

Conversión de energía

1	“Generación” de energía siempre significa conversión de energía	2
2	Rendimiento y rendimiento energético en particular.....	2
2.1	Rendimiento, la razón de “utilidad a consumo”	2
2.2	Rendimiento de los motores térmicos	3
2.3	Medidas para aumentar el rendimiento energético	3
3	Máquinas de vapor	4
3.1	El primer motor térmico en el mundo	5
3.2	¿Por qué se utiliza agua como el medio de trabajo?.....	5
3.3	Notas didácticas sobre el motor Stirling	6
4	Turbinas.....	7
4.1	La turbina de vapor en vez de la máquina de vapor.....	7
4.1.1	Diferencias de diseño comparadas con la máquina de vapor de pistón	7
4.1.2	¿Cómo funcionan las turbinas de vapor?.....	8
4.2	Turbinas a gas	8
4.2.1	¿Por qué turbinas a gas?.....	8
4.2.2	¿Cómo funcionan las turbinas a gas?	9
4.3	Turbinas hidráulicas.....	9
4.3.1	Turbina de Pelton	10
4.3.2	Turbina de Kaplan	10
4.3.3	Turbina de Francis.....	10
4.3.4	Propiedades físicas de las turbinas de Kaplan y de Francis	10
5	Motores.....	11
6	Generadores de energía eléctrica.....	11
7	Reactores nucleares	12
7.1	Principio básico de la fisión nuclear en un reactor	12
7.2	Diferentes diseños técnicos de reactores nucleares	13
8	Pilas de combustible	15
8.1	Energía eléctrica en vez de calor.....	15
8.2	El principio de funcionamiento de la pila de combustible	15
8.3	Problemas técnicos con células de corriente de alta potencia	16
9	Generador de gas de síntesis	16
10	Turbinas eólicas	18
10.1	Propiedades físicas de la turbina eólica	18
10.2	Diseños de turbinas eólicas	19
10.3	Problemas de generación de energía eléctrica con turbinas eólicas	20
11	Células solares.....	20
11.1	Las propiedades físicas de la célula solar.....	20
11.2	¿Por qué es el rendimiento de las células solares tan bajo?.....	21
11.3	Tipos de células solares	21
11.4	Equilibrio climático y ecológico y rendimiento energético de las células solares	22

1 “Generación” de energía siempre significa conversión de energía

“Generación” de energía siempre significa conversión de energía. Generación en el sentido de “aumentar” el contenido energético de un sistema cerrado no es posible según la ley de la conservación de la energía y la primera ley de la termodinámica. Cuando las personas no expertas utilizan los términos “producción de energía” y “generación de energía”, siempre se refieren a la conversión de una forma inutilizable de energía en energía útil. Para recordar a los alumnos de este hecho, estos términos se colocan entre comillas angulares en este documento o en otros archivos de medios didácticos relacionados con estos temas (es decir, “generación” de energía y “producción” de energía).

Por ejemplo, en una central eléctrica caldeada a carbón, primero se convierte la energía química almacenada del carbón en calor mediante combustión. Con una turbina se convierte el calor en energía mecánica, y esta, a su vez, en energía eléctrica con un generador de energía eléctrica. Se puede distribuir y utilizar la energía eléctrica en forma de potencia eléctrica. Se puede distribuir y utilizar la energía eléctrica en forma de potencia eléctrica. Las formas de energía en las cuales se distribuye la energía se conocen como “fuentes de energía secundarias”. Estas son usualmente la energía eléctrica y la calefacción urbana. Los consumidores finales o sus aparatos electrodomésticos y máquinas como cocinas o taladros convierten entonces la energía eléctrica en calor o energía mecánica.

En otras palabras, no hay “generación” de energía. Por el contrario, la conversión de una forma de energía a otra usualmente está acompañada de pérdidas. En relación con el efecto útil, también se habla de la “degradación” de parte de la energía usada.

2 Rendimiento y rendimiento energético en particular

La conversión de una forma de energía a otra está sujeta a ciertas pérdidas de energía en relación con la energía útil deseada. Esto se debe a dos razones: primero, **restricciones técnicas**; por ejemplo, sólo es posible convertir el cien por ciento de la energía mecánica en energía eléctrica, mediante un generador de energía eléctrica, en teoría. Debido a la resistencia eléctrica de las bobinas en el generador y su calentamiento asociado, la conversión al 100 % no es técnicamente factible. También hay pérdidas por calor debido a la fricción en los cojinetes de las máquinas. Sin embargo, los modernos motores eléctricos y generadores alcanzan un rendimiento de hasta el 99 % gracias al enfriamiento. El rendimiento de estas máquinas se puede así aumentar a casi el 100 % por medio del esfuerzo técnico correspondiente. La conversión de la energía eléctrica en calor por medio de un calentador de inmersión en un recipiente bien aislado también llega casi al 100 %. Pero, en segundo lugar, también hay **restricciones naturales** para ciertos procesos de conversión. Especialmente con respecto a la conversión de energía térmica en energía mecánica, la segunda ley de la termodinámica no permite la conversión completa.

2.1 Rendimiento, la razón de “utilidad a consumo”

El concepto de “rendimiento” fue introducido para tener una cantidad comparable para medir las pérdidas que ocurren en la “generación” de energía. El rendimiento designa la proporción de energía útil obtenida ($E_{\text{útil}}$) con respecto a la energía consumida (E_{cons}) y en ingeniería se abrevia con la letra η («eta» griega). Mientras más cercano el rendimiento al valor 1 o el 100 %, mejor (más eficiente) es la conversión de energía.

$$\eta = \text{Utilidad} : \text{Consumo} = E_{\text{Útil}} : E_{\text{Cons}}$$

En la práctica nunca se logra un rendimiento de 1 por las razones anteriores.

2.2 Rendimiento de los motores térmicos

Los procesos en los cuales se genera trabajo mecánico por calor son de gran importancia en tecnología. Estos procesos pueden ser utilizados para impulsar vehículos motorizados o en un generador para conversión a energía eléctrica. El proceso cíclico de Carnot describe el motor térmico ideal. Este tiene el máximo rendimiento posible teóricamente. A partir del proceso Carnot se puede deducir la proporción máxima de calor de admisión que se puede convertir en trabajo mecánico. Este se calcula como el cociente de la diferencia entre la temperatura máxima (T_2) y la temperatura mínima (T_1) en el proceso completo. (Nota: la fórmula de rendimiento se deriva de calor y trabajo. Si se utiliza la ecuación para gases, es posible convertirla a T).

Hay muchos procesos cíclicos en la vida real, pero todos ellos tienen un rendimiento menor que el proceso teórico ideal de Carnot:

Proceso cíclico	Máquina	Rendimiento
Carnot	Motor térmico teóricamente ideal	$\eta_{ideal} = 1 - \frac{T_1}{T_2} < 1$
Stirling	Motor Stirling	$\eta_{real} = 20 \% \text{ hasta } 50 \%$
Diésel	Motor diésel	$\eta_{real} = 40 \% \text{ hasta } 50 \% \text{ (estacionario)}$
Otto	Motor de Otto	$\eta_{real} = 30 \% \text{ hasta } 38 \%$
Clausius-Rankine	Turbina de vapor, máquina de vapor	$\eta_{real} = 30 \% \text{ hasta } 50 \%$
Proceso de Joule	Turbina a gas	$\eta_{real} = 30 \% \text{ hasta } 40 \%$
Central eléctrica de ciclo combinado	Turbina a gas y de vapor en combinación	$\eta_{real} = \text{hasta } 61,5 \%$

La bomba de calor como caso especial para el motor térmico inverso, la “bomba de calor”, se ha definido un “coeficiente de prestación” (L) como un rendimiento inverso, por así decirlo. Por lo tanto, este coeficiente de rendimiento es mayor que 1. El coeficiente máximo de prestación de una bomba de calor es $L = 6$, y la cifra usual se encuentra entre 3 y 5. Esto significa que se pueden obtener 6 kWh de calor mediante el uso de 1 kWh de energía eléctrica.

2.3 Medidas para aumentar el rendimiento energético

Para hacer más eficaz el uso de nuestros recursos de combustibles fósiles, se realizan constantes esfuerzos para optimizar el rendimiento, es decir el rendimiento de la conversión. Aunque no es posible cambiar las leyes naturales, particularmente en lo que respecta a procesos de potencia térmica (rendimiento $< 100 \%$), es posible, sin embargo, aumentar el rendimiento.

- **Calor y potencia combinados:**

Calor y potencia combinados es el término empleado para la cogeneración de electricidad y calor en la cual el calor sobrante que ocurre naturalmente en una central eléctrica (turbina a gas y/o vapor) se utiliza para efectos de calefacción urbana. El rendimiento promedio de una central eléctrica de ciclo combinado está entre 51 % y 58 %. Una primera central eléctrica de ciclo combinado con un rendimiento superior a 60 % se encuentra actualmente en la fase de prueba. Si el calor residual se utiliza para calefacción urbana, se logran rendimientos totales de hasta 90 % (por ejemplo, la central eléctrica de ciclo combinado a biomasa en Viena).

- **Gasificación de carbón, bitumen, aceite denso, madera:**

La combustión de combustibles sólidos es menos adecuada para el caldeo de centrales eléctricas con turbinas a gas (corrosión, abrasión). Mediante la gasificación del combustible sólido y la depuración del gas resultante de la síntesis se obtiene un gas relativamente limpio con bajo contenido contaminante. Este se quema muy bien y a temperaturas más altas que las correspondientes a combustibles sólidos. La temperatura más alta se traduce en mayor rendimiento de la turbina a gas (véase arriba). Si también se genera vapor con el calor sobrante de la turbina a gas y se utiliza una turbina de vapor corriente abajo, los rendimientos combinados alcanzan más de un 60 %. Además del mayor rendimiento, el gas residual con esta moderna tecnología contiene considerablemente menos contaminantes y, por ende, ejerce un menor impacto sobre el medio ambiente.

- **Álabes de rotor optimizados para turbinas a gas:**

Una turbina a gas consta de varias filas de álabes contra los cuales empuja el gas caliente de combustión que fluye a través la turbina. Una porción del gas pasa sin ser utilizado a través del espacio entre los álabes y la pared de la turbina. Gracias a un diseño inteligente, Siemens tuvo éxito en reducir este espacio, y por lo tanto, las pérdidas. Esto produce un aumento en el rendimiento de aproximadamente 0,2 puntos porcentuales en la turbina a gas. Eso podría no parecer mucho, pero en las centrales eléctricas de gran escala representa un ahorro significativo en energía primaria.

- **Resistencia optimizada y resistencia a la corrosión de los álabes de la turbina:**

Hoy en día las turbinas a gas funcionan con gases de combustión a hasta 1500 °C, a una presión superior a 20 bares, y logran rendimientos superiores a 40 %. Bajo estas condiciones, los álabes metálicos de la turbina podrían fundirse o corroerse. También existe el peligro de que los álabes se rompan puesto que las fuerzas de aceleración que actúan sobre ellos alcanzan hasta 10 000 veces la aceleración gravitacional. Por lo tanto, los álabes de la primera etapa constan de superaleaciones monocristalinas sumamente fuertes, recubiertas con cerámica anticorrosión con alto punto de fusión y poco conductoras.

3 Máquinas de vapor

La máquina de vapor convierte **calor en trabajo mecánico** mediante el agua como medio de trabajo. Este fue el primer motor térmico en el mundo; originalmente tuvo un rendimiento de menos del 1 %. Fue este rendimiento bajo lo que motivó a los investigadores e ingenieros a desarrollar máquinas de vapor con rendimientos cada vez mejores. Siemens desempeñó un papel significati-

vo en el desarrollo de las turbinas de vapor modernas y ostenta numerosas patentes actualmente en el campo de la tecnología de generación de vapor y turbinas a vapor.

3.1 El primer motor térmico en el mundo

En 1690 el francés Denis Papin inventó un **digestor de vapor** con válvula de seguridad. Este se basó en el principio de que el punto de ebullición del agua aumenta a mayor presión y, como resultado, se reduce el tiempo de cocción. Fue también Papin quien tuvo la ingeniosa idea de utilizar este efecto a la inversa. Mayor temperatura produce mayor presión que se puede utilizar para realizar trabajo. Las bombas construidas conforme al **principio de la máquina de vapor de pistón** de Papin fueron utilizadas a partir del año 1700 y se vieron mejoradas por el inglés Thomas Savery. En 1712, Thomas Newcomen en Inglaterra construyó la primera máquina de vapor de operación continua, la cual se utilizó en minas de carbón. Tuvo la desventaja de que consumía casi tanto carbón como el que se explotaba con ella. No fue sino hasta el período de 1765 a 1781 que el fabricante de instrumentos escocés James Watt desarrolló exitosamente una máquina de vapor de pistón de forma moderna.

El principio de la máquina de vapor de Watt:

Se produce vapor en una caldera y se lo inyecta en el cilindro de trabajo, primero arriba y luego abajo del pistón. Se condensa el vapor en un condensador subsiguiente y se genera presión negativa adicional. Ahora se puede bombear el agua condensada nuevamente hacia la caldera. El movimiento ascendente y descendente del pistón se convierte en el movimiento rotativo de un volante mediante varillas y levas.

Los consumidores, por ejemplo, las bombas, máquinas de hilado y tejido y las máquinas-herramienta están conectadas a su eje mediante engranajes o correas de impulsión.

Con la máquina de vapor de Watt también se encontró una unidad de impulsión para locomotoras de **ferrocarril**. Se pudo desarrollar el primer medio de transporte público en el mundo. Se denominó "watt" a la unidad física de potencia eléctrica en honor del inventor.

Nota: en el portal de medios didácticos de la Siemens Stiftung hay disponible un módulo informativo con pantallas animadas de todos los tipos de máquinas de vapor.

3.2 ¿Por qué se utiliza agua como el medio de trabajo?

De hecho, un gas sería adecuado como medio de trabajo, puesto que la presión y el volumen de un gas son una función de su temperatura ($p \cdot V = n \cdot R \cdot T$). Si se tiene un sistema cerrado compuesto de un cilindro y un pistón móvil, según el proceso cíclico de Carnot, al agregarse calor, se puede realizar el trabajo por volumen $p \cdot V$. Sin embargo, originalmente fue muy difícil técnicamente poner en práctica este principio con gases. No fue sino hasta 1816 que el pastor escocés Stirling inventó el motor nombrado en su honor, el cual utilizó aire como el gas de trabajo. (Nota: (Nota: en el portal de medios didácticos están disponibles varios archivos de medios relativos al proceso cíclico de Carnot y al motor Stirling.)

El vapor ofrece ventajas: si se calienta agua (H_2O) a más de 100 °C a presión atmosférica normal, esta se convierte en "vapor", o en terminología estricta, agua en forma gaseosa. En este caso, es preciso señalar que científicamente se debería hacer referencia al proceso de "vaporización" como la "transición a la fase gaseosa". Sin embargo, puesto que las moléculas individuales de H_2O del agua gaseosa son invisibles a los seres humanos, el agua vaporizada también es invisible. A lo que llamamos "vapor" en lenguaje sencillo es, de hecho, niebla consistente de agua condensada (en otras palabras, líquida) en forma de gotitas finas. En la ingeniería de vapor, "va-

por” también puede referirse a “áreas bifásicas”. Esto tiene que ver con el punto crítico en el diagrama p-T del agua. Puesto que el agua gaseosa tiene un mayor volumen que el agua líquida, este trata de expandirse. Si no puede expandirse, por ejemplo en la caldera de vapor de la máquina, la presión aumenta. Como resultado, no obstante, la temperatura a la cual el agua se vaporiza aumenta. Esto produce vapor de agua aún más caliente, el cual genera aún más presión, etc. Este proceso concluye a una temperatura “crítica” a la cual ya no es posible distinguir el estado líquido del gaseoso y viceversa. En la práctica, los motores de vapor de pistón, debido a su intervalo de temperatura, usualmente funcionan con vapor supersaturado; es decir, una mezcla de agua gaseosa y gotitas de agua líquida. A las temperaturas “supercríticas” más altas de las turbinas de vapor modernas, el “vapor” consiste de agua gaseosa únicamente. El atractivo del agua como medio de trabajo para los inventores de la máquina de vapor fue que con relativamente poca agua líquida se pueden generar relativamente grandes cantidades de vapor de alta energía. Por otro lado, se necesitarían cantidades considerablemente grandes de una sustancia que fuese gaseosa a temperatura ambiente y bajo presión atmosférica normal.

El vapor tiene desventajas: en la máquina de vapor se utiliza la admisión de energía térmica primero solo para evaporar el agua y únicamente la porción en exceso para calentar el vapor. Después de realizar trabajo en el motor, el “vapor gastado”, es decir el agua gaseosa, sale del motor. En las máquinas de vapor de pistón de locomotoras, por ejemplo, el vapor se condensa fuera del motor y el calor de vaporización se libera como calor de condensación no utilizado. En motores de este tipo no se puede usar este calor para realizar trabajo mecánico. El rendimiento teórico del motor de pistón de vapor en el caso de las locomotoras es menor en una cantidad igual al calor de condensación. En las turbinas de vapor modernas casi no hay pérdidas debido al calor de condensación. Estas turbinas de vapor funcionan a temperaturas de vapor de admisión extremadamente altas (por ejemplo, 600 °C y 270 bar). El proceso de condensación integrado en la descarga de la turbina (enfriamiento a 30 °C para 30 mbar) contribuye a la potencia debido a la presión negativa. Como resultado la diferencia de temperatura y presión entre el vapor de admisión y el de descarga aumenta y se mejora el rendimiento de esta manera.

3.3 Notas didácticas sobre el motor Stirling

El motor Stirling utiliza aire u otro gas inerte (químicamente no reactivo) como el medio de trabajo. Este gas no pasa a través del motor sino que permanece permanentemente dentro de su espacio de trabajo cerrado. En ese aspecto, el motor Stirling se asemeja más al motor teórico de Carnot que a la máquina de vapor. La característica especial de todos los motores térmicos, a saber, que no se puede convertir el calor empleado en trabajo en un 100 %, no es inmediatamente obvio en una máquina de vapor. La máquina de vapor no parece ser nada más que una máquina de trabajo mecánico en la cual la fuerza del vapor se convierte en la fuerza del pistón. El hecho de que el vapor tiene presión y puede ejercer fuerza se puede ver sencillamente desde una consideración mecánica de la “aelópila”, una esfera rotativa llena con vapor, descrita por Hero de Alexandria alrededor de 120 a. C., o un modelo de máquina de vapor. Puesto que estas máquinas de vapor no tienen una unidad de enfriamiento, la restricción natural de la conversión de calor en trabajo mecánico queda oculta “a primera vista”. Por otro lado, el motor Stirling con su unidad de enfriamiento brinda una demostración visible de las leyes de la termodinámica en acción en el caso de los motores térmicos. Un modelo pequeño del motor Stirling de dos cilindros de vidrio dispuestos en V proporciona una manera realmente eficaz de ilustrar las implicaciones termodinámicas del motor térmico. Por esta razón, varios archivos de medios que tratan sobre el tema del motor Stirling (un video, instrucciones de experimentación y un módulo informativo) están disponibles en el portal de medios didácticos. En vista de los problemas de energía y climáticos, sin embargo, la

importancia de la unidad de enfriamiento para el rendimiento de los motores térmicos debería quedar claro en las clases de ciencia y tecnología.

4 Turbinas

Una turbina (del latín “turbare” traducido: turbulento, confuso) es una turbomáquina que convierte la energía interna de un flujo másico (líquido o gas) en energía mecánica rotativa. El término “turbina” también se utiliza para delimitar sistemas abiertos y fluidos, como por ejemplo, las ruedas hidráulicas en el caso del agua. En contraste con la rueda hidráulica, en una turbina la forma de la carcasa y los dispositivos de guía (álabes de guía o boquillas) obligan al flujo másico en una turbina a tomar el camino por el que entrega la mayor parte de la energía a los álabes del rotor.

En su forma más sencilla, una turbina consta de un eje sobre el cual está montado un rotor con un gran número de álabes. Según el tipo de turbina, se pueden colocar varios rotores, uno tras otro. Si fuera posible, se debería convertir la **energía** total de un medio en flujo (agua, vapor, gas) **en energía rotativa mecánica** de la turbina. Si el eje de la turbina acciona un generador, se puede convertir la energía mecánica de la turbina en energía eléctrica (potencia eléctrica).

Se diferencia entre:

- turbinas de vapor
- turbinas a gas
- turbinas hidráulicas

Aunque las leyes de la mecánica de fluidos son pertinentes en el caso de las turbinas hidráulicas, las leyes de la termodinámica son pertinentes también en el caso de las turbinas de vapor y a gas. Las turbinas de vapor y a gas son motores térmicos típicos.

4.1 La turbina de vapor en vez de la máquina de vapor

Como la máquina de vapor, la turbina de vapor también convierte **energía térmica en energía mecánica**. El diseño de la turbina de vapor está basado principalmente en cálculos de mecánica de fluidos. Sin embargo, puesto que son motores térmicos, se los ha de optimizar desde el punto de vista termodinámico.

4.1.1 Diferencias de diseño comparadas con la máquina de vapor de pistón

Comparado con el motor de pistón, el diseño de la turbina de vapor difiere primero en la conversión directa de la energía del vapor en movimiento rotativo. Con el motor de pistón, por otro lado, primero se tiene que convertir el movimiento lineal del pistón en movimiento rotacional mediante una biela de conexión. La admisión y descarga de vapor hacia y desde el cilindro de trabajo del motor de pistón es relativamente lenta, lo cual a su vez limita la presión y la temperatura del vapor. Por esta razón, el motor de vapor de pistón clásico sólo logra un rendimiento de hasta 20 % comparado con el de hasta 50 % de las centrales eléctricas basadas en turbinas de vapor modernas. Siemens AG está desarrollando actualmente, por ejemplo, centrales eléctricas a base de turbinas de vapor, con un rendimiento superior al 50 %. La tecnología de operación a 700 °C y 300 bares en la admisión de la turbina ha hecho esto posible.

Por razones técnicas el motor de vapor de pistón clásico muy difícilmente se puede diseñar para velocidades rotacionales superiores a aproximadamente 600 rpm. La turbina de vapor, por otro lado, sin esfuerzo logra velocidades rotacionales de 1500 a 1800 rpm con generadores de poten-

cia eléctrica dipolares; y 3000 ó 3600 rpm con generadores monopolares que son necesarios para generar corriente alterna a 50 Hz o 60 Hz. Asimismo, la potencia de salida de la turbina de vapor no tiene límite superior. La potencia de salida técnicamente factible de la máquina de vapor de pistón es aproximadamente 12 MW, mientras que las turbinas de vapor modernas ahora logran potencias de salida de hasta 2.000 MW y están en continuo desarrollo. Por esta razón, en la práctica solo se utilizan turbinas de vapor hoy en día.

4.1.2 ¿Cómo funcionan las turbinas de vapor?

Teóricamente, las turbinas de vapor con una sola fila de álabes serían posibles. Sin embargo, ellas tendrían que funcionar excesivamente rápido para absorber la mayor cantidad posible de energía del vapor a medida que este fluye a través de esta a velocidad extremadamente alta. Dichas velocidades rotacionales altas no son fáciles de implementar técnicamente; tampoco son deseables para la generación de energía eléctrica. En cambio, la energía es transferida en varias etapas a una velocidad rotacional más baja (3000 ó 3600 rpm como máximo). Varios rotores («etapas») están ubicados uno tras otro a lo largo del eje de modo que la energía del vapor que fluye se pueda transferir gradualmente. Puesto que la presión del flujo se reduce a medida que el vapor pasa a través de la turbina, los rotores se vuelven cada vez mayores hacia el extremo posterior para mantener constante la fuerza que actúa sobre los álabes (fuerza = presión multiplicada por el área). Mientras más baja la presión de vapor, más baja la fuerza sobre los álabes. Se coloca un estator fijo entre cada dos rotores. El objetivo de esto es desviar el vapor nuevamente hacia el mejor ángulo de incidencia sobre los álabes de modo que su energía sea usada de la forma más eficaz. El rendimiento sumamente alto de las turbinas de vapor modernas es posible por las temperaturas de admisión superiores a 600 °C a una presión de 270 bares y temperaturas de descarga de aproximadamente 32 °C a una presión de aproximadamente 0,03 bares. Los valores bajos tienen el efecto de mejorar el rendimiento termodinámico, puesto que el condensador en la salida es un componente integrado de la turbina como un todo. Por ende, la presión negativa causada por la condensación mejora la diferencia de presión entre la admisión y la descarga de la turbina.

4.2 Turbinas a gas

Si se utiliza gas caliente de la combustión de una mezcla de gas y aire en vez de vapor de agua como el medio de trabajo para la turbina, se tiene una “turbina a gas”.

4.2.1 ¿Por qué turbinas a gas?

La principal ventaja en comparación con la turbina de vapor es la construcción más compacta y la posibilidad de aumentar y disminuir la potencia de salida rápidamente, puesto que no es necesario generar vapor primero. El vapor para las turbinas de vapor es generado, por ejemplo, mediante lignito, carbón o aceite viscoso, cuyo uso está acompañado por gases de escape que contienen contaminantes o, de lo contrario, implica una depuración de alto costo del gas de escape. Asimismo, en este aspecto las turbinas a gas accionadas con gas natural o gas de síntesis son considerablemente menos problemáticas. Originalmente el rendimiento y la potencia de salida de la turbina a gas fueron considerablemente menores que los de las turbinas de vapor. Sin embargo, actualmente las turbinas a gas logran potencias de salida de hasta 400 MW con un rendimiento que actualmente es del 40,1 %. En la práctica esto significa que actualmente se prefieren las turbinas a gas siempre que se utilizan centrales eléctricas o minicentrales modulares de potencia de salida mediana para cubrir las cargas máximas.

En centrales eléctricas modernas de gran escala se utilizan turbinas a gas y de vapor en combinación cada vez más. El calor residual de la turbina a gas se utiliza para generar vapor para una turbina de vapor, aumentando así el rendimiento total hasta un 61,5 %.

Nota: En los países con una elevada proporción de electricidad renovable (alrededor del 32 % en Alemania a finales de 2015), se utilizan cada vez menos las centrales eléctricas de turbinas a gas para cubrir las cargas máximas (generalmente a mediodía). La electricidad fotovoltaica no subvencionada cuesta ahora entre 7 y 9 céntimos de euro / kWh y la energía eólica alrededor de 4,5 céntimos / kWh, mientras que la electricidad de turbinas a gas cuesta hasta 10 céntimos / kWh.

4.2.2 ¿Cómo funcionan las turbinas a gas?

Aire a una temperatura aproximada de 15 °C y a presión normal es comprimido hasta 17 bares en un compresor, donde se lo calienta hasta una temperatura aproximada de 400 °C. Este aire comprimido es mezclado con gas natural en la cámara de combustión de la turbina, donde se quema a aproximadamente 1500 °C. Este gas caliente a alta presión ahora fluye a través de los álabes de la turbina y desprende tanta energía hacia los álabes que la presión del gas de salida vuelve a la presión normal y la temperatura a aproximadamente 600 °C. Con estos datos se puede calcular el rendimiento termodinámico de la turbina a gas. Para calcular el rendimiento total, también se ha de tomar en cuenta la energía consumida en el proceso de compresión.

Las leyes de la mecánica de fluidos se aplican al cálculo de la geometría de la turbina. En contraste con la turbina de vapor, en el caso de la turbina a gas se ha de tener en cuenta que la densidad del gas es comparativamente baja. Por lo tanto, los álabes sufren menor desviación por impacto (impulso). En cambio, es la alta velocidad de la corriente a gas que causa el efecto principal. El gas tiene velocidades diferentes al frente y al dorso de un álabe del rotor. Esto produce una diferencia de presión (véase la ecuación de Bernoulli) que causa el movimiento transversal del álabe con respecto a la dirección del flujo de la corriente a gas. La turbina comienza a rotar.

En este momento se podría hacer referencia a la importancia de las matemáticas en el cálculo del flujo en la turbina (ecuaciones diferenciales, método de los elementos finitos).

4.3 Turbinas hidráulicas

La turbina hidráulica convierte la **energía mecánica** del agua, es decir, la energía potencial de grandes cargas de agua o la energía cinética del agua en curso **en el movimiento rotativo** de una turbina. En centrales hidroeléctricas esto acciona un generador para producir energía eléctrica.

El agua fluye como una masa relativamente densa de líquido que, a diferencia del gas, no es posible comprimir. Por esta razón y debido a que la velocidad de la corriente de partículas es comparativamente baja (en comparación con la corriente a gas en las turbinas a gas) generalmente las turbinas hidráulicas están provistas de un solo rotor. El cálculo de la energía transferida del agua a la turbina es relativamente sencillo. Esta es la diferencia entre las sumas de la energía cinética y la potencial del agua antes y después de la turbina.

Sin embargo, el cálculo del diseño de la turbina según la mecánica de fluidos es sumamente complejo en lo relativo a transferir lo más cerca posible del 100 % de la energía del agua a la turbina. Según el volumen de agua y la altura de la caída de agua disponible, hay diferencias importantes en el diseño, forma y funcionamiento de las turbinas. A la fecha han prevalecido tres tipos principales de turbinas hidráulicas.

4.3.1 Turbina de Pelton

La turbina de Pelton se utiliza con volúmenes de agua relativamente pequeños (masa m) y desniveles de caída muy altos (hasta 1.800 m). Esta tiene un rotor con álabes en forma de cubetas, sin estator (véase la turbina de Francis). Mediante boquillas se concentra el agua directamente hacia las cubetas.

Se podría calcular la transmisión de energía directamente como la transmisión de impulso ($\Delta p = m \cdot \Delta v$, v : velocidad)

del volumen de agua incidente. La turbina de Pelton es una turbina de impulso con presión hidrostática igual en la admisión y en la descarga. El rendimiento de las turbinas de Pelton bajo uso óptimo oscila entre 85 % y 93 %.

4.3.2 Turbina de Kaplan

La turbina de Kaplan se utiliza con cargas de agua relativamente bajas (menos de 10 m), por ejemplo, centrales eléctricas de agua fluyente y volúmenes de agua de medianos a elevados. El agua fluye paralelamente al eje de la turbina hacia un rotor con forma de hélice. El estator fijo montado axialmente alrededor del eje, frente al rotor, tiene forma laminar. Las láminas se ajustan de modo que el flujo del agua incida sobre la hélice paralelamente al eje. La turbina de Kaplan es una turbina de reacción; es accionada principalmente por la presión del agua, la cual es menor en la descarga de la turbina. El rendimiento de las turbinas de Kaplan bajo uso óptimo oscila entre 85 % y 95 %.

4.3.3 Turbina de Francis

La turbina de Francis se utiliza con una carga de agua a un desnivel relativamente alto (por lo general alrededor de 100 m) y volúmenes de agua desde grandes hasta extremadamente grandes, por ejemplo embalses con presas altas. El rotor tiene la forma de álabes curvos. El flujo de agua entra verticalmente en la dirección del eje y el estator fijo montado alrededor del rotor desvía el agua exactamente en la dirección de los álabes del rotor. Se pueden ajustar los álabes del estator para poder lograr siempre el rendimiento óptimo según el volumen y la velocidad del agua. La turbina de Francis es una turbina de reacción; es accionada principalmente por la presión del agua, la cual es menor en la descarga de la turbina. El rendimiento de las turbinas de Kaplan bajo uso óptimo oscila entre 90 % y 95 %.

4.3.4 Propiedades físicas de las turbinas de Kaplan y de Francis

La **ecuación de continuidad** es pertinente a flujo estacionario (es decir, constante con el tiempo) de un fluido no compresible (densidad constante) y no viscoso (sin fricción interna). Esta estipula que el flujo volumétrico a través del área de la sección transversal del fluido es constante. Esto significa que la misma cantidad de agua fluye con mayor velocidad a través de tubos más estrechos que a través de tubos más amplios. La **ecuación de Bernoulli** derivada estipula que la suma de la presión hidrostática e hidrodinámica en un líquido en movimiento es constante. Se puede deducir de esto que la presión hidrostática se reduce cuando la velocidad del flujo de un fluido aumenta. En lo que respecta a turbinas hidráulicas, esto significa que para las turbinas de reacción (Francis, Kaplan) la presión hidrostática en la admisión del rotor es mayor que en la descarga (“turbina de reacción”).

Cabe mencionar que a la descarga de la turbina de Kaplan o a la de Francis se les conoce técnicamente como “tubo de aspiración”. Eso significa que la energía cinética residual del agua causa

un efecto de aspiración similar al de un hidroeyector que se agrega a la presión antes de la turbina.

Nota: en el portal de medios didácticos están disponibles varios archivos de medios sobre turbinas hidráulicas y centrales hidroeléctricas.

5 Motores

Motor es el término general utilizado para una máquina que realiza trabajo mecánico mediante la conversión de otra forma de energía (por ejemplo, energía mecánica, química, eléctrica o térmica). Según esta definición, todos los **motores térmicos**, incluidas las máquinas de vapor de pistón, las turbinas a gas y de vapor, serían motores. Tradicionalmente, no obstante, se ha establecido la convención de que solo los **motores de combustión** (por ejemplo: motor de Otto, motor diésel), el **motor de aire caliente** (motor Stirling, véase arriba) y los **motores eléctricos** se conocen por el término “motor”.

A continuación se trata brevemente el tema de los motores eléctricos. En el portal de medios didácticos está disponible una hoja informativa sobre el tema “Motores y motores térmicos” en particular.

El **motor eléctrico** convierte energía eléctrica en la energía mecánica de un eje. El trabajo mecánico es producto de la fuerza de Lorentz que actúa sobre las cargas en movimiento en un campo magnético. Según el diseño, el motor eléctrico puede funcionar también como generador. Por esta razón, en los vehículos actuales denominados híbridos se utiliza cada vez más la combinación de motor de combustión y motor eléctrico. La energía del frenado —y posiblemente también la energía de la marcha en vacío— se convierte en energía eléctrica, la cual se almacena en batería, las cuales, a su vez, impulsan el motor eléctrico (especialmente al arrancar y acelerar). Otros medios didácticos sobre este tema están disponibles en el portal de medios didácticos; por ejemplo, las instrucciones sobre experimentación “El motor eléctrico y el generador de energía eléctrica” y el módulo informativo parcialmente animado “El motor eléctrico y la fuerza de Lorentz” y “Sistemas híbridos para conversión de energía”.

6 Generadores de energía eléctrica

El generador convierte energía mecánica en energía eléctrica.

El generador es, por tanto, un motor eléctrico invertido. Si se rota una bobina en un campo magnético se induce un voltaje en este, el cual mueve las cargas en el alambre de la bobina. La dirección de esta corriente inducida es siempre tal que su campo magnético se opone a la causa de la inducción (es decir, el movimiento) (ley de Lenz). Así, la dirección de la corriente cambia periódicamente con el campo magnético y se produce una corriente alterna. Si se hace una conexión intermedia mediante un conmutador (inversor de polos) se obtiene una corriente continua pulsante. La ley de la inducción que actúa en el caso del generador es una de las tres bases físicas para máquinas eléctricas. Los otros dos son la fuerza de Lorentz (p. ej., motor eléctrico) y la ley de Ampere (p. ej., el electroimán).

Históricamente, la construcción de generadores de alta potencia representó un problema técnico, puesto que en la etapa temprana de la electrificación esto no era posible con rotores de imán permanente. No fue sino hasta el descubrimiento del principio dinamoeléctrico (por Werner von Siemens en 1866) que se pudo construir generadores con electroimanes. Aun hoy día en que la construcción de generadores con imán permanente de hasta 8 MW es posible, este principio es aún indispensable en centrales eléctricas de gran escala para generadores con potencias nominales de varios cientos de MW hasta más de 1600 MW.

7 Reactores nucleares

En un reactor nuclear se convierte en energía térmica la energía de enlace entre las partículas del núcleo atómico.

Esta energía se libera en el reactor nuclear por fisión nuclear. Otto Hahn y Fritz Strassmann descubrieron experimentalmente en 1938 el principio de la fisión nuclear por bombardeo de uranio (U) con neutrones. Lise Meitner, ex asistente de Albert Einstein, fue capaz de explicar el efecto teóricamente y demostrar que se puede calcular la energía liberada como el defecto de masa según la fórmula de Einstein ($E = m \cdot c^2$), puesto que la suma de las masas en el núcleo (neutrones y protones) antes de la fisión es un poco mayor que la suma de las masas de los productos desintegrados.

Nota: en esta guía no se hace referencia a la fusión nuclear porque solo aborda métodos de conversión de energía técnicamente establecidos. Sin embargo, el portal de medios didácticos también contiene una serie de medios sobre la fusión nuclear.

7.1 Principio básico de la fisión nuclear en un reactor

Aunque hay una variedad de diseños técnicos de reactores nucleares, el principio fundamental es siempre el mismo.

Inicio del proceso de desintegración por bombardeo del combustible con neutrones: el bombardeo con neutrones desencadena la fisión nuclear en un combustible (barras de combustible, por ejemplo con ^{235}U). Los neutrones iniciales se originan, por ejemplo, de una fuente de berilio que desprende neutrones por la desintegración natural al ser bombardeada con partículas alfa (núcleos de $^4\text{He}^{2+}$). Los núcleos atómicos del combustible son divididos por el bombardeo de neutrones y desprenden neutrones ellos mismos. Por cada neutrón de bombardeo que causa la fisión de un núcleo, se liberan varios neutrones, de modo que el proceso continúa como una reacción en cadena. En la bomba atómica, esta reacción en cadena queda fuera de control con un efecto de avalancha que causa una explosión, mientras que en un reactor se ejecuta como una reacción en cadena controlada para producir calor.

Moderación, es decir, reducción de la velocidad de los electrones: la mayoría de neutrones que ocurren durante la fisión nuclear son tan rápidos que “no tienen tiempo” para interactuar cuando chocan con otros núcleos atómicos. Por lo tanto, la reacción en cadena se detendría. A fin de reducir la velocidad de los neutrones a una velocidad adecuada (aproximadamente 2.000 m / s), es necesario usar moderadores como agua (H_2O), agua pesada (D_2O , en la cual el hidrógeno pesado normal es reemplazado por deuterio) o grafito.

Control de la desintegración: se puede regular el número de neutrones, y, por ende, el régimen de fisión nuclear, con sustancias de control que absorben neutrones, como cadmio (Cd), plata (Ag), boro (B) o indio (In). Esto se realiza mediante barras de control que se pueden insertar entre las barras de combustible. Para este propósito también se agrega al agua en el circuito de enfriamiento primario boro en la forma de ácido bórico. En total, se selecciona la interacción entre la moderación y el control para que el equilibrio de neutrones («criticidad») es mínimamente mayor que 1. Eso significa que en promedio, con cada fisión se crea levemente más de 1 neutrón de velocidad adecuada, el cual apenas mantiene la reacción en cadena en el reactor.

Extracción de calor útil: en la fisión nuclear, un 86 % de la energía se libera como la energía cinética de los neutrones y los productos de la fisión. Se transfiere esta energía a las barras de combustible mismas, a los moderadores y reguladores, y en última instancia, al agua de enfriamiento en forma de energía térmica. Esto se utiliza para generar vapor y accionar una turbina.

Enfriamiento del proceso de la turbina de vapor: Al igual que con cualquier motor térmico, parte del calor suministrado a la turbina de vapor también debe disiparse sin utilizar a través de un sistema de refrigeración (torres de enfriamiento). De lo contrario, el punto de baja temperatura aumentaría demasiado y el rendimiento disminuiría. Para este circuito de enfriamiento “externo”, por ejemplo, la circuito de enfriamiento Isar 2 requiere 42.000 l / s de agua de enfriamiento del Isar; la central nuclear de Biblis B, que desde entonces ha sido cerrada, tomaba 210.000 m³/h del Meno.

7.2 Diferentes diseños técnicos de reactores nucleares

Todos los tipos de reactor utilizados comercialmente a nivel mundial en la generación de energía eléctrica funcionan con neutrones retardados («térmicos»). Los tipos más comúnmente usados son los reactores enfriados por agua en los cuales el enfriador también actúa como “moderador”, con el cual se reduce la velocidad de los neutrones. Se hace una distinción entre:

- reactores de agua liviana (reactores con agua presurizada y en ebullición) los cuales necesitan uranio enriquecido como combustible, y
- los reactores con agua pesada, los cuales se puede operar con uranio natural no enriquecido.

También hay reactores enfriados por gas (CO₂ o helio) en los cuales se usa grafito como el moderador. En el RU “Magnox” y “AGR” están en servicio comercial, mientras que se han construido reactores de alta temperatura únicamente como reactores de prueba y prototipo. Los reactores que funcionan con neutrones rápidos, no retardados, denominados reactores reproductores rápidos, están en desarrollo.

Además de los tipos principales mencionados hay también otros tipos que no tienen mucha importancia en la actualidad.

El reactor de agua presurizada es un reactor de agua liviana, puesto que funciona con agua normal («liviana») (H₂O, es decir, sin deuterio). Su característica especial es la presión muy alta de hasta 160 bares en el circuito primario en el núcleo del reactor de modo que el agua se caliente hasta 325 °C sin vaporizarse. El vapor real a 280 °C y aproximadamente 65 bares usado para accionar la turbina es generado en el circuito secundario mediante generadores de vapor por intercambio de calor. El vapor gastado se condensa a través del circuito externo de agua de enfriamiento que luego se suministra nuevamente al generador de vapor. El rendimiento total a que se hace referencia en la generación de energía eléctrica es aproximadamente del 35 %. Los reactores de agua presurizada constituyen aproximadamente el 50 % de todos los reactores nucleares a nivel mundial. Hay ahora una nueva generación de reactores de agua presurizada, desarrollados por Areva como el reactor europeo de agua presurizada (EPR, por sus siglas en inglés), diseñado para satisfacer normas de seguridad aún más altas. La seguridad ha seguido en aumento. Con circuito de enfriamiento cuádruple, redundancia cuádruple y separación física de todos los circuitos de control de seguridad, una cimentación protegida contra fusión del núcleo y un confinamiento hecho de hormigón armado de 2,6 m de espesor como protección contra ataques y accidentes de aviones, está clasificado como uno de los reactores más seguros del mundo. Sin embargo, todavía no hay ningún EPR en funcionamiento. Desde 2005 y 2007, respectivamente, se están

construyendo una planta en Francia (Flamanville) y otra en Finlandia (Olkiluoto). Los costos en Finlandia han aumentado de 3.000 a 9.000 millones de euros. Hoy en día, se calcula que la construcción de un nuevo EPR de 1 GW cuesta unos 12.000 millones de euros.

El **reactor de agua en ebullición** es también un reactor de agua liviana (H_2O). Su característica especial es que el recipiente de presión en el reactor únicamente está lleno de agua hasta aproximadamente dos tercios de su capacidad. Como consecuencia del calor resultante de la fisión nuclear, parte del agua se vaporiza ahí a 286 °C y 71 bares. La turbina es accionada directamente con este vapor (esta es una de las desventajas de este tipo de reactor: el vapor radioactivo contamina la turbina y en caso de una falla en el funcionamiento se escaparía al recinto de la turbina). El vapor de agua gastado se condensa a través del circuito externo de agua de enfriamiento que luego se suministra de nuevo y directamente al recipiente de presión del reactor. Por lo tanto, el reactor de agua en ebullición no tiene un circuito de enfriamiento secundario. El rendimiento total a que se hace referencia en la generación de energía eléctrica es aproximadamente del 35 %. Los reactores de agua en ebullición constituyen aproximadamente un 30 % de todos los reactores nucleares a nivel mundial.

El **reactor de agua pesada** (HWR, por sus siglas en inglés) utiliza agua pesada (D_2O) como enfriador y moderador en el circuito primario. La ventaja de este tipo de reactor es que se puede usar como combustible uranio natural no enriquecido. Esto significa que la producción de los elementos de combustible es más económica. Puesto que los neutrones son absorbidos con menos intensidad en agua pesada, el D_2O como moderador crea más neutrones de velocidad adecuada que el H_2O . La desventaja es que el agua pesada es muy cara, y asimismo, la construcción de reactores con agua pesada es más complicada. Por esta razón este tipo de reactor únicamente constituye aproximadamente un 9 % de todos los reactores nucleares a nivel mundial.

Los reactores de alta temperatura (HTR, por sus siglas en inglés) se construyen con varios diseños. En el **reactor con lecho granular** que se desarrolló en Alemania se puede lograr una temperatura en servicio extremadamente alta de hasta 950 °C en el circuito primario. Esto es posible mediante el uso de helio como enfriador y grafito resistente al calor como moderador y como el material de base para los elementos de combustible esféricos (bolas). En vez de barras se utilizan bolas de grafito del tamaño de pelotas de tenis, con nódulos de combustible de uranio o de uranio/torio embutidos. La ventaja estriba en que si el sistema de enfriamiento falla, la potencia de salida se reduce automáticamente a casi cero como resultado de la elevación de temperatura del combustible, lo cual hace imposible la fusión del núcleo. Como resultado, el reactor con lecho granular ofrece un alto nivel de seguridad inherente. Sin embargo, debido a sus costos comparativamente altos, este prototipo nunca pasó de la construcción de unos cuantos prototipos (en Alemania y en otros países).

El **reactor reproductor** no solo está previsto para “generar” energía, sino que su propósito principal es crear material fisible adicional. Los materiales no fisibles se convierten en materiales fisibles por bombardeo con neutrones y se pueden utilizar como combustible nuclear. Esto es posible para ^{238}U no fisible, a partir del cual se produce o “reproduce” plutonio (^{239}Pu) fisible. También se puede reproducir ^{233}U de ^{232}Th . También se pueden lograr estos procesos en reactores térmicos con rendimiento limitado. El sello distintivo del reactor reproductor, entonces, es que debido al hecho de que funciona con neutrones rápidos puede producir más material fisible que el que usa. Sin embargo, los reactores reproductores son sumamente complejos técnicamente, en parte porque se los enfría con sodio (Na). El rendimiento de un escaso porcentaje de ^{239}Pu por proceso de

reproducción es también relativamente bajo y el procesamiento del material producido es sumamente elaborado. Puesto que el temor de escasez de uranio, el cual proveyó el ímpetu para el desarrollo de reactores reproductores en la década de 1960, careció de fundamento y tampoco se prevé escasez alguna en el futuro cercano, no hay interés comercial en reactores reproductores con la tecnología actual. Por lo tanto, los pocos reactores reproductores a nivel mundial son operados para propósitos de investigación.

El reactor de transmutación: En los últimos años, se ha despertado el interés en otra aplicación del reactor reproductor: La transformación (“transmutación”) de productos de fisión de larga duración y elementos transuránicos en radioisótopos de corta duración. La energía que se libera durante la transmutación podría ser aprovechada para la generación de energía eléctrica. La transmutación “acortaría” además el tiempo de almacenamiento final de residuos radioactivos procedentes de centrales eléctricas nucleares (unos pocos cientos de años en lugar de muchos miles de años). No obstante, la investigación todavía tendrá que revelar hasta qué punto puede resolver realmente esta tecnología el problema del almacenamiento final de los residuos radioactivos. Sin embargo, los costos son tan altos que la realización de un reactor de transmutación no está progresando. El proyecto MYRRHA (Multi-purpose Hybrid Research Reactor for High-Tech Applications) en Bélgica, previsto para 2014, no se pondrá en marcha hasta 2023.

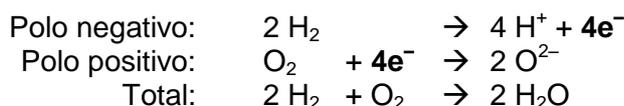
8 Pilas de combustible

8.1 Energía eléctrica en vez de calor

La combustión de hidrógeno y oxígeno a temperatura ambiente desprende calor y emite prácticamente 100 % de agua. Esta agua se puede descomponer nuevamente en hidrógeno y oxígeno mediante la aplicación de calor a temperaturas superiores a 3.000 °C. En términos de energía, lo que sucede aquí es que se convierte energía química en energía térmica, e inversamente, energía térmica en energía química. Sin embargo, en última instancia, todas las reacciones químicas están basadas en la interacción o intercambio de electrones de los átomos participantes. De ahí surgió la idea de suprimir el flujo directo de electrones en reacciones químicas entre los átomos de hidrógeno y oxígeno y redirigir el flujo de electrones a través de un circuito de operación externa. Este flujo de electricidad, en otras palabras, energía eléctrica, estaría entonces disponible en vez de calor.

8.2 El principio de funcionamiento de la pila de combustible

Para la combustión en frío de hidrógeno se construye un elemento primario (célula electroquímica) en la cual un electrodo consiste de hidrógeno (H) y el otro de oxígeno (O). Puesto que los gases son aislantes, se utiliza un truco técnico: electrodos de platino con hidrógeno u oxígeno circulando a su alrededor. El platino (Pt) mismo no reacciona pero tiene la propiedad de dividir moléculas de H₂ catalíticamente en átomos y acto seguido, liberarlas. También los átomos de O son divididos catalíticamente por el Pt en átomos y los adsorbe en su superficie.



En el polo negativo los átomos de H liberados emergen de la superficie de Pt como iones H⁺ (protones) y pasan a través de un electrolito o de una membrana permeable a protones hacia el

polo positivo. Un electrón permanece en el electrodo por átomo de H y estos electrones fluyen a través del circuito externo hacia el polo positivo.

En el polo positivo los átomos de O absorben cada uno dos electrones en la superficie del Pt y se convierten en iones O^{2-} , y en este proceso se crean dos cargas positivas en el electrodo. Dos de los iones H^+ que han pasado a través del electrolito o membrana hacia el polo positivo encuentran un ion O^{2-} y reaccionan entre sí para formar H_2O . Después de fluir a través del circuito externo hacia el polo positivo, los electrones se recombinan ahí con las cargas positivas. En total, la misma reacción ocurre en el caso de la combustión, tan solo que los electrones en la pila de combustible fluyeron a través del circuito externo.

Nota: en el portal de medios didácticos existen varios medios sobre el tema Pila de combustible y Tecnología del hidrógeno.

8.3 Problemas técnicos con células de corriente de alta potencia

Si hay disponibles gas de hidrógeno, electrodos de Pt y una membrana electrolítica de polímero, se puede construir una pila de combustible de este tipo en cuestión de minutos en cualquier laboratorio escolar (véase la sugerencia para el experimento en el portal de medios didácticos). Sin embargo, estas pilas de combustible de membrana electrolítica de polímero que funcionan a temperatura ambiente son comparativamente caras y únicamente tienen potencias de salida relativamente bajas de hasta 500 kW. Para potencias mayores, se necesitarían áreas de electrodos de Pt y membranas tan grandes que estas pilas no serían económicamente factibles.

En la actualidad, se presenta una investigación febril para reemplazar el costoso platino con otros materiales catalizadores más baratos. Por ejemplo, se prueban compuestos organometálicos. Si esto tiene éxito, el hidrógeno en combinación con la pila de combustible podría convertirse en una alternativa a los automóviles eléctricos accionados por batería.

Por ello, las pilas de combustible de hasta 100 MW se construyen usualmente de pilas de combustible de electrolitos sólidos de alta temperatura (también conocidas técnicamente como pilas de combustible de óxidos sólidos (PCOS) o pilas de combustible de cerámica sólida). En las PCOS, ambos electrodos consisten de un óxido conductor de iones y electrones a altas temperaturas. La membrana electrolítica consiste de un óxido que es selectivamente permeable para iones de oxígeno. Ello permite una construcción robusta y relativamente económica. Una desventaja es la alta temperatura de operación de más de 800 °C, puesto que los materiales de óxido no exhiben las propiedades necesarias sino hasta haberse alcanzado esta temperatura. También hay otras tecnologías en la etapa embrionaria por lo cual no está claro aún cuál se convertirá en la tecnología establecida a largo plazo.

Entretanto, en la tecnología de pilas de combustible PCOS existen minicentrales modulares para calefacción (BHKW) más pequeñas, con una potencia calorífica de hasta 20 kW como sistemas de calefacción para viviendas unifamiliares o edificios de apartamentos más pequeños.

9 Generador de gas de síntesis

Los combustibles sólidos como el carbón, lignito, bitumen, aceite denso para calefacción, residuos de refinería o madera o combustibles con sólidos agregados no son muy adecuados o son completamente inadecuados para turbinas a gas. Para ser compatibles para este uso se los convierte en “gas de síntesis” (“gasificado”). Este gas de síntesis, una mezcla consistente principalmente de monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H_2) adquirió ese nombre porque históricamente en la Segunda Guerra Mundial se lo utilizó como el material inicial para la síntesis de otros compuestos químicos, por ejemplo, metanol y gasolina. La “gasificación” en el proceso del gas de síntesis, a

diferencia del carburador en el motor de Otto, no es un cambio de fase sino una reacción química. Tampoco se convierte una forma de energía en otra en el proceso de producción de gas de síntesis. Se almacena energía química tanto en el combustible sólido así como en el gasificado, aunque como compuestos diferentes. Se crean compuestos gaseosos a partir de carbono sólido o de compuestos de carbono sólido o líquido a través de la reacción con una pequeña cantidad de oxígeno y agua (el proceso químico implica la oxidación parcial del carbón y la reducción del agua). En un proceso típico de este tipo, aproximadamente, se obtiene lo siguiente del carbón mineral: 31 % de hidrógeno (H_2), 56 % de monóxido de carbono (CO), 5 % de nitrógeno (N_2), 4 % de dióxido de carbono (CO_2) y 4 % de agua (H_2O). Esta mezcla de gas tiene un valor calorífico considerablemente menor que el gas natural. Las impurezas gaseosas restantes como los compuestos de azufre y halógeno así como también todos los compuestos minerales sólidos se pueden retirar del gas de síntesis casi en un 100 % durante la producción con relativamente poco esfuerzo. Actualmente, se utiliza gas de síntesis para operar centrales eléctricas de ciclo combinado. En este caso se habla de una central eléctrica de CCGI (ciclo combinado con gasificación integrada). Aunque el gas de síntesis producido estaría también disponible para generar vapor en una central eléctrica de vapor, el rendimiento sería menor que con la central eléctrica de ciclo combinado. Por otro lado, el gas de síntesis de alta pureza es excepcionalmente adecuado para la operación de la etapa de turbinas a gas de la central de ciclo combinado y posee valores de gas de escape similarmente buenos como gas natural puro, sin azufre. En la actualidad, en el campo de las energías renovables se utiliza gas de síntesis procedente de la gasificación de biomasa (paja, madera, lodos de aguas residuales). Los modernos sistemas de calefacción de madera para viviendas unifamiliares también funcionan con gasificación de madera, ya que el gas de escape está prácticamente libre de polvo, hollín y olores.

10 Turbinas eólicas

Una turbina eólica convierte la **energía cinética mecánica del aire en la energía rotativa mecánica** de un rotor que la convierte en energía eléctrica mediante un generador.

10.1 Propiedades físicas de la turbina eólica

Las partículas de aire fluyen a través de un área circular (perpendicular a la dirección del viento) con un radio r , a una velocidad v , en un tiempo t .

La masa de aire (m) que fluye a través de dicha área es:

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot A \cdot v \cdot t = \rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot v \cdot t$$

ρ : densidad del aire, V : volumen de aire,

A : área de barrido del rotor ($\pi \cdot r^2$),
 v : velocidad del viento de cara de la turbina eólica
 w : velocidad del viento de cola de la turbina eólica
 c_p : Rendimiento, t : tiempo

La energía cinética (E_{cin}) del viento es:

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{\pi}{2} \cdot \rho \cdot r^2 \cdot t \cdot v^3$$

La potencia del viento (P_{Viento}) es:

$$P_{\text{Wind}} = \frac{E_{\text{kin}}}{t} = \frac{\pi}{2} \cdot \rho \cdot r^2 \cdot v^3$$

Potencia útil P de la turbina eólica:

$$P = c_p \cdot P_{\text{Wind}} = c_p \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \rho \cdot r^2 \cdot v^3$$

Por lo tanto, la potencia aumenta como el cubo de la velocidad del viento.

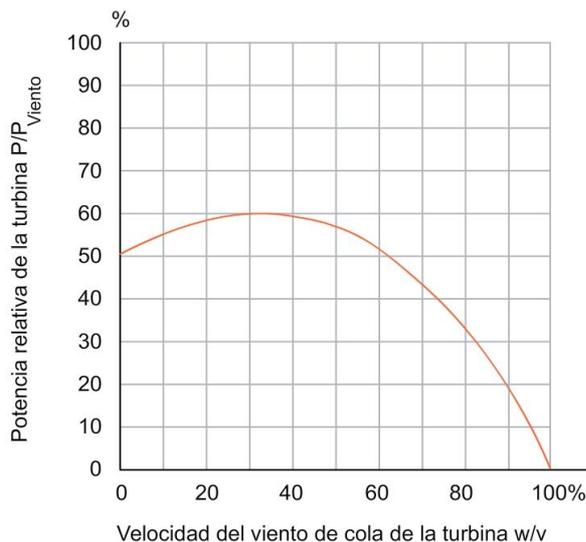
En este aspecto, el cálculo del equilibrio de energía no es un problema. Pero la pregunta es cómo transferir la energía del viento a la turbina eólica de la manera más eficaz. Hay dos tipos de turbina: el tipo de fuerza de resistencia y el tipo de sustentación.

En el "tipo de fuerza de resistencia" el aire empuja el aspa del rotor de la turbina eólica fuera de su trayectoria, similar a la manera en que el agua actúa sobre la cubeta en la turbina de Pelton. Sin embargo, la mayoría de turbinas eólicas funcionan como turbinas de "fuerza de sustentación" porque son más eficientes. El principio detrás del tipo de fuerza de sustentación es el mismo principio que causa el movimiento de los álabes en la turbina a gas (véase atrás). Para calcular la hélice de una turbina eólica óptimamente, se han de aplicar las leyes de la mecánica de fluidos (véase la sección sobre "Turbinas"). Un enfoque didáctico interesante es considerar el problema con base en la secuencia de ideas siguientes: sustentación en el ala de un planeador; sustentación en el ala de una aeronave propulsada; propulsión en la hélice de una aeronave propulsada; rotación de la hélice de una turbina eólica en la corriente de aire.

Es una pregunta interesante si es posible en lo absoluto transferir el 100 % de la energía de la corriente de viento a la turbina eólica. La ley de Betz (Albert Betz, 1926) estipula que, teóricamente, se puede captar un máximo del 59,3 % de la energía cinética del viento. Esto queda claro si se considera lo siguiente:

La potencia nominal de una turbina eólica depende de la medida en que la energía cinética del viento ($E_{cin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$) sea transferida a la hélice; en otras palabras, qué efecto de oposición tiene sobre el aire. Si tiene un efecto de oposición fuerte, la velocidad del viento a sotavento de la turbina eólica es baja. La fuerza aplicada a la turbina fue grande pero el flujo de la masa fue bajo. Si la velocidad del viento a sotavento de la turbina es alta, la fuerza fue baja pero el flujo de la masa fue alto. Se ha de encontrar un valor óptimo teniéndose en cuenta la conservación de la energía y la masa.

Si la turbina extrae potencia del viento, se reduce la velocidad del mismo. Independientemente de la velocidad más baja del viento de cola de la turbina, se ha de transportar a través de la turbina la misma cantidad de aire que incidió en esta. Sin embargo, conforme a la ley de conservación de la masa, el flujo de la masa ha de permanecer constante. Por lo tanto, en el caso de una turbina eólica de corriente libre el viento se esparce nuevamente en el viento de cola de la turbina. La misma masa puede, por ende, pasar a velocidad reducida. Si la velocidad de la masa de aire permanece baja, con la misma sección transversal, la velocidad del flujo de estela se vería reducido adicionalmente por la turbina eólica. El punto óptimo se puede encontrar mediante derivación de las funciones correspondientes. El resultado de la maximización se muestra en forma gráfica.



Como el gráfico muestra, el rendimiento máximo de una turbina eólica es 59,3 %, el cual se obtiene cuando la velocidad del viento de cola de la turbina es exactamente $\frac{1}{3}$ de la velocidad del viento de cara de la turbina. Por lo tanto, las turbinas eólicas modernas están diseñadas para lograr este “frenado” de la velocidad del viento en la medida de lo posible. Su rendimiento es de alrededor del 50 %.

10.2 Diseños de turbinas eólicas

Se puede clasificar las turbinas eólicas según la posición del eje del rotor con relación a la corriente de aire. Las turbinas eólicas con eje de rotación vertical, denominadas rotores de Darrius o rotores de Savonius, han demostrado ser adecuadas en casos individuales pero no han sido adoptadas como una solución generalizada. En la actualidad el tipo más frecuente son las turbinas eólicas con eje de rotación horizontal. En cuanto al número de aspas de rotor, son perfectamente posibles rotores con una, dos, tres, cuatro o incluso cinco aspas. Las turbinas (rotores) con tres aspas son las más comúnmente usadas. Debido a su simetría se las puede diseñar con oscilación sumamente baja. Los rotores de cuatro o cinco aspas podrían lograr una mayor capacidad y un mejor rendimiento, pero este aumento sería desproporcionado con respecto al costo de las aspas adicionales del rotor. Las aspas del rotor están hechas de materiales compuestos, livianos, de alta resistencia como los usados en la construcción de aeronaves. Los esfuerzos a que están sujetas son enormes. ¡La velocidad rotacional en la punta del aspa del rotor es aproximadamente siete veces la velocidad del viento!

10.3 Problemas de generación de energía eléctrica con turbinas eólicas

El generador de energía eléctrica está ubicado en el eje del rotor o conectado mediante una caja de engranajes. Para generar electricidad con una frecuencia constante, se ha de operar el generador a una velocidad rotacional constante muy específica. Para una frecuencia de línea de 50 a 60 Hz, por ejemplo, esto significa 1.500 rpm con un generador bipolar. Sin embargo, mantener esta velocidad constante parecería casi imposible dado que el viento no sopla constantemente. Estas variaciones en la velocidad del viento se pueden compensar en cierta medida mediante sistemas de control para ajustar el paso de las aspas del rotor y el tren de engranajes. Las turbinas eólicas que incorporan los desarrollos más recientes también funcionan con generadores de hasta 36 polos. Según la fuerza del viento, se activan o desactivan polos de modo que se pueda utilizar el rango completo del viento sin mayor dificultad. En forma alternativa, sin embargo, han estado disponibles generadores magnéticos permanentes sin engranajes en combinación con unidades de alimentación que utilizan electrónica de potencia. Puesto que estos generadores convierten la corriente alterna generada con convertidores de potencia, primero en corriente continua y luego nuevamente a corriente alterna a una frecuencia y voltaje constantes, la generación de potencia eléctrica no depende de la velocidad del viento ni de la velocidad del generador. La omisión del tren de engranajes elimina la necesidad de una pieza de desgaste, haciendo que las góndolas de las turbinas eólicas sean más pequeñas y ligeras.

11 Células solares

Una célula solar convierte la **energía de radiación del Sol** (energía de las ondas electromagnéticas) en **energía eléctrica**. Este proceso también se conoce como tecnología fotovoltaica. (Proponemos utilizar **fotovoltaica**, que también está permitida según el Duden, en lugar de **photovoltaica**. Esto no sólo es común internacionalmente, sino que también es compatible con las abreviaturas de uso común en el alemán para la electricidad fotovoltaica o sistema fotovoltaico).

Las células solares se utilizaron por primera vez para generar energía eléctrica para satélites. Las primeras centrales eléctricas fotovoltaicas terrestres no se construyeron sino hasta en la década de 1970. Actualmente la tecnología fotovoltaica se considera entre todas una de las tecnologías de “generación” de energía más prometedoras en el futuro. A diferencia de la energía eólica o la energía hidráulica, es más flexible en cuanto a la ubicación y se podría utilizar potencialmente en casi cualquier región del mundo.

Entretanto, la energía fotovoltaica también se ha vuelto muy barata. En 2005, un módulo solar de 1 W todavía costaba aprox. 4 Euro, en 2016 para un 1 W desde aprox. 0,40 Euro. En 2016, por ejemplo, con una central eléctrica de tejado de 5 kWp se pudo generar electricidad no subvencionada por unos 10 céntimos / kWh. En 2016, los parques solares recién construidos en Alemania alcanzaron incluso los 7 céntimos / kWh.

11.1 Las propiedades físicas de la célula solar

En principio, la tecnología fotovoltaica se puede describir a grandes rasgos como un proceso de dos electrodos: Para la célula de silicio esto tiene lugar esquemáticamente como sigue:

En el electrodo positivo (semiconductor impurificado), la luz libera electrones de la banda de valencia mediante excitación, dejando tras sí agujeros (cargas) positivos. Estos electrones pasan a través de una película separadora no conductora hacia la banda de conducción del electrodo negativo (semiconductor impurificado) y la cargan negativamente. Los electrones pueden entonces fluir de regreso desde el electrodo negativo al electrodo positivo a través del circuito de operación externa.

Nota: en el portal de medios didácticos están disponibles varios archivos de medios relativos a células solares y tecnología fotovoltaica.

11.2 ¿Por qué es el rendimiento de las células solares tan bajo?

Debido a la cuantización de la energía, la célula solar no puede absorber energía en todas las frecuencias contenidas en el espectro de la luz. En cambio, la absorción ocurre en bandas de energía relativamente estrechas que solo corresponden a unas cuantas longitudes de onda del espectro de la luz. Los tipos de células solares que figuran a continuación sufren esta desventaja. Actualmente se están realizando esfuerzos para aumentar la anchura de banda de la absorción y, por lo tanto, el rendimiento mediante la combinación de capas de células solares de varios materiales o de semiconductores con adulteraciones diferentes o mediante capas adicionales de colorantes fluorescentes.

11.3 Tipos de células solares

Según el material, estado de cristalización y espesor de capa, hay una variedad de tipos distintos de los cuales los siguientes son los más importantes.

Células de silicio de película gruesa, monocristalino

Rendimiento en la producción en serie hasta un 26 %, en el laboratorio hasta un 40 %, vida útil muy extensa (30 años y más), más caras que las células de silicio policristalino o amorfo.

Células de silicio policristalino

Rendimiento en la producción en serie hasta un 19 %, vida útil muy extensa, fabricación más económica que para las células monocristalinas.

Células de silicio de película delgada, amorfas

Rendimiento en la producción en serie hasta un 10 %, vida útil muy extensa, fabricación más económica que para las células monocristalinas y policristalinas.

Células de telurio de cadmio (CdTe)

Rendimiento hasta el 14 % en producción en serie, más del 20 % en el laboratorio, larga vida útil, producción más barata que las células de Si, debido al contenido de cadmio y telurio, la eliminación y el reciclado son más problemáticos que con las células de silicio.

Cobre indio selenio (CIS, CIGS)

Rendimiento hasta el 14 % en producción en serie, más del 20 % en el laboratorio, Muy delgada, semitransparente, apta para fachadas de vidrio, buena producción incluso en condiciones de luz difusa, larga vida útil, producción 50 % más barata que las células de Si monocristalinas y policristalinas, la eliminación puede ser problemática debido al contenido de selenio.

Células de arseniuro de galio (GaAs)

Rendimiento hasta el 40 % (actualmente no se producen en serie), larga vida útil, producción más cara que las células de Si.

Células solares orgánicas (de plástico semiconductor)

Rendimiento hasta el 7 % en producción en serie, más del 14 % en el laboratorio, muy delgada y flexible, hasta un 40 % de transparencia, apta para fachadas acristaladas, pero no lo suficientemente duradera, duración de 5 a 10 años, producción más barata que todas las células inorgánicas.

Células solares sensibilizadas por colorante

Rendimiento hasta un 15 % en el laboratorio, buena transparencia, aptas para fachadas acristaladas, pero con muy poca durabilidad, por lo que todavía no están disponibles en el mercado, la producción sería más barata que cualquier otra célula. Éstas se conocen como “células de Graetzel” en honor a su inventor. Las células sensibilizadas por colorante utilizan pigmentos orgánicos como su electrodo positivo desde el cual los electrones —excitados por la luz— fluyen sobre un electrodo semiconductor de óxido de titanio (contraelectrodos negativos).

11.4 Equilibrio climático y ecológico y rendimiento energético de las células solares

Circulan algunos reclamos burdamente falsos.

“Las células solares consumen para su fabricación más energía de la que producen”.

La respuesta correcta es: Hoy en día, la amortización energética de las células solares está entre 12 y 18 meses. Con una vida útil de hasta 30 años no hay problema. Por cierto, las células solares también se pueden producir con energía más renovable.

Las células solares contienen sustancias tóxicas que contaminan el medio ambiente durante la fabricación, eliminación o reciclaje.

La respuesta correcta es: En la fabricación de todo tipo de células solares, hay etapas de producción con sustancias químicas peligrosas. Lo mismo ocurre con los materiales utilizados en los teléfonos inteligentes, los envases de bebidas y alimentos o en los automóviles. Sin embargo, si estas sustancias se utilizan según lo prescrito en los procesos cerrados, la producción de células solares no es más cuestionable que la producción de vasos de yogur. Lo mismo se aplica a la eliminación y el reciclaje. En particular, las células de silicio utilizadas con mayor frecuencia son completamente inofensivas en cuanto a su eliminación. El arsénico y el boro, agentes dopantes peligrosos que se citan a menudo, sólo están presentes en el rango de ppm y químicamente están ligados firmemente, por lo que ni siquiera pueden llegar a las aguas subterráneas durante su eliminación en el relleno sanitario.

“Las células solares son ridículamente ineficientes con sólo un 20 % de rendimiento”.

La respuesta correcta es: El rendimiento de un automóvil con motor de combustión interna es ridí-

culamente baja con un 10 % aproximadamente (lo que se convierte del combustible en locomoción). Pero el combustible cuesta y el automóvil emite gases de escape. Por otra parte, el Sol es gratuito y la célula solar no produce gases de escape ni ruido. Esto también se aplica en comparación con la producción agrícola de cultivos energéticos: Una hectárea de campo solar produce 10 veces más energía que un campo de maíz de 1 hectárea. Además, la fertilización nitrogenada del campo de maíz contamina las aguas subterráneas con nitrato y el aire con el óxido nitroso de efecto invernadero, además de la exposición a herbicidas y pesticidas.