



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

MARCELO LOPES ALMEIDA JACOB

SERVIÇOS ANCILARES OFERTÁVEIS POR USINAS HIDROELÉTRICAS E SUAS
IMPORTÂNCIAS PARA UMA MATRIZ ELÉTRICA COM ALTA PENETRAÇÃO DE
FONTES VARIÁVEIS

Belo Horizonte – MG

2019

MARCELO LOPES ALMEIDA JACOB

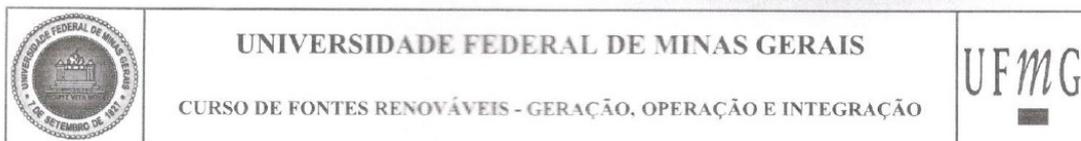
**SERVIÇOS ANCILARES OFERTÁVEIS POR USINAS HIDROELÉTRICAS E SUAS
IMPORTÂNCIAS PARA UMA MATRIZ ELÉTRICA COM ALTA PENETRAÇÃO DE
FONTES VARIÁVEIS**

Monografia para conclusão do curso de Especialização em Fontes Renováveis: Geração, Operação e Integração, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Engenharia Elétrica.

Orientador: Bruno Marciano Lopes

Belo Horizonte – MG

2019



ATA DA DEFESA DA MONOGRAFIA DO ALUNO MARCELO LOPES ALMEIDA JACOB

Realizou-se, no dia 05 de dezembro de 2019, às 13:50 horas, Sala de Seminários 1012 - Escola de Engenharia da UFMG, da Universidade Federal de Minas Gerais, a defesa de monografia, intitulada *SERVIÇOS ANCILARES OFERTÁVEIS POR USINAS HIDROELÉTRICAS E SUAS IMPORTÂNCIAS PARA UMA MATRIZ ELÉTRICA COM ALTA PENETRAÇÃO DE FONTES VARIÁVEIS*, apresentada por MARCELO LOPES ALMEIDA JACOB, número de registro 2018707900, graduado no curso de ENGENHARIA ELÉTRICA, como requisito parcial para a obtenção do certificado de Especialista em FONTES RENOVÁVEIS - GERAÇÃO, OPERAÇÃO E INTEGRAÇÃO, à seguinte Comissão Examinadora: Prof(a). Bruno Marciano Lopes - Orientador (CEMIG), Prof(a). Wadaed Uturbey da Costa (UFMG).

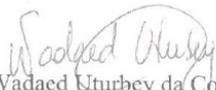
A Comissão considerou a monografia:

Aprovada

Reprovada

Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.
Belo Horizonte, 05 de dezembro de 2019.


Prof(a). Bruno Marciano Lopes (Mestre)


Prof(a). Wadaed Uturbey da Costa (Doutora)


Secretaria do Curso de Especialização em
Fontes Renováveis - Geração, Operação
e Integração

RESUMO

Esta monografia busca descrever o estado da arte em sistemas elétricos de potência, especificamente no que tange à capacidade de usinas hidrelétricas em prover serviços ancilares necessários no contexto de alta penetração de geração renovável variável - VRE (do inglês, Variable Renewable Energy). Com as usinas de VRE, novas condições operativas estão sendo crescentemente demandadas do sistema elétrico, criando novos patamares de necessidades e serviços ancilares. Estas alterações e peculiaridades na operação, geradas pelas VRE, tem sido base de estudos, de artigos, de normas e de procedimentos elaborados por diferentes agentes atuantes no sistema elétrico (operadores de sistema, órgãos reguladores, concessionárias, academias, agências internacionais, etc). O Brasil se insere neste contexto de uma forma única, tendo em vista suas dimensões continentais e sua diversidade de fontes na sua matriz elétrica, que propicia elevadas taxas de penetração das VREs. Serão abordados conceitos fundamentais e as principais modalidades de serviços ancilares, com destaque para aqueles potencialmente disponibilizados por usinas hidroelétricas. Serão, ainda, analisados alguns mercados existentes de serviços ancilares, no contexto da alta penetração de recursos renováveis e enfatizada a importância da geração hidroelétrica no Brasil, no contexto de alta penetração de geração renovável variável. Portanto, este trabalho tem por objetivo de, por meio de uma revisão bibliográfica, acompanhada de análise crítica, avaliar o potencial de utilização de usinas hidrelétricas para o atendimento destes novos serviços demandados.

Palavras-chave: Alta penetração de energias renováveis. Geração hidrelétrica e fornecimento de serviços ancilares. Serviços ancilares.

ABSTRACT

This monograph seeks to describe the state of the art in electric power systems, specifically regarding the ability of hydroelectric plants to provide ancillary services needed in the context of variable penetration of variable renewable generation (VRE). With VRE plants, new operating conditions are increasingly being demanded from the electrical system, creating a new level of ancillary services needs. These changes and peculiarities in the operation, generated by the VRE, have been the basis of studies, articles, standards and procedures prepared by different agents acting in the electrical system (system operators, regulators, concessionaires, academies, international agencies, etc.). Brazil fits into this context in a unique way, given its continental dimensions and diversity of sources in its electrical matrix, which provides high penetration rates of VREs. Fundamental concepts and the main modalities of ancillary services will be addressed, especially those potentially provided by hydroelectric plants. Some existing ancillary services markets will be analyzed in the context of the high penetration of renewable resources and the importance of hydroelectric generation in Brazil in the context of the high penetration of variable renewable generation. Therefore, this paper aims, through a literature review, accompanied by critical analysis, to evaluate the potential use of hydroelectric plants to meet these new demanded services

Keywords: High penetration of renewable energies. Hydroelectric generation and ancillary services provision. Ancillary services.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Matriz elétrica da Alemanha 2018.	10
Figura 2. Matriz elétrica de Portugal 2018	11
Figura 3. Matriz elétrica brasileira – Balanço energético nacional 2018.....	12
Figura 4. Curva do pato (Curva de Carga da Califórnia) – percepção da crescente penetração da geração FV na curva diária de carga.	13
Figura 5 - Caso Leve – Ano 2027 - Máxima Exportação do N/NE para o SE/CO – Fator de penetração de Eólica: 24%.	14
Figura 6 - Carga Média – Ano 2027 - Máxima Importação do Nordeste.	14
Figura 7 - Carga Leve – Ano 2023 – Máx. Recebimento do SE/CO.	15
Figura 8. Efeitos da operação flexível nas usinas hidrelétricas.....	17
Figura 9: Peças para Promover a Inserção Eficiente dos RED (Recursos Energéticos Distribuídos) no Brasil	19
Figura 10: Fator de capacidade para diferentes níveis de penetração de geração eólica.	21
Figura 11. Curva de Carga no Brasil durante a Copa do Mundo de 2010.	23
Figura 12. Médias horárias mensais da velocidade do vento (a) e da radiação solar (b), para Praia Grande (ano de 1998).....	23
Figura 13. O efeito da inércia no desempenho da frequência	26
Figura 14. Atributos dos tipos de fontes	28
Figura 15. Flexibilidade operativa das principais Tecnologias.	31
Figura 16. Balanço Energético Nacional 2005 - Ano Base 2004 - Estrutura da oferta interna segundo a natureza da Fonte Primária de Geração - Brasil 2004.	32
Figura 17. Insuficiência de flexibilidade do sistema elétrico analisado, dado o do nível de penetração das VREs.	33
Figura 18. Sistema híbrido de geração “Sistema LFAC” provendo serviços ancilares	39

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Desgaste de equipamento por regime de operação.	16
Quadro 2. Categorização das métricas de flexibilidade	28
Quadro 3. Síntese dos estudos dos impactos das fontes eólicas e solar fotovoltaica na rede do Texas, Estados Unidos da América (2017).	30

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agencia Nacional de Energia Elétrica
CaISO	California Independent System Operator
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
IEA	International Energy Agency
MME	Ministério de Minas e Energia
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
RED	Recursos Energéticos Distribuídos
SIN	Sistema Interligado Nacional
SNPTEE	Seminário Nacional De Produção E Transmissão De Energia Elétrica
VRE	Energia Renovável Variável (do inglês <i>Variable Renewable Energy</i>)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 Contexto	10
1.2 Objetivo	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 Energia Renovável Variável	21
2.2 Características das VREs	22
2.2.1 Variabilidade	22
2.2.2 Incerteza	25
2.2.3 Não sincronismo.....	25
3 SERVIÇOS ANCILARES.....	27
3.1 Introdução aos serviços ancilares	27
3.2 Introdução às métricas de flexibilidade.....	28
4 FLEXIBILIDADE DO SISTEMA INTERLIGADO BRASILEIRO.....	32
4.1 O Brasil no cenário das VREs.....	33
5 SISTEMAS HIDRELÉTRICOS FRENTE AOS CENÁRIOS DE ELEVADA PENETRAÇÃO DAS VRE	35
6 CONCLUSÃO.....	41
REFERÊNCIAS	43

1 INTRODUÇÃO

Esta monografia visa analisar alguns dos mercados de serviços ancilares existentes, de sistemas elétricos que já estão sujeitos à alta penetração de recursos renováveis variáveis (Energia Renovável Variável, do inglês *Variable Renewable Energy* – VRE) e discorrer sobre a importância da geração hidroelétrica no Brasil, neste contexto.

Em face da maior demanda por serviços ancilares provocada por este tipo de geração, este trabalho tem por objetivo avaliar a utilização de usinas hidrelétricas com reservatório, para o atendimento de alguns dos serviços demandados. Para tanto, será realizada uma revisão bibliográfica acompanhada de análise crítica.

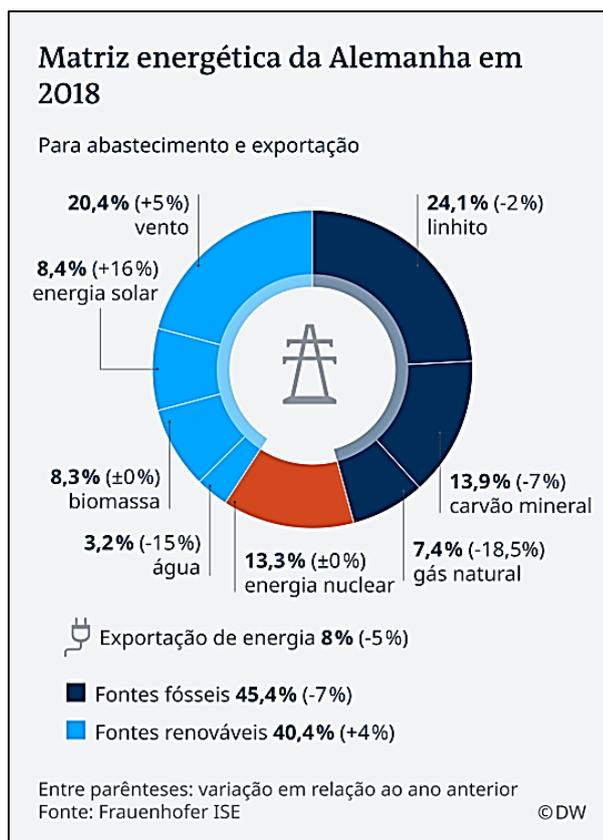
1.1 Contexto

Mundialmente, o apelo ecológico e a buscas por novas fontes de energia renováveis tem promovido a pesquisa e desenvolvimento de uma grande diversidade destas novas fontes (BOYLE, 2004; ASANO JUNIOR; CASELLA; ASANO, 2019).

As fontes de geração variável são largamente estudadas e desenvolvidas por inúmeras questões, que vão desde questões ambientais, segurança energética, econômicas, entre outras.

Em muitos países as VREs (particularmente eólica e solar fotovoltaica) já possuem representatividade na matriz elétrica, como por exemplo na Alemanha e Portugal (Figuras 1 e 2).

Figura 1. Matriz elétrica da Alemanha 2018.



Fonte: Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, 2018.

Figura 2. Matriz elétrica de Portugal 2018

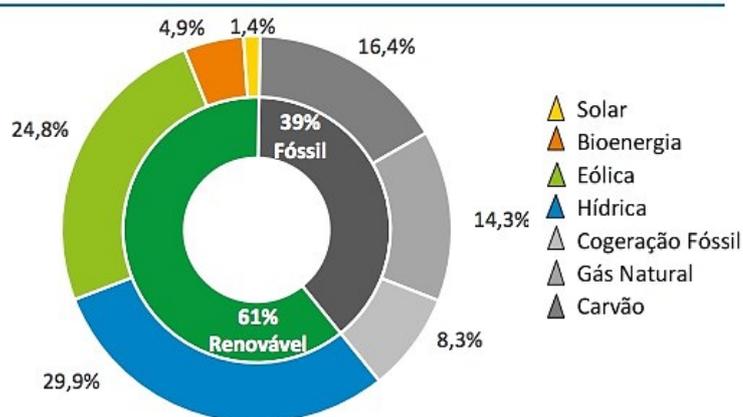


Figura 1: Repartição das Fontes na Produção de Eletricidade em Portugal Continental. (1º Semestre de 2018)

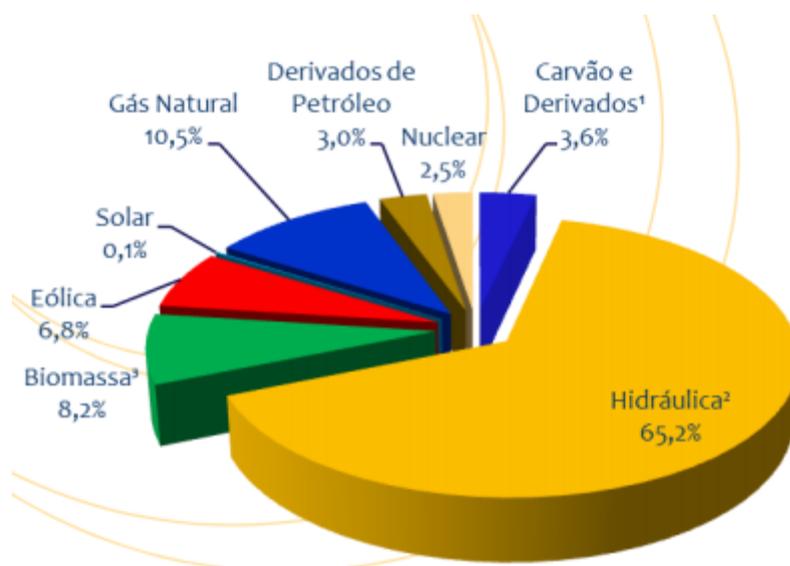
Fonte: REN; Análise APREN

Fonte: Redes Energéticas Nacionais, 2018.

As VREs serão abordadas no capítulo 2 deste trabalho.

No Brasil algumas destas fontes já são largamente utilizadas na matriz elétrica, como por exemplo: as usinas hidrelétricas a fio d'água e as turbinas eólicas e mais recentemente as usinas fotovoltaicas (Figura 3).

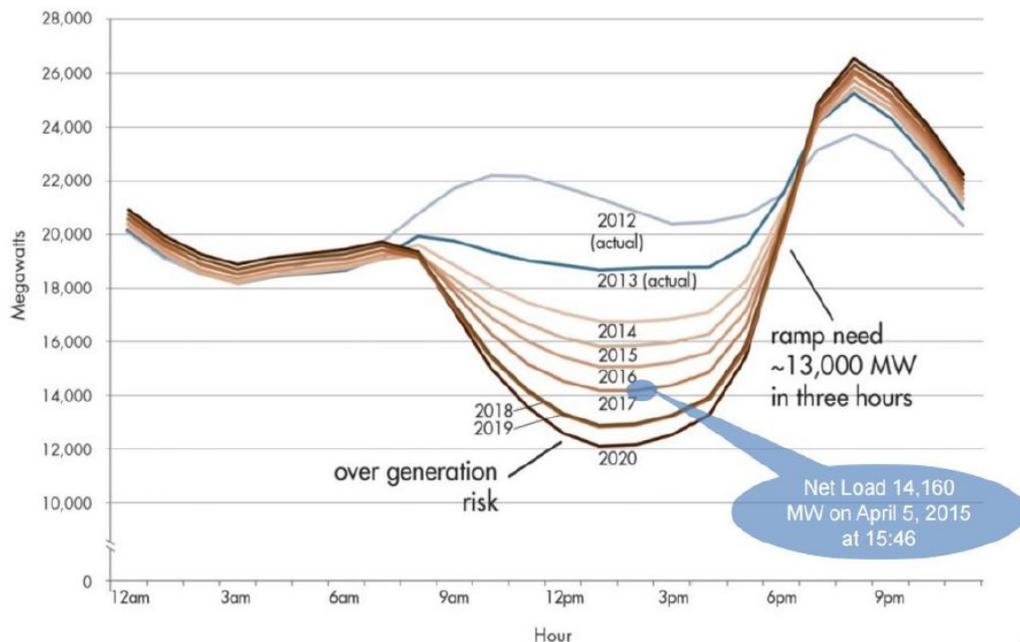
Figura 3. Matriz elétrica brasileira – Balanço energético nacional 2018.



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2018.

É importante observar que o incremento das VREs altera a curva diária de carga líquida dos sistemas elétricos. Por exemplo, a elevada penetração de sistemas fotovoltaicos provoca uma alteração no perfil de carga, característico e recorrente em diversos locais. Este perfil foi apresentado pela primeira vez em 2012 (CAISO, 2013), e devido ao seu formato, foi chamado de “curva do pato” (*duck curve*).

Figura 4. Curva do pato (Curva de Carga da Califórnia) – percepção da crescente penetração da geração FV na curva diária de carga.



Fonte: Caiso, 2013.

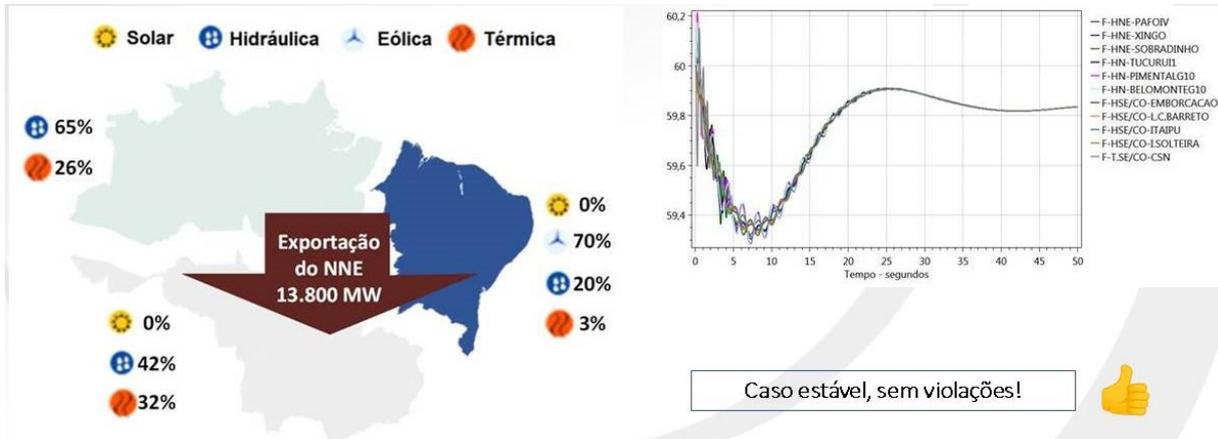
Observa-se na Figura 4 a indicação, pelos autores, de dois riscos ao sistema elétrico, relacionados ao comportamento característico das VREs, são eles: “Sobre geração” e “Necessidade de rampas”. Estes riscos são cada vez mais representativos, dada a alta penetração das VREs.

Outro exemplo é o estudo apresentado no XXV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE, “Avaliação do desempenho dinâmico do Sistema Interligado Nacional frente à crescente inserção de geração eólica na matriz” (Souza *et al.*, 2019), onde são apresentadas simulações para estudar o comportamento do sistema elétrico do nordeste brasileiro, frente a uma redução de 9% da geração eólica por 5 minutos. Os estudos concluem que, a malha de transmissão de interligação de subsistemas agrega resiliência para o sistema elétrico, frente a ocorrência de eventos de alta severidade.

As seguintes simulações elétricas de desempenho dinâmico foram apresentadas para o diagnóstico do sistema – Horizonte PDE 2027 (Figuras 5, 6 e 7).

- Evento: Bloqueio do bipolo Xingu-Terminal Rio, com SEP de corte de UG na UHE Belo Monte.
- Característica do cenário: Despacho elevado de eólicas.

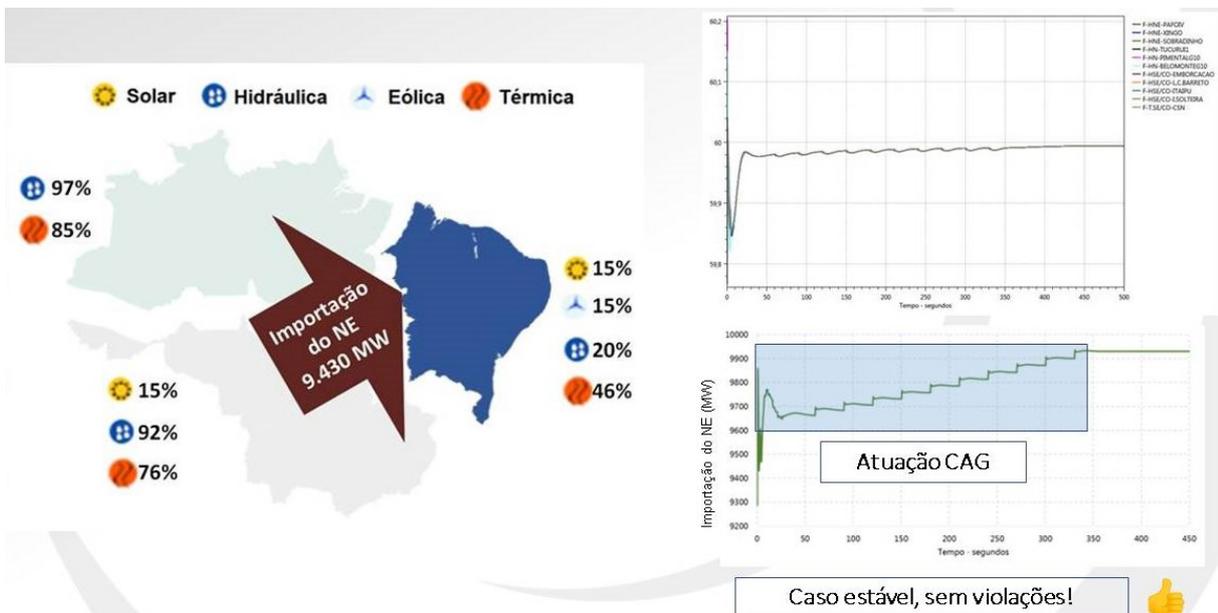
Figura 5 - Caso Leve – Ano 2027 - Máxima Exportação do N/NE para o SE/CO
 – Fator de penetração de Eólica: 24%.



Fonte: Workshop de Serviços Ancilares, 2019.

- Evento: Redução de 9% da geração eólica do Nordeste
- Característica do cenário: Forte dependência da Interligação

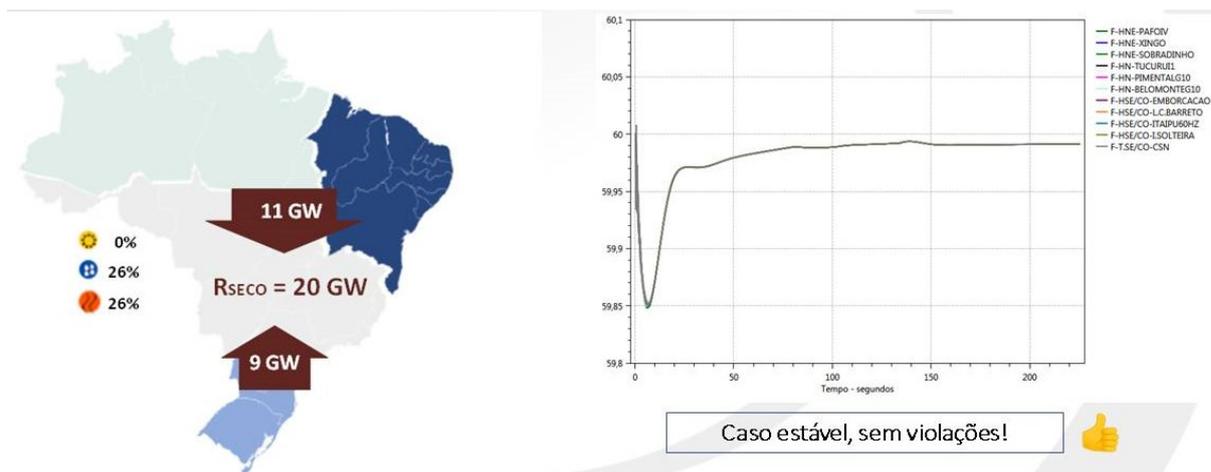
Figura 6 - Carga Média – Ano 2027 - Máxima Importação do Nordeste.



Fonte: Workshop de Serviços Ancilares, 2019.

- Evento: Perda de Angra I
- Característica do cenário: Baixa inércia no subsistema SE/CO

Figura 7 - Carga Leve – Ano 2023 – Máx. Recebimento do SE/CO.



Fonte: Workshop de Serviços Ancilares, 2019.

Em decorrência deste comportamento das VREs, faz-se necessária a adequação do modelo operativo do sistema elétrico, onde fontes despacháveis passam a ser operadas de maneira menos usual, sendo estas despachadas em intervalos de tempo bem menores. Esta condição operativa pode acarretar custos adicionais de operação, por exemplo: perda de eficiência, ou mesmo dada a maior frequência de partida e paradas das turbinas hidráulicas, há um desgaste anormal das unidades geradoras e outros equipamentos relacionados, como demonstrado no Quadro 1(BAHLEDA, 2001).

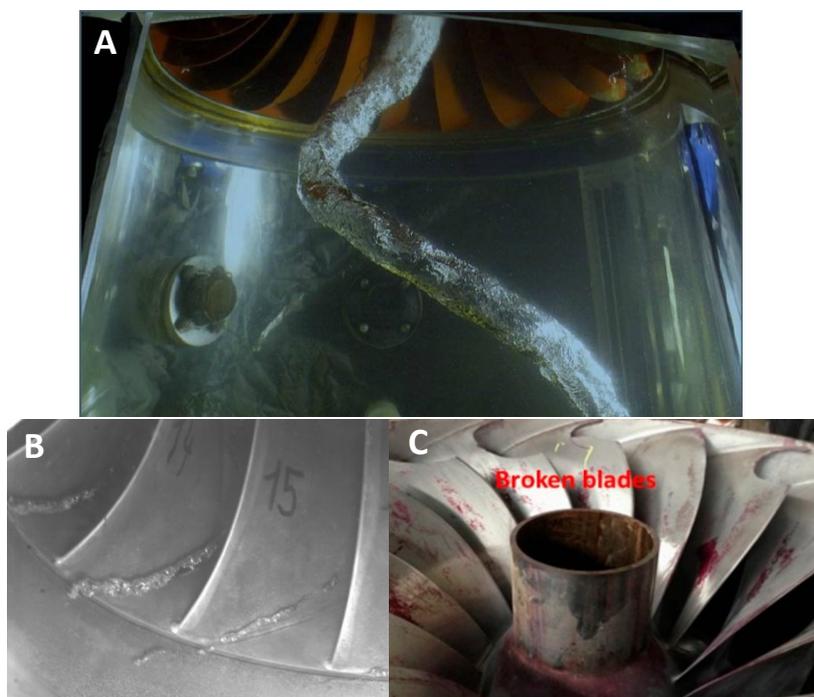
Quadro 1. Desgaste de equipamento por regime de operação.

Rotor da turbina	Incremento da frequência de inspeção devido à operação fora do ponto ótimo	Cavitação
Pás móveis	Desgaste dos rolamentos e conexões mecânicas	Frequentes ajustes para regulação (deslizamento, obstruções)
Atuadores, cilindros hidráulicos, servomotores, transdutores	Substituição mais frequente	Uso como resultado de maiores frequências de ajuste
Estator/rotor do gerador	Incremento na frequência de inspeção	Vibração
Enrolamentos do estator	Incremento na frequência de inspeção	Danos por vibração e ciclos térmicos
Enrolamentos do rotor	Faltas com relação a terra e entre enrolamentos	Ciclos de partida e de parada, incremento nas correntes de excitação ou ambos
Transformadores	Incrementos na inspeção e manutenção	Mudanças de temperatura devido a cargas parciais e completas de curta duração
Controle e instrumentação	Substituição mais frequente	Uso como resultado de ajuste e de movimentos frequentes

Fonte: Adaptado de Bahleda, 2001

A figura 8 demonstra alguns efeitos da operação flexível nas usinas hidrelétricas.

Figura 8. Efeitos da operação flexível nas usinas hidrelétricas



Fonte: Workshop de Serviços Ancilares, 2019

Entre os principais efeitos da operação flexível nas usinas hidrelétricas estão:

- Esforços dinâmicos em estruturas e componentes devido a fenômenos hidráulicos na partida/parada ou em carga parcial (vórtices entre pás, trança, flutuação de pressão/torque) → Fadiga, danos, redução da vida útil.
- Desgaste prematuro de componentes (ex. freios gerador) → Aumento custos e periodicidade das manutenções e redução da disponibilidade.
- Perdas energéticas: rendimento menor em carga parcial, volume de água gasto sem gerar energia (partidas, paradas, vazamentos no distribuidor), custo de oportunidade.

Fonte: (Painel 1 - Workshop de Serviços Ancilares, 2019)

Entre os principais Desafios:

- Projetos específicos → efeitos/custos diferentes
- Previsão da forma de operação nas fases iniciais dos estudos/projeto (ex. balanço entre rendimento x custos x flexibilidade) [...]"

Fonte: (Painel 1 - Workshop de Serviços Ancilares, 2019)

A inserção de representativos volumes de VRE pode acarretar significativos desafios técnicos, regulatórios e de política pública. No Brasil, tem-se observado uma atuação muito frequente da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), Operador Nacional do Sistema elétrico (ONS) e Empresa de Pesquisa Energética (EPE), na busca por um equilíbrio e por uma expansão adequada da matriz elétrica brasileira. Cita-se a resoluções da ANEEL, como a RN-482 que regula a micro e minigeração, comumente chamada de geração distribuída, que majoritariamente faz uso de geração solar fotovoltaica e os relatórios de planejamento energéticos elaborados e divulgados pela (ANEEL, 2012)

O Brasil pode valer-se da experiência internacional sobre o tema, incorporando as experiências adquiridas pelos sistemas com elevada penetração de VRE (Ex: Alemanha; California Independent System Operator - CalISO) e estudos realizados na Inglaterra, Suíça, Noruega, Portugal entre outros, para o armazenamento de energia excedente em reservatórios hidráulicos ou mesmo para operação das Hidrelétricas em conjunto com as VREs, como proposto no estudo *“Provision of ancillary services by renewable hybrid generation in low frequency AC systems to the grid”* (DONG; ATTYA; ANAYA-LARA, 2019). Os sistemas de outros países com elevada penetração de VRE podem, em certa proporção, auxiliar no planejamento adequado para a expansão da matriz energética, bem como na abordagem regulatória e de política pública. Desde que “tropicalizando” às condições do SIN (Sistema Interligado Nacional) estas experiências podem ser de grande valia. Alguns estudos serão citados nos próximos capítulos.

O Ministério de Minas e Energia (MME) publicou na Consulta Pública nº 87 de outubro de 2019, o relatório elaborado pela EPE, Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) 2029, com fortes indicativos de que o tema está sendo amplamente analisado.

“Com relação ao potencial de geração renovável na região Nordeste, o presente ciclo do PDE mantém a previsão de uma expressiva participação das fontes eólica e solar nessa região. Esse montante já supera aquele considerado nas premissas dos estudos de transmissão já desenvolvidos, o que, além da própria ampliação do horizonte, determina que se realizem novos estudos prospectivos com foco nas interligações, objetivando verificar a necessidade de novas expansões, além daquelas já previstas” (EPE, p.14, 2019)

O relatório em questão, em sua página 98, menciona no Caso 5: alternativas para o suprimento de potência: resposta da demanda e modernização de UHE, bem como o item 9.5., uma visão de futuro para os recursos energéticos distribuídos.

“Caso 5: Alternativas para o Suprimento de Potência: Resposta da Demanda e Modernização e UHE”.

“9.5. Um Visão de Futuro para os Recursos Energéticos Distribuídos

(...) Concomitantemente, cabe permitir que os RED participem de mercados competitivos do setor elétrico. Eficiência energética, por exemplo, poderia competir em leilões de energia; resposta da demanda e armazenamento, por outro lado, poderiam participar de mercados de capacidade e serviços ancilares. Para que isso ocorra, precisa haver um mercado competitivo para esses serviços. Essa pode ser uma forma de remuneração adicional para os RED.” (EPE, p.245, 2019)

Este mesmo relatório traz a figura 9, com uma representação das peças necessárias para a inserção eficiente dos recursos energéticos distribuídos (RED) no Brasil.

Figura 9: Peças para Promover a Inserção Eficiente dos RED (Recursos Energéticos Distribuídos) no Brasil



Fonte: (EPE, 2019)

1.2 Objetivo

Esta monografia visa analisar a utilização das usinas hidroelétricas com reservatórios, como uma opção para atender a requisitos de sistema impostos pela VRE, de forma a mitigar os riscos e minimizar os impactos que estas trazem à operação do Sistema Interligado Nacional (SIN).

Esta forma de operação representaria uma mudança no paradigma operacional do Sistema Elétrico Brasileiro, visto que as hidroelétricas com reservatório são, via de regra, despachadas e utilizadas como energia de base.

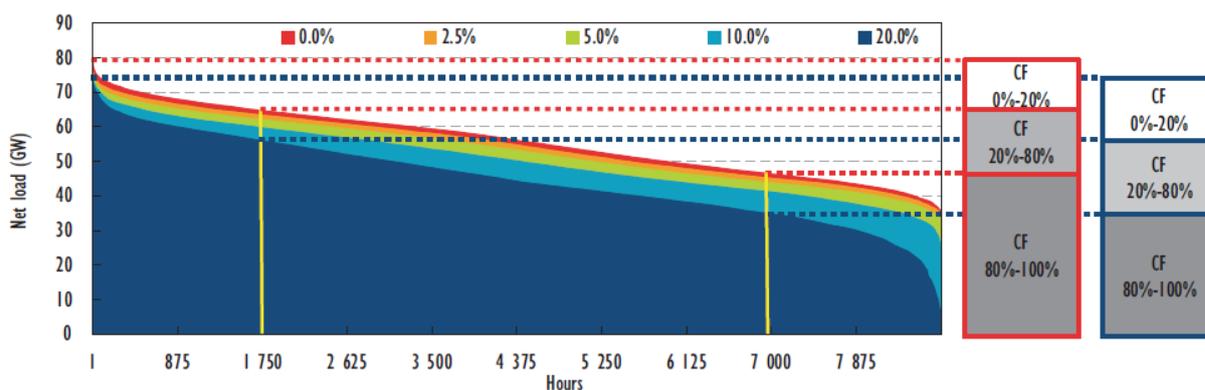
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Energia Renovável Variável

A necessidade por novas fontes de geração de energia renovável e a expansão da matriz elétrica torna o uso massivo destas fontes uma realidade. Uma característica marcante destas fontes é a grande variação da potência disponível, em escalas temporais desde poucos segundos até plurianuais (conforme a tecnologia considerada). Para a maioria destas novas fontes não há armazenamento integrado. Este fato inviabiliza o planejamento de despacho destas fontes. Exemplificando: geração eólica, ondas, marés e a geração solar fotovoltaica, são fontes por natureza não despacháveis (SOUSA; JARDINI, 2014).

O fator de capacidade do Sistema Elétrico é reduzido quanto maiores forem os níveis de penetração das VREs, pois estas irão prover a energia na medida da disponibilidade da sua fonte, como por exemplo, o vento para as eólicas e a irradiação solar para as fotovoltaicas. Desta forma, as fontes despacháveis irão contribuir com uma menor fatia para energia de base, resultando em uma redução do fator de capacidade médio do Sistema Elétrico Nacional. Esta condição acaba por gerar uma necessidade adicional por flexibilidade, como pode ser observado na Figura 10:

Figura 10: Fator de capacidade para diferentes níveis de penetração de geração eólica.



Nota: CF = Fator de capacidade (do inglês capacity factor)

Fonte: IEA, 2014

2.2 Características das VREs

A Agência Internacional de Energia (IEA, 2009) indica seis importantes características das usinas de VRE, que afetam a operação e os investimentos no setor elétrico, são eles:

- Baixo custo de operação
- Variabilidade
- Incerteza
- Restrições locacionais
- Modularidade
- Não sincronismo.

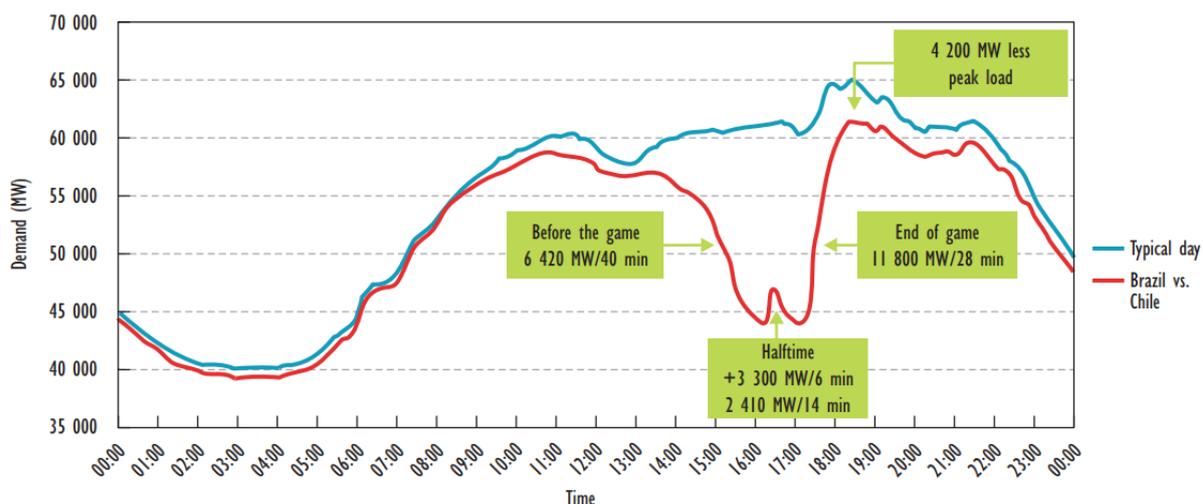
Dentre estas, serão abordadas três características que trazem relevantes análises para a operação do sistema elétrico, pois estão diretamente relacionadas aos serviços ancilares ofertáveis por usinas hidrelétricas. São elas:

2.2.1 Variabilidade

A variabilidade é uma característica das VREs que impacta na operação do sistema elétrico (IEA, 2009).

O efeito da variabilidade da demanda líquida provocado pelas cargas é algo já a muito estudado e conhecido. Este conhecimento permite uma previsão com grande precisão para a carga diária. Contudo, estas previsões ainda estão suscetíveis às variações, como as variações de curto prazo, as variações climáticas que impliquem em comportamento atípico da demanda (como em dias extremamente quente e o uso de ar condicionado), ou eventos relacionados ao comportamento do consumidor. Um exemplo desse último pode ser observado na figura 11, que mostra a forte variação de carga durante um jogo da Copa do Mundo em 2010.

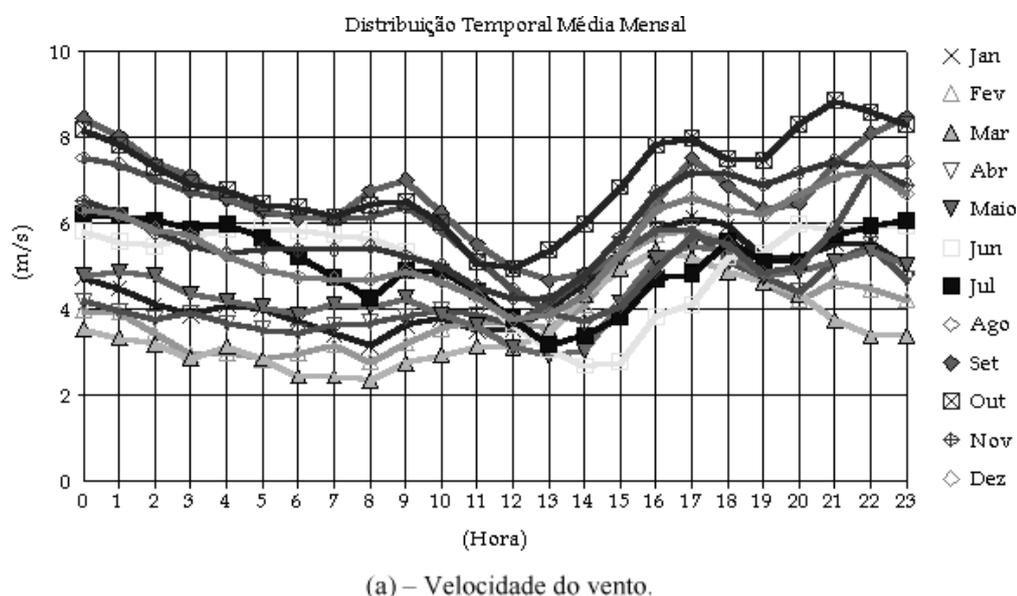
Figura 11. Curva de Carga no Brasil durante a Copa do Mundo de 2010.

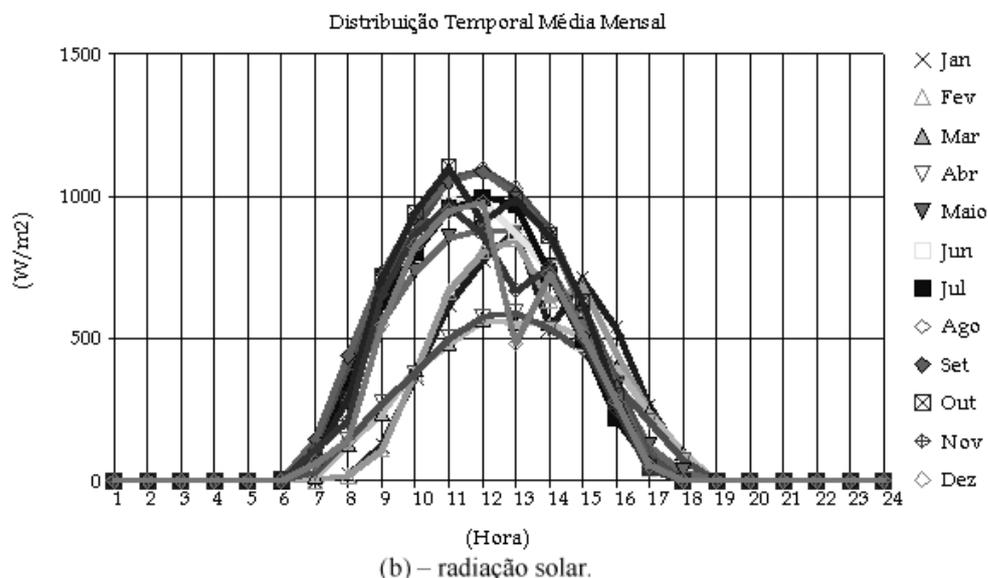


Fonte: IEA, 2014.

Por outro lado, as VREs trouxeram um elevado nível de variabilidade pelo lado das fontes de geração. Cada VRE possui uma característica marcante, quando analisado um sistema individualmente esta variabilidade apresenta efeito relevante, porém se associadas geograficamente, podemos atenuar esta variabilidade (efeito portfólio). Na figura 12 (A e B) verifica-se a curva com o registro horário de disponibilidade de ventos e de radiação, apresentados no Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas DEEC/CT/UFPa em 2002.

Figura 12. Médias horárias mensais da velocidade do vento (a) e da radiação solar (b), para Praia Grande (ano de 1998)





Fonte: (Macêdo; Pinho, 2002)

Outra forma de atenuar a variabilidade das VREs é a utilização de diferentes fontes, o que fará com que as curvas de cargas características de diferentes tipos de VREs sejam sobrepostas, suavizando a variabilidade resultante (geração híbrida de energia elétrica).

Conforme já mencionado, as VRE acarretam impactos nos sistemas de energia em diferentes escalas de tempo (de acordo com o IEA 2014, foi apresentado o conceito de escala de tempo “balanceamento ou equilíbrio”, para curto prazo e escala de tempo de “utilização” para prazos mais alongados de tempo).

Sistemas solares fotovoltaicos, por exemplo, apresentam a variabilidade definida pelo ciclo solar (diurno / sazonal), condições climáticas locais (neblina, nebulosidade) e deposição de partículas suspensas no ar. A curva de carga resultante, considerando a composição da geração de diversas usinas geograficamente distribuídas, acaba por ter um formato de sino com ápice ao meio dia solar. Sistemas solares fotovoltaicos, quando em níveis elevados de penetração demandam o atendimento a rampas ao Sistema Elétrico, como já mencionado na análise da figura 4. Curva do Pato (Curva de Carga da Califórnia) – percepção da crescente penetração da geração FV na curva diária de carga.

2.2.2 Incerteza

A incerteza é uma variável que afeta o planejamento e a operação do Sistema Elétrico. Esta variável está diretamente relacionada à precisão das previsões meteorológicas. A incerteza se diferencia da variabilidade, por ser uma grandeza vinculada à imprevisibilidade do recurso energético disponível para as VREs, ao passo que a variabilidade é uma característica da VRE, ou seja, a variabilidade possui previsibilidade (Informação verbal)¹.

Estudos da Agencia Internacional de Energia (IEA) estimam que as previsões horárias são até três vezes mais precisas que as previsões diárias. Outros estudos da IEA (HOLTTINEN *et al.*, 2006) indicam a necessidade de reservas dada a maior penetração das VREs ao sistema elétrico.

2.2.3 Não sincronismo

As VREs são conectadas ao sistema elétrico por meio da eletrônica de potência, de uma maneira não síncrona. Esta característica difere as VREs das fontes de geração tradicional, compostas majoritariamente por geradores síncronos.

A elevada penetração das VREs demandará atenção na garantia da regulação de frequência.

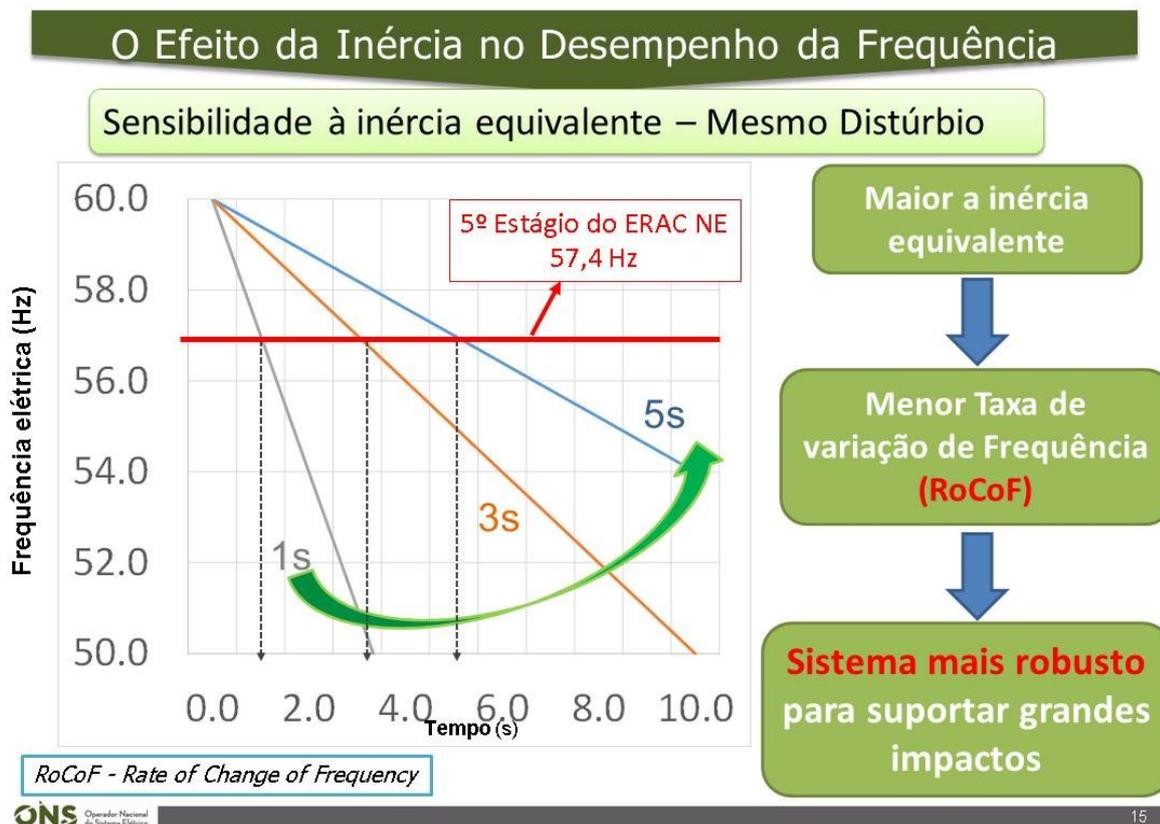
Já os geradores síncronos são conectados ao sistema de forma direta, estabelecendo um acoplamento eletromecânico com a rede. A operação conjunta destas máquinas síncronas estabelece a frequência da rede. As máquinas síncronas, por meio de sua inercia rotacional, absorvem pequenas variações de frequência do sistema, contribuindo para a regulação de frequência. O acoplamento eletromecânico dos geradores síncronos com a rede possibilita que estes atuem de forma conjunta e percebam qualquer variação na frequência da rede.

A redução da inércia equivalente acarreta uma maior sensibilidade do sistema às frequências. Podemos visualizar graficamente este efeito, comparando três sistemas com as inercias equivalentes de 1s, 3s e 5s. Percebe-se que quanto maior a inercia equivalente, menor a taxa de variação de frequência, ou seja, tem-se um

¹ Informação dada no Workshop Serviços Ancilares, ONS, 2019 pelo palestrante Leonardo Rese da empresa Tractebel do grupo Engie.

sistema mais robusto, por exemplo, com maior tempo para atuar em uma possível perda de interligação (Figura 13) (Informação verbal) ².

Figura 13. O efeito da inércia no desempenho da frequência



Fonte: (Workshop de Serviços Ancilares, 2019)

² Informação dada no Workshop Serviços Ancilares, ONS, 2019, pelo palestrante Leonardo Penna do ONS.

3 SERVIÇOS ANCILARES

Neste capítulo, busca-se definir e explicar alguns dos principais serviços ancilares do sistema elétrico.

Para tanto, é feita uma revisão bibliográfica, acompanhada de análise crítica, especialmente no sentido de identificar as especificidades dos serviços ancilares que potencialmente contribuam para a integração das VREs, no contexto brasileiro. Este tópico do trabalho visa o abordar os principais serviços ancilares que são ou provavelmente serão demandados pelo SIN devido à alta penetração das VREs na matriz elétrica.

3.1 Introdução aos serviços ancilares

O termo “serviços ancilares” foi empregada na Lei 9.648/98 (Art. 13, Parágrafo único, “d” e Art. 14, § 1º, “d”) (BRASIL, 1998) sem uma definição explícita do seu significado. Este termo foi derivado do inglês “*ancillary services*” cuja definição neste idioma é: “algo que prove o suporte necessário para as atividades”.

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) por meio do Submódulo 21.9 - Análise técnica dos serviços ancilares, define em seu item 1.3 (ONS,p.3, 2008):

1.3 Para fins e efeitos regulatórios são reconhecidos como serviços ancilares:

- (a) controle primário de frequência;
- (b) controle secundário de frequência;
- (c) reserva de potência para controle primário;
- (d) reserva de potência para controle secundário;
- (e) reserva de prontidão;
- (f) suporte de reativos;
- (g) auto-restabelecimento (black start); e
- (h) sistem*as especiais de proteção – SEP

A natureza física da geração e do consumo de eletricidade implica que estas devem estar em equilíbrio instantaneamente e em todos os momentos. Estas condições são almejadas na operação do SIN.

Cada tecnologia/combustível possui seus próprios atributos intrínsecos ao processo e desta forma, cada uma é mais indicada para cada tipo de necessidade (Fig.14)

Figura 14. Atributos dos tipos de fontes

Tipos de Fonte	Serviços Essenciais					Garantia de combustível		Flexibilidade			Outros		
	Resposta em Frequência	Controle de Tensão	Rampa			Combustível Ilimitado (> 72h)	Estoque de Combustível local	Ciclo	Curto tempo de tomada (Várias partidas por dia)	Tempo de resposta <30min	Black Start	Sem Restrições Ambientais	Fator de Disponibilidade Equivalente
			Regulação	Reserva de Contingência	Atendimento a Carga								
Hidráulica	●	●	●	●	●	○	○	●	●	●	○	○	○
GN Ciclo Aberto	●	●	○	●	○	●	○	●	●	●	○	○	○
Óleo Ciclo Combinado	●	●	●	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○
Carvão	●	●	●	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○
GN Ciclo Combinado	●	●	●	●	●	○	○	●	○	○	○	○	○
Óleo/Diesel	●	●	○	●	○	○	●	●	●	●	○	○	○
Nuclear	○	●	○	○	○	●	●	○	○	○	○	○	○
Armazenamento	○	○	●	●	○	○	○	●	●	●	○	○	○
Resposta da Demanda	○	○	○	○	○	○	○	●	●	○	○	○	○
Solar	○	○	○	○	○	○	○	●	●	●	○	○	○
Eólica	○	○	○	○	○	○	○	●	●	●	○	○	○

Fonte: Workshop de Serviços Ancilares, 2019

3.2 Introdução às métricas de flexibilidade

Flexibilidade é a capacidade de um sistema elétrico de ajustar-se a mudanças repentinas na geração ou na demanda (ULBIG; ANDERSSON, 2015).

O *Lawrence Livermore National Laboratory* (EDMUNDS; ALZAABI; MILLS, 2017) tipifica as métricas em quatro categorias básicas: Demanda por flexibilidade; Geração flexível; Equilíbrio entre fornecimento de flexibilidade e flexibilidade exigida; Inflexibilidade.

Segundo (EDMUNDS; ALZAABI; MILLS, 2017) estas métricas indicam a necessidade de alterações do sistema em escalas temporais e espaciais. Essas métricas foram segmentadas no Quadro 2.

Quadro 2. Categorização das métricas de flexibilidade

Categorização	Métrica
---------------	---------

Demanda por flexibilidade	Magnitude das rampas de carga líquida em diferentes escalas temporais e regiões
	Magnitude dos erros de previsão de carga líquida em relação a diferentes horizontes de previsões
	Proporção entre carga de pico e carga diária mínima (por estação e dia de semana)
	Penetração de geração solar e eólica (inclusive atrás do medidor)
Geração flexível	Taxa de rampa de geradores despacháveis sustentáveis em diferentes escalas de tempo
	Nível mínimo de geração de geradores
	Capacidade de armazenamento de energia
	Resposta da demanda (por estação, hora do dia e necessidade de antecipação da notificação)
	Capacidade intra e inter-regional da transmissão
Equilíbrio entre Fornecimento de flexibilidade e flexibilidade exigida	Períodos de déficit de flexibilidade
	Expectativa insuficiente de recursos de rampa
	Perda de carga dentro da hora e de várias horas devido à falta de flexibilidade
Inflexibilidade	Necessidade de corte de geração de fontes renováveis
	Grandes diferenças de preços entre mercados, dia seguinte (DA, do inglês day ahead) e em tempo real (RT, do inglês real time)
	Escassez de reservas operacionais
	Violações de restrição de equilíbrio de energia
	Alívio de carga

Fonte: Adaptado de Edmunds; Alzaabi; Mills, 2017.

Como proposto em “*The impacts of wind and solar on grid flexibility requirements in the Electric Reliability Council of Texas, Energy (2017)*” por Deetjen; Rhodes; Webber, (2017) os requerimentos de flexibilidade, devido aos impactos das fontes eólicas e solar fotovoltaica, podem ser mensurados por taxas e indicadores, conforme abaixo:

- Taxa de rampa horária
- Taxa de rampa de três horas
- Fator de rampa
- Aceleração de rampa
- Volatilidade horária
- Volatilidade diária

Estas taxas e indicadores permitem uma análise qualitativa e quantitativa do requerimento de flexibilidade de uma rede.

Os estudos desenvolvidos por Deetjen; Rhodes; Webber, (2017) foram sintetizados pelo Quadro 3:

Quadro 3. Síntese dos estudos dos impactos das fontes eólicas e solar fotovoltaica na rede do Texas, Estados Unidos da América (2017).

		Efeito do incremento de Capacidade Eólica	Efeito do incremento de Capacidade Solar (FV)
Taxa de rampa horária	Méd.	Não correlacionado	Não correlacionado
	Máx.	Leve aumento de Jun a Ago Leve diminuição de Dez a Mar	Aumento expressivo, especialmente de Nov a Abr
Taxa de rampa de três horas	Méd.	Não correlacionado	Leve aumento de Abr a Out Leve diminuição de Nov a Mar
	Máx.	Aumento moderado de Jun a Set	Aumento moderado de Nov a Abr
Fator de rampa	Méd.	Leve aumento	Diminuição moderada
	Máx.	Leve diminuição	Aumento significativo de Nov a Abr
Volatilidade horária	Méd.	Indeterminado	Indeterminado
	Máx.	Não correlacionado	Aumento significativo de Fev a Ago
Volatilidade diária	Méd.	Indeterminado	Aumento significativo
	Máx.	Não correlacionado	Aumento significativo de Jan a Set

Fonte: Adaptado de Deetjen; Rhodes; Webber, 2017.

Em uma breve análise deste quadro, infere-se a demanda que as fontes eólicas e solar fotovoltaica trazem para o sistema elétrico. Destaca-se a demanda por atendimento a rampa, imposta pela fonte solar fotovoltaica, quando em níveis elevados de penetração.

Quanto à flexibilidade de operação das principais tecnologias, na prestação de serviços ancilares o tempo de resposta é uma característica importante. A capacidade de resposta da potência instalada despachável às variações bruscas na carga se altera de acordo com as tecnologias (Fig. 15).

Figura 15. Flexibilidade operativa das principais Tecnologias.

- Apesar das melhores características, a fonte hidráulica possui a restrição de armazenamento de água, hoje em foco, devido aos cenários hidrológicos desfavoráveis, uso múltiplo da água, etc.

Flexibilidade	Turbina a Gás - ciclo combinado ²	Turbina a Gás - ciclo aberto ²	Motor ³ - ciclo combinado ²	Motor ³ - ciclo aberto ²	Carvão	Hidro	Nuclear
Tempo de partida ¹	30 a 60 min	< 30 min	< 30 min	< 10 min	1 a 6 h	1-10 min	13 a 24 h
Taxa de variação em rampa (<i>ramp rate</i>) por minuto	5 a 10%	10 a 20%	10 a 20%	20%	1 a 5%	20-100%	1 a 5%
Tempo de 0 a 100%	< 20 min	< 10 min	< 10 min	5 min	2 a 6 h	< 10 min	15 a 24 h
Mínimo fator de carga estável	15 a 60 %	15 a 60%	20%	15%	30 a 40%	15 a 40%	30 a 50%
Eficiência	< 63%	< 44%	< 51%	< 48%	-	-	-

¹ A partir do estado quente (geração interrompida entre 6 e 10 horas)

² Turbinas e motores podem ter como combustível gás, óleo combustível ou diesel

³ Motores de média rotação - 720 rpm

Fonte: IEA, 2012+ Informações de fabricantes.

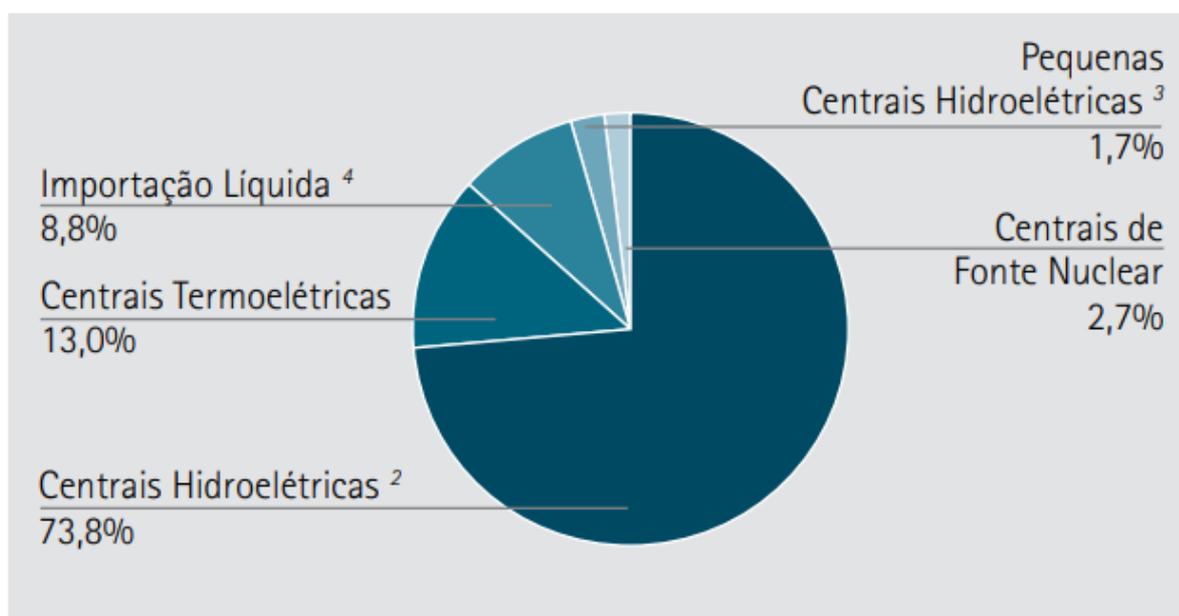
Fonte: (Workshop de Serviços Ancilares, 2019)

4 FLEXIBILIDADE DO SISTEMA INTERLIGADO BRASILEIRO

Flexibilidade é a capacidade do sistema de potência manter os serviços em face das grandes mudanças e alterações na curva de carga do mesmo, independente da origem da perturbação (CARLOS; MANSO, 2010).

Anteriormente às VREs o SIN apresentava predominância de fontes síncronas (como se observa da figura 16), com elevada inercia equivalente e com grande previsibilidade de geração.

Figura 16. Balanço Energético Nacional 2005 - Ano Base 2004 - Estrutura da oferta interna segundo a natureza da Fonte Primária de Geração - Brasil 2004.



¹ Inclui centrais elétricas autoprodutoras.

² Centrais hidroelétricas são aquelas com potência superior a 30 MW.

³ Pequenas centrais hidroelétricas são aquelas com potência igual ou inferior a 30 MW.

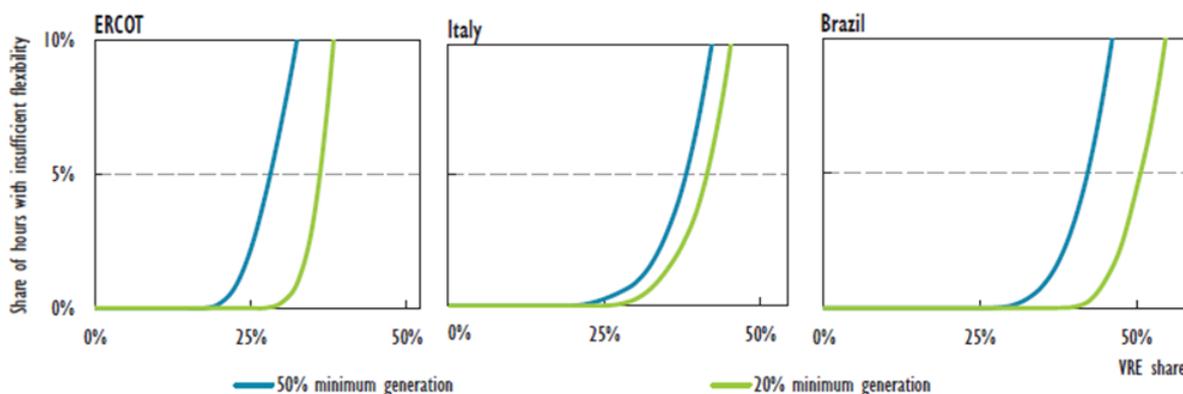
⁴ A importação inclui a parcela paraguaia de Itaipu.

Fonte: (EPE/MME, 2005)

No cenário atual e perspectivas do futuro, a demanda por flexibilidade será cada vez maior (vide

Figura 3. Matriz elétrica brasileira – Balanço energético nacional 2018.). Para este futuro o sistema elétrico brasileiro apresenta características únicas no contexto mundial, com grandes indicativos de capacidade de absorção de penetração de VREs em níveis bastante elevados, quando comparado com outros sistemas internacionais (Fig. 17) (IEA, 2014).

Figura 17. Insuficiência de flexibilidade do sistema elétrico analisado, dado o do nível de penetração das VREs.



Fonte: (IEA, 2014)

Infere-se da figura 17 que o Sistema Elétrico Brasileiro apresenta elevada resiliência aos distúrbios provocados pelas VREs, atingindo o ponto de saturação de disponibilidade de flexibilidade em elevados percentuais de penetração das VREs.

A flexibilidade pode ser provida pelas hidrelétricas com reservatório, com capacidade de atendimento às rampas de incremento ou alívio de geração. Estas fontes de geração de energia serão mais flexíveis, se tiverem:

- Capacidade de entrada rápida ao sistema, quando despachada.
- Tiver regimes operacionais amplos.
- Alterar rapidamente entre diferentes níveis de geração.

4.1 O Brasil no cenário das VREs

A agência reguladora (ANEEL) e a Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE) estão realizando estudos e planejamentos para definição da expansão da matriz elétrica brasileira.

O relatório da ANEEL (2019) registrou o representativo incremento da geração eólica (10%, representando 17,7GW) e o início da evolução e participação das Usinas de Geração Fotovoltaica (2%, representando 2,9GW).

O Plano Decenal de Expansão de Energia 2026 da EPE (2017) registra a atenção que será despendida para garantir que as novas fontes de geração tragam benefícios e estabilidade à matriz elétrica brasileira. Indicando a necessidade de realização de estudos para atendimento horário em complementariedade aos atuais sistemas computacionais de atendimento mensal.

A Nota técnica do Ministério de Minas e Energia nº 5/2017/AEREG/SE (2017) indica a que as VREs poderão contribuir para a redução do custo da energia no Brasil.

5 SISTEMAS HIDRELÉTRICOS FRENTE AOS CENÁRIOS DE ELEVADA PENETRAÇÃO DAS VRE

As alterações impostas à operação do SIN, em função da elevada penetração da VRE refletirão diretamente no regime de operação das fontes despacháveis.

Como relata (DEETJEN; RHODES; WEBBER, 2017) o baixo custo operacional das fontes de geração de energias como a eólica e a solar para o mercado de curto prazo (*day-ahead*) permite que estas fontes tenham preços muito baixos, alterando assim a ordem de despacho das fontes. Neste momento, as fontes despacháveis passarão a operar de maneira não convencional, provendo serviços que antes não lhes caberia, como atendimento a demandas residual, balanço de carga, entre outras condições. Estas demandas impõem às fontes despacháveis a necessidade de atendimento a rampas, ciclos de potência de curto período (incremento de potência e alívio de geração em curtos períodos) entre outras dificuldades que são chamadas de “requerimento de flexibilidade”, sem contudo haver uma remuneração adequada para estes serviços ancilares.

A ANEEL e o ONS promoveram nos dias 31 de julho e primeiro de agosto de 2019 Workshop de Serviços Ancilares, no auditório do escritório do ONS no Rio de Janeiro. Os resultados do evento serão utilizados para subsidiar a preparação de Consulta Pública, a ser realizada de acordo com a Agenda Regulatória da ANEEL para o biênio 2019/2020. Este Workshop foi realizado para debater a regulação destinada à prestação de serviços ancilares e identificar oportunidades de implementação de novas modalidades desses serviços.

Em seu discurso de abertura no Workshop Serviços Ancilares (2019), o “Diretor de TI, Relacionamento com Agentes e Assuntos Regulatórios (DTA)” - Álvaro Fleury Veloso da Silveira, registrou:

“[...]Contextualizando a realização do evento, a gente deve ter em mente que a matriz elétrica brasileira tem passado por transformações marcadas pela redução da regularização dos reservatórios das usinas hidrelétricas e pela forte penetração de fontes renováveis com geração intermitente, especialmente os grandes parques eólicos na região nordeste, assim com a crescente inserção de geração distribuída. O plano decenal de expansão 2027 aponta para um futuro com elevada participação de fontes renováveis na matriz elétrica brasileira, com destaque para eólica e solar também. E esses fatos aliados ao aumento da complexidade da rede indicam que para

garantir uma operação segura estável no sistema, neste cenário, é importante contar com serviços ancilares que proporcione maior qualidade, maior segurança e especialmente também redução de investimentos, por serviços e complementações que esse serviço ancilares podem proporcionar. Identificado a partir disso, tanto pela ANEEL, quanto pelo ONS, quanto pelo setor elétrico como um todo a necessidade de revisitar a regulação destinada a prestação de serviços ancilares. Em virtude disso, a ANEEL e a ONS acordaram a realização deste workshop, do qual participa todo o setor, como já citei, para debater o assunto e identificar necessidades e oportunidades de implementação de novas modalidades de serviços ancilares, ou revisitar os serviços similares existentes, traçando sua nova viabilidade ou impulsionando para uma solução mais abrangente. Os questionamentos, portanto que norteiam é a realização deste workshop são os seguintes:

- Serviços ancilares atualmente regulamentado no Brasil atendem a todas as necessidades da operação do SIN do presente e do futuro?
- Podem ser criados novos serviços ancilares para dar mais segurança e flexibilidade de operação atual e futura?
- A forma de remuneração dos serviços existentes está adequada e incentiva a sua disponibilidade?
- Como deve ser a remuneração de novos serviços ancilares?
- Quais os modelos de negócio podem ser aplicados para os novos serviços ancilares no contexto brasileiro?
- Quais os aprimoramentos regulatórios são necessários?
- E como a experiência internacional pode inspirar esses aprimoramentos da regulação vigente para os serviços ancilares? Ou seja, como podemos nos valer da experiência internacional sobre o assunto?

De uma forma resumida, qual é a necessidade que o sistema precisa, quais são as possibilidades da gente vir a atender ou confrontar essas necessidades com soluções providas por serviços ancilares e qual a forma da gente viabilizar econômica, regulatoriamente e tecnicamente esse serviço?

Esse seria em resumo as nossas metas as respostas para o que a gente busca. [...]” (Informação Verbal) (Workshop Serviços Ancilares, 2019)

Ainda no mesmo evento, em seu discurso de abertura, o “Diretor de Operação (DOP)” - Sinval Zaidan Gama, registrou:

“[...] O ONS e a ANEEL periodicamente fazem reuniões exploratórias, reuniões de expectativas e de probabilidades de uso do sistema. E entre uma

reunião essa, que nós estávamos com esse RG, visualizamos que poderíamos usar mais intensivamente a infraestrutura do sistema elétrico brasileiro. E experiências que nós fizemos ao longo do período, com geração de reativos em parques fotovoltaicos e o uso de alguns compensadores síncronos de geradores específicos ou geração em algum período, poderia facilitar a operação do sistema, poderia dar maior facilidade, inclusive contribuindo com a minimização do custo do sistema, algumas dessas facilidades já estão disponíveis e já tem sinal econômico, que fazem com que os agentes possam utilizar. Outras nós visualizamos que precisaríamos investir e este é o momento onde através de palestras, de informações, de discussões, nós veremos a possibilidade de a utilização mais intensivamente da infraestrutura disponível no Brasil com esses objetivos [...]” (Informação Verbal) (Workshop Serviços Ancilares, 2019)

E em seu discurso de abertura no mesmo evento mencionado, o “Superintendente de Regulação dos Serviços de Geração SRG – ANEEL” - Cristiano Vieira, registrou:

“[...] Um de evento altíssimo nível, realizado em tão curto espaço de tempo e fruto de uma série de discussões, Sinval como você bem colocou, entre o ONS e a agência apontando para a necessidade de evolução de alguns aspectos regulatórios que parametrizam e disciplinam as ferramentas que estão à disposição do operador para assegurar a operação do sistema com segurança, eficiência, confiabilidade e principalmente com o menor custo. Quando a gente construiu a 697, ela tem um conjunto relativamente simples para a prestação de serviços ancilares, basicamente ela cobre black start, cobre o pagamento de comunicação para CAG e compensação síncrona. O mundo hoje está muito mais complicado, o desafio que o operador enfrenta, eu diria que esses desafios não estão ali contemplados na nosso arcabouço normativo regulatório. E por quê? A estrutura da 697 foi pensada numa época em que o grande provedor de serviços ancilares eram as hidrelétricas e tudo se resolve dentro do MRE, o MRE independente do uso que o operador fazia nessas usinas, para atender a flexibilidade, controle de tensão e suporte de reativos, independente desse uso, havia um equacionamento financeiro, um compartilhamento de risco entre todos os geradores, uma matriz predominante hidrelétrica com um sistema com capacidade de reservação é plurianual. A realidade que a gente tem hoje é outra... Então se 20 anos atrás do desafio do ONS era: contar com a oferta controlável despachável e a grande variável estocástica era a carga, hoje eu diria que nós temos é um desafio duplo, porque você continua com a variabilidade na demanda e hoje

a gente tem o desafio de operar o sistema com a variabilidade na oferta também. Então eu tenho estocacidade nos dois lados da equação, oferta e demanda. Então toda a lógica pensada de prestação de serviços ancilares ela tem que ser pensada diante dessa nova realidade, de uma oferta que não é firme todo o tempo, ela está variando ali, então em um determinado momento tem uma contribuição significativa da eólica, meia hora depois eu tenho que mudar todas as estratégias operativas, tem que pensar em questões de estabilidade dinâmica e questões de suporte de reativo, reserva de potencia operativa. Uma serie de requisitos que tem que ser atendidos em tempo exíguos para permitir essa segurança do sistema e a pergunta que, e ai eu acho a importância desse workshop dessa discussão vai fomentar de uma forma rica todo um conjunto de normativos regramentos novos que a gente quer trazer discutir com a sociedade é:

- Como é que a gente pode ajudar o ONS, fornecer ferramentas regulatórias que dão incentivos para que essa operação seja feita pelo menor custo de forma eficiente que de fato agregue valor no trabalho que o ONS faz?[...]” (Informação Verbal) (Workshop Serviços Ancilares, 2019)

As usinas hidrelétricas com reservatório, se utilizadas para atender à demanda do Sistema Elétrico Nacional em condições onde as VREs incrementem uma demanda por flexibilidade importante, podem funcionar como grande reservatório de energia, dada a elevada capacidade dos reservatórios hídricos destas hidrelétricas, pois nas conjunturas atuais de planejamento e operação, estes reservatórios não tem apresentado mais a mesma capacidade de operação plurianual, estando a vários períodos em níveis críticos devido às condições hidrológicas desfavoráveis. Como indica o estudo apresentado por Lopes e colaboradores (2019), para estabelecer novos limites inferiores de operação da Usina Hidrelétrica de Três Marias.

Corroborando com esta análise, estudos realizados na Inglaterra por Dong; Attya; Anaya-Lara (2019) avaliaram o potencial das hidrelétricas em proverem serviços ancilares, como regulação de frequência e para suavizar a curva de potência das fazendas eólicas.

Nos estudos de Dong; Attya; Anaya-Lara, (2019) as hidrelétricas são as provedoras dos serviços ancilares, no lugar das termelétricas convencionais (combustível fóssil) e evitando assim os altos custos de utilização destas fontes não

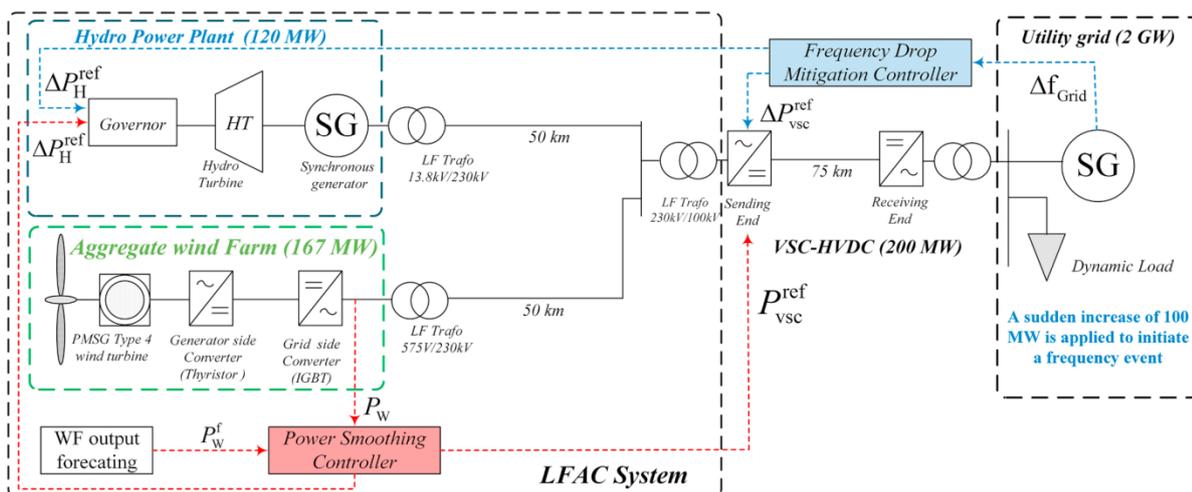
renováveis e até mesmo evitando a utilização de sistemas de armazenamento de energia a baterias, que ainda apresentam um elevado custo de CAPEX.

A utilização de hidrelétricas para a regulação de frequência e suavização de curva de potência, mostrou-se atrativa para sistemas com elevada disponibilidade hídrica e eólica, mesmo para casos onde estas fontes estão distantes dos grandes centros de carga, conforme demonstrado nos estudos de Dong; Attya; Anaya-Lara, 2019.

Outra interessante perspectiva é a viabilidade de utilização das hidrelétricas para conexão de parques eólicos offshore ao sistema interligado, aliando os benefícios do Sistema de transmissão de Alta tensão em corrente contínua (HVDC Transmission system) a um sistema de baixa frequência (LFAC System). Um interessante conceito é apresentado: o da utilização de uma usina hidrelétrica como “*power buffer*” (em tradução livre, Amortecedor de potência), acumulando energia nos momentos de sobre geração e provendo potência para os períodos de baixa geração.

A figura 18 exemplifica a integração entre a operação de uma usina hidrelétrica de 120MW com um parque eólico de 167MW, por meio de um VSC-HVDC de 200MW de 200MW.

Figura 18. Sistema híbrido de geração “Sistema LFAC” provendo serviços ancilares



Fonte: Dong; Attya; Anaya-Lara, 2019.

As simulações realizadas neste estudo apresentaram um excelente resultado para o controle de regulação de frequência e para suavização da curva de potência dos parques eólicos.

Outros estudos estão analisando a sinergia das VREs com as usinas hidrelétricas, como o realizado na Suíça por Kahl *et al.*, (2017) que propõe o uso de usinas reversíveis para o armazenamento da energia excedente disponível no verão para o uso no inverno, em estações climáticas de elevado consumo de energia e baixa disponibilidade de energia renovável. Buscando assim a autossuficiência energética após o desligamento das plantas termonucleares, daquele país.

Neste mesmo sentido, estudos estão sendo realizados na Noruega por Norang (2015), para o uso de usinas reversíveis para o provimento de serviços ancilares.

Dado a grande participação da geração hídrica na matriz energética brasileira e da possível sinergia com as novas fontes de geração variável (VRE), fica evidente que este assunto tem elevada relevância para o contexto nacional. Este cenário indica a possibilidade de taxas de penetração das VREs em níveis muito acima do convencional em outros países.

A figura 17 foi apresentada nos estudos realizados pela Agência Internacional de Energia, para os sistemas do Texas, da Itália e do Brasil (IEA, 2014). O sistema elétrico brasileiro é evidenciado como o sistema com maior potencial de penetração de fontes de geração variável. Este resultado está muito vinculado à capacidade de oferta de serviços ancilares das unidades geradoras síncronas, conforme evidenciado pelos autores do trabalho.

6 CONCLUSÃO

Os estudos analisados nesta monografia, permitiram uma visão qualitativa dos serviços ancilares e seus impactos no sistema elétrico de potência. Verificou-se as fontes capazes de contribuir neste fornecimento e as origens da demanda destes serviços.

Evidenciou-se, por fontes citadas nesta monografia, as crescentes demandas por serviços ancilares, dado os elevados índices de penetração de VREs indicados pelas agências reguladoras e governamentais, para os estudos de expansão da matriz elétrica.

Verificou-se, qualitativamente, os impactos na operação do sistema elétrico e a necessidade de alteração do atual modelo de previsão mensal para um modelo de previsão horário.

Constata-se que diversos estudos estão sendo realizados para a operação conjunta das novas fontes VRE e as usinas hidrelétricas. Em especial, destaca-se o estudo realizado na Inglaterra que simulou, por meio de ferramentas computacionais, a operação conjunta de uma fonte hidrelétrica e de um parque eólico, para suavizar a variabilidade da fonte eólica, garantindo um suprimento confiável de energia para as cargas simuladas.

Por fim, concluiu-se que a sinergia entre as VREs e as usinas hidrelétricas com reservatório, possuem características importantes para a garantia do fornecimento de energia e para a operação do sistema elétrico. No cenário brasileiro, esta sinergia possibilitará elevados índices de participação das VREs na matriz elétrica brasileira. Utilizando as usinas hidrelétricas com reservatório, para armazenar água, elevando os níveis dos reservatórios em momentos de disponibilidade eólica e de irradiação solar. Esta energia armazenada poderá ser utilizada para suprir o sistema elétrico, deplecionando os reservatórios, quando não houver condições favoráveis de ventos ou irradiação. Porém será necessária uma regulação adequada para a garantia da operação, sem prejuízo a viabilidade econômica dos agentes envolvidos no Sistema Elétrico Brasileiro.

O Sistema Elétrico Brasileiro, por ter predominância de fontes síncronas (hidrelétricas e termoeletricas) apresenta elevada resiliência e acomoda, com relativa facilidade, as VREs recentemente inseridas na matriz elétrica.

Contudo é necessário fomentar a criação de um mercado regulado de serviços ancilares para incentivar a manutenção desta capacidade do sistema, permitindo assim o crescimento contínuo e sustentável da matriz elétrica brasileira.

Os serviços ancilares são um recurso abundante na atual matriz elétrica brasileira, porém finito, devemos observar e criar atratividade para que estes possam ser ofertados por agentes específicos e desta forma obtenha-se o menor custo global de operação do sistema elétrico nacional.

REFERÊNCIAS

- ANEEL. Resolução Normativa 482. 2012. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em 20/09/2019
- ANEEL. ANEEL - Banco de Informações de Geração (BIG). Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>> Acesso em 20/09/2019
- BRASIL. Lei nº 9.648 de 27 de Maio de 1998. p. 18, 1998.
- SOUZA de. D. J. T, BRESSANE J. M., Teixeira T. P., Rizzotto T. C., Cabral R. R., Avaliação do desempenho dinâmico do Sistema Interligado Nacional frente à crescente inserção de geração eólica na matriz. Empresa de Pesquisa Energética. XXV SNTPEE SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 2019. Disponível em: <https://www.xxvsntpee.com.br/anais-sntpee/>. Acesso em 23/11/2019
- CALIFORNIA INDEPENDENT SYSTEM OPERATOR. (2012). What the duck curve tells us about managing a green grid. California ISO, Shaping a Renewed Future, Fact Sheet, 1–4. Disponível em: https://www.caiso.com/Documents/FlexibleResourcesHelpRenewables_FastFacts.pdf. Acesso em 13/10/2019.
- MANSO, J. C. G. Valorização de Serviços Ancilares de Reserva em Geradores Hidroelétricos. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. 2010. 171 p.
- DEETJEN, T. A., RHODES, J. D., WEBBER, M. E. (2017). The impacts of wind and solar on grid flexibility requirements in the Electric Reliability Council of Texas. Energy. vol. 123, March 2017. pp. 637-654.
- DONG, J.; ATTYA, A. B.; ANAYA-LARA, O. Electrical Power and Energy Systems Provision of ancillary services by renewable hybrid generation in low frequency AC systems to the grid. Electrical Power and Energy Systems, v. 105, July 2018, p. 775–784.
- EDMUNDS, T.; ALZAABI, O.; MILLS, A. Flexibility Metrics to Support Grid Planning and Operations. United States. Disponível em: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1393323>. Acesso em 01/09/2019.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Brazilian energy balance -

Summary report: year base 2017. p. 62, 2018. Disponível em: [http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-](http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-419/BEN2018__Int.pdf#search=ben%202018)

[abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-419/BEN2018__Int.pdf#search=ben%202018](http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-419/BEN2018__Int.pdf#search=ben%202018). Acesso em 28/10/2019

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Minuta do Plano Decenal de Expansão de Energia 2029 (PDE 2029). p. 382, 2019. Disponível em:

<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-52/topico-89/Relat%C3%B3rio%20Final%20do%20PDE%202019.pdf#search=pde%202019>. Acesso em 28/10/2019.

EMPRESA DE PESQUISAS ENERGÉTICASPE/MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Balanço energético nacional 2005. Disponível em:

<http://www.mme.gov.br/documents/36208/435042/01+-+BEN+2005+-+Ano+Base+2004+%28PDF%29.pdf/53c663cb-a1f3-abe0-4a46-f4de5c6c9c88?version=1.0>. Acesso em 25/10/2019.

FRAUNHOFER INSTITUTE FOR SOLAR ENERGY SYSTEMS. Net public electricity generation in Germany in 2018. p. 55, 2018. Disponível em:

https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/News/Stromerzeugung_2018_2_en.pdf. Acesso em 25/10/2019

HOLTTINEN, H. et al. IEA Wind Task 25: Design and operation of power systems with large amounts of wind power. First ed. [s.l.] International Energy Agency, 2006. Disponível em:

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.295.6965&rep=rep1&type=pdf>. Acesso em 20/10/2019.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Empowering variable renewables: Options for flexible electricity systems. First ed. Paris: International Energy Agency, 2009. Disponível em:

<https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/21248886>. Acesso em 10/10/2019.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY . The power of transformation. Wind, Sun and the Economics of Flexible Power Systems. First ed. Paris: International Energy Agency, 2014. v. 10

LOPES, J.; MORAES de, E.; AMARAL, D.; BRITO, R.; AENDER. MOURA; PREHL JR, L.; NASCIMENTO, C.; CIRINO, M.; JUSTE F.. Desafio de operação de unidades geradoras com restrição hídrica em uma grande usina. XXV SNTPEE SEMINÁRIO

NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 2019. Disponível em: <https://www.xxvsnptee.com.br/anais-snptee/>. Acesso em 23/11/2019

KAHL, A. et al. Interplay between photovoltaic , wind energy and storage hydropower in a fully renewable Switzerland. *Energy*. v. 135, pp. 513–525, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544217310861>. Acesso em 10/08/2019.

MACÊDO, W. N.; PINHO, J. T. Ases : Programa Para Análise De Sistemas Eólicos E Solares Fotovoltaicos. AGRENER 2002 - 4º Encontro de Energia no Meio Rural, Campinas, 2002. Disponível em: http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022002000100022&script=sci_arttext&tlng=pt. Acesso em 12/10/2019.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - Nota Técnica Nº 5/2017/AEREG/SE - Disponível em: http://www.mme.gov.br/c/document_library/get_file?uuid=7065f74c-d139-d957-a3dd-d14bac73604c&groupId=36131. Acesso em 02/11/2019.

NORANG, I. Pump Storage Hydropower for delivering Balancing Power and Ancillary Services. A Case Study of Illvatn Pump Storage Power Plant. Norwegian University of Science and Technology. June, 2015. p. 113. Disponível em <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2433581>. Acesso em 10/08/2019.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). Submódulo 21.9 - Análise técnica dos serviços ancilares. Procedimentos de Rede, v. 0, p. 8, 2008. Disponível em:

http://www.ons.org.br/%2FProcedimentosDeRede%2FM%C3%B3dulo%2021%2FSubm%C3%B3dulo%2021.9%2FSubm%C3%B3dulo%2021.9_Rev_1.0.pdf. Acesso em 19/10/2019.

_____. Workshop de Serviços Ancilares ONS 2019. Disponível em: http://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/Apresenta%C3%A7oes_Workshop_Servicos_Ancilares.zip. Acesso em Acesso em 23/11/2019.

_____. Palestra Painel 1. Workshop de Serviços Ancilares ONS 2019. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=SgMTsxEqAro>. Acesso em 23/11/2019

_____. Palestra Paineis 2 e 3. Workshop de Serviços Ancilares ONS 2019. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=GkkdrEsHeGk>. Acesso em 23/11/2019

_____. Palestra Paineis 4 e 5. Workshop de Serviços Ancilares ONS 2019.

Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=-SnAgSQ_v5Q. Acesso em 23/11/2019

ASANO JUNIOR, R.; CASELLA, I. R. S.; ASANO, P.T.L.; Impacto da penetração massiva de geração solar e eólica na operação de médio e longo prazo das hidroelétricas brasileiras. XXV SNTPEE SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 2019. Disponível em: <https://www.xxvsntpee.com.br/anais-sntpee/>. Acesso em 23/11/2019.

REN - REDES ENERGÉTICAS NACIONAIS. Relatório e Contas. p. 414, 2018. Disponível em: [https://www.ren.pt/files/2019-04/2019-04-26112801_3600afd9-7cec-4a36-a8c2-a17a20bbd204\\$\\$\\$25055b9b-7643-490a-992e-69493ffb834b\\$\\$\\$2582097a-0a61-4d0c-88a6-b753b3f91c3b\\$\\$pt_pt__Docs\\$\\$pt\\$\\$\\$1.pdf](https://www.ren.pt/files/2019-04/2019-04-26112801_3600afd9-7cec-4a36-a8c2-a17a20bbd204$$$25055b9b-7643-490a-992e-69493ffb834b$$$2582097a-0a61-4d0c-88a6-b753b3f91c3b$$pt_pt__Docs$$pt$$$1.pdf). Acesso em 12/10/2019

SOUSA, T.; JARDINI, J. A.; Feltrin, A. P.; Rosa, J. A. O.; Manso J. C. G. Uma Nova Abordagem para Remuneração de Serviços Ancilares Providos por Agentes de Geração. November 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Tania_Sousa5/publication/264890997_Um_a_Nova_Abordagem_para_Remuneracao_de_Servicos_Ancilares_Providos_por_Agentes_de_Geracao/links/5457908e0cf2bccc4910db63/Uma-Nova-Abordagem-para-Remuneracao-de-Servicos-Ancilares-Providos-por-Agentes-de-Geracao.pdf. Acesso em 02/11/2019.

ULBIUG, A.; ANDERSSON, G. Analyzing operational flexibility of electric power systems. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, v. 72, p. 155–164, 2015. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142061515001118>.

Acesso em 10/08/2019.