República Federativa do Brasil
Ministério da Indústria, Comércio Exterior
e Serviços
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(21) PI 0819398-3 A2

(22) Data do Depósito: 18/11/2008

(43) Data da Publicação: 25/06/2009

(54) Título: SISTEMA DE CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL RESFRIADO POR EVAPORAÇÃO, AERONAVE E MÉTODO PARA OPERAR UM SISTEMA DE CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL RESFRIADO POR EVAPORAÇÃO

(51) Int. Cl.: H01M 8/04

(30) Prioridade Unionista: 14/12/2007 DE 102007060428.0, 14/12/2007 DE 102007060428.014/12/2007 US 61/031,670

(73) Titular(es): AIRBUS OPERATIONS GMBH

(72) Inventor(es): SCHEIBERT, TOBIAS

(74) Procurador(es): CLOVIS SILVEIRA

(86) Pedido Internacional: PCT EP2008009735 de 18/11/2008

(87) Publicação Internacional: WO 2009/077048 de 25/06/2009

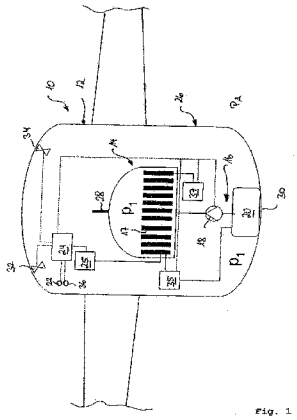

Fig. 1

SISTEMA DE CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL RESFRIADO POR EVAPORAÇÃO, AERONAVE E MÉTODO PARA OPERAR UM SISTEMA DE CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL RESFRIADO POR EVAPORAÇÃO

A presente invenção relaciona-se ao sistema de células de combustível resfriado por evaporação e ao método para operar um sistema de células de combustível resfriado por evaporação.

Os sistemas de célula de combustível permitem que a energia elétrica seja gerada com baixas emissões e alta eficiência. Por essa razão, estão sendo feitos esforços no presente para aplicar os sistemas de células de combustível em diversas aplicações móveis, como, por exemplo, na engenharia automotiva, aplicações marítimas e aeronáuticas com o objetivo de gerar energia elétrica. Por exemplo, em uma aeronave é imaginável que os geradores atualmente usados para o fornecimento da energia elétrica a bordo, acionados pelos motores principais ou pela turbina auxiliar, sejam substituídos por um sistema de células de combustível. Entretanto, um sistema de células de combustível também pode ser usado para o fornecimento de energia elétrica de emergência da aeronave e para substituir a turbina acionada a ar (*ram air turbine ou* RAT) usada até agora.

As células de combustível geralmente compreendem uma região catódica, e uma região anódica separada da região catódica por um eletrólito. Quando a célula de combustível está em operação, um combustível, por exemplo, hidrogênio, é provido ao lado anódico da célula de combustível e um oxidante contendo oxigênio, por exemplo, ar é provido ao lado catódico da célula de combustível. Em uma célula de combustível com membrana eletrolítica polimérica

(PEM), as moléculas de combustível reagem com o catalisador anódico presente na região anódica, por exemplo, de acordo com a equação (1)

$$H_2 \rightarrow 2 \cdot H^+ + 2 \cdot e^- \qquad (1)$$

e, ao formar íons de hidrogênio carregados positivamente, fornecem então elétrons ao eletrodo.

Os íons H^+ formados na região anódica então se difundem através do eletrólito ao catódio, onde, no catalisador catódico presente na região catódica, reagem com o oxigênio fornecido ao catódio e com os elétrons direcionados à região catódico via um circuito elétrico externo, de acordo com a equação (2)

$$0.5 \cdot O_2 + 2 \cdot H^+ + 2 \cdot e^- \rightarrow H_2O \qquad (2)$$

para formar água.

Além de gerar energia elétrica, uma célula de combustível, quando em operação, gera energia térmica, que deve ser removida da célula de combustível com o auxílio de um sistema de resfriamento, a fim de evitar o superaquecimento da célula de combustível. No caso de aplicações móveis, nas quais geralmente somente uma porção da energia térmica gerada pela célula de combustível durante a operação pode ser provida ao sistema ou aos reservatórios de calor externos para uso futuro, frequentemente pelo menos uma porção do calor da reação gerado pelas células de combustível deve ser liberada ao ambiente. As células de combustível usadas em uma aeronave, por exemplo, para o fornecimento de energia elétrica a bordo devem ser desenhadas de modo a serem capazes de atender a uma ampla exigência de energia elétrica. Entretanto, uma célula de combustível com alta capacidade no que diz respeito à geração de energia elétrica também gera

uma grande quantidade de energia térmica e, portanto, tem uma demanda alta de resfriamento.

Em princípio, as células de combustível usadas a bordo das aeronaves devem ser resfriadas de várias formas. Por exemplo, um resfriamento por líquido é possível, quando um líquido é usado como meio de resfriamento, a fim de absorver o calor da reação gerado pela célula de combustível. A capacidade de resfriamento do sistema de resfriamento por líquido é calculada a grosso modo de acordo com a equação (3)

$$\dot{Q}_F = \dot{m}_F \cdot c_{pF} \cdot \Delta T_F \qquad (3)$$

onde $\dot{Q}_F$ é a capacidade de absorção de calor do líquido de resfriamento, $\dot{m}_F$ é a taxa do fluxo da massa, c_{pF} é a capacidade térmica do líquido de resfriamento e ΔT_F é a diferença de temperatura entre a temperatura de saída do líquido de resfriamento e a temperatura de entrada do líquido de resfriamento.

Conforme diretamente evidenciado pela equação (3), o resfriamento por líquido eficiente no qual o líquido de resfriamento é direcionado em um circuito, exige que o líquido de resfriamento aquecido pela absorção de calor da célula de combustível seja resfriado novamente por ΔT_F, antes de poder absorver de modo eficiente o calor que sobra da célula de combustível. Para fins de resfriamento do líquido de resfriamento por ΔT_F, o líquido de resfriamento pode ser provido, por exemplo, para o trocador de calor, no qual a energia térmica armazenada no líquido de resfriamento é transferida para um outro meio de resfriamento, por exemplo, o ar ambiente. Como alternativa ao resfriamento por líquido da célula de combustível com novo resfriamento no ar

ambiente do líquido de resfriamento, o resfriamento do ar ambiente direto da célula de combustível também é imaginável.

Independente do sistema de resfriamento do ar ambiente a ser usado para o resfriamento do ar ambiente direto da célula de combustível ou servir apenas para resfriar novamente o líquido de resfriamento do sistema de resfriamento por líquido, a capacidade de resfriamento do sistema de resfriamento do ar ambiente é calculado a grosso modo de acordo com a equação (4)

$$\dot{Q}_L = \dot{m}_L \cdot c_{pL} \cdot \Delta T_L \qquad (4)$$

onde $\dot{Q}_L$ é a capacidade de absorção de calor do ar de resfriamento, $\dot{m}_L$ é a taxa do fluxo da massa do ar de resfriamento, c_{pL} é a capacidade térmica do ar de resfriamento e ΔT_L é a diferença de temperatura entre a temperatura de saída do ar de resfriamento e a temperatura do ar ambiente.

A equação (4) torna claro que, quanto menor a diferença de temperatura ΔT_L entre a temperatura de saída do ar de resfriamento e a temperatura do ar ambiente, menor a capacidade de resfriamento do resfriamento do ar ambiente. No caso do resfriamento de uma célula de combustível com membrana eletrolítica polimérica (PEM), cuja temperatura de operação geralmente fica entre 60 e 110 °C, com uma ótima saída entre aproximadamente 60 e 90 °C, onde, portanto, existe o problema de que a diferença de temperatura ΔT_L entre a temperatura de saída do ar de resfriamento correspondendo no máximo à temperatura de operação da célula de combustível e a temperatura do ar ambiente é relativamente pequena, onde a capacidade de resfriamento do sistema de

resfriamento é, portanto, correspondentemente menor. Consequentemente, superfícies grandes de transferência de calor são necessárias para a eliminação adequada do calor da célula de combustível com membrana eletrolítica polimérica (PEM) para o ambiente. Os sistemas de resfriamento por líquido e/ou ar para as células de combustível com membrana eletrolítica polimérica (PEM) são portanto necessariamente grandes e com peso relativamente grande, o que é muito desvantajoso para uso em aplicações móveis e, especialmente, na aviação. Além disso, o ar frio necessário para o resfriamento da célula de combustível com membrana eletrolítica polimérica (PEM) usado a bordo das aeronaves tem que ser aspirado do ambiente da aeronave e, após a absorção do calor da reação gerado pela célula de combustível, retornado ao ambiente da aeronave. Entretanto, tanto a sucção do ar e seu retorno ao ambiente da aeronave provocam aumento da resistência do ar, que é prejudicial à operação eficiente do voo da aeronave.

Em contraste aos sistemas de resfriamento descritos acima, cuja capacidade de resfriamento depende substancialmente da diferença entre a temperatura do meio de resfriamento e a temperatura do ar ambiente, a capacidade de resfriamento do sistema de resfriamento por evaporação de acordo com a equação (5)

$$\dot{Q}_V = \dot{m}_V \cdot c_{pL} \cdot \Delta h_V \qquad (5)$$

é determinada pela entalpia Δh_V do meio de resfriamento usado no sistema de resfriamento por evaporação, $\dot{Q}_V$ sendo a capacidade de absorção de calor do meio de resfriamento a ser transferida do estado líquido para o estado gasoso da matéria e $\dot{m}_V$ sendo a taxa do fluxo da massa do meio de resfriamento

a ser transferida do estado líquido para o estado gasoso da matéria.

Após a evaporação, o meio de resfriamento roteado em um circuito em um sistema de resfriamento por evaporação tem que ser retornado ao seu estado líquido da matéria por meio de condensação. Não é necessário, entretanto, o meio de resfriamento ser resfriado até uma temperatura abaixo da temperatura de operação da célula de combustível resfriada pelo sistema de resfriamento por evaporação. Além disso, comparado com os sistemas de resfriamento por líquido e resfriamento por ar descritos acima, um sistema de resfriamento por evaporação tem a vantagem de que a alteração do estado do meio de resfriamento convencional como, por exemplo, a água, exige muito mais energia do que o meio de resfriamento é capaz de absorver no estado líquido. Um sistema de resfriamento por evaporação pode, portanto, ser operado com uma taxa de fluxo de massa do meio de resfriamento significativamente mais baixa do que o sistema de resfriamento por ar tendo uma capacidade de resfriamento comparável.

Um sistema de resfriamento por evaporação para resfriamento das células de combustível é revelado, por exemplo, na patente DE 199 35 719 A1. No sistema de resfriamento descrito na patente DE 199 35 719 A1, o meio de resfriamento, por exemplo, a água, é roteado através de tubos de resfriamento, dispostos em uma câmara de gás anódica e uma câmara de gás de exaustação anódica de uma pilha de células de combustível. O meio de resfriamento evapora à medida em que flui através dos tubos de resfriamento e, portanto, absorve até 90% da quantidade de calor emitida pela célula de combustível através de radiação térmica.

A presente invenção destina-se a prover um sistema de células de combustível resfriado por evaporação que seja adequado, especialmente, para o uso em aeronaves. Além disso, a invenção destina-se a prover um método de operação, como por exemplo, um sistema de células de combustível resfriado por evaporação.

Esse objetivo é alcançado por um sistema de células de combustível tendo as características especificadas na Reivindicação 1 e por um método tendo as características especificas na Reivindicação 11 para a operação de um sistema de células de combustível.

Um sistema de células de combustível de acordo com a invenção compreende uma célula de combustível, preferencialmente uma célula de combustível da classe de saída MW, o termo "célula de combustível" aqui denota não somente uma única célula, mas também uma pilha de células de combustível compreendendo diversas células de combustível. A célula de combustível é preferencialmente uma célula de combustível com membrana eletrolítica polimérica (PEM), a região anódica da mesma sendo conectada a uma fonte de hidrogênio e o lado catódico alimentado por meios de oxidação contendo oxigênio, preferencialmente ar. O combustível a ser fornecido à região anódica, preferencialmente hidrogênio, pode ser armazenado em um tanque de combustível integrado ao sistema de células de combustível de acordo com a invenção. Alternativamente ou em adição a isso, o sistema de células de combustível, de acordo com a invenção, pode compreender uma unidade de geração de combustível para a geração de combustível a ser provido à região anódica da célula de combustível. O lado catódico da célula de combustível pode ser conectado ao lado da pressão de um compressor. O

compressor pode ser um compressor contendo uma entrada de vapor e ar combinados.

A célula de combustível pode ser uma célula com membrana eletrolítica polimérica (PEM) de baixa temperatura, uma célula de combustível com membrana eletrolítica polimérica (PEM) de alta temperatura, uma célula de combustível com membrana eletrolítica polimérica (PEM) contendo um eletrólito composto tendo material inorgânico, uma célula de combustível com membrana eletrolítica polimérica (PEM) com polibenzimidazola ou uma célula de combustível com membrana eletrolítica polimérica (PEM) com ácido poliperfluorsulfônico. Quando em operação, a célula de combustível, além de produzir energia elétrica produz energia térmica que pode ser retirada da célula de combustível a fim de evitar o superaquecimento da célula de combustível.

O sistema de células de combustível de acordo com a invenção, portanto, ainda compreende um sistema de resfriamento por evaporação que está em contato térmico com a célula de combustível, a fim de que o calor gerado pela célula de combustível durante a operação desta seja absorvido através da evaporação do meio de resfriamento e seja retirado da célula de combustível. Conforme explicado acima, um sistema de resfriamento por evaporação distingue-se por uma capacidade alta de absorção de calor e, consequentemente, uma excelente capacidade de resfriamento devido à entalpia de evaporação alta necessária para alterar o meio de resfriamento do estado líquido da matéria para o estado gasoso. O sistema de resfriamento por evaporação do sistema de células de combustível de acordo com a invenção pode, portanto, ser operado com uma taxa de fluxo de massa do meio de resfriamento menor, em comparação com o sistema de resfriamento por líquido ou ar tendo capacidade de absorção

de calor similar e, ainda, um design compacto e menor peso. Além disso, o sistema de resfriamento por evaporação tem menos perda de energia, não provoca nenhuma resistência de ar adicional quando o sistema de células de combustível, de acordo com a invenção, é usado a bordo de aeronaves e, também, durante os picos de carga operacional é capaz de ser confiável e alimentar de modo autônomo a célula de combustível com capacidade de resfriamento. Finalmente, a dinâmica alta do sistema pode ser alcançada no sistema de resfriamento por evaporação do sistema de células de combustível de acordo com a invenção, uma vez que a expansão do meio de resfriamento mediante evaporação permite que o meio de resfriamento seja rapidamente removido da região do sistema de resfriamento por evaporação que está em contato térmico com a célula de combustível.

O sistema de resfriamento por evaporação do sistema de células de combustível de acordo com a invenção pode ser considerado como um sistema desenhado separadamente da célula de combustível. De preferência, entretanto, o sistema de resfriamento por evaporação é pelo menos parcialmente integrado aos componentes da célula de combustível e compreende, por exemplo, canais de resfriamento formado em placas bipolares, placas do separador, placas de cobertura e/ou placas de delimitação laterais das células de combustível ou da pilha de células de combustível. Alternativamente ou além disso, os canais de resfriamento do sistema de resfriamento por evaporação podem também se estender para a câmara anódica de alimentação do gás, câmara catódica de alimentação do gás, câmara anódica do gás de exaustão e/ou câmara catódica do gás de exaustão da célula de combustível. O meio de resfriamento flui através dos canais de resfriamento do sistema de resfriamento por evaporação cujo meio de resfriamento é transferido do estado líquido

para o estado gasoso da matéria através da absorção do calor gerado pela célula de combustível durante a operação. A água, por exemplo, pode ser usada como meio de resfriamento, evaporada pela ebulição nucleada à medida em que flui através dos canais de resfriamento do sistema de resfriamento por evaporação.

O sistema de células de combustível de acordo com a invenção ainda compreende um dispositivo para detectar a pressão no sistema de resfriamento por evaporação isto é, nas partes do sistema de resfriamento por evaporação no qual o meio de resfriamento é transferido do estado líquido para o estado gasoso da matéria. Se o sistema de resfriamento por evaporação, isto é, as partes do sistema de resfriamento por evaporação nas quais o meio de resfriamento é transferido do estado líquido para o estado gasoso da matéria, são conectadas ao ambiente do sistema de resfriamento por evaporação, o dispositivo de detecção de pressão pode ser adaptado de modo a detectar a pressão ambiente no ambiente do sistema de resfriamento por evaporação e ou na célula de combustível. Um sensor de pressão, por exemplo, pode ser usado como dispositivo de detecção de pressão. O dispositivo de detecção de pressão provê sinais que são característicos da pressão no sistema de resfriamento por evaporação para uma unidade de controle que por ser, por exemplo, uma unidade de controle eletrônico.

A unidade de controle do sistema de células de combustível de acordo com a invenção é adaptada para controlar a temperatura operacional da célula de combustível de acordo com os sinais fornecidos à unidade de controle pelo dispositivo de detecção de pressão no sistema de resfriamento por evaporação, de modo que o meio de resfriamento do sistema de resfriamento por evaporação seja transferido do estado

líquido para o estado gasoso da matéria pelo calor gerado pela célula de combustível durante a operação da célula. Em outras palavras, a unidade de controle é adaptada de modo a controlar a temperatura operacional da célula de combustível de acordo com a pressão no sistema de resfriamento por evaporação, isto é, as partes do sistema de resfriamento por evaporação das quais o meio de resfriamento evapora, de modo que seja sempre assegurado que o calor gerado pela célula de combustível durante a operação da célula seja suficiente para transferir o meio de resfriamento do sistema de resfriamento por evaporação do estado líquido para o estado gasoso da matéria. Como resultado, o funcionamento adequado do sistema de resfriamento por evaporação será sempre assegurado. No sistema de células de combustível de acordo com a invenção, a temperatura do meio de resfriamento após a absorção do calor gerado pela célula de combustível fica pouco abaixo da temperatura operacional da célula de combustível, de modo que uma transferência de calor alta e assim, uma capacidade de resfriamento especialmente boa do sistema de resfriamento por evaporação seja alcançada. Além disso, a troca isotérmica substancial do estado da matéria do meio de resfriamento permite uma possível operação estável do sistema de resfriamento por evaporação.

A temperatura de evaporação do meio de resfriamento usual, como por exemplo, a água, diminui à medida que a pressão diminui. Por exemplo, a temperatura de evaporação da água é 100 ° C a uma pressão correspondendo à pressão atmosférica a nível do mar (1,0132 bar). Por contraste, a uma pressão de 0,1992 bar, conforme a existente a uma altitude de 12.192 m (40.000 pés), i.e. a altitude de cruzeiro de uma aeronave comercial, a temperatura de evaporação da água é somente 60 °C. Consequentemente, se o sistema de resfriamento por evaporação de um sistema de

células de combustível de acordo com a invenção for operado com água como meio de resfriamento, no caso da pressão do sistema de resfriamento por evaporação correspondendo à pressão atmosférica a nível do mar, a temperatura operacional da célula de combustível deve ser selecionada para ser tão alta de modo que o calor gerado pela célula de combustível durante a operação seja suficiente para aquecer o meio de resfriamento do sistema de resfriamento por evaporação acima de 100 °C e, portanto, proporcionar o funcionamento adequado do sistema de resfriamento por evaporação. Se, por outro lado, a pressão no sistema de resfriamento por evaporação for de somente 0,1992 bar, a célula de combustível pode ser operada com uma temperatura operacional mais baixa, uma vez que o calor gerado pela célula de combustível durante a operação tem somente que ser suficiente para aquecer o meio de resfriamento a 60 °C.

Uma célula de combustível com membrana eletrolítica polimérica (PEM) atinge seu resultado excelente quando é operada a uma temperatura operacional entre aproximadamente 60 e 90 °C. Se, no sistema de células de combustível de acordo com invenção, for determinado com o auxílio de um dispositivo de detecção de pressão, que há pressão baixa suficiente no sistema de resfriamento por evaporação, por exemplo, devido à pressão ambiente inferior à pressão atmosférica a nível do mar, a unidade de controle pode ser menor do que a temperatura operacional da célula de combustível até onde um resultado excelente da célula de combustível seja alcançado, mas o calor gerado pela célula de combustível durante a operação ainda seja suficiente para transferir o meio de resfriamento do sistema de resfriamento por evaporação do estado líquido para o estado gasoso da matéria e assim assegurar o funcionamento adequado do sistema de resfriamento por evaporação.

Quando em voo, a aeronave está, predominantemente, em um ambiente no qual a pressão ambiente está abaixo da pressão atmosférica a nível do mar. Esse fato pode ser usado, de um modo especialmente vantajoso, no sistema de células de combustível de acordo com a invenção usado a bordo das aeronaves, para manter a temperatura operacional da célula de combustível abaixo de 100 °C, mas na medida do possível em um intervalo de temperatura operacional excelente entre aproximadamente 60 e 90 °C, durante a maior parte do período operacional da célula de combustível. Isso exige somente que o sistema de resfriamento por evaporação, isto é, as peças do sistema de resfriamento por evaporação das quais o meio de resfriamento evapora, seja instalado na região não pressurizada da aeronave e conectado à atmosfera ambiente, de modo que a pressão ambiente mais baixa no ambiente da aeronave esteja presente nessas peças do sistema de resfriamento por evaporação.

Por exemplo, a unidade de controle pode manter a temperatura operacional da célula de combustível de um sistema de células de combustível, de acordo com a invenção, usado a bordo de aeronaves a uma temperatura constante, na medida do possível em um intervalo de temperatura operacional excelente da célula de combustível, enquanto a aeronave estiver em altitude de cruzeiro constante. Por outro lado, quando a aeronave está subindo, a unidade de controle pode baixar a temperatura operacional da célula de combustível na dependência da diminuição da pressão ambiente, sendo que, quando a aeronave está descendo, ela pode aumentar a temperatura operacional da célula de combustível na dependência do aumento da pressão ambiente.

Se for usada água como meio de resfriamento no sistema de resfriamento por evaporação do sistema de células de combustível de acordo com a invenção, a unidade de controle poderá manter a temperatura operacional da célula de combustível, a, por exemplo, aproximadamente 60 ° C, quando a aeronave estiver em altitude de cruzeiro constante de aproximadamente 12.192 m (40.000 pés). Quando a aeronave está subindo, de um local inicial a aproximadamente o nível do mar, até que a sua altitude do cruzeiro seja alcançada, a unidade de controle pode reduzir a temperatura ambiente da célula de combustível continuamente durante a subida, de aproximadamente 100 °C para aproximadamente 60 °C, por exemplo, na dependência da diminuição da pressão ambiente. Por outro lado, quando a aeronave está descendo, da altitude do cruzeiro para o local de aterrissagem a aproximadamente o nível do mar, a unidade de controle pode aumentar a temperatura operacional da célula de combustível continuamente, de aproximadamente 60 °C para aproximadamente 100 °C, na dependência da pressão ambiente.

Em uma realização preferida do sistema de células de combustível de acordo com a invenção, a unidade de controle é adaptada para controlar a temperatura operacional da célula de combustível na dependência dos sinais fornecidos à unidade de controle pelo dispositivo de detecção da pressão no sistema de resfriamento por evaporação, de modo que a evaporação do meio de resfriamento do sistema de resfriamento por evaporação pelo calor gerado pela célula de combustível durante a operação da célula ocorra na região de vapor úmido do meio de resfriamento. "Vapor úmido" aqui é entendido como um sistema no qual o líquido em ebulição e o vapor saturado estejam em equilíbrio.

Se a evaporação do meio de resfriamento usado no sistema de resfriamento por evaporação do sistema de células de combustível de acordo com a invenção acontecer na região de vapor úmido do meio de resfriamento, durante a evaporação do meio de resfriamento, o meio de resfriamento em ebulição, no estado líquido da matéria estará em equilíbrio com o vapor saturado do meio de resfriamento. Esse é o caso onde o meio de resfriamento, durante a evaporação é aquecido até a sua temperatura de evaporação dependente da pressão. O dispositivo de controle desse modo controla preferivelmente a temperatura operacional da célula de combustível de modo que o meio de resfriamento do sistema de resfriamento por evaporação seja aquecido até a temperatura correspondendo à temperatura de evaporação dependente da pressão do meio de resfriamento. Por exemplo, a célula de combustível pode ser operada à temperatura ambiente que é 0 a 5 °C, preferencialmente 1 a 3 °C, acima da temperatura de evaporação dependente da pressão do meio de evaporação do sistema de resfriamento por evaporação.

O sistema de células de combustível de acordo com a invenção preferencialmente ainda compreende um sistema gerando pressão operacional da célula de combustível, adaptado para gerar a pressão desejada na célula de combustível, isto é, os componentes da célula de combustível na qual não há canais de resfriamento integrados do sistema de resfriamento por evaporação. O sistema gerando pressão operacional para a célula de combustível do sistema de células de combustível de acordo com a invenção pode ser integrado, por exemplo, ao sistema de alimentação do meio do sistema de células de combustível e compreende um compressor para o fornecimento de um oxidante para a região catódica da célula de combustível e/ou um dispositivo de alimentação correspondente para o fornecimento de combustível à região

anódica da célula de combustível. O sistema gerando pressão operacional para a célula de combustível serve para levar pressão operacional à célula de combustível até o nível desejado ou para mantê-la no nível desejado, sem levar em consideração a pressão ambiente no ambiente da célula de combustível e a pressão no sistema de resfriamento por evaporação.

O sistema gerando pressão operacional à célula de combustível pode ser adaptado para gerar na célula de combustível uma pressão menor ou maior do que a pressão ambiente no ambiente da célula de combustível e/ou maior ou menor do que a pressão no sistema de resfriamento por evaporação. Além disso, o sistema de células de combustível de acordo com a invenção pode compreender uma unidade de controle, como por exemplo, uma unidade de controle eletrônico, para controlar o sistema gerando pressão operacional à célula de combustível. A unidade de controle para controlar o sistema gerando pressão operacional à célula de combustível pode ser uma unidade de controle separada. Como alternativa, entretanto, a unidade de controle para controlar o sistema gerando pressão operacional à célula de combustível também pode ser integrada à unidade de controle para controlar a temperatura operacional da célula de combustível.

Conforme explicado acima, no sistema de células de combustível de acordo com a invenção, a temperatura operacional da célula de combustível sempre é controlada, na dependência da pressão no sistema de resfriamento por evaporação, de modo que o meio de resfriamento do sistema de resfriamento por evaporação seja alterado do estado líquido para o estado gasoso pelo calor gerado pela célula de combustível durante a operação da

célula de combustível. No caso de temperaturas operacionais altas correspondentes, entretanto, o problema pode ser substâncias e/ou misturas de substâncias como, por exemplo, água, geralmente presentes em forma de líquido na célula de combustível, isto é, por exemplo, na região anódica, na região catódica, na região da membrana separando a região anódica da região catódica, nas linhas de gás anódicas ou nas linhas de gás catódicas, evaporarem.

A fim de evitar a evaporação indesejada de substâncias e/ou de misturas de substâncias geralmente presentes em forma de líquido na célula durante a operação da célula de combustível, a unidade de controle para controlar o sistema gerando pressão operacional à célula de combustível pode ser adaptada para controlar o sistema gerando pressão operacional à célula de combustível de modo que seja gerada, na célula de combustível, uma pressão na qual a evaporação indesejada das substâncias e/ou das misturas de substâncias geralmente presentes em forma de líquido na célula de combustível seja evitada.

A unidade de controle para controlar o sistema gerando pressão operacional para a célula de combustível pode ser adaptada para controlar a pressão operacional da célula de combustível na dependência da temperatura operacional da célula de combustível. A temperatura operacional da célula de combustível é usada pela unidade de controle uma vez que a variável de controle para controlar o sistema gerando pressão operacional para a célula de combustível pode ser uma temperatura operacional da célula de combustível definida, fornecida pela unidade de controle para controlar a temperatura operacional da célula de combustível ou pode ser uma temperatura operacional da célula de combustível medida, por exemplo, por um sensor de

temperatura. Alternativamente ou além disso, entretanto, a unidade de controle para controlar o sistema gerando pressão para a célula de combustível também pode ser adaptada para controlar a pressão operacional da célula de combustível na dependência dos sinais providos a ela pelo dispositivo para detecção da pressão no sistema de resfriamento por evaporação. Por exemplo, a unidade de controle para controlar o sistema gerando pressão operacional à célula de combustível pode calcular uma temperatura operacional definida da célula de combustível com base nos sinais do dispositivo de detecção da pressão que são as características da pressão no sistema de resfriamento por evaporação e usá-la como uma variável de controle para determinar a pressão operacional definida adequada na célula de combustível.

Se for usada água como meio de resfriamento ambientalmente favorável no sistema de resfriamento por evaporação do sistema de células de combustível de acordo com a invenção, a célula de combustível, na forma, por exemplo, de célula de combustível com membrana eletrolítica polimérica (PEM) será preferencialmente operada, no caso de uma pressão no sistema de resfriamento por evaporação correspondendo a aproximadamente à pressão atmosférica a nível do mar, a uma temperatura operacional de aproximadamente 100 a 105 °C. A unidade de controle para controlar o sistema gerando pressão operacional para a célula de combustível então, preferencialmente, controla o sistema gerando pressão operacional à célula de combustível de modo que uma pressão acima da pressão atmosférica a nível do mar, por exemplo de 2 bar, seja gerada na célula de combustível. A uma pressão de 2 bar, a temperatura de evaporação da água será de 120,23 °C, de modo que a evaporação da água presente na célula de combustível, isto é, por exemplo, na região anódica, na região catódica, na região da membrana separando a região

anódica da região catódica, nas linhas de gás anódicas ou nas linhas de gás catódicas seja confiavelmente evitada na temperatura operacional da célula de combustível.

Conforme explicado acima, grandes quantidades de calor podem ser retiradas das células de combustível através do processo de evaporação ocorrendo no sistema de resfriamento por evaporação do sistema de células de combustível de acordo com a invenção. O calor retirado da célula de combustível pelo sistema de resfriamento por evaporação deve então ser emitido ao ambiente ou provido para outro uso. O processo de transferência de calor pode ser descrito pela equação (6)

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta t_{m\log} \qquad (6)$$

onde $\dot{Q}$ é o valor de transferência de calor, k é o coeficiente de transferência de calor, A é a superfície de transferência de calor e $\Delta t_{m\log}$ é o gradiente da temperatura. O coeficiente de transferência de calor k é calculado de acordo com a equação (7)

$$1/k = 1/\alpha_{out} + s/\lambda + 1/\alpha_{in} \qquad (7)$$

onde s é a espessura da parede, λ é o coeficiente de condutividade térmica e α é o coeficiente de transferência de calor.

O coeficiente de transferência de calor α é considerado a principal variável influenciando a quantidade de calor $\dot{Q}$ a ser transferida no decorrer de um processo de transferência de calor. Um coeficiente de transferência de calor alto α é alcançado no caso de um processo de condensação. O sistema de resfriamento por evaporação do

sistema de células de combustível de acordo com a invenção, portanto, compreende, preferencialmente, um condensador, para condensar o meio de resfriamento evaporado durante a operação da célula de combustível com o objetivo de resfriar a célula de combustível. No caso desse design de sistema de resfriamento por evaporação, a absorção do calor da reação da célula de combustível ocorre através da evaporação, onde a emissão do calor da reação da célula de combustível ocorre através do processo de condensação. Uma vez que o processo de condensação, de modo similar ao processo de evaporação, consome muito mais energia do que, por exemplo, um meio de resfriamento em forma de líquido é capaz de absorver, o sistema de resfriamento por evaporação equipado com condensador opera de modo especialmente eficiente.

Uma vantagem adicional do sistema de resfriamento por evaporação equipado com condensador é que ele pode ser operado como um sistema de circuito, no qual o meio de resfriamento que é condensado no condensador retorna, em estado líquido da matéria para a célula de combustível, onde pode evaporar novamente com o objetivo de resfriar a célula de combustível. De preferência, entretanto, em um sistema de resfriamento por evaporação equipado com um condensador, a função de resfriamento da célula de combustível é desvinculada da função de recuperação do meio de resfriamento, de modo que o resfriamento adequado da célula de combustível seja assegurado, mesmo no caso de falha do condensador. A fim de assegurar que o sistema de resfriamento por evaporação seja alimentado adequadamente com o meio de resfriamento, o sistema de células de combustível de acordo com a invenção pode compreender um dispositivo para transferir a água produzida durante a operação da célula de combustível para dentro do sistema de resfriamento por evaporação.

O calor retirado da célula de combustível através do sistema de resfriamento por evaporação pode ser emitido ao ambiente. Isso é especialmente adequado quando o calor resultante está a um nível de temperatura comparativamente baixo, por exemplo 60 °C.

Um condensador que permite que o calor não aproveitado gerado pela célula de combustível do sistema de células de combustível de acordo com a invenção seja efetivamente dissipado para o ambiente pode ser conseguido, por exemplo, na forma de um resfriador do revestimento externo. O resfriador externo pode ser constituído, por exemplo, por uma parede cuja parte interna voltada para o sistema de células de combustível, recebe o meio de resfriamento em forma de vapor e funciona como condensador de vapor. Por outro lado, a parte externa da parede constituindo o resfriador do revestimento externo, voltada para o ambiente, funciona como meio de aquecimento do ar ambiente. Um condensador funcionando como resfriador do revestimento externo é adequado para uso, especialmente, em um sistema de células de combustível, de acordo com a invenção, usado a bordo das aeronaves. O resfriador do revestimento externo pode então ser constituído, por exemplo, por uma parte do revestimento externo da aeronave que recebe, em seu interior, o meio de resfriamento aplicado que evapora durante a operação da célula de combustível para fins de resfriamento da célula de combustível.

Se a parte do revestimento externo da aeronave for usada como resfriador do revestimento externo, superfícies grandes de transferência de calor podem ser facilmente criadas e sem componentes adicionais. Isso resulta em vantagem considerável no que se refere ao peso. Além disso, um resfriador do revestimento externo, constituído,

por exemplo, por uma parte do revestimento externo da aeronave, distingue-se por sua alta capacidade de resfriamento, e permite mais vantagens em relação ao peso, devido à ausência de tubulações. Ainda, a retirada de calor por meio de um resfriador do revestimento externo produz pouco ruído e não exige movimentações de grandes quantidades de massas de ar, o que, no caso do sistema de células de combustível de acordo com a invenção sendo usado em aeronaves poderia resultar em resistência do ar, adicional, indesejada. Finalmente, o incomodo do "loft" pode ser evitado.

Como alternativa ou adicionalmente ao calor da reação produzido pela célula de combustível, de acordo com a invenção, durante a operação, emitido para o ambiente, o calor da reação gerado pela célula de combustível também pode ser recuperado e utilizado. Com esse objetivo, o sistema de células de combustível, de acordo com a invenção, pode compreender pelo menos um dispositivo para utilizar o calor armazenado no meio de resfriamento. A utilização do calor armazenado no meio de resfriamento pode ser feita direta ou indiretamente. Por exemplo, o meio de resfriamento, no estado gasoso da matéria pode ser provido diretamente ao dispositivo para utilização do calor armazenado no meio de resfriamento. Entretanto, o meio de resfriamento retirado do sistema de resfriamento por evaporação neste processo deve ser retornado ao sistema de resfriamento por evaporação a fim de assegurar o resfriamento adequado da célula de combustível.

Alternativa ou adicionalmente, também é permitido que somente o calor armazenado no meio de resfriamento seja transferido para o dispositivo para utilização deste calor. Com esse objetivo, o meio de resfriamento, no estado gasoso da matéria, pode ser redirecionado, por exemplo, através do trocador de calor, que

está em contato térmico com o dispositivo para utilização do calor armazenado no meio de resfriamento. Além disso, um condensador instalado no sistema de resfriamento por evaporação pode funcionar e/ou ser disposto de modo que o calor liberado pela condensação do meio de resfriamento no condensador seja transferido ao dispositivo para utilização do calor armazenado no meio de resfriamento.

O dispositivo para utilização do calor armazenado no meio de resfriamento pode ser um dispositivo de aquecimento, de preferência um meio de aquecimento do vapor que utiliza, para fins de aquecimento, o calor armazenado no meio de resfriamento. Como alternativa a isso, entretanto, o dispositivo para utilização do calor armazenado no meio de resfriamento também pode ser uma instalação de dessalinização de água, para obtenção de água potável da água do mar. No sistema de células de combustível de acordo com a invenção destinado ao uso em aeronaves, o dispositivo para utilização do calor armazenado no meio de resfriamento será de preferência uma instalação de degelo da aeronave.

Finalmente, é concebível que a água usada como meio de resfriamento no sistema de resfriamento por evaporação seja utilizada em uma instalação de fornecimento de água e/ou vapor de água para a tubulação do gás de exaustão da aeronave. Assim é possível reduzir a emissão de poluentes dos motores da aeronave.

Uma realização preferida do sistema de células de combustível de acordo com a invenção, de preferência, ainda compreende um dispositivo para a exaustão do meio de resfriamento para o ambiente. De preferência, tal dispositivo para a exaustão do meio de resfriamento para o ambiente é adaptado para liberar no ambiente o meio de resfriamento no estado gasoso da matéria, se o calor

armazenado no meio de resfriamento não puder ser liberado no ambiente ou, de outra forma, utilizado em quantidade suficiente. O dispositivo para liberação do meio de resfriamento no ambiente pode ser instalado, por exemplo, na forma de uma válvula de descarga e assegurar uma operação confiável do sistema de células de combustível de acordo com a invenção, mesmo se a retirada do calor armazenado no meio de resfriamento for considerada mais difícil, por exemplo, como resultado da temperatura ambiente alta ou condições de calma.

No método, de acordo com a invenção, para a operação do sistema de células de combustível, compreendendo uma célula de combustível e um sistema de resfriamento por evaporação, que está em contato térmico com a célula de combustível, a fim de que o calor gerado pela célula de combustível durante a operação da célula seja absorvido através da evaporação do meio de resfriamento e retirado da célula de combustível, a pressão no sistema de resfriamento por evaporação é detectada por um dispositivo de detecção de pressão adequado. A temperatura operacional da célula de combustível é controlada por uma unidade de controle, na dependência dos sinais providos à unidade de controle pelo dispositivo de detecção de pressão. O controle da temperatura operacional da célula de combustível é realizado de modo que o meio de resfriamento do sistema de resfriamento por evaporação seja transferido do estado líquido para o estado sólido da matéria pelo calor gerado pela célula de combustível durante a operação da mesma.

De preferência, a temperatura operacional da célula de combustível é controlada, na dependência dos sinais providos à unidade de controle pelo dispositivo de detecção de pressão, de modo que a evaporação do meio de resfriamento

do sistema de resfriamento por evaporação pelo calor gerado pela célula de combustível durante a operação da célula aconteça na região de vapor úmido do meio de resfriamento.

Em uma realização preferida do método, de acordo com a invenção, para a operação do sistema de células de combustível, a pressão desejada é gerada na célula de combustível por meio do sistema gerando pressão operacional à célula de combustível. Por exemplo, a pressão desejada é gerada por meio do sistema gerando pressão operacional à célula de combustível, na região anódica, na região catódica, na região da membrana separando a região anódica da região catódica, nas linhas de gás anódicas e nas linhas de gás catódicas da célula de combustível.

O sistema gerando pressão operacional à célula de combustível por meio de uma unidade de controle para o controle do sistema gerando pressão operacional à célula de combustível pode ser controlado de modo que seja gerada na célula de combustível uma pressão segundo a qual seja evitada a evaporação indesejada de substâncias e/ou misturas de substâncias geralmente presentes em forma de líquido na célula de combustível.

De preferência, a unidade de controle para controlar o sistema gerando pressão operacional à célula de combustível controla a pressão na célula de combustível na dependência da temperatura operacional da célula de combustível e/ou na dependência dos sinais do dispositivo de detecção de pressão para detectar a pressão no sistema de resfriamento por evaporação.

O meio de resfriamento que evapora durante a operação da célula de combustível para fins de resfriamento da célula pode ser condensado em um condensador. De

preferência, o meio de resfriamento é condensado por um condensador operado na forma de um resfriador do revestimento externo.

Alternativamente ou além disso, o calor armazenado no meio de resfriamento também pode ser provido a pelo menos um dispositivo para a utilização desse calor. Por exemplo, o calor armazenado no meio de resfriamento pode ser provido a um dispositivo para utilização na forma de vapor, unidade de dessalinização ou unidade de degelo de uma aeronave.

Além disso, a água usada como meio de resfriamento no sistema de resfriamento por evaporação também pode ser fornecida, na forma de líquido ou de vapor à tubulação do gás de exaustão da aeronave.

De preferência, o meio de resfriamento é liberado para o ambiente, se necessário, isto é quando a retirada adequada ou a utilização do calor armazenado no sistema de resfriamento não são possíveis.

O sistema de células de combustível de acordo com a invenção é especialmente adequado para uso como fonte de energia baseada em células de combustível em aeronaves, especialmente em aviões comerciais. Por exemplo, o sistema de células de combustível pode ser usado como alternativa à unidade de energia auxiliar (APU) ou à turbina acionada a ar (RAT), ou ao sistema de fornecimento de energia para o sistema anticongelamento das asas (*wing anti-ice system* - WAIS). A fim de atender às exigências de energia elétrica da aeronave, poderá haver a necessidade de um sistema de células de combustível capaz de gerar 1 MW de energia elétrica. O sistema de resfriamento por evaporação do sistema de células de combustível de acordo com a invenção, apesar de seu peso

baixo e design compacto, é capaz de fornecer capacidade de resfriamento suficiente para a célula de combustível de alta potência. Além disso, a operação autônoma do sistema de resfriamento é possível, independente de outros sistemas da aeronave, como por exemplo, a instalação de ar condicionado da aeronave. O sistema de células de combustível de acordo com a invenção pode, portanto, ser usado a bordo das aeronaves, como unidade autônoma de fornecimento de energia elétrica de emergência.

Em aeronaves equipadas com sistema de células de combustível de acordo com a invenção, o sistema de células de combustível, ou pelo menos partes do sistema de resfriamento por evaporação no qual o meio de resfriamento evapora, são de preferência instalados em uma região não pressurizada da aeronave. Tais regiões da aeronave estão localizadas, por exemplo, na estrutura principal/cobertura da fuselagem (carenagem ventral) e na seção da fuselagem posterior.

Três realizações preferidas de um sistema de células de combustível de acordo com a invenção são agora explicados mais detalhadamente com relação às figuras do esquema em anexo, das quais

Figura 1 mostra a representação esquemática da primeira realização de um sistema de células de combustível,

Figura 2 mostra a representação esquemática de uma segunda realização de um sistema de células de combustível e

Figura 3 mostra a representação esquemática de uma terceira realização de um sistema de células de combustível

A Figura 1 mostra um sistema de células de combustível 10, instalado na carenagem ventral 12, isto é, em uma região não pressurizada da aeronave. O sistema de células de combustível 10 compreende células de combustível 14 dispostas em forma de pilha de células de combustível. As células de combustível 14 instaladas como células de combustível com membrana eletrolítica polimérica (PEM) de baixa temperatura com intervalo de temperatura operacional entre 60 e 110 °C. O intervalo de temperatura operacional ideal da célula de combustível 14 é entre 60 e 90 °C.

Um sistema de resfriamento por evaporação 16 provido para a célula de combustível 14 compreende canais de resfriamento 17, instalados em placas bipolares da célula de combustível 14 não representados em maiores detalhes na Fig. 1. A água servindo como meio de resfriamento flui através dos canais de resfriamento 17 durante a operação da célula de combustível 14. A água em estado líquido é provida aos canais de resfriamento 17 a partir de um tanque do meio de resfriamento 20 por meio de uma bomba 18.

Instalado no interior da carenagem ventral 12 está o sensor de pressão 22. O sensor de pressão 22 mede a pressão no interior da carenagem ventral 12, cuja pressão corresponde à pressão no sistema de resfriamento por evaporação 16, isto é, a pressão nos canais de resfriamento 17. Conforme já mencionado, a carenagem ventral 12 pertence às regiões não pressurizadas da aeronave, de modo que a pressão p_1 presente no interior da carenagem ventral 12 e medida pelo sensor de pressão 22 corresponde substancialmente à pressão ambiente p_A no ambiente da aeronave. Quando a

aeronave está em voo, e especialmente quando está em altitude de cruzeiro, essa pressão é significativamente menor do que a pressão atmosférica a nível do mar.

Os sinais emitidos pelo sensor de pressão 22, característicos da pressão ambiente no interior da carenagem ventral 12 são providos à unidade de controle eletrônica 24. Com base nos sinais do sensor de pressão 22, a unidade de controle eletrônica 24 controla a temperatura operacional da célula de combustível 14 de modo que a água seja transferida do estado líquido para o estado gasoso da matéria à medida em que flui através dos canais de resfriamento 17 instalados nas placas bipolares da célula de combustível 14. A evaporação da água fluindo através dos canais de evaporação 17 faz com que o valor da reação gerado pela célula de combustível 14 durante a operação seja absorvido pela água servindo como meio de resfriamento.

Em particular, a unidade de controle eletrônico 24 controla a temperatura operacional da célula de combustível 14, na dependência dos sinais providos à unidade de controle 24 pelo sensor de pressão 22, de modo que a evaporação da água fluindo através dos canais de resfriamento 17 do sistema de resfriamento por evaporação 16 devido ao calor da reação gerada pela célula de combustível 14 durante a operação ocorra na região de vapor úmido. A fim de que isso ocorra, a unidade de controle 24 sempre controla a temperatura operacional da célula de combustível 14 de modo que a temperatura operacional da célula de combustível 14 seja de cerca de 0 a 5 °C acima da temperatura de evaporação, dependente da pressão da água do meio de resfriamento.

A temperatura operacional da célula de combustível 14 é assim controlada pela unidade de controle 24, na dependência da altitude de voo da aeronave e da pressão resultante na carenagem ventral 12, de modo que sempre siga a curva de evaporação dependente da pressão da água do meio de resfriamento. A Tabela 1 provê os valores correspondentes para a temperatura de ebulição ou de evaporação e a pressão de ebulição ou de evaporação da água como meio de resfriamento, na dependência da altitude de voo da aeronave.

Temperatura de ebulição, [°C]	Pressão de ebulição, [bar]	Altitude de voo, [m]
59	0,1901	12497 (41.000 pés)
60	0,1992	12192 (40.000 pés)
70	0,3116	9144 (30.000 pés)
80	0,4736	6096 (20.000 pés)
90	0,7011	3048 (10.000 pés)
100	1,0132	0
120,23	2	-

Tabela 1: A temperatura de ebulição e a pressão de ebulição dá água como meio de resfriamento na dependência da altitude de voo da aeronave (hemisfério norte, 45°N, julho)

Fica claro na Tabela 1 que a célula de combustível 14 pode ser operada com temperatura operacional de aproximadamente 60 °C quando a aeronave está em altitude de cruzeiro. Quando a aeronave está subindo e descendo, a temperatura operacional da célula de combustível 14 é adaptada continuamente à variação da pressão ambiente pela unidade de controle 24. Em outras palavras, a temperatura operacional da célula de combustível 14 deve seguir a curva de evaporação dependente da pressão da água como meio de

resfriamento de modo que a evaporação da água do meio de resfriamento nos canais de resfriamento 17 do sistema de resfriamento por evaporação 16, durante a subida e a descida da aeronave ocorra na região de vapor úmido. Como resultado, a evaporação adequada do meio de resfriamento fluindo através dos canais de resfriamento 17 do sistema de resfriamento por evaporação 16 será sempre assegurada. Ao mesmo tempo, evita-se a operação da célula de combustível 14 a temperaturas operacionais desnecessariamente altas.

A Tabela 1 mostra que a célula de combustível 14 pode ser operada em um intervalo de temperatura operacional ideal de 60 a 90 °C durante grande parte do período de operação. Temperaturas operacionais mais altas da célula de combustível 14 somente são necessárias quando a aeronave está voando a uma altitude abaixo de 3.048 m (10.000 pés) ou estiver no solo.

A fim de evitar a evaporação indesejada da água geralmente presente na forma de líquido na célula de combustível 14, isto é, por exemplo, na região anódica, na região catódica, na região da membrana de separação da região anódica da região catódica, nas linhas de gás anódicas ou nas linhas de gás catódicas, a unidade de controle 24 controla o sistema de geração de pressão operacional da célula de combustível 25, integrada ao sistema de alimentação do meio da célula de combustível 14, de modo a que seja gerada na célula de combustível 14 pressão operacional mediante a qual seja evitada a evaporação indesejada da água em estado líquido presente na célula de combustível. A célula de combustível com membrana eletrolítica polimérica (PEM) 14 mostrada na Fig. 1 é operada com pressão operacional de 2 bar. A uma pressão de 2 bar, a temperatura de evaporação da água é de 120,23 °C, de modo que a evaporação da água em

estado líquido presente na célula de combustível 14 seja evitada de modo confiável em todo o intervalo da temperatura operacional da célula de combustível 14.

O sistema de células de combustível 10 mostrado na Figura 1 ainda compreende um condensador 26 na forma de um resfriador externo. O condensador 26 serve para trazer de volta ao estado líquido a água que evaporou durante a operação da célula de combustível 14 com o objetivo de resfriar a célula de combustível 14. O condensador 26 é constituído, na região da carenagem ventral 12, pelo revestimento externo da aeronave, composta de liga de titânio, liga de alumínio, material composto de fibra-plástico ou alumínio reforçado de fibra de vidro. A água que evapora à medida em que flui através dos canais de resfriamento 17 do sistema de resfriamento por evaporação 16 emerge dos canais de resfriamento através de uma linha de saída do vapor 28, é distribuída no interior da carenagem ventral 12 e desloca-se até o interior da carenagem ventral do revestimento externo da aeronave sem a necessidade de tubulações. O vapor de água condensa-se na face interna do revestimento externo da aeronave e emite assim o calor da condensação liberado para o ambiente, via face externa do revestimento externo da aeronave.

Se a célula de combustível 14 gerar, por exemplo, 1 MW de energia elétrica, é necessário que 0,5 litro de água por segundo evapore durante a operação da célula de combustível 14, a fim de oferecer a retirada adequada do calor da reação da célula de combustível 14. O vapor de água se desloca pela linha de saída de vapor 28, através do interior da carenagem ventral 12 até a face interna do revestimento externo da aeronave onde se condensa. Assim, durante a operação da célula de combustível 14,

aproximadamente 0,5 litro por segundo de água condensada escorre até a face interna do revestimento externo da aeronave.

A água condensada que escorre para baixo até as faces internas do revestimento externo da aeronave é coletada na região de coleta da água condensada 30. A região de coleta da condensação 30 está localizada em uma região da parte do revestimento externo da aeronave que constitui o condensador 26, localizado próximo ao piso, de modo que a gravidade possa ser usada para coletar a água condensada. Na região de coleta da água condensada 30, a água condensada é transportada por meio de uma bomba 18, seja para dentro do tanque do meio de resfriamento 20 ou retornada aos canais de resfriamento 17 instalados nas placas bipolares da célula de combustível 14. Um circuito fechado do meio de resfriamento é portanto produzido.

Claramente, os componentes dispostos no interior da carenagem ventral 12 devem ser protegidos contra a umidade. Entretanto, uma vez que o vapor de água com temperatura de pelo menos 60 °C está sendo provido continuamente para o interior da carenagem ventral 12, através da linha de saída de vapor 28, durante a operação da célula de combustível 14, não há necessidade de que os componentes dispostos no interior da carenagem ventral 12 ser protegidos contra congelamento e frio durante o voo. A carenagem ventral 12 pode ser escolhida como compartimento para acomodar o sistema de célula de combustível 10. O vapor de água produzido pelo sistema de resfriamento por evaporação 16 pode ser usado para ventilação e/ou enchimento desse compartimento.

A fim de assegurar a operação confiável do sistema de células de combustível 10 mesmo se a retirada adequada, por meio do condensador 26, do calor da reação da célula de combustível armazenado na água como meio de resfriamento for considerada mais difícil devido às temperaturas ambiente altas ou no caso de condições de calma, o sistema de células de combustível 10 ainda compreende um dispositivo, instalado na forma de duas válvulas de descarga de vapor 32, 34, para a eliminação da água do meio de resfriamento para o ambiente. As válvulas de descarga de vapor 32, 34 são acionadas por meio de uma unidade de controle eletrônico 24. Para esse fim, a unidade de controle 24 recebe sinais do sensor de pressão 22 e/ou do sensor de temperatura 36 para medir a temperatura no interior da carenagem ventral 12. Se o sensor de pressão 22 e/ou o sensor de temperatura 36 indicarem que a pressão e/ou a temperatura na carenagem ventral 12 excede os valores máximos críticos predefinidos, as válvulas de descarga de vapor 32, 34 serão abertas pela unidade de controle eletrônico 24, de modo que o vapor de água liberado para o interior da carenagem ventral 12 através da linha de saída de vapor 28 assim como a energia térmica armazenada no vapor de água possam ser liberados do interior da carenagem ventral 12 para o ambiente.

A fim de assegurar o funcionamento correto do sistema de resfriamento por evaporação 16 mesmo no caso de falha do condensador 26, ou após a liberação do meio de resfriamento para o ambiente, é preciso tomar medidas para o fornecimento do meio de resfriamento para o sistema de resfriamento por evaporação 16, isto é, para o tanque do refrigerante 20 ou os canais de resfriamento 17, que independem da condensação do meio de resfriamento que evapora à medida em que flui através dos canais de resfriamento 17. Para esse fim, o sistema de células de combustível 10 tem um

dispositivo de partida da água do processo 35, que serve para receber a água produzida pela célula de combustível 14 durante a operação e direcioná-la até o tanque de refrigerante 20 do sistema de refrigeração por evaporação 16.

Finalmente, o sistema de células de combustível 10 possui um sistema de armazenagem 37 para armazenar a energia elétrica gerada durante a operação da célula de combustível 14. O sistema de armazenamento 37 serve para armazenar intermediariamente a energia em excesso gerada pela célula de combustível 14 e, se necessário, fornecê-la às cargas a bordo da aeronave alimentadas com energia elétrica pelo sistema de células de combustível 10. O sistema de armazenagem 37 pode compreender, por exemplo, um supercapacitador ou diversos supercapacitadores.

Em princípio, a carenagem ventral 12 também pode funcionar como um recipiente de pressão. Nesse caso, a pressão p_1 no interior da carenagem ventral 12 também pode estar acima da pressão ambiente p_A. Uma vez que o vapor do meio de resfriamento pode ser comprimido, o interior da carenagem ventral 12 pode então servir como um recipiente de armazenagem para absorver as flutuações da carga. Além disso, no caso de variação específica da pressão p_1 no interior da carenagem ventral 12 através do controle correspondente da bomba 18, e da entrada de calor através da célula de combustível 14 e das válvulas de descarga de vapor 32, 34 é possível influenciar a intensidade da transferência de calor na face interna da parede da carenagem ventral, uma vez que a transferência de calor depende da pressão. Entretanto, o design da carenagem ventral 12 como um recipiente de pressão necessita de um reforço correspondente da parede da carenagem ventral e, portanto, resulta em aumento de peso indesejado.

O sistema de células de combustível 10 mostrado na Figura 2 difere do sistema de células de combustível de acordo com a Figura 1, uma vez que naquele a célula de combustível 14 é concebida não como uma célula de combustível com membrana eletrolítica polimérica (PEM) de baixa temperatura, mas como uma célula de combustível com membrana eletrolítica polimérica (PEM) de alta temperatura. A célula de combustível com membrana eletrolítica polimérica (PEM) de alta temperatura 14 de acordo com a Fig. 2 normalmente é operada com temperaturas operacionais mais altas (até 200 °C) do que a célula de combustível com membrana eletrolítica polimérica (PEM) de baixa temperatura 14 mostrada na Fig. 1.

Além disso, a válvula 40, que em sua posição fechada delimita a zona de pressão compreendendo os canais de resfriamento 17 do sistema de resfriamento por evaporação 16, é instalada na linha de saída de vapor 28 que é conectada aos canais de resfriamento 17 do sistema de resfriamento por evaporação 16. Essa zona de pressão pode ser desenhada de modo a suportar o excesso de pressão de diversos bars. Por meio de uma bomba 18, portanto, a pressão p_2 maior do que a pressão p_1 na carenagem ventral 12 pode ser produzida na zona de pressão compreendendo os canais de resfriamento 17 do sistema de resfriamento por evaporação 16. Um sensor de pressão, não mostrado na Fig. 2 pode ser providenciado para medir a pressão dessa zona de pressão.

No sistema de células de combustível mostrado na Figura 2, a uma pressão nos canais de resfriamento 17 do sistema de resfriamento por evaporação 16 que corresponde a uma pressão ambiente baixa p_A, pode ocorrer superaquecimento e, consequentemente, superaquecimento do material e danos ao material nos canais de resfriamento 17 do sistema de

resfriamento por evaporação 16, devido à grande diferença entre a temperatura de evaporação relativamente baixa do meio de resfriamento a uma pressão baixa e à temperatura operacional relativamente alta da célula de combustível membrana eletrolítica polimérica (PEM) 14. A fim de evitar isso, a pressão nos canais de resfriamento 17 do sistema de resfriamento por evaporação 16 é especificamente aumentada por meio da bomba 18, a fim de elevar a temperatura de evaporação do meio de resfriamento de modo a se obter um comportamento de ebulição satisfatório do meio de resfriamento na temperatura de operação da célula de combustível com membrana eletrolítica polimérica (PEM) 14.

A unidade de controle 24 pode controlar a temperatura operacional da célula de combustível 14, na dependência da pressão dos canais de resfriamento 17 do sistema de resfriamento por evaporação 16, de modo que a evaporação da água flua pelos canais de resfriamento, devido ao calor da reação gerada pela célula de combustível 14 durante a operação, aconteça na região de vapor úmido. Como uma alternativa a isso, entretanto, a unidade de controle 24 também pode usar a temperatura operacional da célula de combustível 14 como uma variável de controle da pressão nos canais de resfriamento 17 do sistema de resfriamento por evaporação 16, na dependência da temperatura operacional da célula de combustível 14, de modo que a evaporação da água flua através dos canais de resfriamento, devido ao calor da reação gerada pela célula de combustível 14 durante a operação aconteça na região de vapor úmido. A operação do sistema de células de combustível 10 mostrada na Fig. 2 pode assim ser realizada independente da pressão ambiente p_A e, portanto, independente da altitude de voo da aeronave. Além disso, a variação da pressão dos canais de resfriamento 17 do sistema de resfriamento por evaporação 16 torna possível

controlar a transferência de calor nos canais de resfriamento 17. A interação entre a bomba 18, o calor da reação gerada pela célula de combustível 14 durante a operação, a válvula 40 e as válvulas de descarga de vapor 32, 34 é controlada pela unidade de controle 24 na dependência das variáveis determinadas meteorologicamente e com influência na operação, como por exemplo, altitude de voo, demanda de carga do sistema de energia elétrica a bordo, o estado da carga do sistema de armazenagem 37, etc. Em outros aspectos e a estrutura e o funcionamento do sistema de células de combustível 10 representados na Figura 2 corresponde à estrutura e ao funcionamento do arranjo de acordo com a Figura 1.

O sistema de células de combustível 10 ilustrado na Figura 3 difere do arranjo mostrado na Figura 2 uma vez que o sistema de células de combustível 10 compreende, não somente um condensador 26 para a eliminação do calor da reação da célula de combustível para o ambiente, mas também um dispositivo 42, na forma de uma unidade de degelo, para utilização do calor armazenado na água do meio de resfriamento. A unidade de degelo compreende duas linhas de vapor 44, 46, que se ramificam a partir da linha de saída de vapor 28, e através da quais o vapor da água emergindo dos canais de resfriamento 17 do sistema de resfriamento por evaporação 16 pode ser levado embora e dissipado em regiões da aeronave que devem ser descongeladas.

O vapor de água, à medida que flui através das linhas de vapor 44, 46, libera para as regiões da aeronave a serem descongeladas a energia térmica armazenada no vapor e então retornada, ainda em sua forma gasosa ou na forma líquida, para o interior da carenagem ventral 12. As válvulas de controle de pressão 48, 50, 52, 54 são instaladas

nas linhas de vapor 44, 46 com o propósito de controlar a pressão desejada nas linhas de vapor 44, 46. As válvulas de controle de pressão 48, 50, 52, 54 são controladas na dependência da pressão desejada p_2 nos canais de de resfriamento 17 do sistema de resfriamento por evaporação 16 e a pressão desejada p_3 nas linhas de vapor 44, 46. Entretanto, a pressão p_3 nas linhas de vapor 44, 46 não pode exceder a pressão p_2 nos canais de resfriamento 17 do sistema de resfriamento por evaporação 16. Uma variação da pressão nas linhas de vapor 44, 46 permite a transferência de calor nas linhas de vapor 44, 46 a serem controladas. A interação entre a bomba 18, o calor da reação gerada pela célula de combustível 14 durante a operação, a válvula 40, as válvulas de controle de pressão 48, 50, 52, 54 e as válvulas de descarga de vapor 32, 34 é controlada pela unidade de controle 24 na dependência das variáveis determinadas meteorologicamente e com influência na operação, como por exemplo, altitude de voo, demanda de carga do sistema de energia elétrica a bordo, o estado da carga do sistema de armazenagem 37, etc. e, se necessário, com a especificação de um degelo prioritário da estrutura principal.

Além disso, o sistema de células de combustível 10 ilustrado na Figura 3 compreende duas instalações de fornecimento 56 para prover vapor de água para a tubulação do gás de exaustão dos dois motores da aeronave 58. O vapor de água pode ser aspirado para dentro da tubulação do gás de exaustão dos motores da aeronave 58 através, por exemplo, de tubos Venturi. O fornecimento de vapor de água para as tubulações de gás de exaustão dos motores da aeronave 58 pode reduzir a emissão de poluentes dos motores 58. Em outros aspectos, a estrutura e o funcionamento do sistema de células de combustível 10

representado na Figura 3 corresponde à estrutura e ao funcionamento do arranjo de acordo com a Figura 2.

REIVINDICAÇÕES

1. **Sistema de células de combustível resfriado por evaporação** (10) compreendendo:

- uma célula de combustível (14) e

- sistema de resfriamento por evaporação (16), que está em contato térmico com a célula de combustível (14), a fim de que o calor gerado pela célula de combustível (14) durante a operação da célula (14) seja absorvido através da evaporação do meio de resfriamento e então retirado da célula de combustível (14),

caracterizado por um dispositivo (22) para detectar a pressão no sistema de resfriamento por evaporação (16), e por uma unidade de controle (24), adaptada para controlar a temperatura operacional da célula de combustível (14) na dependência dos sinais providos à unidade de controle (24) pelo dispositivo (22) para detectar a pressão no sistema de resfriamento por evaporação (16), de modo que o meio de resfriamento do sistema de resfriamento por evaporação (16) seja transferido do estado líquido para o estado gasoso da matéria pelo calor gerado pela célula de combustível (14) durante a operação da célula de combustível (14).

2. **Sistema de células de combustível** de acordo com a Reivindicação 1 **caracterizado** pelo fato de a unidade de controle (24) ser ajustada para controlar a temperatura operacional da célula de combustível (14) na dependência dos sinais providos à unidade de controle (24) pelo dispositivo (22) para detecção da pressão no sistema de resfriamento por evaporação (16), de modo que a evaporação do meio de resfriamento do sistema de resfriamento por

evaporação (16) devido ao calor gerado pela célula de combustível (14) durante a operação da célula de combustível (14) ocorra na região de vapor úmido do meio de resfriamento.

3. **Sistema de células de combustível** de acordo com a Reivindicação 1 ou 2, **caracterizado** por um sistema de geração de pressão operacional para a célula de combustível (25), adaptado para gerar a pressão desejada na célula de combustível (14), e por uma unidade de controle (24) para controlar o sistema gerando pressão operacional para a célula de combustível (25).

4. **Sistema de células de combustível** de acordo com a Reivindicação 3, **caracterizado** pelo fato de a unidade de controle (24) para controlar o sistema gerando pressão operacional para a célula de combustível (25) ser adaptada para controlar o sistema gerando pressão operacional para a célula de combustível (25) de modo que seja gerada na célula de combustível (14) pressão segundo a qual seja evitada a evaporação indesejada de substâncias e/ou de misturas de substâncias geralmente presentes em forma de líquido na célula de combustível (14).

5. **Sistema de células de combustível** de acordo com a Reivindicação 3 ou 4, **caracterizado** pelo fato de a unidade de controle (24) para controlar o sistema gerando pressão operacional à célula de combustível (25) ser adaptada para controlar a pressão na célula de combustível (14) na dependência da temperatura operacional da célula de combustível (14) e/ou na dependência dos sinais do dispositivo (22) para detectar a pressão no sistema de resfriamento por evaporação (16).

6. **Sistema de células de combustível** de acordo com qualquer uma das reivindicações precedentes, **caracterizado** pelo fato de o sistema de resfriamento por evaporação (16) compreender um condensador (26) para condensar o meio de resfriamento que evapora durante a operação da célula de combustível (14) com o objetivo de resfriar a célula (14).

7. **Sistema de células de combustível** de acordo com a Reivindicação 6, **caracterizado** pelo fato de o condensador (26) funcionar na forma de um resfriador do revestimento externo.

8. **Sistema de células de combustível** de acordo com qualquer uma das reivindicações precedentes, **caracterizado** por ter pelo menos um dispositivo (42) para utilização do calor armazenado no meio de resfriamento.

9. **Sistema de células de combustível** de acordo com a Reivindicação 8, **caracterizado** pelo fato de o dispositivo (42) para utilização do calor armazenado no meio de resfriamento ser um meio de aquecimento do vapor, uma unidade de dessalinização de água ou uma unidade de degelo da aeronave.

10. **Sistema de células de combustível** de acordo com qualquer uma das reivindicações precedentes, **caracterizado** por um dispositivo (32, 34) para remover o meio de resfriamento para o ambiente.

11. **Método para operar um sistema de células de combustível resfriado por evaporação** (10) compreendendo uma célula de combustível (14) e um sistema de resfriamento por evaporação (16), que está em contato térmico com a célula de combustível (14), a fim de que o calor gerado pela célula

de combustível (14) durante a operação da célula (14) seja absorvido através da evaporação do meio de resfriamento e retirado da célula de combustível (14), **caracterizado** por duas etapas:

- detectar a pressão no sistema de resfriamento por evaporação (16) por meio de um dispositivo de detecção de pressão (22) e

- controlar a temperatura operacional da célula de combustível (14) por meio de uma unidade de controle (24) na dependência dos sinais providos à unidade de controle (24) pelo dispositivo de detecção de pressão (22), de modo que o meio de resfriamento do sistema de resfriamento por evaporação (16) seja transferido do estado líquido para o estado gasoso da matéria devido ao calor gerado pela célula (14) durante a operação da célula de combustível (14).

12. **Método** de acordo com a Reivindicação 11, **caracterizado** pelo fato de a temperatura operacional da célula de combustível (14) ser controlada, na dependência dos sinais providos à unidade de controle (24) pelo dispositivo de detecção de pressão (22), de modo que a evaporação do meio de resfriamento do sistema de resfriamento por evaporação (16) devido ao calor gerado pela célula (14) durante a operação da célula de combustível (14) ocorra na região de vapor úmido do meio de resfriamento.

13. **Método** de acordo com as Reivindicações 11 ou 12, **caracterizado** pelo fato de a pressão desejada ser gerada na célula de combustível (14) por meio de um sistema de geração de pressão para a célula de combustível (25).

14. **Método** de acordo com a Reivindicação 13, **caracterizado** pelo fato de que o sistema gerando pressão

operacional para a célula de combustível (25), por meio de uma unidade de controle (24) para controlar o sistema gerando pressão operacional para a célula de combustível (25), ser controlado de modo que seja gerada na célula de combustível (14) uma pressão segundo a qual seja evitada a evaporação indesejada de substâncias e/ou misturas de substâncias presentes na forma de líquido na célula de combustível (14).

15. **Método** de acordo com as Reivindicações 11 a 14, **caracterizado** pelo fato de a unidade de controle (24) para controlar o sistema gerando pressão operacional para a célula de combustível (25) controlar a pressão na célula (14) na dependência da temperatura operacional da célula de combustível (14) e/ou na dependência dos sinais do dispositivo de detecção de pressão (22).

16. **Método** de acordo com as Reivindicações 11 a 15, **caracterizado** pelo fato de o meio de resfriamento que evapora durante a operação da célula de combustível (14) com o objetivo de resfriar a célula de combustível (14) ser condensado em um condensador (26).

17. **Método** de acordo com a Reivindicação 16, **caracterizado** pelo fato de o meio de resfriamento ser condensado por um condensador (26) na forma de um resfriador do revestimento externo.

18. **Método** de acordo com as Reivindicações 11 a 17, **caracterizado** pelo fato de o calor armazenado no meio de resfriamento ser fornecimento a pelo menos um dispositivo (42) para utilização desse calor.

19. **Método** de acordo com a Reivindicação 18, **caracterizado** pelo fato de o calor armazenado no meio de resfriamento ser provido ao dispositivo (42) para a

utilização desse calor, cujo dispositivo é em forma de um meio de aquecimento de vapor, unidade de dessalinização da água ou unidade de degelo de uma aeronave.

20. **Método** de acordo com as Reivindicações 11 a 19, **caracterizado** pelo fato de o meio de resfriamento ser removido para o ambiente.

21. **Aeronave caracterizada** por ser equipada com sistema de célula de combustível (10) de acordo com qualquer das Reivindicações 1 a 10.

22. **Aeronave** de acordo com a Reivindicação 21, **caracterizada** pelo fato da célula de combustível (10) ser instalada em uma região não pressurizada da aeronave.

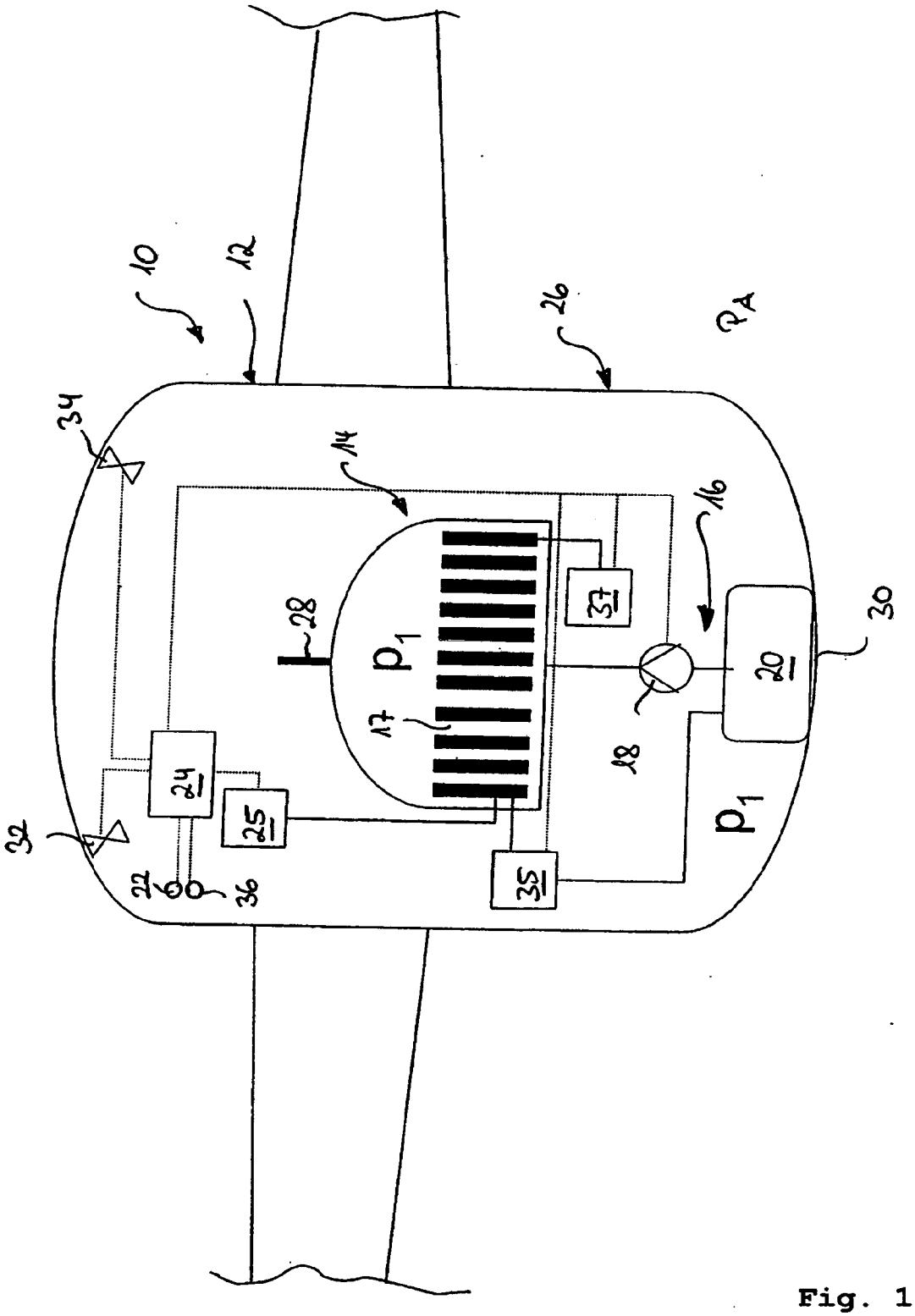

Fig. 1

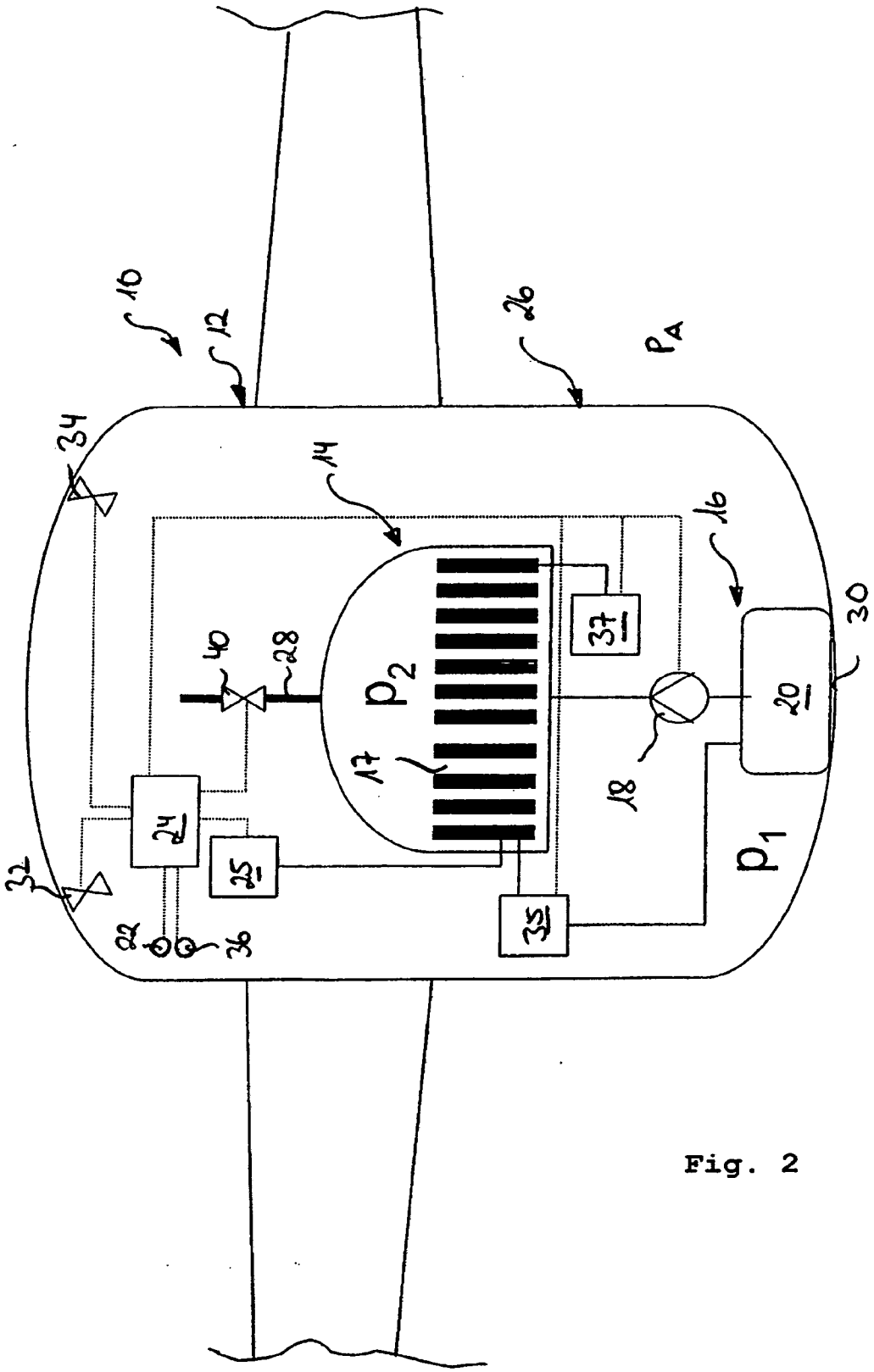

Fig. 2

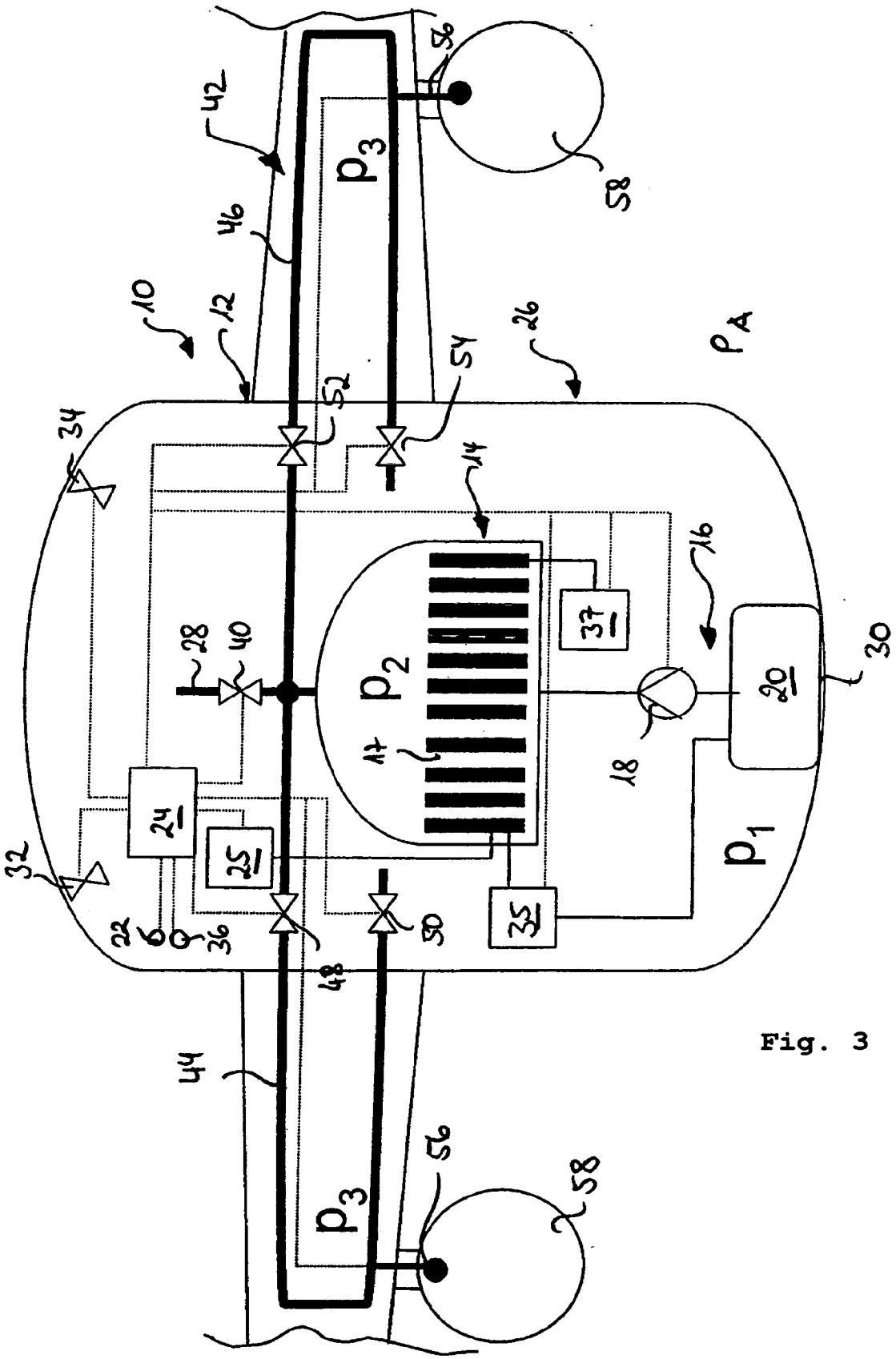
10
12
14
16
17
18
20
22
24
25
26
28
30
32
34
35
36
37
40
42
44
46
48
50
52
54
56
58
p_1
p_2
p_3
p_3
p_A

Fig. 3

RESUMO

SISTEMA DE CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL RESFRIADO POR EVAPORAÇÃO, AERONAVE E MÉTODO PARA OPERAR UM SISTEMA DE CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL RESFRIADO POR EVAPORAÇÃO

Um sistema de células de combustível (10) compreende uma célula de combustível (14) e um sistema de resfriamento por evaporação (16), que está em contato térmico com a célula de combustível (14), a fim, de que o calor gerado pela célula de combustível (14) durante a operação da célula (14) seja absorvido através da evaporação do meio de resfriamento e retirado da célula de combustível (14). O sistema de células de combustível (10) ainda compreende um dispositivo (22) para detectar a pressão no sistema de resfriamento por evaporação (16). A unidade de controle (24) é adaptada para controlar a temperatura operacional da célula de combustível (14) na dependência dos sinais providos à unidade de controle (24) pelo dispositivo (22) para a detecção da pressão no sistema de resfriamento por evaporação (16) de modo que o meio de resfriamento do sistema de resfriamento por evaporação (16) seja transferido do estado líquido para o estado gasoso da matéria pelo calor gerado pela célula (14) durante a operação da célula de combustível (14).