a cabo un proyecto para construcción de una locomotora que pueda ser construida con tecnología propia y que consuma un combustible

autóctono, con el objeto de no que depender del exterior ni en el mantenimiento ni en el aprovisionamiento de combustible.

Se trata de una locomotora tanque de mediana potencia, 800-1.000 HP, que pueda ser utilizada en servicios de carga y pasaje ligeros, así como en servicios de maniobra.

En el diseño se ha tenido especial cuidado en el aprovechamiento del ciclo termodinámico, en la medida en que supone, además de un mejor aprovechamiento del combustible, una reducción de costes y material en todo el equipamiento que le es proporcional, esto es, tamaño de la caldera, depósitos de combustible, depósitos de agua etc.

Las principales características de la locomotora son:

- Caldera trabajando a 25 bar. Alta temperatura de vapor sobrecalentado, 450 °C a plena carga.
- Sistema de combustión de Producción de Gas adaptado a biomasa.
- Expansión multietapa. Compound con recalentamiento intermedio. Esto supone una reducción de las pérdidas por expansión incompleta y un aumento del rendimiento del ciclo teórico, al reducir la diferencia de temperaturas entre los focos caliente y frío.
- Mantenimiento reducido. Con un tratamiento adecuado del agua en la caldera, se elimina virtualmente el lavado y reparaciones en la caldera.

La relativa simplicidad del mecanismo motor unido al reducido número de masas alternativas hace prever un bajo índice de averías.

- Ergonomía avanzada; supone facilidad y comodidad en la conducción.

En la relación óptima potencia-velocidad está previsto un rendimiento del 15%. Una locomotora diesel funcionando en las mismas condiciones, conseguiría un 27%. Si bien existe una diferencia en los rendimientos, hay que tener en cuenta que ésta se ve claramente compensada por el precio del combustible, al margen del beneficio que supone una fuente de energía renovable frente a un combustible fósil.

Está previsto tener la locomotora construida en el año 2002 para comenzar las pruebas y en función de éstas, comenzar la producción.

4. CONCLUSIONES

De todo lo expuesto anteriormente, se puede concluir que la tracción vapor pudiera irse convirtiendo a una alternativa a la tracción diesel en aquellos países con especiales dificultades en el acceso al petróleo y que sin embargo, posean un combustible autóctono en abundancia, como pudiera ser el carbón, el gas natural o biomasa. La operación con tracción vapor podría permitirles una importante reducción de costes tanto de explotación como en la adquisición del material, asegurando al mismo tiempo que las capacidades de tracción quedan garantizadas con la tecnología empleada.

Otra posible alternativa de utilización surge de los mínimos niveles contaminantes de locomotoras de vapor construidas con moderna tecnología. Este aspecto permite presentarlas como una alternativa ecológica en trazados de especial importancia medioambiental, en los que su menor eficiencia con respecto a locomotoras diesel se vea compensada por su mucho menor impacto medioambiental.