

EXPERIÊNCIAS RECENTES DA OPERAÇÃO COM ALTA PENETRAÇÃO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

3.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como objetivo apresentar experiências adquiridas na operação de sistemas elétricos com elevada penetração de fontes renováveis, com foco em fazendas produtoras de eletricidade a partir de energia solar e eólica.

A produção das fazendas eólicas e solares estão sujeitas às variações aleatórias de seus insumos, diferentemente das usinas hidrelétricas que apresentam alto nível de controle de despacho.

A operação de sistemas com elevados níveis de penetração de fontes renováveis traz consigo inúmeros desafios e peculiaridades, como: atender a rampa de geração devida à brusca variação de recursos, restrições de pequena inércia devido às fontes de energia baseadas em inversores e a necessidade de serviços ancilares.

Alguns sistemas de potência com grande participação de geração proveniente de fontes renováveis, de origens eólica e solar, são apresentados, a título de exemplo:

- CAISO - *California Independent System Operator*;

- ERCOT - *Electric Reliability Council of Texas*;
- Sistema Elétrico de Potência da Dinamarca;
- Sistema Elétrico de Potência da China;
- Sistema Elétrico de Potência do Nordeste do Brasil.

Os recordes de penetração instantânea e de penetração anual de fontes renováveis de quatro desses sistemas a serem discutidos são mostrados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 Recordes de penetração de geração renovável em sistemas elétricos

Sistema	País	Penetração Instantânea	Penetração Anual
CAISO	Estados Unidos	49 % (2017)	27 % (2016)
ERCOT	Estados Unidos	50 % (2017)	15 % (2016)
Dinamarca	Dinamarca	140 % (2015)	42 % (2015)
Nordeste	Brasil	101 % (2018)	18 %*

* Recorde de geração eólica registrado em toda a rede brasileira.

Para a acomodação dos níveis de penetração mostrados na tabela, cada operador de sistema utilizou e testou estratégias de operação, regulação ou interconexões com sistemas vizinhos. A seguir, são apresentadas descrições sucintas de cada sistema, bem como comentários de aspectos relevantes que envolveram esses sistemas, quanto à penetração de fontes renováveis.

3.2 CALIFORNIA ISO

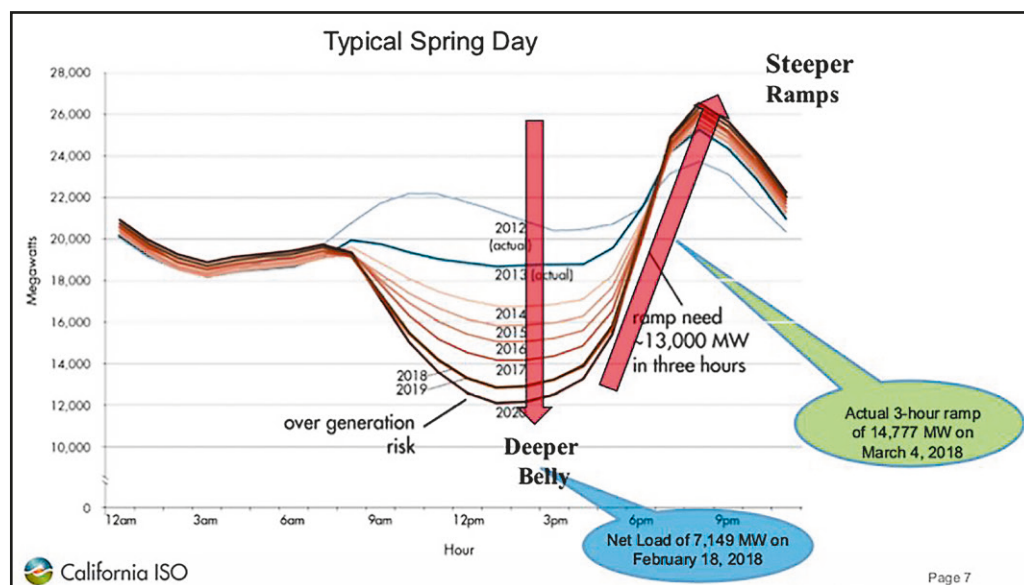
O California ISO (*Independent System Operator*) é um dos principais sistemas dos Estados Unidos. O CAISO é o único operador independente na costa oeste dos Estados Unidos e é responsável por mais de 40 mil km de circuitos elétricos que correspondem a 80 % dos sistemas elétricos da Califórnia e parte dos circuitos do estado de Nevada.

O CAISO é responsável por atender cerca de 30 milhões de consumidores que demandaram, na ponta de carga, 46.424 MW em julho de 2018. Alinhado com a política de redução de emissões do estado da Califórnia, o CAISO conta com elevada capacidade instalada de fontes renováveis (11.868 MW de energia solar fotovoltaica e 6.505 MW de energia eólica). Em 2018, a máxima geração

eólica foi de 5.193 MW (em 6 de junho), suficiente para atender cerca de 15 % da ponta de demanda daquele dia. As estatísticas da geração por fontes renováveis assim como a demanda do CAISO podem ser conferidas dinamicamente por aplicativo de celular e também pelo site do operador (California ISO, 2019).

Entendendo como carga líquida (*net load*), a diferença entre a demanda de carga do sistema e a geração de fontes renováveis, observa-se para o CAISO a curva da Figura 3.1, conhecida como “curva do pato”.

Figura 3.1 Carga líquida no California em um dia típico da primavera



Essa curva mostra a necessidade de suprir uma rampa muito inclinada de carga, cerca de 15.000 MW em 3 horas, no período de transição entre o dia e a noite. Conforme divulgado em relatório do operador (Loutan, 2018), a forma de operar o sistema é dependente dos recursos disponíveis no dia. A estratégia de operação conta com reduções de geração de fontes renováveis (*curtailment*, em inglês), usinas hidrelétricas e térmicas, além da interconexão com sistemas vizinhos.

Relatórios do CAISO indicam que não se deve contar com as usinas eólicas para o atendimento da referida rampa, nem com a importação de energia de sistemas vizinhos interconectados. Porém, o operador confirma que as interconexões com sistemas vizinhos são alternativas eficazes para exportar energia renovável durante os picos de geração renovável e, em alguns casos, para importação de recursos em momentos do atendimento da rampa. Durante o ano de 2017, apenas

1,3 % da geração eólica no CAISO precisou ser reduzida (Loutan, 2018). Além disso, o Estado da Califórnia tem metas de instalação de 1.325 MW em sistemas de armazenamento de energia até 2020.

3.3 ERCOT

O *Electric Reliability Council of Texas* (ERCOT) é o operador responsável pelo Estado do Texas, no sudoeste dos Estados Unidos, operando uma malha de cerca de 68.800 km de linhas de transmissão que corresponde a 90 % da carga da região, cuja ponta de carga era 71.000 MW em 2016 (Bloom, et al., 2017). O sistema operado pelo ERCOT pode ser considerado praticamente um sistema isolado, dado que a sua interconexão com os sistemas vizinhos se limita a 1.100 MW em corrente contínua (Woodfin, 2016).

Em 2006, a *Public Utility Commission of Texas* propôs a criação das *Competitive Renewable Energy Zones* (CREZs), as zonas para a geração de energias renováveis competitivas. Desde a proposta, a comissão investiu 6,8 bilhões de dólares na criação de 5.760 km de novas linhas de transmissão que entraram em operação em 2014 para escoar cerca de 18.500 MW de geração renovável (principalmente eólica) (Conto, 2012).

Entre 2011 e 2016, o preço médio da energia caiu de 45 US\$/MWh em 2011 para 22 US\$/MWh em 2016 ao passo que a carga cresceu cerca de 28 milhões de MWh, trazendo benefícios para os usuários. Nesse período, a penetração de energia eólica no sistema cresceu de 9 % para 16 %, operando com fatores de capacidade anuais entre 31 e 35 % (Tsai & Gülen, 2017).

Porém, com a crescente participação das fontes renováveis surgiram desafios motivados pela aleatoriedade dos insumos primários. Como fator agravante, o ERCOT é um sistema praticamente isolado, excluindo soluções que envolvem importação ou exportação de energia para sistemas vizinhos. Para lidar com esse crescimento, foi criada a Mesa de Riscos de Confiabilidade (*Reliability Risk Desk*, em inglês) que entrou em operação em janeiro de 2017, no Centro de Operação (Tsai & Gülen, 2017). O objetivo desse novo recurso é avaliar riscos relacionados a erros de previsão na geração renovável, a atendimento da rampa de geração devido à brusca variação de recursos e a baixa inércia, dentre outros.

Pesquisas e ações implementadas pelo ERCOT para a acomodação de crescentes níveis de penetração incluíram avanços na previsibilidade de geração das fontes renováveis e no estabelecimento de novos requisitos de operação. Os avanços na previsibilidade resultaram numa redução de erro de 8 % para 5 % nos

períodos de ponta de geração e de 8,8 % para 6,8 % fora de ponta (Tsai & Gülen, 2017). Dentre os novos requisitos de operação houve a exigência e suporte de frequência das turbinas eólicas de forma semelhante ao da geração convencional e também a participação das novas turbinas eólicas no suporte de potência reativa à rede (Matevosyan, 2018).

3.4 DINAMARCA

A Dinamarca é o país que opera com a maior penetração de fontes renováveis (excluindo as hidrelétricas) no mundo. Em 2017, 44 % da demanda dinamarquesa foi atendida por fazendas eólicas e 2 % atendida por fazendas solares (Danish TSO, 2018). O pico de carga do sistema elétrico da Dinamarca é de 6.500 MW enquanto que a capacidade instalada em energia renovável é de 5.000 MW de fazendas eólicas e 900 MW de fazendas solares. Além disso, o sistema é bastante interconectado, tendo 6.000 MW de conexões com países como Holanda, Alemanha e Noruega.

Conforme mostrado na Tabela 3.1, a Dinamarca chegou a operar com 140 % de penetração instantânea de fontes renováveis. Isso só foi possível graças à grande quantidade de interconexões com países vizinhos. A Noruega possui 967 MW em capacidade instalada de hidrelétricas reversíveis (U.S. Department of Energy, 2019), o que traz grande benefício para a operação do sistema elétrico da Dinamarca: em momentos de excesso de produção de energia eólica, em que a energia pode ser vendida para os vizinhos, para que seja armazenada nas hidrelétricas reversíveis ou consumida instantaneamente. Nos momentos em que a geração eólica é menor, além de contar com a sua própria geração térmica, a Dinamarca pode comprar energia renovável proveniente de hidrelétricas da Noruega, o que, muitas vezes, tem custo menor do que despachar as usinas termelétricas.

3.5 CHINA

O sistema elétrico da China está entre os mais complexos do mundo. Ao final de 2016, a China atingiu 1.646.000 MW de capacidade instalada de geração sendo 148.000 MW de geração eólica e 77.000 MW de geração solar. No total, estas fontes renováveis correspondem a 13,7 % da capacidade instalada de geração (Xin, Zhang, Zhai, Li, & Zhou, 2018). Além disso, a China possui a maior capacidade instalada de linhas de transmissão em ultra alta tensão (acima de 1.000 kV) (Xin, Zhang, Zhai, Li, & Zhou, 2018).

Porém, as fontes renováveis não estão uniformemente espalhadas pelo sistema. Algumas províncias do norte/noroeste da China chegam a ter 30 % da capacidade instalada composta por fontes renováveis. Para a acomodação destes altos níveis de penetração, as soluções encontradas pelos chineses foram:

- a revisão dos requisitos de operação de rede;
- o desenvolvimento de um sistema específico para o gerenciamento de energia (*Energy Management System* (EMS), em inglês)¹.

O sistema EMS desenvolvido além de permitir a integração de altos níveis de penetração de fontes renováveis também aborda a gestão da confiabilidade, do despacho automatizado, da cyber segurança e da gestão de dados, em uma única plataforma amigável. Um dos módulos deste sistema EMS responsável pela operação inteligente de redes elétricas (o *Smart Grid Operation System*, SGOS) permite a otimização da operação da rede seguindo objetivos de segurança, de confiabilidade, de emissões e de queima de combustíveis fósseis. O uso de tal sistema resultou em uma produção anual de energia renovável de 260 GWh em 2016, o que supera a produção anual da usina hidrelétrica de Três Gargantas, a maior usina em capacidade instalada do mundo.

3.6 BRASIL

No Brasil, o órgão responsável pela operação do sistema elétrico interligado é o Operador Nacional do Sistema (ONS). O sistema interligado é composto de quatro subsistemas: norte, nordeste, sudeste/centro-oeste e sul. Dos quase 13 GW de capacidade instalada de geração eólica do Brasil, 80 % se encontra no nordeste e 20 % no subsistema sul.

Esta distribuição não uniforme da capacidade instalada cria diversos desafios para a operação do sistema interligado. Um dos parâmetros do sistema que exige atenção especial na operação com elevadas penetrações de geração variável é a frequência. Como a velocidade do vento pode variar rapidamente de um instante para o outro, a frequência do sistema elétrico pode sofrer oscilações repentinas de frequência com o excesso ou diminuição da produção da energia eólica.

Uma das formas de se mitigar as variações de frequência no sistema interligado é através da reserva de potência operativa. O ONS prevê três tipos de reservas: primária, secundária e terciária. A reserva primária é aquela que

¹ Para mais detalhes do SEM da China ver (Xin, Zhang, Zhai, Li, & Zhou, 2018).

deve ser mantida nas próprias unidades geradoras dentro da área de controle. Atualmente, o ONS exige a participação de geradores térmicos e hidrelétricos na resposta primária de frequência (RPF). Para lidar com os crescentes níveis de penetração de energia renovável variável, principalmente da fonte eólica, no nordeste brasileiro, o ONS recentemente passou a exigir das fazendas eólicas a capacidade de atuarem em distúrbios de frequência. A participação no RPF atualmente não é remunerada e a capacidade para seu atendimento é verificada no momento de comissionamento da planta.

A reserva secundária está alocada em unidades geradoras sob o controle automático da geração, mas que não necessariamente estão produzindo energia, estando comprometidas com o ONS com a sua capacidade. A reserva secundária deve ser incrementada para garantir a estabilidade de frequência quando a velocidade do vento varia rapidamente, tanto sendo capaz de auxiliar o sistema a elevar a frequência, quanto a reduzir. Os valores da reserva operativa de potência secundária são calculados pelo ONS como (Lins, et al., 2018):

$$R_{2e} = 0,040C + R_{eólica} \quad (8)$$

e

$$R_{2r} = 0,025C + R_{eólica} \quad (9)$$

Onde

R_{2e} indica a reserva secundária para elevação de frequência;

R_{2r} indica a reserva secundária para redução de frequência;

C indica a carga da área de controle;

$R_{eólica}$ indica a parcela a ser adicionada à reserva secundária devida à geração eólica.

A parcela $R_{eólica}$ é calculada como sendo um percentual da geração eólica previsto para o período. Para o subsistema sul, este percentual é de 15 % e para o nordeste, 6 % (Lins, et al., 2018).

O ideal é que esta reserva secundária de potência seja alocada em usinas hidrelétricas dentro do subsistema. Porém, esta alocação nem sempre é possível por conta dos regimes hidrológicos das bacias da região. Dessa forma, a alocação deve ser feita em subsistemas diferentes, o que torna a interligação do sistema

nacional extremamente importante para manter a estabilidade de frequência nos sistemas sul e nordeste, os mais ricos em geração eólica. Outra ação implementada pelo ONS para a operação em tempo real e possibilitar a integração de elevados níveis de penetração de geração eólica foi o Sistema de Gestão de Previsões Eólicas (SGPE).

3.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em algumas experiências internacionais para acomodação de crescentes níveis de penetração de fontes renováveis de energia (excluindo a hidrelétrica), observa-se, resumidamente, os seguintes recursos:

- Organização de mercados de energia em tempo real;
- Organização de mercados de serviços ancilares;
- Melhoria na predição dos recursos renováveis;
- Interconexão com sistemas elétricos vizinhos;
- Elaboração de códigos adicionais de rede;
- Criação de sistemas específicos para gerenciamento do sistema elétrico com alta penetração de fontes intermitentes.

Os operadores do sistema conduzem estudos para uma correta organização dos mercados de energia em tempo real, avaliação da construção de interconexões com sistemas vizinhos ou para atualizar ou criar requisitos de rede. Estes estudos são baseados em modelos computacionais do sistema elétrico como um todo, objeto de capítulos subsequentes.