



CADERNO OPINIÃO

## A EFICIÊNCIA DE USO DA ÁGUA NA GERAÇÃO ELÉTRICA

---

AUTOR

André Vieira

**maio.2019**



---

## SOBRE A FGV ENERGIA

A FGV Energia é o centro de estudos dedicado à área de energia da Fundação Getúlio Vargas, criado com o objetivo de posicionar a FGV como protagonista na pesquisa e discussão sobre política pública em energia no país. O centro busca formular estudos, políticas e diretrizes de energia, e estabelecer parcerias para auxiliar empresas e governo nas tomadas de decisão.

### DIRETOR

Carlos Otavio de Vasconcellos Quintella

### SUPERINTENDENTE DE RELAÇÕES INSTITUCIONAIS E RESPONSABILIDADE SOCIAL

Luiz Roberto Bezerra

### SUPERINTENDENTE COMERCIAL

Simone C. Lecques de Magalhães

### ANALISTA DE NEGÓCIOS

Raquel Dias de Oliveira

### ASSISTENTE ADMINISTRATIVA

Ana Paula Raymundo da Silva  
Cristiane Parreira de Castro

### SUPERINTENDENTE DE ENSINO E P&D

Felipe Gonçalves

### COORDENADORA DE PESQUISA

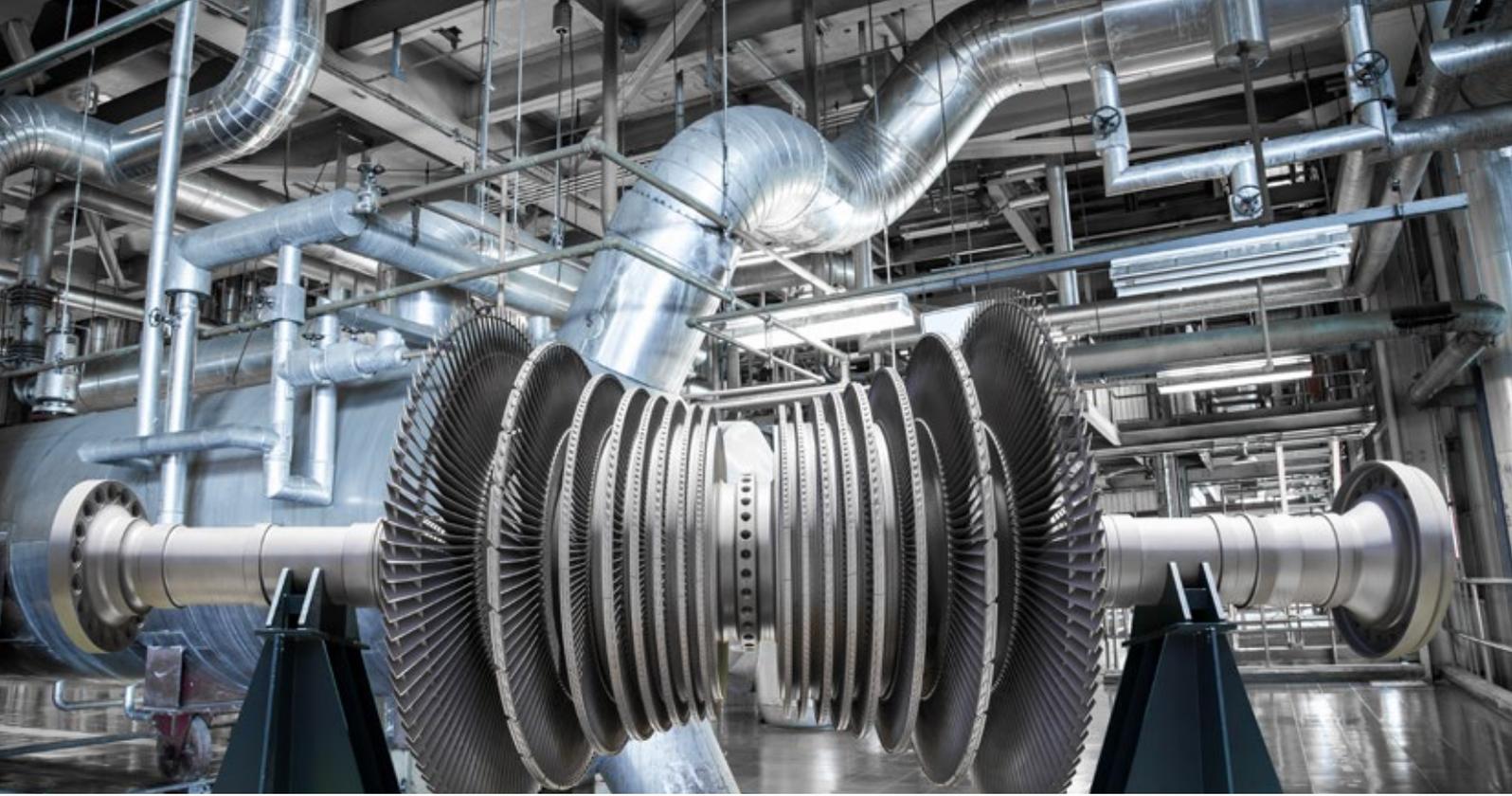
Fernanda Delgado

### PESQUISADORES

Angélica Marcia dos Santos  
Carlos Eduardo P. dos Santos Gomes  
Daniel Tavares Lamassa  
Glaucia Fernandes  
Mariana Weiss de Abreu  
Pedro Henrique Gonçalves Neves  
Priscila Martins Alves Carneiro  
Tamar Roitman  
Tatiana de Fátima Bruce da Silva  
Thiago Gomes Toledo  
Vanderlei Affonso Martins

### CONSULTORES ESPECIAIS

Ieda Gomes Yell  
Magda Chambriard  
Milas Evangelista de Souza  
Nelson Narciso Filho  
Paulo César Fernandes da Cunha



## OPINIÃO

# A EFICIÊNCIA DE USO DA ÁGUA NA GERAÇÃO ELÉTRICA

*André Vieira*

É impossível imaginar o futuro da humanidade sem soluções para as questões relativas à sustentabilidade dos recursos hídricos e sem a disponibilidade de energia. Este tema aborda dois recursos dos quais dependem a sobrevivência e o desenvolvimento das populações humanas modernas: água e energia. Os processos de captação, tratamento e distribuição da água demandam energia e a produção de eletricidade por sua parte utiliza grandes quantidades de água. Como se vê, um depende do outro e o nosso amanhã depende de ambos.

As instituições mundiais ainda estão aprendendo a manejar de maneira integrada a água e a energia, como parte de sua aposta no desenvolvimento

sustentável. Segundo Daryl Fields, do Banco Mundial, entender a conexão entre água e energia é fundamental para poder abordar o crescimento e o desenvolvimento humano, a urbanização e a mudança climática.

Diante deste cenário, a Organização das Nações Unidas (ONU) ressalta que a alta utilização dos recursos hídricos para a geração de energia coloca-os em risco, pois a água doce, própria para consumo e geração de energia, corresponde a apenas 2,5% do total disponível no mundo.

No Brasil, quando pensamos em energia, imediatamente nos vem à mente, por associação, a importância da água neste setor. Não é de se estranhar, uma vez que a matriz energética do nosso país é predominantemente formada por hidrelétricas. Esta fonte é responsável por aproximadamente 18% da energia elétrica no mundo e aproximadamente 70% da energia produzida no Brasil atualmente.

Apesar de possuir grandes hidrelétricas e enorme potencial hídrico, o Brasil ainda está sujeito a falhas no sistema de transmissão de energia. Vários apagões aconteceram nos últimos anos, com justi-

ficativas que variaram entre problemas técnicos, falhas humanas e a atuação de forças da natureza, tais como as tempestades de raios. Este último supostamente foi o motivo de um grande apagão na região sudeste em outubro de 2009.

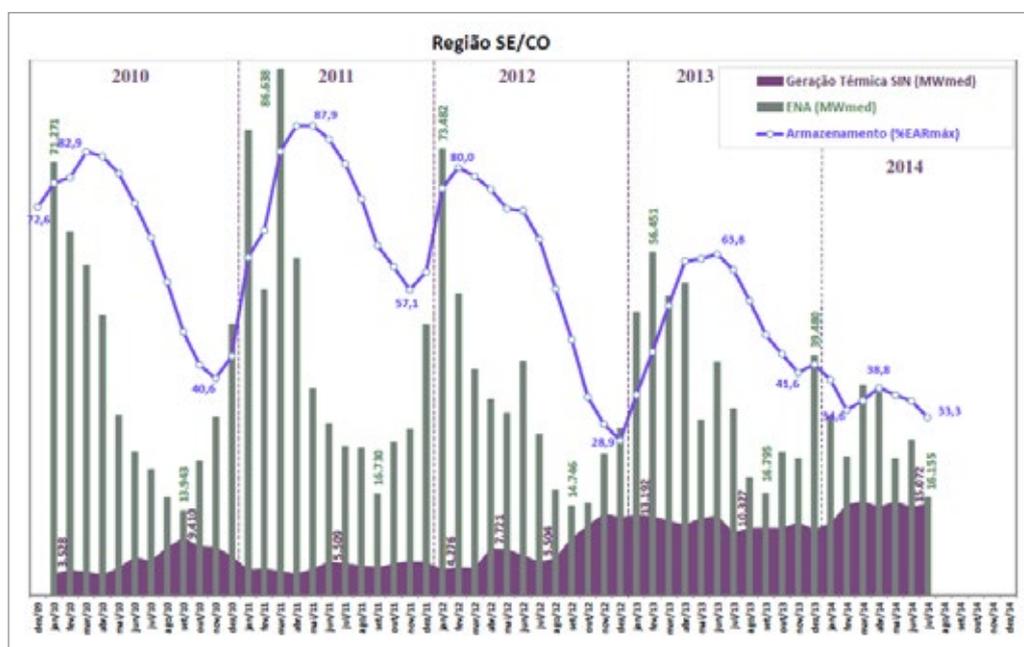
Em 2012, ocorreram inúmeros blecautes. Foram centenas de interrupções consideradas pequenas, entre 15 MW e 100 MW, capazes de deixar sem energia elétrica alguns bairros ou cidades de até 400 mil habitantes. Além disso, pelo menos quatro interrupções classificadas como intensas, com mais de 100 mil MW, foram capazes de deixar dezenas de milhões de pessoas sem energia elétrica, afetando todas as regiões brasileiras. As justificativas são sempre pontuais, como incêndios em linhas de transmissão ou curtos-circuitos esporádicos (Brasil Escola, 2015).

O ano de 2014 iniciou-se de modo preocupante no Brasil, com o risco de apagões e de racionamento de água e energia em boa parte do país. Os princi-

pais fatores ligados a essa questão são a estiagem atípica, e o fato de os reservatórios operarem muito abaixo de suas capacidades máximas.

Após os apagões vividos, ocasionados pela escassez de chuvas, a matriz elétrica brasileira iniciou um processo de diversificação, de modo que a expansão da capacidade instalada por meio da construção de hidrelétricas deve ocorrer a taxas inferiores às ocorridas no passado. Consideradas fontes de energia limpa e renovável, as hidrelétricas são de construção cara e ainda possuem o inconveniente do impacto ambiental causado pelas barragens. A inundação ocasiona grandes perturbações na fauna e flora de extensas áreas, com alterações em todo o ecossistema, devido às mudanças no regime hidráulico dos rios. Os habitantes das áreas próximas também são profundamente afetados. A Figura 1 mostra a queda na produção de energia em hidrelétricas nas regiões Sudeste e Centro-Oeste do país, bem como a elevação da geração térmica como medida para compensar a redução da geração hídrica.

Figura 1- Redução da Geração Hídrica x Elevação da Geração Térmica.

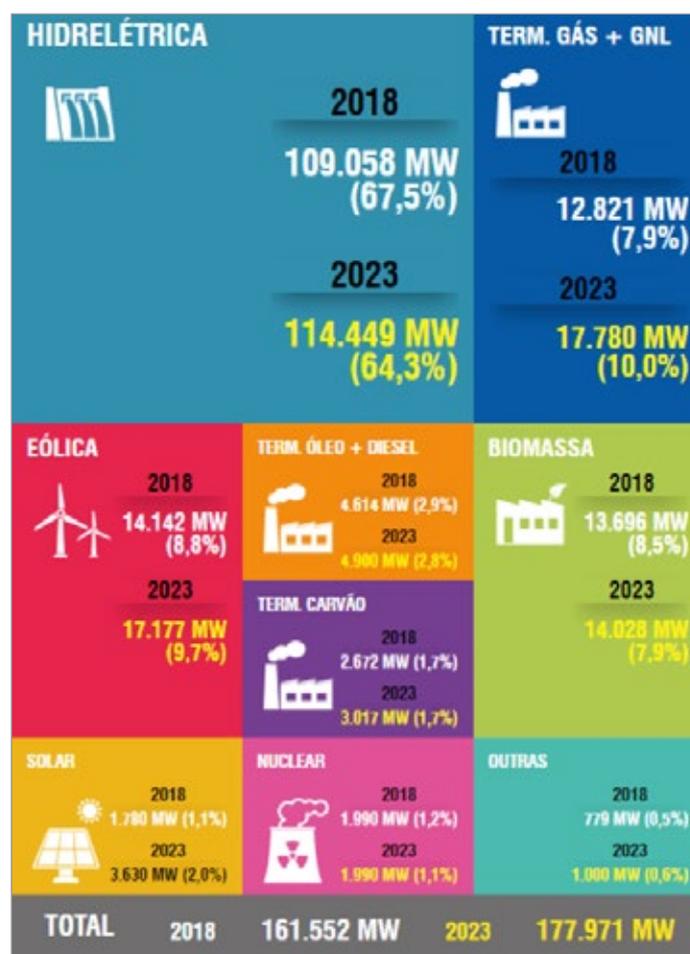


Fonte: ONS, PEN (2014).

Para atender ao aumento da demanda, a participação de outras fontes de geração continuará a crescer nas próximas décadas. Neste contexto as fontes solar e eólica se mostram como as menos impactantes sob a ótica ambiental. Por outro lado, não oferecem a estabilidade e segurança de fornecimento que o Sistema Interligado Nacional (SIN) requer, de forma que o planejamento governamental e as diversas análises setoriais apontam para uma tendência de continuidade do crescimento da termoeletricidade como a principal fonte comple-

mentar às demais no curto, médio e longo prazo no país. Há de se considerar, no entanto, que a maior parte das usinas termoeletricas em operação no Brasil também emprega como recurso vital grandes volumes de água, utilizada para o resfriamento dos equipamentos principais e também como meio de transporte da energia térmica que será convertida em eletricidade. A Figura 2 apresenta a distribuição da matriz energética brasileira conectada ao SIN, em 2018, bem como o cenário esperado para 2023.

Figura 2 – Composição da matriz energética brasileira conectada ao SIN.

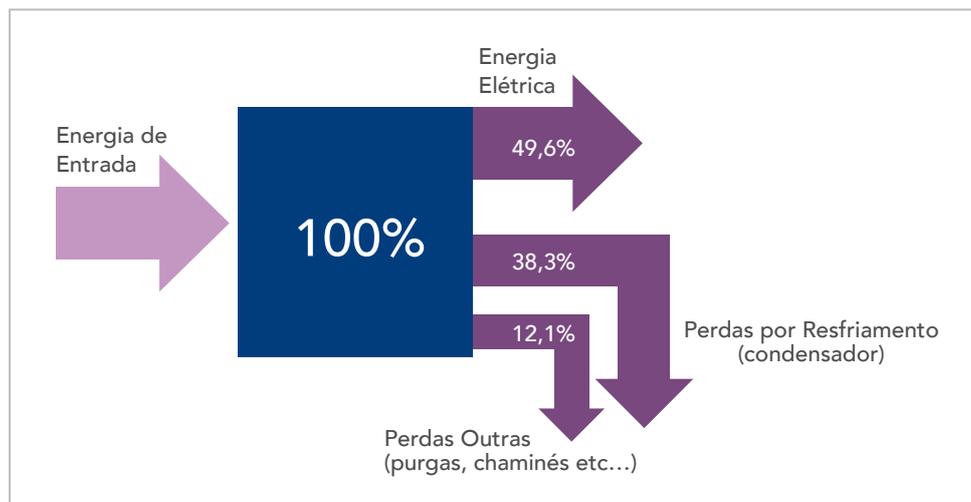


Fonte: ONS (2019).

A termoeletricidade consiste em transformar a energia térmica liberada por um combustível em energia elétrica, porém uma parcela importante não será convertida em energia elétrica, mas liberada na

forma de calor e perdida nos sistemas de refrigeração. Quanto menor a eficiência da termelétrica, maior será esta perda. A Figura 3 mostra o balanço de energia em uma termelétrica moderna.

Figura 3 – Balanço de energia simplificado em uma usina termelétrica.



A eficiência global da usina depende de fatores climáticos (temperatura do ar, umidade relativa e pressão atmosférica) e tecnológicos (idade dos equipamentos, periodicidade de manutenção e da configuração do ciclo termodinâmico).

A configuração do ciclo termodinâmico é de longe o que terá maior impacto sobre a eficiência da planta. Entende-se por ciclo termodinâmico a sequência repetitiva de transformações físicas produzidas por um sistema a fim de realizar trabalho, regressando ao seu estado inicial ao completar o ciclo. Os ciclos termodinâmicos utilizados em grandes usinas estão classificados em Rankine, Brayton e Combinado.

### CICLO RANKINE

A principal característica deste ciclo é o uso da água como o meio de transporte do calor que será convertido em energia elétrica.

O processo se inicia com a pressurização e transporte da água tratada por bombeamento até as caldeiras. Por meio da queima de combustíveis, ocorre a transferência de calor para a água até que esta mude para a fase de vapor saturado e, posteriormente, vapor

superaquecido (vapor seco). Este vapor a altas pressões e temperaturas é, então, convertido em energia cinética pela turbina a vapor que está conectada por um eixo ao gerador de eletricidade que transformará a energia mecânica em eletricidade ao passar seu núcleo girante através um campo magnético. Ao final do processo, o vapor terá sido convertido novamente a água líquida completando-se, assim, o ciclo. O Ciclo Rankine é também o utilizado pelas usinas nucleares, em que o calor é produzido pela fissão nuclear. O Ciclo Rankine moderno possui eficiência térmica de até 45%, quando muito bem otimizado. O seu grande consumo de água ocorre por evaporação no processo de resfriamento do vapor saturado no condensador e, também, na compensação das perdas durante a produção e controle da qualidade da água tratada para as caldeiras.

### CICLO BRAYTON

No Ciclo Brayton, o transporte do calor se dá por meio de um gás, preferencialmente o ar atmosférico, por ser abundante e de baixo custo. O processo inicia-se com a captação, filtragem e pressurização do ar, através de um compressor, que é movido pela turbina a gás. Note-se aí que a designação de turbina

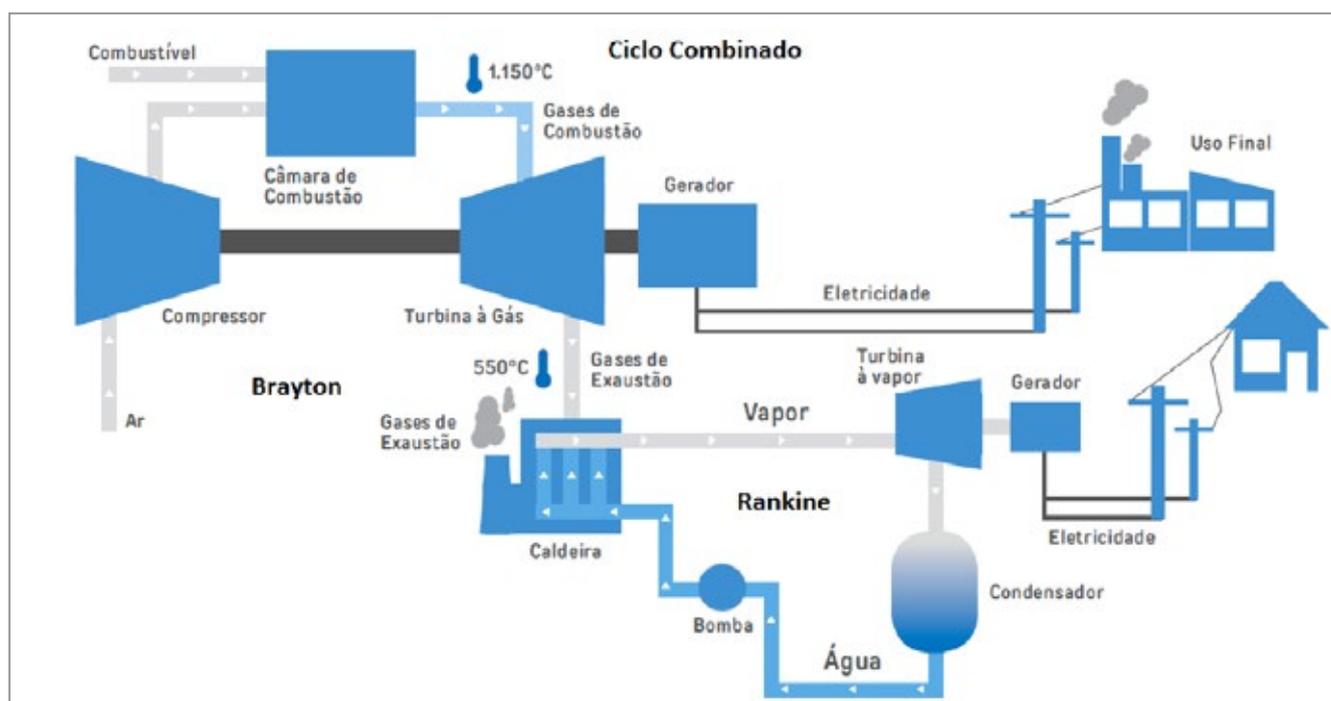
a gás tem como origem o estado do fluido que é utilizado como meio de transporte do calor, neste caso o ar, e não com o tipo de combustível, que pode ser tanto um gás quanto um líquido - as turbinas de avião, por exemplo, são denominadas turbinas a gás, embora queimem combustível líquido. Após ser pressurizado, o ar é aquecido a altas temperaturas no combustor, por meio da queima de um combustível, e expandido na turbina a gás, que produzirá a energia mecânica necessária ao gerador elétrico. O ar e os gases da combustão seguem, então, para o túnel de exaustão das turbinas e, em seguida, para a atmosfera, via chaminé, com temperaturas na ordem de 550°C. Como não retorna ao estágio inicial, este ciclo é conhecido como de Circuito Aberto. O Ciclo Brayton possui eficiência máxima na ordem de 35%. O consumo de água é baixo, ocorrendo, principalmente, da etapa de resfriamento dos equipamentos e nos sistemas auxiliares de resfriamento. Em algu-

mas turbinas mais antigas, utiliza-se água para o controle das emissões de  $\text{NO}_x$ .

## CICLO COMBINADO

Em busca de maiores eficiências, criou-se o Ciclo Combinado ou de Circuito Fechado, nome que faz referência à junção dos ciclos Brayton e Rankine. No ciclo combinado, a energia térmica presente nos gases de exaustão descartados pelas turbinas a gás é reaproveitada na produção de vapor por meio de uma caldeira de recuperação de calor. Esta é o elo de ligação entre os ciclos, e que permite que sejam alcançadas eficiências superiores a 62% nas plantas de última geração. Desse modo, mais energia elétrica é produzida, sem significativo aumento no consumo de água captada. O consumo de água no Ciclo Rankine pode chegar a 250 m<sup>3</sup> por MW/h contra 120 m<sup>3</sup> por MW/h no Ciclo Combinado. A Figura 4 apresenta o esquema básico de um Ciclo Combinado.

Figura 4 – Esquema simplificado em uma usina termelétrica de ciclo combinado.



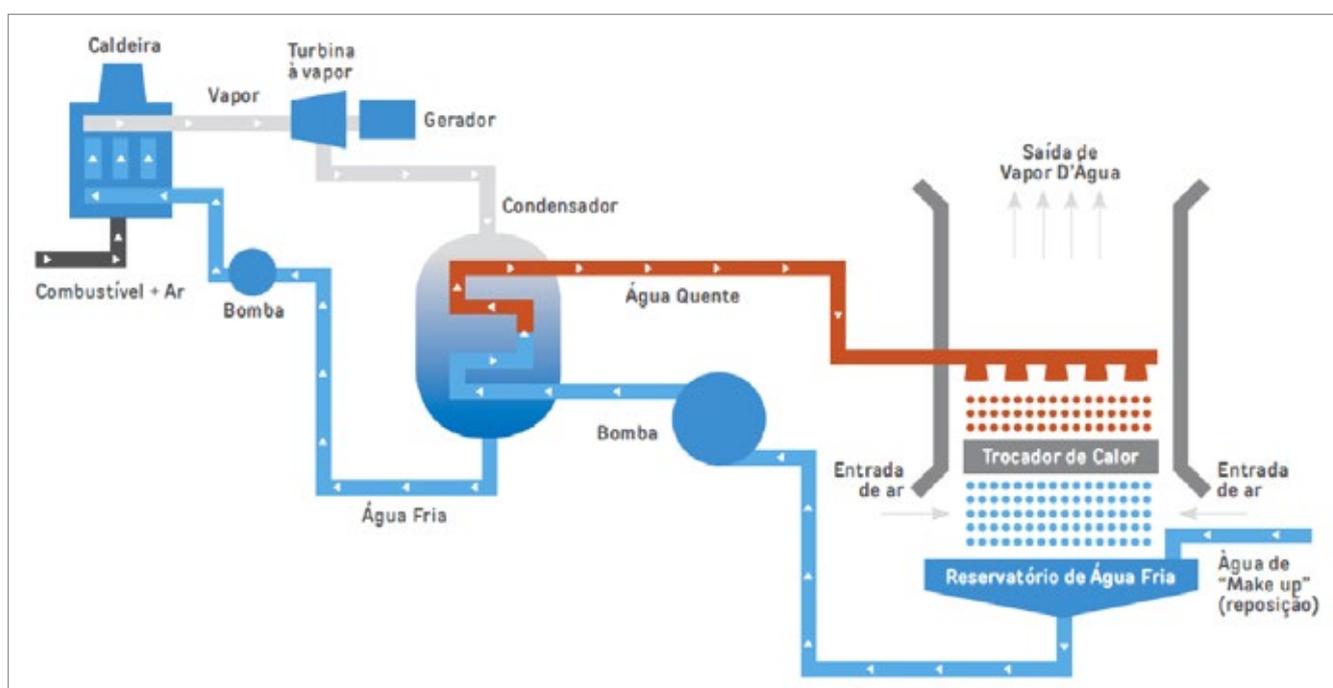
Fonte: Série Termoelectricidade em Foco (IEMA 2016).

## SISTEMAS DE RESFRIAMENTO.

A grande demanda por água nas termelétricas se dá nos condensadores de vapor. Os sistemas de resfriamento a água podem ser subdivididos em: aberto, semiaberto com convecção natural e semiaberto com circulação forçada. O calor retirado do condensador pela água é repassado diretamente

a uma fonte de suprimento (mar, rios ou lagos) ou dispersado na atmosfera por meio das torres úmidas de resfriamento. Parte da água de resfriamento também acaba sendo perdida na forma de vapor. A Figura 5 mostra um sistema de refrigeração semiaberto com convecção natural.

Figura 5 – Esquema simplificado de um sistema de refrigeração semiaberto com convecção natural.



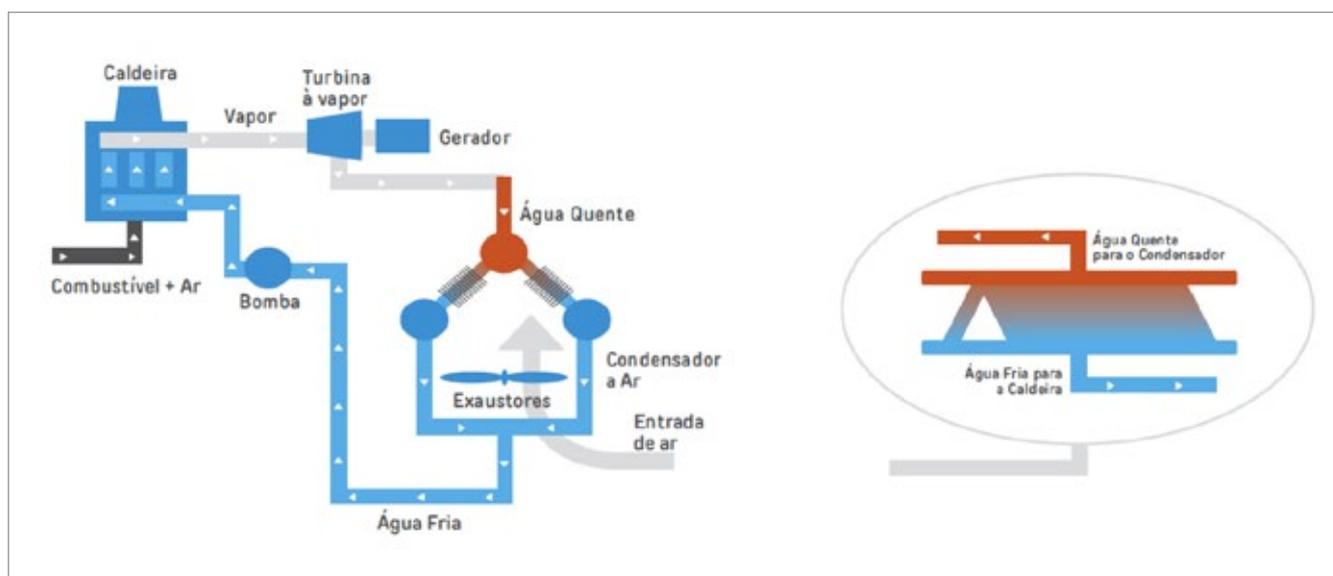
Fonte: Série Termoeletricidade em Foco (IEMA 2016).

## SISTEMAS DE RESFRIAMENTO A AR

Como o próprio nome sugere, o fluido utilizado nesse sistema para retirar o calor é o ar (Figura 6), por meio de condensadores a ar de troca direta (torre seca) e indireta (usa água como meio intermediário). O uso do resfriamento a ar vem crescendo mundialmente, apesar de ter eficiência mais baixa e envolver custos de construção aproximadamente 15% mais altos

(EPRI, 2004), justificado pela escassez de água em algumas regiões, aumento das exigências ambientais, cada vez mais restritivas, e altos preços das tarifas cobradas pela captação e uso da água. Em 2013, a China já possuía cerca de 127 GW de capacidade térmica instalada operando com condensadores a ar, correspondendo a 44% das instalações realizadas naquele ano (YANG et al., 2014).

Figura 6 – Esquema simplificado de um sistema de refrigeração a ar de Torre Seca.



Fonte: Série Termoelectricidade em Foco (IEMA 2016).

## CONCLUSÕES

A água é provavelmente o único recurso natural que está envolvido em todas as atividades humanas, desde o desenvolvimento agrícola ao industrial. Nas sociedades modernas, este líquido tem enorme importância no sucesso de diversas atividades econômicas, dentre elas a produção de energia elétrica.

O Brasil dispõe de grande abundância de água doce, sendo dono de cerca de 12% de toda a água doce disponível no mundo. Todavia, sempre convivemos com a escassez de água para a agricultura e o consumo humano em algumas cidades, e até mesmo em grandes áreas como o nordeste brasileiro, devido à distribuição desigual dos rios e às condições climáticas regionais.

Ficamos indiferentes quanto à relação entre a água e energia até a recente década, pois o país não havia

experimentado com tanta força o peso da falta do recurso para a geração de energia elétrica. Nossas grandes hidrelétricas abastecidas por rios caudalosos nos fez a terceira maior potência hidrelétrica do mundo, com mais de 150 usinas hidrelétricas de médio e grande porte distribuídas em dezesseis bacias hidrográficas nas diferentes regiões do país e entrelaçadas através do SIN (Sistema Interligado Nacional). Estas grandes hidrelétricas podem transferir a energia entre as regiões, permitindo que localidades com menor capacidade de geração ou que estejam enfrentando dificuldades por falta de chuvas, por exemplo, recebam energia de outras, garantindo o fornecimento da eletricidade. Quando sobra energia no Norte, esta pode ser levada ao Sul e vice-versa.

Embora vital para o Brasil, o SIN, com extensão de mais de 141.388 km e distribuindo mais de 161.552 MW (ONS, 2019), não é imune a falhas, pois é

complexo e demanda um grande esforço de monitoramento, além de grandes investimentos.

Atualmente, a instalação de usinas eólicas, principalmente nas regiões Nordeste e Sul, vem apresentando um forte crescimento, aumentando a importância dessa geração para o atendimento do mercado e reduzindo a pressão sobre as bacias hidrográficas.

As usinas térmicas contribuem para a segurança do SIN, pois, em geral, estão situadas nas proximidades dos principais centros de carga. Quando despachadas, em função das condições hidrológicas vigentes, também permitem a melhor gestão dos estoques de água armazenada nos reservatórios.

O futuro energético do Brasil e do mundo passa obrigatoriamente pelo uso racional das fontes naturais, em destaque a água. Por isso, faz-se mister a busca incondicional por processos cada vez mais eficientes e eficazes no uso deste recurso, sem priorizar uma tecnologia em detrimento de outra. A diversificação é fundamental neste setor.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BÖHM, H., (1994), "Fossil-Fired Power Plants", VGB Kraftwerkstechnik, No. 3/94 reprinted.

BOYCE, M.P., (2001), "Gas Turbine Engineering Handbook", Second Edition.

BEN (2014) - "Balanço Energético Nacional", Empresa de Pesquisa Energética.

PEN, (2014), "Plano da Operação Energética 2014/2018", Operador Nacional do Sistema Elétrico.  
BRASIL ESCOLA (2015), "Planejamento Energético do Brasil e Iminência de uma nova Crise no Setor-Apagão.". Disponível em: <http://www.brasilescola.com/geografia/planejamento-energetico-brasil-iminencia-uma-nova-crise-no-setor-apagao.htm>

IEMA (2016) - "Série Termoelectricidade em Foco", Instituto de Energia e Meio Ambiente.

ONS (2019) - Sobre o SIN, o Sistema em Números-2019. Disponível em : <http://ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>



André Vieira é Mestre em Engenharia Mecânica na área de Máquinas de Conversão de Energia pela UNIFEI (Universidade Federal de Itajubá), Graduado em Engenharia Metalúrgica pela UFF (Universidade Federal Fluminense). Com 30 anos de experiência em plantas de geração de energia já passou por grandes projetos no setor em suas diversas fases, comissionamento, operação e manutenção. Atuando como Engenheiro Especialista em Sistemas de Geração na Termoeletrica do Atlântico com 490MW de potência, inserida no complexo Siderúrgica da Ternium BR, na área de Otimização de Processos desenvolve estudos ligados à análise de desvios e melhoria de performance e eficiência dos processos de transformação da energia.

\* Este texto é de inteira responsabilidade do autor e não reflete necessariamente a linha programática e ideológica da FGV.



---

[fgv.br/energia](http://fgv.br/energia)

