



República Federativa do Brasil
Ministério da Economia
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(21) PI 0907973-4 A2



(22) Data do Depósito: 02/03/2009

(43) Data da Publicação Nacional: 10/12/2009

(54) Título: USINA DE ENERGIA HÍBRIDA

(51) Int. Cl.: F01K 7/34.

(30) Prioridade Unionista: 28/02/2008 US 61/032233.

(71) Depositante(es): ROGER FERGUSON.

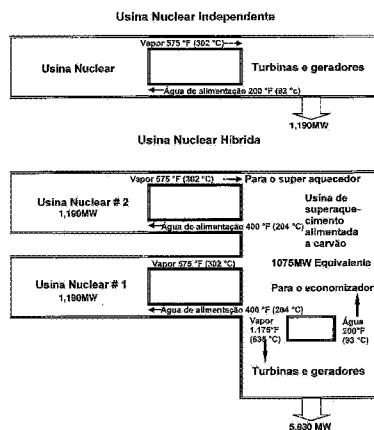
(72) Inventor(es): ROGER FERGUSON.

(86) Pedido PCT: PCT US2009035630 de 02/03/2009

(87) Publicação PCT: WO 2009/148649 de 10/12/2009

(85) Data da Fase Nacional: 30/08/2010

(57) **Resumo:** "USINA DE ENERGIA HÍBRIDA" Uma usina de energia híbrida é descrita em que um reator nuclear de água pressurizada ou uma usina de energia alimentada a biomassa que têm uma temperatura operacional relativamente baixa como tal, é combinada com uma usina de energia a carvão ou outro combustível fóssil que tem uma temperatura operacional mais alta. Vapor proveniente da primeira usina é superaquecido na segunda usina de energia para proporcionar uma usina híbrida com eficiências melhoradas e emissões mais baixas.



“USINA DE ENERGIA HÍBRIDA”

Fundamentos da Invenção

A presente invenção diz respeito no geral a usinas de energia nuclear e, mais especificamente, a uma usina de energia híbrida que combina uma usina de energia nuclear ou uma usina de energia alimentada a biomassa com uma usina de energia alimentada a combustível fóssil para proporcionar maiores eficiências e emissões mais baixas.

A grande maioria da produção de energia no mundo vem de uma das quatro fontes não renováveis: carvão, gás, petróleo ou nuclear. De acordo com os dados mais recentes (CY 2006) da International Energy Agency, 85 % de eletricidade foram gerados de fonte nuclear (23,2 %) e de combustíveis (61,8 %), ao passo que de hidroelétrica foram 13,4 % e de outras fontes renováveis foi 1,6 %. Cada uma dessas fontes tem suas vantagens e desvantagens. Dados apenas dos Estados Unidos do US Department of Energy dividem os combustíveis como carvão 49,7 %, natural gás 18,7 % e petróleo 3 %. Petróleo é praticamente sempre reservado para transporte e não é normalmente usado em geração de energia elétrica. Gás natural é usado, mas, em virtude de seu custo, ele é normalmente usado somente para capacidade de surto em período de pico de energia. Isto deixa usinas nucleares e alimentadas a carvão prover a carga básica e a maioria da eletricidade no mundo.

Carvão atualmente provê a ampla maioria da capacidade de geração elétrica da carga básica e cerca da metade de toda a capacidade, mas seu uso está passando por grande pressão por problemas de poluição e especialmente pelas emissões de "gás de efeito estufa" dióxido de carbono. O uso nuclear tem sido limitado pelos altos custos de produção, amplamente impulsionados pela eficiência térmica muito baixa de seu ciclo de vapor que exige um reator muito grande em relação à quantidade de eletricidade que pode ser gerada por causa de seu vapor saturado de baixa temperatura.

Biomassa tem sido investigada, mas, em virtude do alto teor de água e baixa densidade de energia não é possível atingir temperaturas de combustão equiparáveis à combustão do carvão. Isto resulta em menores eficiências de vapor saturado de baixa temperatura, muito parecido com aquelas que limitam a energia nuclear.

Aplicações atuais para abordagem de problemas ambientais e de eficiência centralizam em instalações de múltiplos usos. Essas instalações usam uma única fonte de energia para atender a diversas necessidades, muitas pela exploração de sinergias entre controle de emissões e energia residual ou produtos de combustão não utilizados. Esta patente propõe uma abordagem mais efetiva para instalação de múltiplos usos, usando mais de uma fonte de energia em uma usina de energia híbrida para usar as vantagens das tecnologias separadas para abordar as desvantagens secundárias. Uma usina híbrida combinando as tecnologias existentes de usinas de energia nuclear ou usinas de energia de biomassa interconectadas a uma usina de carvão modificada resultaria em um processo térmico total que teria um ciclo térmico bastante melhorado, aumentando assim saída elétrica praticamente no dobro dos mesmos conjuntos de entradas, comparado com configurações 'independentes', dessa forma reduzindo drasticamente o custo, poluição e emissões de dióxido de carbono em relação às duas usinas independentes desses projetos.

Usinas de combustível fóssil alimentadas a carvão geralmente operam a níveis máximos de eficiência térmica, com a saída elétrica para aquecer frações de entrada da unidade na faixa de 30-45 %. Isto é conseguido por meio de um ciclo de vapor de três etapas. Primeiro, a água de alimentação da caldeira é pré-aquecida com o vapor de extração de gases de combustão efluentes de baixa temperatura para aumentar a temperatura do condensador até aproximadamente 450 – 500°F (232 - 260 °C). Uma vez que a água de alimentação é adicionada à caldeira, ela é aquecida e convertida em vapor

saturado a temperaturas de 500 – 600°F (260 - 316 °C). Uma vez que o vapor é formado na caldeira, ele passa através de tubos de superaquecimento na seção mais quente da coluna de gás efluente onde o vapor tem a temperatura aumentada para 1.100°F - 1.200°F (593 - 650 °C). Este vapor superaquecido então passa através de uma série de turbinas de pressão alta, intermediária e baixa, onde energia é extraída e eletricidade é produzida por geradores mecanicamente anexados nas turbinas. Uma etapa final em um processo de usina alimentada a carvão para geração de eletricidade é que o ar que está sendo arrastado para a fornalha passa através dos gases efluentes de temperatura mais baixa para pré-aquecer o ar que chega e aumentar a temperatura de combustão.

Uma usina alimentada a carvão é muito eficiente, mas, mesmo neste tipo de usina, a maior parte da energia de combustão é perdida. Dos 1.512 BTUs (1595,2 kJ) necessários para aquecer uma libra (0,45 kg) de água de alimentação ambiente 140°F (60°C) a uma libra (0,45 kg) de vapor superaquecido a 1.200°F (650°C), vapor a 1.000 psi (6,89 MPa), 1.014 BTUs (1069,8 kJ) ou 67 % da energia de entrada vão para a conversão da água em vapor e não podem ser recuperados como saída elétrica. Aproximadamente outros 40 BTUs (42,2 kJ) (cerca de 3 % do total) são também perdidos de forma irrecuperável em cada ciclo. Os condensadores à jusante das turbinas operam a um vácuo, de forma que o vapor não reverterá em água no ponto de ebulição normal 212°F (100°C), mas a uma temperatura de 140°F (60°C). Entretanto, esta água continuará resfriar até a temperatura do rio ou lago que está sendo usado como o dissipador de calor, e este calor terá que ser substituído no ciclo seguinte. Energia útil (para conversão em eletricidade) pode ser extraída do vapor de 1.200°F (650°C) em vapor a 140°F (60°C). Isto significa que menos que uma a cada duas toneladas de dióxido de carbono que uma usina alimentada a carvão emite na atmosfera jamais é usada para produzir eletricidade.

O uso de biomassa no lugar de carvão em uma caldeira exige uma configuração muito parecida com a de uma caldeira de carvão pulverizado, embora a operação da usina seja alterada. Embora exista uma emissão de carbono “zero líquido” dessas instalações, biomassa tem uma menor densidade de energia e temperatura de chama do que carvão quando queimado nas mesmas condições. Isto reduz a quantidade de energia que pode ser transferida para a água de alimentação, reduzindo a temperatura do vapor normalmente para vapor com não mais de 850 F (454 °C). Em virtude de uma menor temperatura operacional, uma menor pressão operacional é usada para aumentar a eficiência do ciclo, e assim uma pressão operacional de 850 psi (5,9 MPa) é considerada. Isto é uma adição de calor de 1.317 BTUs (1395,5 kJ) por libra (0,45 kg) na água de alimentação ambiente, dos quais cerca de 1.014 BTUs (1069,8 kJ) são perdidos por causa da mudança de fase de vapor para água e outras perdas. Isto faz com que 77 % da energia não fiquem disponíveis para produzir eletricidade.

A tecnologia de ponta das usinas de energia nuclear atuais (incluindo reatores de água leve pressurizada, reatores de água fervente, e projetos de água pesada CANDU) é extremamente estável, segura e isenta de emissão. Sua saída elétrica é extremamente restrita, entretanto, pela necessidade de limitar a máxima temperatura no núcleo do reator em aproximadamente 600°F (316°C) (reatores de água fervente operam a menores temperaturas do núcleo de cerca de 540 – 550°F (555 - 561°C)) para impedir perda de refrigerante e dano nos elementos de combustível. Isto resulta em uma usina com reator bastante superdimensionado e em perda de uma alta porcentagem dos BTUs (1,06 kJ) gerado. Isto resulta em poluição térmica excessiva - o aquecimento localizado das massas de água que servem como dissipadores de calor para os condensadores das unidades de turbina a vapor.

A usina de energia nuclear tem somente duas ou três etapas do

ciclo de vapor. Essencialmente não é adicionado nenhum superaquecimento ao ciclo de vapor, já que a água no gerador de vapor já está em contato com a água mais quente que passa através do reator. Existem métodos de pré-aquecer a água de alimentação que entra no gerador de vapor, mas isto é feito
5 somente com vapor de extração, exigindo uma maior vazão de vapor para a mesma saída elétrica. A água refrigerante primária em contato com o núcleo do reator aquece até 600°F (316°C) antes de ir para o gerador de vapor (a mesma função da caldeira na usina alimentada a carvão) e converter água secundária em vapor a cerca de 575°F (302°C) com uma pressão operacional
10 de 400 psi (2,76 MPa) para aumentar a eficiência. Isto resulta em um ciclo de vapor onde somente 1.199 BTUs (1265 kJ) podem ser adicionados a cada libra (0,45 kg) de vapor, também os mesmos 1.014 BTUs (1069,8 kJ) são perdidos na mudança da água em/de vapor, de forma que 85 % da entrada de energia térmica jamais podem ser usados na criação de energia elétrica.
15 Combinando-se as maiores temperaturas obteníveis em um forno de carvão com o vapor de baixa temperatura de uma instalação nuclear ou de biomassa, uma maior eficiência pode ser realizada com menos emissões, comparadas com qualquer projeto sozinho.

Uma pesquisa da tecnologia anterior foi conduzida e as
20 patentes relacionadas seguintes foram descobertas. Nenhuma dessas patentes preceitua ou sugere nenhum método ou dispositivo que corresponde a esta invenção.

A patente U.S. 3.575.002 de Vuia foi de um projeto que roteava o vapor saturado de uma usina de energia nuclear padrão através da
25 seção do superaquecedor de um forno de combustível fóssil em uma usina de energia convencional. Embora seja uma solução viável, a maior parte da entrada de energia no sistema é de carvão, já que esta é uma usina de energia de fóssil combustível em escala comercial com uma seção do superaquecedor ligeiramente maior no forno. Este projeto de Vuia propõe um desenho com

duas usinas de energia independentes nas quais a instalação nuclear é assistida pela usina de carvão. Ao contrário, esta invenção propõe uma única usina de energia híbrida integrada que usa a energia do carvão somente para adicionar superaquecimento ao vapor, diminuindo a quantidade de carvão usado para gerar a mesma quantidade de energia.

5 A patente U.S. 4.530.814 de Schluderberg usa a energia térmica de uma usina alimentada a fóssil para produzir vapor. Este vapor é então roteado através de uma unidade de separador/reaquecedor de umidade para adicionar vapor que já foi expandido através de uma turbina de alta
10 pressão. Este desenho usa o combustível fóssil exclusivamente para adicionar superaquecimento ao vapor do processo nuclear, mas só faz isto indiretamente e somente depois que a pressão de vapor tiver sido reduzida. Neste desenho, o vapor da usina de energia escoar novamente, permanece separado e a usina de carvão somente provê um reaquecimento para assistir a usina de energia
15 nuclear, e não é disponível nenhuma energia para pré-aquecer a água de alimentação.

A patente U.S. 5.361.377 de Miller descreve o uso de superaquecedores antes da turbina de alta pressão e na seção do separador/reaquecedor de umidade entre turbinas. O superaquecedor descrito
20 pode receber energia tanto da combustão de combustível fóssil quanto de vapor de uma usina de combustível fóssil adjacente. A descrição não é clara de como o superaquecedor poderia usar tanto vapor quanto combustível fóssil. O desenho também não consegue fazer uso total dos gases combustíveis exaustos para pré-aquecer a água de alimentação e o ar de
25 combustão, indicando que é uma unidade de queimador pequena e não um forno de queima de carvão de tamanho normal. Parece que este desenho diz respeito somente a um superaquecedor aquecido externamente em uma usina de energia nuclear.

A patente U.S. 5.457.721 de Tsiklauri usa um sistema de ciclo

combinado com os gases de exaustão quentes de uma unidade de turbina de gás alimentada com gás natural que aquece água de alimentação e produz vapor. O vapor deste gerador de vapor de recuperação de calor é então usado para superaquecer o vapor de um gerador de vapor de energia nuclear. Depois
5 que o vapor é expandido na turbina de alta pressão, as duas correntes de fluido são misturadas e aumentadas por mais vapor do gerador de vapor de recuperação de calor e usadas na turbina de baixa pressão. Este uso de um gerador de vapor de recuperação de calor diminui a eficiência do sistema, oposto ao uso de toda a energia para aumentar o superaquecimento. A mistura
10 do vapor de ambas as fontes diminui esta perda de eficiência, mas exigiria controles mais rigorosos da composição química da água.

A patente U.S. 6.244.033 de Wylie usa a exaustão de uma unidade de turbina de gás alimentada com gás natural para superaquecer diretamente o vapor de um gerador de vapor nuclear. Ela também faz uso dos
15 gases de exaustão para pré-aquecer a água de alimentação e provê uma unidade de queima suplementar para garantir que existe energia suficiente para prover o superaquecimento e pré-aquecimento. Notável nesta patente é que ela especifica que o superaquecimento e o pré-aquecimento podem ser adicionados pelo uso de calor de gás natural adicional sozinho, se a unidade
20 de turbina a gás não estiver em operação. Não existe provisão para o uso de carvão nesta patente, mas somente de gás natural mais caro.

Sumário da Invenção

A presente invenção, em uma modalidade preferida, toma a saída de vapor saturado de uma usina de energia nuclear e passa-a através de
25 uma caldeira de usina alimentada a carvão modificada, e então o vapor superaquecido produzido da usina de carvão é enviado para as turbinas onde a energia é extraída e convertida em eletricidade. A usina de energia nuclear seria alterada apenas minimamente em relação aos desenhos existentes, a única revisão no desenho seria o aumento do tamanho dos geradores de vapor

em cerca de 15 % em relação ao tamanho do núcleo do reator, já que a água de alimentação seria pré-aquecida a cerca de 450°F (232°C) antes de entrar no gerador de vapor, de forma que o calor do reator seria usado quase exclusivamente na conversão da água em vapor, e não tanto no aquecimento da água quanto na sua conversão em vapor. Em uma modalidade alternativa, uma usina de energia alimentada com biomassa toma o lugar da usina de energia nuclear para prover vapor à usina alimentada a carvão modificada.

Embora esta patente seja aplicável a qualquer forno alimentado a carvão, um desenho de carvão pulverizado é descrito aqui para mostrar a utilidade desta invenção. A unidade alimentada a carvão seria modificada mais significativamente, já que a seção da caldeira a vapor (a seção de temperatura intermediária do desenho atual) seria eliminada. A seção do tubo de superaquecimento da unidade seria bastante expandida para aceitar o vapor saturado do reator e aumentar bastante a sua temperatura antes enviar o vapor superaquecido para fora das turbinas. Na fornalha, os tubos onde passam gases efluentes acima de 800°F (427°C) seriam usados para superaquecer o vapor produzido no reator, enquanto os tubos na área onde gases efluentes estão abaixo de 800°F (427°C) seriam usados para pré-aquecer água de alimentação. Considerando que a temperatura máxima na fornalha é cerca de 2.000°F (1.366°C), cerca de 75 % do calor iriam para o superaquecimento de vapor saturado a 575°F (302°C) para vapor superaquecido a 1.200°F (650°C), ao passo que os demais 25 % iriam no sentido do pré-aquecimento da água de alimentação antes de entrar no reator. Isto resultaria em uma usina alimentada a carvão com a metade de seu tamanho original e um quarto de suas emissões originais de dióxido de carbono para a mesma saída elétrica. Construímos nossos modelos econômicos com a suposição de que a solução ideal será construir a fornalha para operar em torno de 2.000°F (1.366°C) e usar de materiais normais no desenho dos tubos de superaquecimento. Percebemos que existe uma

abordagem alternativa de usar materiais mais exóticos e de custo mais alto na fabricação dos tubos e aumentar a eficiência operacional por meio de temperaturas mais altas para substituir os materiais de custo mais alto. Pretendemos que esta patente cubra ambas as abordagens.

5 Quando o lado nuclear é levando em consideração, a eletricidade produzida para qualquer dado tamanho de reator aumentaria em pelo menos 3 vezes sua saída independente. Isto seria o resultado do aumento de 15 % no vapor saturado gerado em decorrência do pré-aquecimento adicional da água de alimentação no economizador da usina de combustível, bem como a adição de superaquecimento do carvão. O superaquecimento do vapor na unidade alimentada a carvão adicionaria 316 BTUs (333,4 kJ) recuperáveis aos 181 que existiam quando o vapor deixado na instalação nuclear, para um aumento de 175 %. A soma de 115 % do volume de vapor saturado vezes os 275 % de adição de superaquecimento resulta em 3,16 vezes a produção de energia. Um outro fator é que turbinas que utilizam vapor superaquecido são mais eficientes do que aquelas que operam com vapor saturado, de forma que um aumento adicional na saída elétrica pode ser obtido.

20 Usinas de energia nuclear têm historicamente sido construídas com múltiplas unidades em sítios individuais. Dos 63 sítios ativos de estações de energia nuclear nos Estados Unidos, 37 têm ou tiveram dois ou três reatores, embora somente 26 tenham sido construídos como sítios de reatores individuais. No Canadá, existem dois sítios com quatro reatores ativos (cada qual planejado para oito) junto com um sítio com dois reatores e um único sítio isolado com uma usina de energia. A maioria das usinas é construída em proximidade imediata com um lago ou rio para prover uma fonte de resfriamento para os condensadores. Existe também a necessidade de acesso ferroviário para prover um meio econômico de prover o suprimento de carvão para a porção de alimentada a combustível fóssil da usina. Essas necessidades

não são restritivas, já que a maioria das linhas ferroviárias segue leitos de rios para evitar curvas significativas.

Benefícios similares podem ser conseguidos em usinas de energia alimentadas a biomassa, com 194 BTUs (204,7 kJ) adicionais de energia recuperável por libra (0,45 kg) de água de alimentação. Isto seria combinado com turbinas de vapor de maior eficiência para dar um aumento de eficiência acima de 55 %. Além do mais, este desenho exigiria menos biomassa para a geração da mesma quantidade de eletricidade, permitindo que a maior parte dessas usinas de energia seja posta em serviço para uma dada fonte de combustível.

Descrição Resumida dos Desenhos

A figura 1a é um diagrama esquemático mostrando a água de alimentação e temperaturas do vapor de um reator nuclear independente exemplar, e a figura 1b é um diagrama esquemático de uma usina de energia híbrida da presente invenção em que o reator da figura 1a foi combinado com uma usina alimentada a carvão.

A figura 2a é um diagrama esquemático dos elementos principais de uma usina de energia nuclear independente exemplar, e a figura 2b é um diagrama esquemático dos elementos principais de uma usina alimentada a carvão de energia independente exemplar.

A figura 3 é um diagrama esquemático correspondente à figura 2, em que as usinas de energia foram modificadas e interconectadas para formar uma usina de energia híbrida da presente invenção.

A figura 4 é um gráfico do teor de energia do vapor para a usina de energia descrita neste relatório. Os valores de entalpia são mostrados para 400 psi (2,76 MPa); o teor de energia é aumentado adicionalmente com o uso de sistemas de maior pressão. Esta figura mostra a energia útil adicional que pode ser extraída do vapor usando a presente invenção.

A figura 5 é uma tabela de estatística comparando a saída

elétrica anual, custos anuais e emissões anuais de dois reatores nucleares independentes e uma usina alimentada a carvão independente versus uma usina de energia híbrida da presente invenção em que as duas usinas nucleares foram interconectadas na usina alimentada a carvão de acordo com a presente invenção.

A figura 6 é um diagrama esquemático de um reator nuclear a água pulverizada independente exemplar.

A figura 7 é um diagrama esquemático correspondente à figura 6 na qual o reator de água pressurizada foi interconectado a uma usina alimentada a carvão de acordo com a presente invenção.

A figura 8 é um gráfico que compara os três exemplos econômicos apresentados neste pedido e mostra uma surpreendente consistência de melhorias da eficiência inerentes na presente invenção.

Descrição da Invenção

Exemplo 1 - Esquema da usina de energia híbrida

Neste exemplo, um reator nuclear de água pressurizada dedicado (figuras 1a e 2a) é interconectado a uma usina de energia alimentada a carvão independente com a seção de fervura substituída por um superaquecedor estendido (figura 2b), formando a usina de energia híbrida representada na figura 1b e na figura 3.

Exemplo 2 - Estimativa Geral de Custo e Reduções de Emissões

Uma estimativa geral do custo e reduções de emissões pode ser feita examinando a adição de um forno de carvão às duas usinas de energia nuclear existentes. Considere duas usinas de energia nuclear de 1.190 MW que são interconectadas a uma usina de energia alimentada a carvão dimensionada para fornecer 1.075 MW se ela tivesse sido projetada como uma unidade independente. Seguindo o gráfico da figura 4, e as suposições providas nas figuras, as estatísticas de produção anual de energia, custos anuais de operação e emissões anuais são apresentados na figura 5. Pode-se

ver que, quando interconectadas de acordo com a presente invenção, essas três unidades, que teriam uma capacidade de 3.455 MW se projetadas e operadas como unidades independentes, teriam uma capacidade de 5.930 MW. Isto resulta em uma redução de cerca de 36 % no custo por kilowatt-hora de eletricidade produzida e uma redução nas emissões de carbono de cerca de 80 %.

Exemplo 3 - Estimativa Detalhada de Custo e Redução de Emissões

Para mostrar os benefícios econômicos e ambientais deste conceito, este exemplo fundamenta-se em instalações existentes. Para esta comparação, um modelo de linha de base para uma usina de energia de reator de água pressurizada foi modelada para permitir comparação. Dados e parâmetros operacionais da Wolf Creek Nuclear Generating Station [Black & Veatch] são usados para desenvolver o modelo. Esta comparação pode também ser estendida a uma instalação alimentada a biomassa e carvão com parâmetros apropriados.

A Wolf Creek Nuclear Generating Station usada é uma usina de energia de 1.190 MW em Burlington, KS. O projeto é uma usina de reator de água pressurizada (PWR) de 4 circuitos da Westinghouse. Entre outros detalhes, um separador/reaquecedor de umidade e sete aquecedores de água de alimentação fechados são usados no sistema de vapor secundário para aumentar a eficiência. A usina opera como um ciclo de Rankine de vapor saturado, e assim não existe superaquecimento do vapor dos geradores de vapor.

Durante estado de operação estacionário, o reator é usado para aquecer o refrigerante primário, que, por sua vez, é usado para aquecer o refrigerante secundário, fazendo com que ele ferva. A circulação em cada circuito de refrigerante primário é provida por uma bomba de refrigerante do reator. O vapor saturado produzido nas unidades geradoras de vapor é

entregue através da tubulação a uma turbina de pressão intermediária, onde um certo trabalho é produzido. Depois de sair da turbina de pressão intermediária, o vapor passa através de um separador de umidade para secar o vapor para impedir dano na turbina. O vapor passa então através de uma

5 turbina de baixa pressão, onde o restante da energia disponível é extraída. Um condensador na saída da turbina de baixa pressão condensa o vapor (agora denominado água de alimentação) de forma que ele possa ser bombeado de volta para o gerador de vapor usando bombas de condensado e bombas de alimentação. Este vapor condensado passa através de sete aquecedores de

10 água de alimentação fechados (CFWH) no caminho de volta para o gerador de vapor: quatro entre as bombas de condensado e bombas de alimentação e três entre as bombas de alimentação e o gerador de vapor. Esses CFWHs são trocadores de calor que usam vapor extraído de diferentes estágios das turbinas para pré-aquecer a água de alimentação antes de ela retornar para o

15 gerador de vapor. Isto redireciona parte da energia de volta para o gerador de vapor, em vez de rejeitá-la no condensador, aumentando assim a eficiência. Os CFWHs antes das bombas de alimentação drenam para o condensador, enquanto aqueles depois das bombas de alimentação drenam para um tanque comum, do qual eles são retornados para o sistema na entrada das bombas de

20 alimentação usando uma bomba de dreno separada.

Algumas suposições simplificadas foram feitas no modelamento desta usina. O sistema é modelado em uma condição de estado estacionário. A pressão do condensador é considerada 1 psia (6,89 kPa abs.), perdas de pressão na tubulação de 1 % foram aplicadas através do sistema, e

25 foi usada uma pressão de 2 % através do separador de umidade. Além do mais, 15 % da energia produzida foram considerados uma perda para levar em conta perdas do gerador e cargas parasitas da usina de energia, tais como bombas de circulação da água de resfriamento, sistema de ar de alta pressão e instalações de tratamento de água. Como essas suposições são aplicadas a

ambas as usinas de energia, não deve haver introdução de erros de tendenciosidade.

Opção 1 - Manter a saída elétrica constante

Convertida em BTUs (1,06 kJ) por hora, a saída elétrica de 1,19 MW é $4,06 \times 10^9$ BTU ($428,3 \times 10^9$ kJ)/h. Para gerar esta saída elétrica, é necessário um reator produção de energia de $1,375 \times 10^{10}$ BTU ($1,45 \times 10^{10}$ kJ)/h, que dá uma eficiência da usina de 29,5 %. A figura 6 dá um diagrama esquemático deste sistema. Por questão de simplificação, somente um circuito está mostrado na figura.

O modelo da instalação híbrida foi desenvolvido a partir do modelo de Wolf Creek Generating Station. As principais alterações foram a inserção de um forno alimentado a carvão para agir como um superaquecedor e economizador, e a eliminação da unidade de separação de umidade. O separador de umidade é desnecessário, já que vapor deve manter uma quantidade suficiente de superaquecimento na maior parte das turbinas de vapor. Essas alterações podem ser vistas no diagrama esquemático da usina de energia híbrida (A figura 7).

Algumas mudanças também precisaram ser feitas nos parâmetros do sistema para levar em conta a adição de energia do carvão. A temperatura de saída do superaquecedor é considerada 1.200°F (650 °C), que é comparável com temperaturas de saída de vapor de forno a carvão moderno. Considera-se que este equipamento incorporado cause uma diminuição de 4 % na pressão no fluxo de vapor por causa das perdas por atrito. Entretanto, o aumento de 600°F (334°C) na temperatura do vapor supera esta queda de pressão.

O uso do economizador aumenta a temperatura da água de alimentação antes de ela entrar no gerador de vapor, diminuindo a quantidade de energia que precisa ser adicionada pelo circuito principal. Este calor é adicionado pelos gases de combustão que deixam o forno que estão a uma

temperatura muito baixa para adicionar superaquecimento ao vapor, e assim esta reutilização da energia aumenta a eficiência. Esta adição de calor extra tanto do superaquecedor quanto do economizador necessita uma alteração nos parâmetros operacionais dos aquecedores de água de alimentação de circuito
 5 fechado, já que o vapor entregue por eles tem um maior teor térmico e menos calor precisa ser adicionado. Em decorrência do economizador e das alterações nos CFWHs, a água de alimentação entra no gerador de vapor a uma temperatura 80°F (27°C) mais alta do que na usina de PWR tradicional. Uma perda de pressão de 2 % foi adicionada ao economizador para levar em
 10 conta a energia extra necessárias para bombear a água de alimentação através da tubulação do trocador de calor.

A única mudança nas suposições para o modelo da usina híbrida em relação à usina tradicional é que três por cento mais da energia elétrica das turbinas são considerados perda. Isto é uma estimativa
 15 conservadora que leva em conta as cargas parasitas adicionais, tais como ventiladores de arrasto induzido, moinhos de carvão e outros sistemas auxiliares associados com o sistema de combustível a carvão.

Para produzir os mesmos 1,19 MW de eletricidade do projeto tradicional, a instalação híbrida precisou de $6,951 \times 10^9$ BTU ($7,33 \times 10^9$ kJ)/h do reator, 50,5 % da entrada de energia do projeto básico de referência. Uma
 20 adição de $4,591 \times 10^9$ BTU ($4,84 \times 10^9$ kJ)/h de carvão é também necessária para acionar o superaquecedor, para uma entrada de calor total de $1,154 \times 10^{10}$ BTU ($1,22 \times 10^{10}$ kJ)/h. A eficiência da usina para este sistema é calculada em 35,5 %. Considerando um maior valor de aquecimento (teor de energia) de
 25 10.000 BTU (10550 kJ)/lbm (0,45 kg) para o carvão e um custo de \$40 por tonelada entregue, o custo por kilowatt hora atribuído ao carvão em uma usina de energia híbrida é \$0,00452.

Opção II - Manter a saída do reator constante, aumentar a saída elétrica

Se a instalação nuclear primária fosse deixada como ela é, a

classificação da instalação seria diminuída pela adição dos superaquecedores alimentados a carvão. Isto aumentaria a produção da usina em relação aos 1.190MW a 2.354MW originais. Mantendo-se o tamanho da usina do reator o mesmo, o custo de capital para construir a usina e os custos operacionais permaneceriam virtualmente os mesmos para os sistemas de reator, aumentando a produção elétrica em praticamente 98 % pela incorporação de um superaquecedor alimentado a carvão e a capacidade da turbina adicional de acomodar o maior fluxo de vapor. Usando as mesmas suposições de custo, isto levaria a um custo de \$0,01011 por kWh em relação à instalação nuclear. Novamente usando o valor de \$0,00452 por kWh previamente calculado para a energia de carvão em uma instalação híbrida, isto dá um custo geral de \$0,01463 por kWh. Estas economias de \$0,00537 por kWh representam uma economia de mais de 25 % para produção de eletricidade na usina de energia, ao mesmo tempo praticamente dobrando a capacidade.

Uma comparação detalhada mostra que, para a mesma geração de eletricidade, somente 84,7 % da entrada de energia térmica de um projeto tradicional são necessários para uma instalação híbrida. Além do mais, existe 25,8 % menos de calor rejeitado no condensador. Esses valores são refletidos na maior eficiência da usina.

Conclusões

A instalação híbrida proporciona um aumento de trinta e seis por cento na eficiência, um aumento de aproximadamente 3 % para biomassa e 6 % para usinas nucleares sozinhas. O aumento na eficiência está diretamente relacionado com a maior temperatura do vapor entregue pelo superaquecedor alimentado a carvão, aumentando a eficiência de Carnot (ou máxima) que o sistema pode obter. Usando carvão para adicionar superaquecimento ao vapor, uma grande parte da energia do carvão é convertida em eletricidade.

Como um exemplo, a menor quantidade de energia que precisa ser adicionada pelo sistema de reator diminuiria o custo da instalação nuclear.

A diminuição do custo de combustível em 50 % (cerca de 15 % do custo total) e uso de uma regra dos seis décimos para custos de capital, operação e outros custos (os 85 % restantes) para diminuí-los em 33 %, a redução do custo total para geração elétrica com a instalação nuclear é diminuída em 35,55 %. Embora isto não inclua o custo de capital do forno alimentado a carvão, a economia deve compensar este custo em um curto prazo. Embora esta configuração tenha emissões de carbono, elas devem ser muito menores do que uma instalação de carvão convencional. Considerando que não foi adicionado nenhum superaquecimento da porção nuclear da usina, a única energia do carvão não convertida em eletricidade seriam perdas, cortando as emissões de carbono em um terço. Quando o maior fluxo de vapor por causa do pré-aquecimento da água de alimentação for também levando em conta, seria possível atingir uma redução de carbono de cerca de 75 % em relação a uma usina de carvão independente.

Existe também o potencial para adicionar pré-aquecimento suficiente à água de alimentação no economizador para fazer uso de aquecedores de água de alimentação desnecessários. Isto reduziria a quantidade de fluxo de vapor necessária para produzir a mesma quantidade de eletricidade e possivelmente poderia aumentar a produção geral da usina.

A única limitação física potencial para esta invenção é como manter a temperatura do forno que é suficiente para adicionar superaquecimento ao vapor sem danificar os tubos do superaquecedor. Isto deve ser possível controlando-se a quantidade de oxigênio introduzido no combustível durante combustão, ou pela seleção do combustível.

O projeto proposto resulta tanto em uma usina de maior eficiência quanto um menor custo por kWh para produzir eletricidade. Levando-se todos esses fatores em conta, os modelos apresentados aqui mostram que o benefício do desempenho de se usar uma combinação energia de biomassa ou nuclear para produzir energia de vapor e carvão para

adicionar superaquecimento apresenta o potencial de ser economicamente viável, bem como significativamente mais eficiente.

Embora os exemplos apresentados tenham sido limitados a uma combinação de usinas de energia nuclear ou biomassa com usinas de energia alimentadas a carvão, a invenção também inclui uma usina de energia híbrida onde um reator de água pressurizada é combinado com um reator de leito de seixo. Como com a modalidade alimentada a carvão, o vapor do reator de água pressurizada é usado como uma fonte de vapor pré-aquecido para o reator de leito de seixo para concretizar maiores eficiências.

A descrição e desenhos apresentados compreendem modalidades ilustrativas da presente invenções. As modalidades apresentadas e os métodos aqui descritos podem variar com base na habilidade, experiência e preferência dos versados na técnica. A mera listagem das etapas do método em uma certa ordem não constitui nenhuma limitação a respeito da ordem das etapas do método. A descrição e desenhos apresentados meramente explicam e ilustram a invenção, e a invenção não está limitada a isto, exceto até o ponto em que as reivindicações estão assim limitadas. Versados na técnica que de posse desta revelação poderão fazer modificações e variações nelas sem fugir do seu escopo.

REIVINDICAÇÕES

1. Usina de energia híbrida, caracterizada pelo fato de que compreende:

5 (a) uma primeira usina de energia que produz vapor secundário de uma primeira temperatura;

(b) uma segunda usina de energia que tem uma temperatura operacional mais alta que aquela primeira temperatura; e

(c) superaquecer o vapor da primeira temperatura à temperatura mais alta na segunda usina de energia.

10 2. Usina de energia híbrida de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que a primeira usina de energia é selecionada da lista que consiste em usinas de energia nuclear e de energia alimentada a biomassa

15 3. Usina de energia híbrida de acordo com a reivindicação 2, caracterizada pelo fato de que a usina de energia de combustível fóssil é selecionada da lista que consiste em usinas de energia alimentadas a carvão, óleo, petróleo, gás natural, propano e hidrogênio.

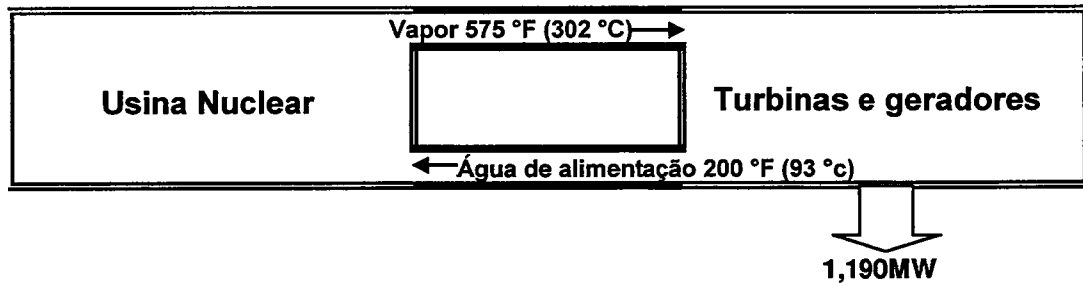
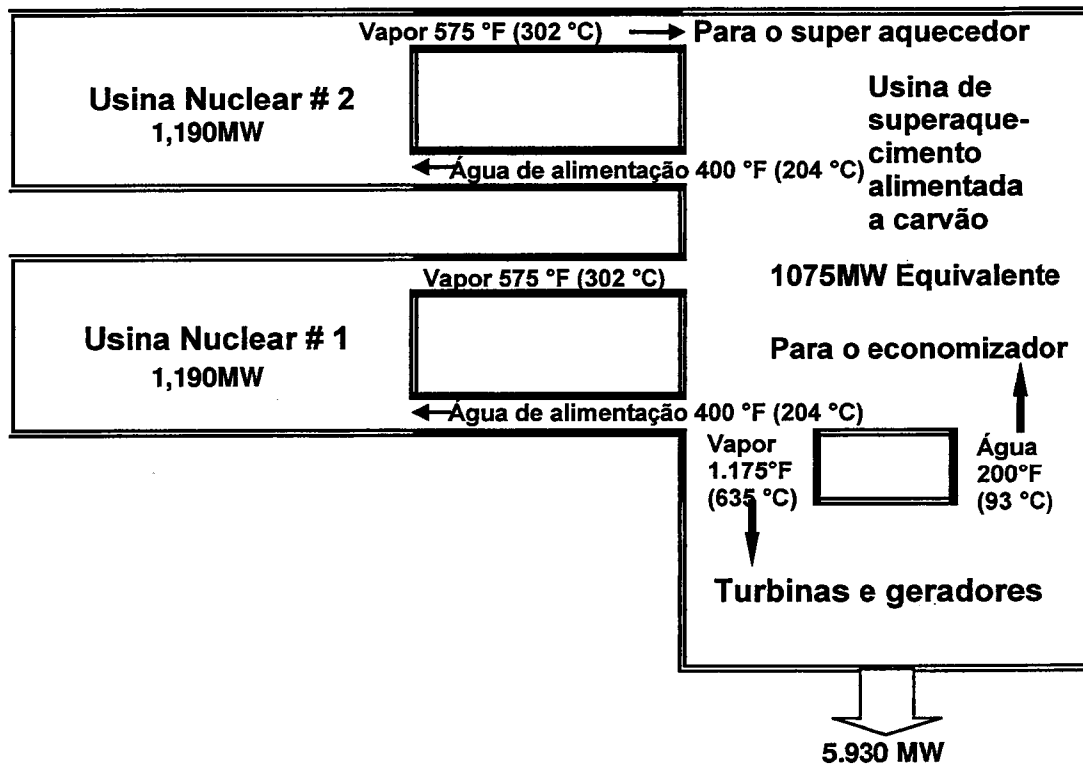
Usina Nuclear Independente**Usina Nuclear Híbrida**

FIG. 1

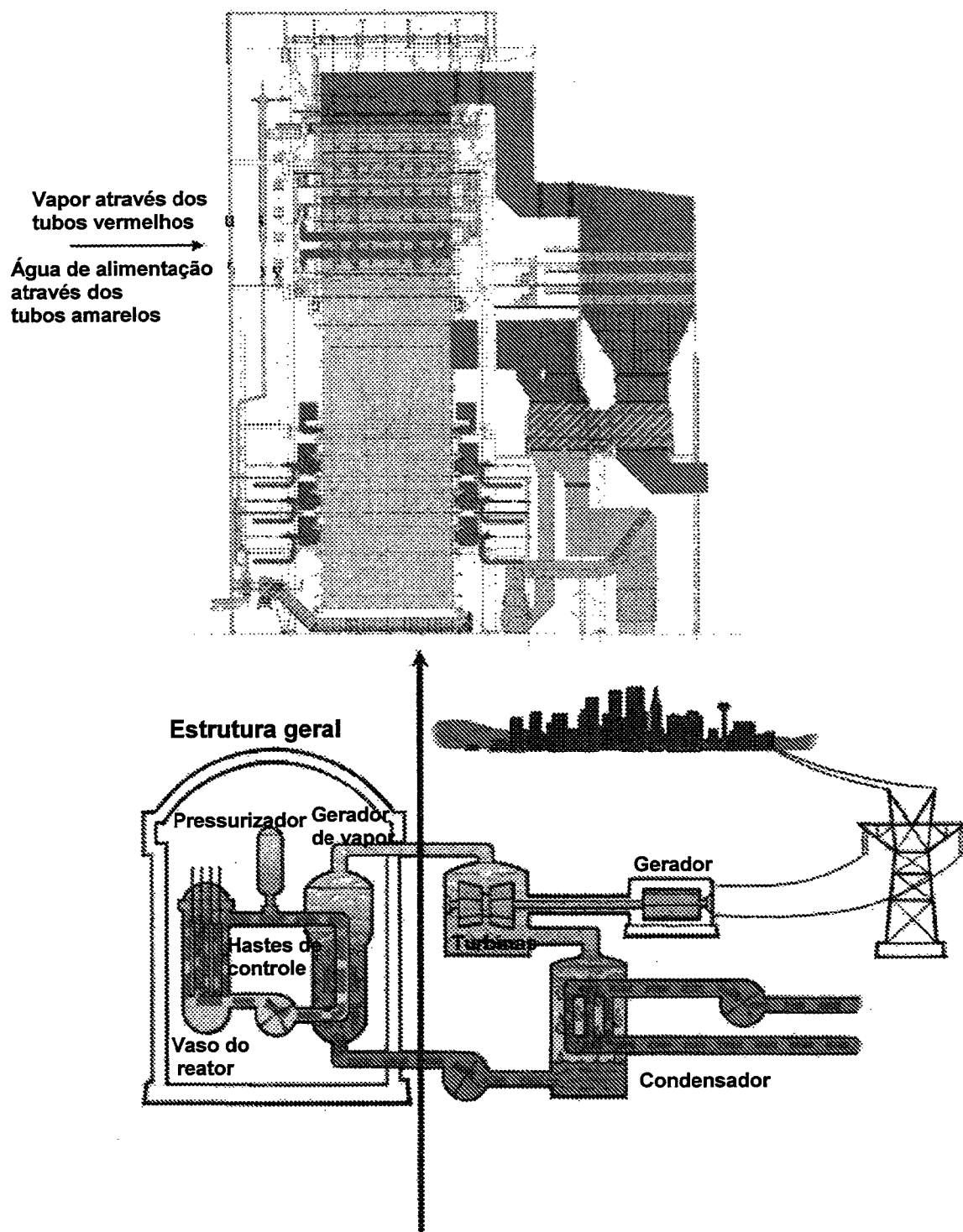


FIG. 2

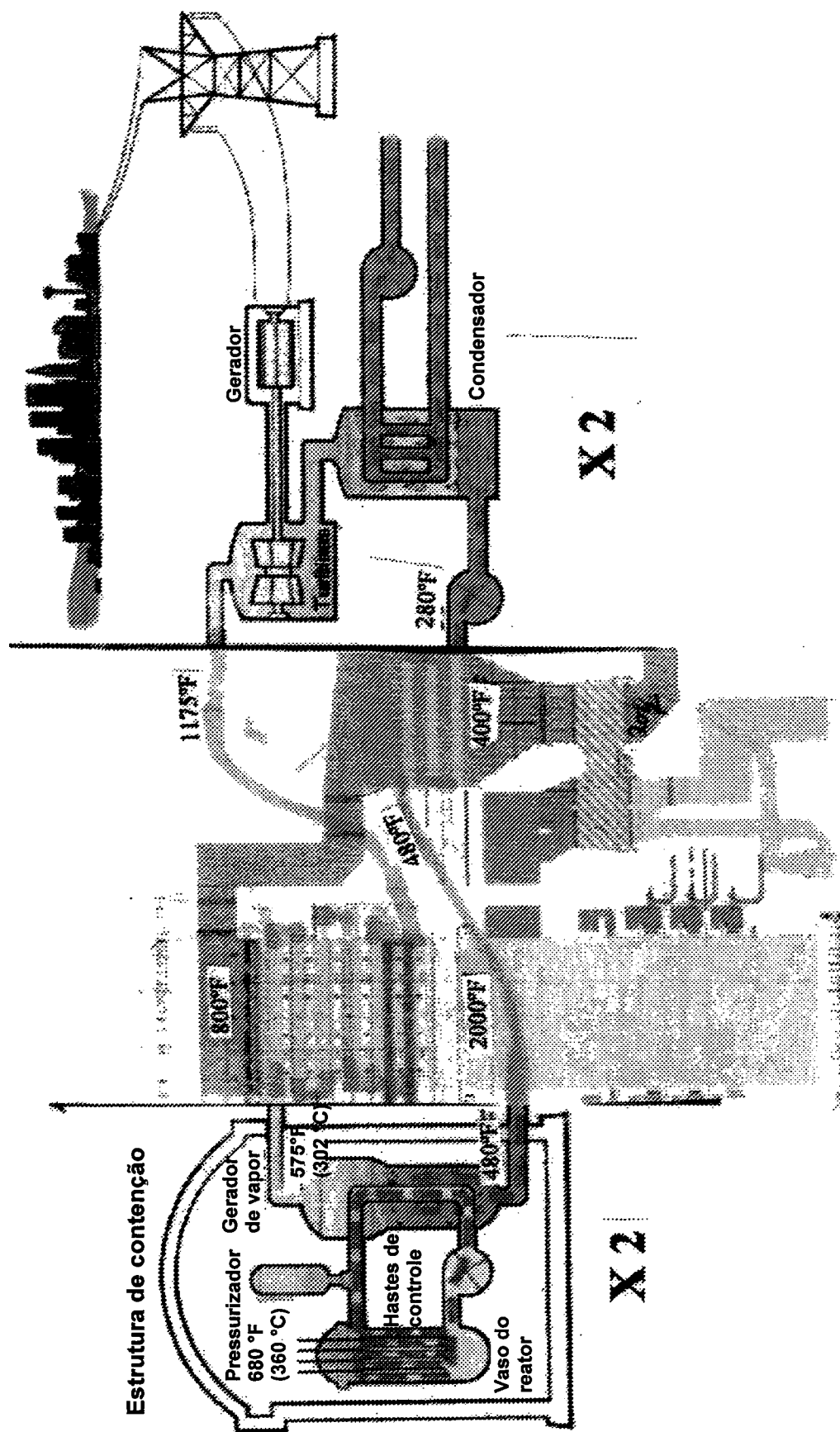


FIG. 3

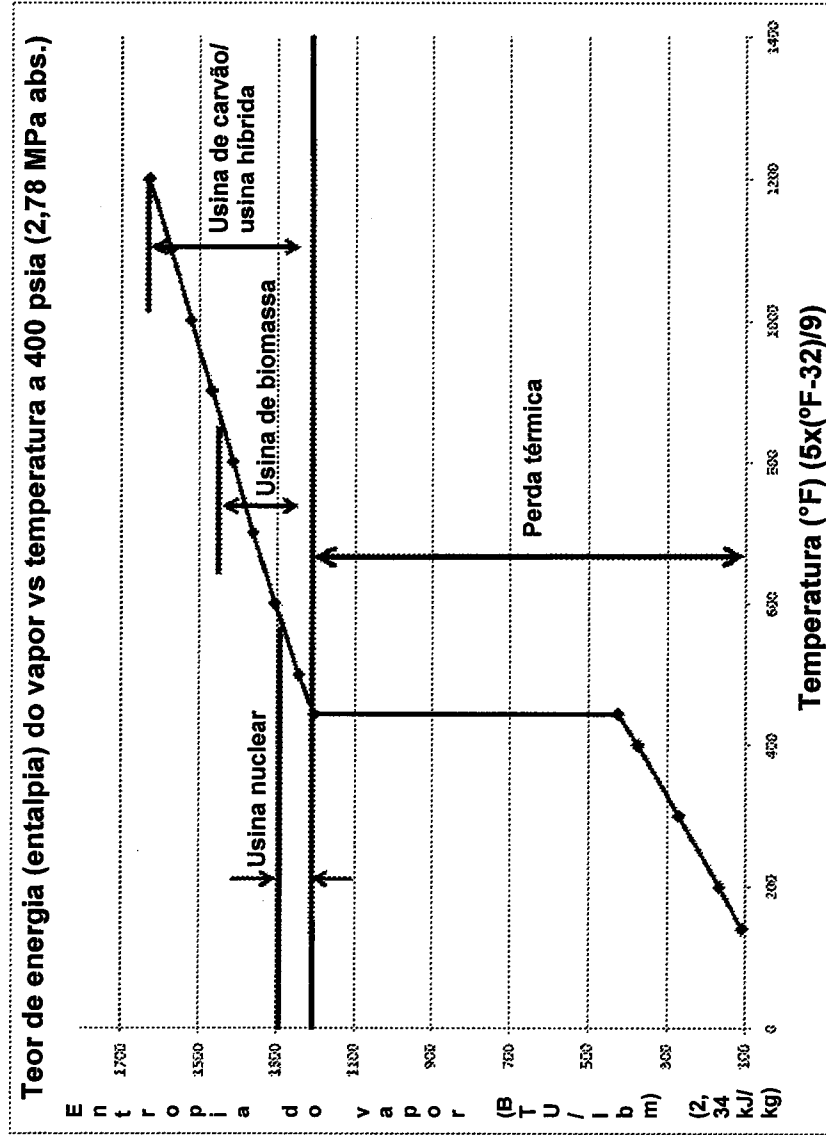


FIG. 4

Modelo Econômico				
Projetos independente - atuais				
Usina	Capacidade (MW)	Custo/ KWh	Saída anual (MWh)	Custo anual (milhões)
Nuclear #1	1,190	\$0.05	10,424,400,000	\$521
Nuclear #2	1,190	\$0.05	10,424,400,000	\$521
Alimentada a carvão	1,075	\$0.05	9,417,000,000	\$471
Total	3,455	\$0.05	30,265,800,000	\$1,513
Central de Energia Híbrida				
Usina	Capacidade	Custo/ KWh	Saída anual (MWh)	Custo anual (milhões)
Nuclear #1	1,190	\$0.05	25,974,268,992	\$521
Nuclear #2	1,190	\$0.05	25,974,268,992	\$521
Alimentada a carvão	90,3 % da entrada nuclear			\$471
Total	5,930		51,948,537,984	\$1,513
Custo de turbina extra/geradores (10 %)				\$151
Custo total				\$1,664

	Emissões/ MWh	Combustível gasto/MWh	Custo/ KWh
Carvão independente	100%	NA	0.05
Nuclear independente	NA	100%	0.05
Híbrida	25.33%	40.13%	0.032
Redução %	74.66%	47.54%	35.91%

Estatísticas operacionais para modelo econômico				
Parâmetros operacionais				
		Nuclear	Carvão	Híbrida
Condensado em °F (5x(°F-32)/9)		122	122	122
Água de alimentação em °F (5x(°F-32)/9)		208	408	408
Saída de vapor		575	1200	1200
Entradas de energia - BTU/libra				
Condensado		107.7	107.7	107.7
Água de alimentação		176	384	384
Saída de vapor		1306.6	1619.7	1619.7
Energia útil		185.6	498.7	498.7
Adição do reator		1130.6	NA	922.6
Adição de carvão		NA	1235.7	313.1

FIG. 5

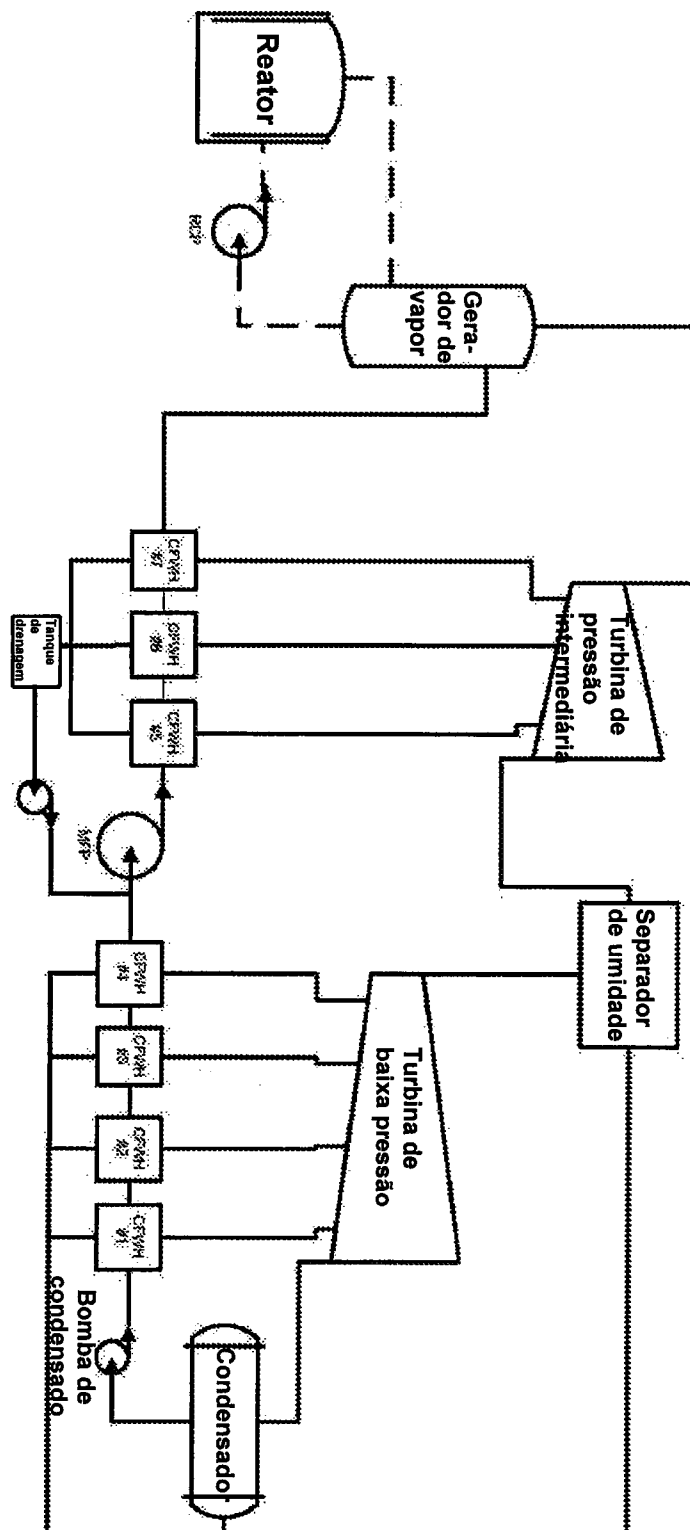


FIG. 6

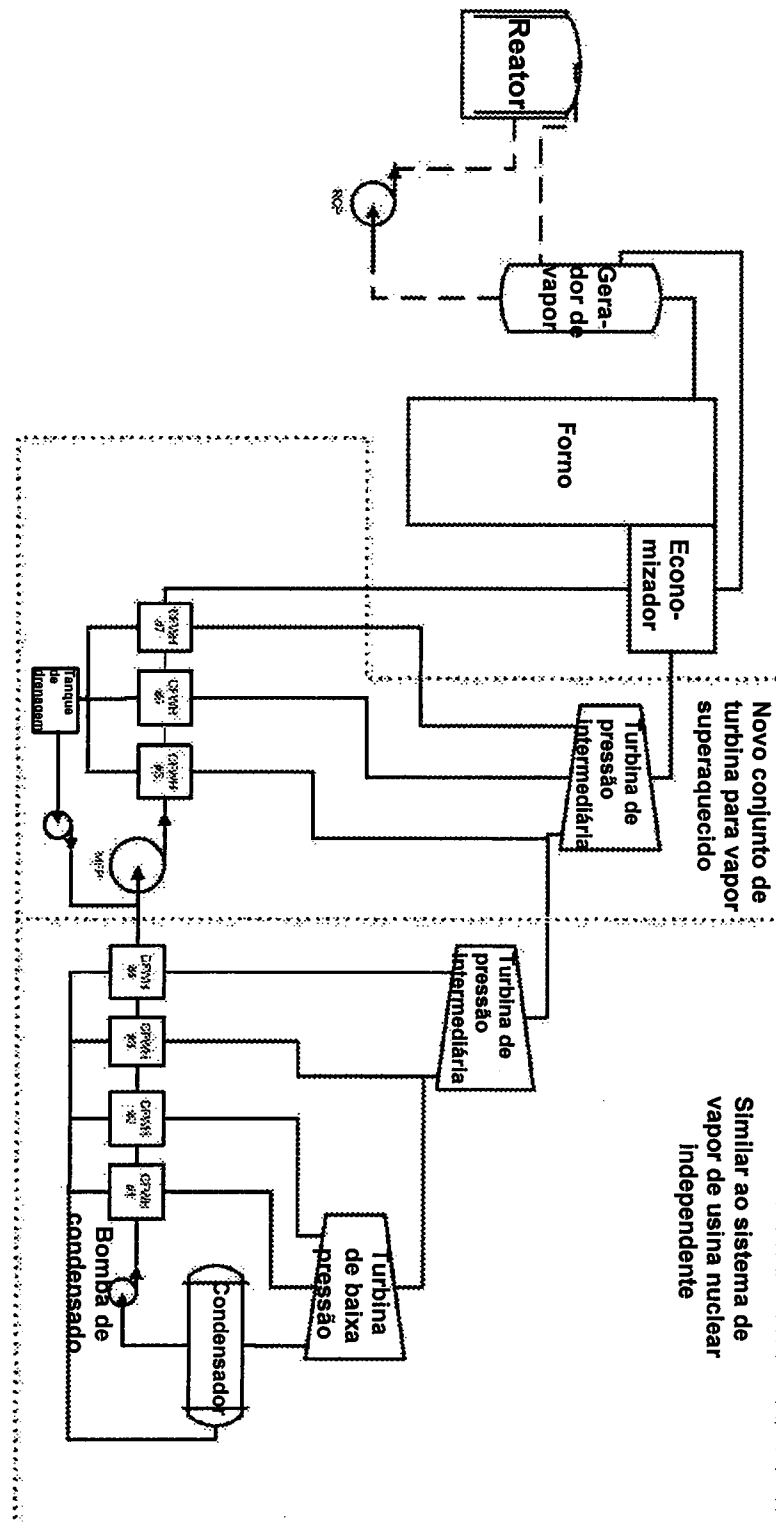


FIG. 7

PWR nuclear vs centro de energia híbrida

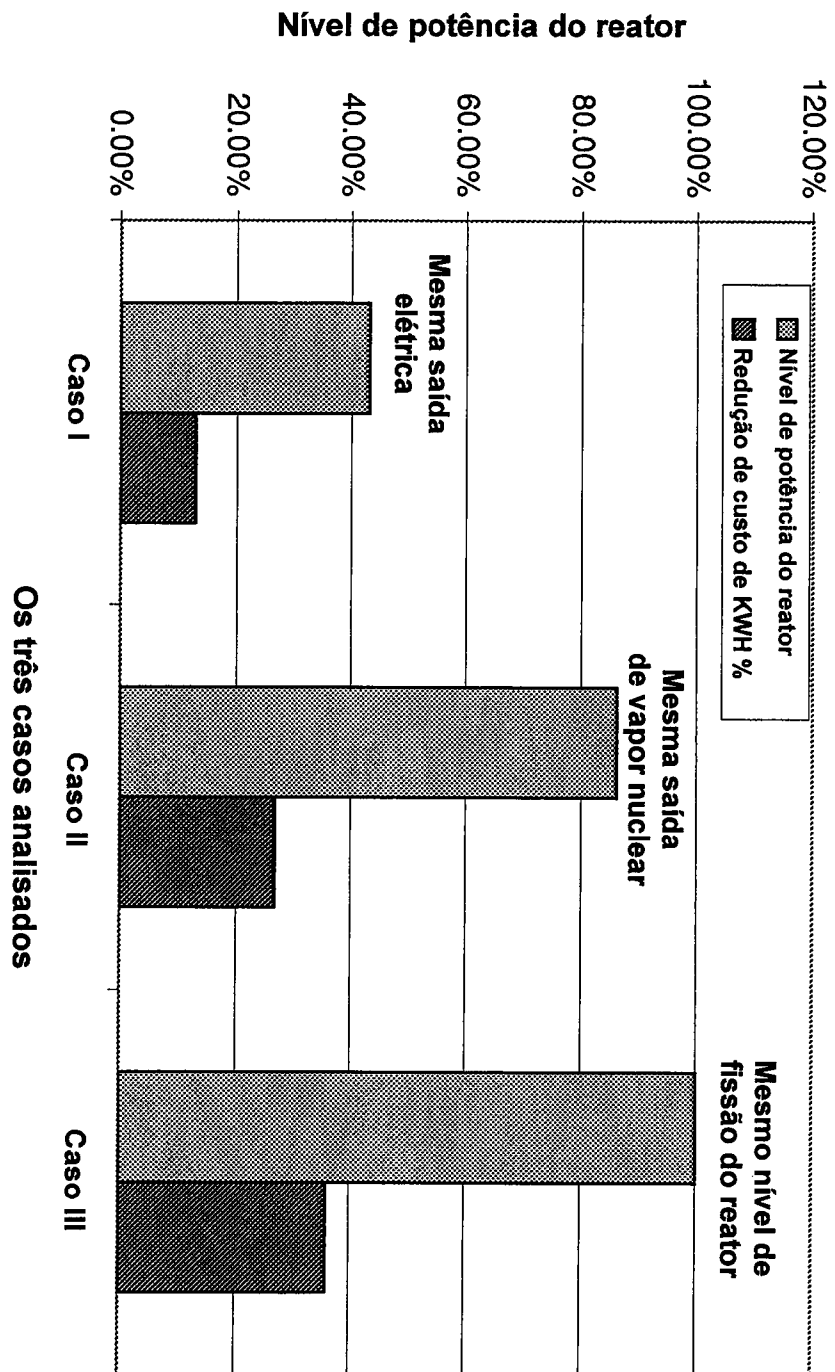


FIG. 8

RESUMO

“USINA DE ENERGIA HÍBRIDA”

5 Uma usina de energia híbrida é descrita em que um reator nuclear de água pressurizada ou uma usina de energia alimentada a biomassa que têm uma temperatura operacional relativamente baixa como tal, é combinada com uma usina de energia a carvão ou outro combustível fóssil que tem uma temperatura operacional mais alta. Vapor proveniente da primeira usina é superaquecido na segunda usina de energia para proporcionar uma usina híbrida com eficiências melhoradas e emissões mais baixas.