

Comitê de Estudos C5 - Mercados de Eletricidade e Regulação**IMPACTE DA UTILIZAÇÃO DE MODELOS DE REDE DE TRANSPORTE
NA AVALIAÇÃO PROBABILÍSTICA DA ADEQUAÇÃO DOS SISTEMAS ELÉTRICOS:
CASO PORTUGUÊS**

N. MARTINS*
REN
Portugal
nuno.martins@ren.pt

H. AZEVEDO
REN
Portugal
helenazevedo@ren.pt

R. PINTO
REN
Portugal
rui.pinto@ren.pt

R. PEREIRA
REN
Portugal
ricardo.pereira@ren.pt

S. VILELA
REN
Portugal
sonia.vilela@ren.pt

B. NUNES
REN
Portugal
bruno.nunes@ren.pt

F. BATISTA
REN
Portugal
fernando.batista@ren.pt

M. FERREIRA
REN
Portugal
mariobruno.ferreira@ren.pt

A. PITARMA
REN
Portugal
antonio.pitarma@ren.pt

M. MATOS
INESC TEC
Portugal
manuel.matos@inesctec.pt

L. CARVALHO
INESC TEC
Portugal
leonel.m.carvalho@inesctec.pt

A. M. LEITE DA SILVA
PUC-Rio
Brasil
armando@ele.puc-rio.br

M. ROSA
INESC P&D Brasil &
UFSC
Brasil
mauro.rosa@inescbrasil.org.br

P. VIEIRA
INESC P&D Brasil & UFSC
Brasil
pedro.vieira@inescbrasil.org.br

E. PEQUENO
INESC P&D Brasil & UFSC
Brasil
erika.pequeno@inescbrasil.org.br

Resumo – Este trabalho investiga o impacto resultante da inclusão da rede de transporte na avaliação da adequação a longo-prazo da reserva estática e da reserva operacional de sistemas electroprodutores interligados. Para esse fim, são utilizados os modelos implementados na ferramenta PS-MORA (Power Systems-Model for Operational Reserve Adequacy), que tem por base a Simulação Monte Carlo Sequencial (SMCS) e que tem sido amplamente utilizada em estudos de adequação do sistema electroprodutor Português. Os casos de estudo baseados em configurações planeadas para o sistema electroprodutor de Portugal com elevada componente renovável demonstram que os índices de fiabilidade (e.g. Loss of Load Expectation - LOLE e Expected Energy Not Supply - EENS) tanto para a performance global do sistema, como para cada barramento de rede podem ser afetados com a inclusão de modelos de rede na avaliação. Comparativamente às simulações baseadas em modelos de nó único, observa-se um maior esforço computacional devido aos processos de cálculo associados à determinação/cálculo do trânsito de potências ótimo (TPO).

Palavras-chave: Avaliação Adequação Sistemas Eletroprodutores – Renováveis – Rede de Transporte – PS-MORA – Índices Fiabilidade

1 INTRODUÇÃO

A avaliação da adequação de sistemas electroprodutores interligados requer o desenvolvimento de ferramentas e modelos capazes de representar, de forma apropriada, não só a variabilidade temporal associada à capacidade disponível nas unidades de produção das diversas áreas de controlo interligadas, mas também as políticas e mecanismos que permitem o acesso e partilha de energia e reservas entre as áreas. A ferramenta PS-MORA [1][2] foi desenvolvida com o objetivo de simular de uma forma detalhada sistemas electroprodutores interligados com elevada penetração de fontes de energia renovável (FER) através de metodologias probabilísticas baseadas em SMCS [3]. Ao utilizar este tipo de abordagem, a ferramenta permite incluir diversos aspetos cronológicos no processo de estimação dos índices de fiabilidade (e.g. LOLE, LOLF, EENS), como a variabilidade da produção renovável (eólica e solar), limitações semanais para utilização da energia hídrica disponível nas albufeiras, bombagem sazonal e diária através da simulação dos processo de arbitragem de preços em mercado, ações de manutenção programadas, variabilidade da procura, incluindo a variação decorrente da maior penetração dos veículos elétricos, entre outros. A ferramenta permite ainda executar uma diversidade de estudos de adequação, desde estudos de reserva estática da procura, de reserva operacional (a subir e a descer) e de flexibilidade, incluindo múltiplas representações para a configuração dos sistemas electroprodutores, tais como nó único, áreas interligadas, ou ainda, a introdução de modelos da rede de transporte (modelo DC com e sem estimação de perdas [4]), permitindo aferir não só a capacidade dos geradores em atender a carga, mas também a forma como os trânsitos de potência se distribuem pela rede interna de transporte e circuitos de interligação, de modo a contabilizar também o seu efeito nos índices de fiabilidade. Desta forma, o modelo de simulação enquadra-se numa representação cada vez mais próxima da realidade física dos sistemas elétricos.

A inclusão de modelos de rede na avaliação da adequação a longo-prazo de sistemas electroprodutores torna-se cada vez mais importante à medida que se aumenta a potência renovável variável na rede, já que o acesso à capacidade de produção e às reservas disponíveis pode não ser possível em situações de congestionamento de rede, inviabilizando políticas de assistência entre áreas e, consequentemente, conduzindo a maiores valores de corte de carga do que seriam esperados no caso de uma representação mais simplificada, tipicamente em nó isolado. O nível de detalhe oferecido pela ferramenta PS-MORA permite também identificar zonas de rede críticas, seja através de índices de fiabilidade discriminados por barramento, seja através do nível de carga dos vários componentes da rede.

Desta forma, a metodologia adotada neste trabalho para evidenciar a mais-valia da inclusão de modelos de rede na avaliação da reserva estática e operacional consiste na realização de diversos estudos assentes em configurações de planeamento do sistema electroprodutor de Portugal com elevada componente renovável, com e sem modelos de rede de transporte, evidenciando as vantagens e desvantagens, tanto ao nível da diversidade de índices e de resultados úteis para o exercício de planeamento, como do esforço computacional associado a avaliações mais detalhadas.

2 METODOLOGIA

2.1 Avaliação a Longo-prazo da Reserva Estática e da Reserva Operacional em Ambiente Multiárea

A adequação dos sistemas electroprodutores pode ser aferida sob duas perspetivas: a perspetiva da reserva estática [5] e da reserva operacional [6]. De uma forma simples, os estudos de reserva estática visam definir a capacidade de produção necessária a longo-prazo para atender/cobrir a procura prevista para o sistema, consoante um determinado nível máximo admissível para o risco de corte de carga. As incertezas associadas à reserva estática decorrem da variabilidade dos recursos energéticos primários, da indisponibilidade dos geradores, tanto por ações de manutenção programadas como por saídas intempestivas de serviço, e da cronologia da carga. Por outro lado, os estudos de reserva operacional focam-se na capacidade do sistema electroprodutor em lidar com as variações a curto-prazo no equilíbrio entre a procura e a oferta. Estas variações momentâneas estão associadas às saídas intempestivas das unidades em serviço e às diferenças entre as previsões da produção variável (e.g. eólica e solar) e o consumo e os respetivos valores observados. Uma vez que as regras de operação no curto-prazo dependem de diferentes condições de operação como resultado da combinação de diferentes condições eólicas, solares, hídricas e consumo, então é igualmente possível avaliar a adequação da reserva operacional sob a perspetiva do planeamento a longo-prazo. De notar que as regras de operação incluem diferentes critérios para o estabelecimento dos níveis mínimos adequados para a reserva

sincronizada, nomeadamente, para a componente de reserva primária (*frequency containment reserve* - FCR) e secundária (*frequency restoration reserve* - FRR).

Ao contrário da avaliação de sistemas isolados, a avaliação da adequação de sistemas/áreas interligadas requer a definição das políticas de trocas de energia e de reservas tanto em situações normais de operação como em situações de emergência [1][2]. Como exemplo, uma área com capacidade de produção insuficiente para satisfazer a sua carga pode tentar procurar assistência das áreas vizinhas com o objetivo de melhorar a sua adequação caso existam excedentes nessas áreas e caso exista capacidade de trocas (importação/exportação) disponível. O montante da assistência depende dos seguintes fatores: nível de carga na área apoiada, capacidades de produção disponíveis nas áreas de apoio, restrições nas interligações e acordos de importação/exportação. Estes fatores foram mapeados no *framework* da avaliação da reserva estática e da reserva operacional disponibilizadas pela ferramenta PS-MORA [1][2], e estendido às várias representações, como nó único até representação multiárea com rede de transporte e interligações, em que existe uma área de interesse com a representação completa da rede e sistemas externos em nó único (ver Fig. 1).

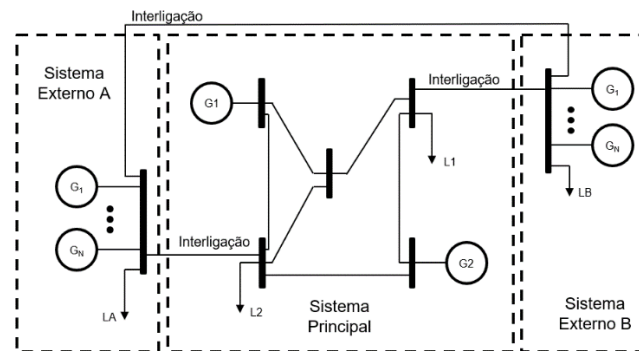


Fig. 1. Representação multiárea com rede de transporte e interligações

Em avaliações de nó único, a representação das políticas de operação multiárea é mais simplista, sendo apenas necessário calcular os montantes de capacidade de exportação e importação disponíveis em cada área, para depois aferir as trocas entre as várias áreas de acordo com a política adotada. Como não há representação detalhada da rede de transporte elétrica, não há restrições de transporte e, desta forma, os valores de intercâmbio entre as áreas são calculados diretamente com base nos valores de importação e exportação e nas prioridades de suporte de cada área. Por outro lado, os estudos de adequação que contêm representação detalhada da rede de transporte requerem cálculos adicionais, nomeadamente, o valor do trânsito de potências (TP) nas linhas de interligação e nos distintos elementos da rede. Neste caso, verifica-se a eventual violação de limites operacionais dos componentes do sistema e, caso necessário, procura-se um novo ponto de operação ótimo do sistema recorrendo a modelos de otimização que equacionam os limites para as trocas definidos nas políticas multiárea.

Os índices de fiabilidade associados à segurança de abastecimento incorporam a expectativa de perda de carga associada à reserva estática (e.g., o LOLE estático) e a expectativa de perda de carga por insuficiência de reserva operacional (e.g., LOLE operacional). É possível também dissociar estes índices por subsistema de origem, como o subsistema de geração (G), o subsistema rede de transporte (T) e eventos conjuntos nos dois subsistemas (G+T).

2.2 Modelo de Rede e Interligações

A ferramenta PS-MORA contém vários modelos detalhados para as diferentes tecnologias de produção e tipos de carga (convencional e veículos elétricos), que incluem aspetos ligados à variação temporal da disponibilidade dos recursos e ao processo estocástico da ocorrência de avarias fortuitas [1][2]. Este trabalho foca-se no modelo de rede, pelo que apenas se aborda as opções adotadas para esses componentes.

Na versão do modelo PS-MORA utilizado, as linhas de transporte e os transformadores não incorporam falhas fortuitas, pelo que o modelo destes circuitos é composto somente pela capacidade máxima destes equipamentos em regime permanente, assim como os respetivos parâmetros elétricos do modelo em Pi [7] (p. ex., impedância, admitância shunt, etc.). A potência que circula em cada circuito é determinada através das equações do modelo linearizado DC [4]. A ferramenta PS-MORA admite também a contabilização das perdas através do método

de *Based-Point α - Matching* [4]. Esse modelo consiste em representar as perdas através de injeções adicionais nas extremidades de cada circuito. Na sua formulação tradicional, o processo baseia-se na resolução de um TP antes do início do processo de simulação, considerando pontos de funcionamento típico para o sistema em que todos os componentes se encontram em funcionamento. O impacto das injeções adicionais pode ser embebido no processo de cálculo do TP DC, obtendo-se assim uma avaliação mais correta da potência que circula nos elementos de rede. A ferramenta PS-MORA permite também mapear vários pontos de funcionamento típicos consoante o nível de carga do sistema, para se definir intervalos de variação para as injeções nas extremidades dos circuitos e, com isso, obter-se uma estimativa mais aproximada para os estados amostrados pela SMCS.

Por outro lado, o modelo das interligações é consideravelmente mais detalhado do que o modelo da rede de transporte uma vez que contabiliza também as avarias fortuitas através de um modelo de Markov de dois estados [1][2]. O objetivo deste tipo de modelização prende-se com a necessidade em se representar as restrições dos trânsitos de potência entre áreas com maior detalhe.

2.3 Processo de Avaliação de Estados em Ambiente Multiárea

O processo de avaliação de estados em ambiente multiárea traduz-se num conjunto de restrições a ser adicionado ao modelo de avaliação de rede. Sendo assim, considera-se os limites de trocas de cada área

$$I_i^{min} \leq I_i \leq I_i^{max} \quad (1)$$

em que I_i é o valor de potência ativa a partir da área i dado por I_i^{min} e

$$I_i = \sum_{j \in \Omega_i} I_{ij} \quad (2)$$

I_i^{max} e I_i^{min} são, respetivamente, os limites de exportação e importação da área i calculados com base na política multiárea adotada e as capacidades de produção disponíveis em cada Sistema, I_{ij} representa o valor da potência que circula na interligação j pertencente ao conjunto Ω_i de interligações que conectam a área i às restantes áreas. É possível então definir:

$$\mathbf{I} = \mathbf{A}_{AI} \mathbf{\Gamma}^{red} \widehat{\mathbf{A}}_{IB} \widehat{\boldsymbol{\theta}} \quad (3)$$

em que, \mathbf{I} é o vetor-coluna de intercâmbios entre áreas, $\widehat{\mathbf{A}}_{IB}$ é a matriz de incidência interligação-área (exclui a coluna da área de referência), \mathbf{A}_{AI} é a matriz de incidência área-interligação, $\mathbf{\Gamma}^{red}$ é uma matriz diagonal com a reatância de interligações e $\widehat{\boldsymbol{\theta}}$ é o vetor-coluna com os argumentos da tensão (exclui a coluna da área de referência).

É possível então expandir o equacionamento típico do modelo de trânsito de potências ótimo (TPO) apresentado em [8] para considerar as restrições de intercâmbio entre áreas. Considerando N_A áreas interligadas temos

$$\min. \quad c(\widehat{\boldsymbol{\theta}}, \mathbf{P}_G) \quad (4)$$

$$\text{sujeito a.} \quad -\widehat{\mathbf{B}}\widehat{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{A}_G \mathbf{P}_G = \mathbf{P}_L \quad (5)$$

$$\mathbf{P}_G^{min} \leq \mathbf{P}_G \leq \mathbf{P}_G^{max} \quad (6)$$

$$-\mathbf{P}_I^{max} \leq \mathbf{\Gamma} \widehat{\mathbf{A}}_S \widehat{\boldsymbol{\theta}} \leq \mathbf{P}_I^{max} \quad (7)$$

$$\mathbf{I}^{min} \leq \mathbf{A}_{AI} \mathbf{\Gamma}^{red} \widehat{\mathbf{A}}_{IB} \widehat{\boldsymbol{\theta}} \leq \mathbf{I}^{max} \quad (8)$$

em que, \mathbf{P}_G é o vetor-coluna com as produções dos geradores, \mathbf{P}_L é o vetor-coluna com os consumos, $\widehat{\mathbf{A}}_S$ é a matriz de incidência área-barramento (exclui a coluna da área de referência), \mathbf{A}_G é a matriz de incidência barramento-gerador e $c(\widehat{\boldsymbol{\theta}}, \mathbf{P}_G)$ é uma função de performance que reflete as políticas de operação entre áreas, os custos de produção das unidades e o custo de corte de carga. Perante o exposto, é possível definir um algoritmo para simulação e avaliação da adequação em ambiente multiárea representado na Fig. 2.

- C1: Análise da segurança de abastecimento ao nível da reserva estática sem a consideração da rede de transporte detalhada
- C2: Análise da segurança de abastecimento ao nível da reserva operacional sem a consideração da rede de transporte detalhada
- C3: Análise da segurança de abastecimento ao nível da reserva estática **com a consideração da rede de transporte** e sem consideração de possíveis indisponibilidades nos elementos de rede
- C4: Análise da segurança de abastecimento ao nível da reserva operacional **com a consideração da rede de transporte** e sem consideração de possíveis indisponibilidades nos elementos de rede
- C5: Análise da segurança de abastecimento ao nível da reserva estática com a consideração da rede de transporte **e considerando a ocorrência de indisponibilidades nos elementos de rede**
- C6: Análise da segurança de abastecimento ao nível da reserva operacional com a consideração da rede de transporte **e considerando a ocorrência de indisponibilidades nos elementos de rede**

Como critério de paragem da SMCS no modelo PS-MORA foram considerados 100 anos de simulação e um coeficiente de variação de 5%. Nos cenários que consideram a configuração com rede de transporte detalhada, utilizou-se a opção de TP sem perdas.

3.2 Resultados

A tabela seguinte apresenta os resultados dos índices de segurança de abastecimento LOLE e EENS para a avaliação da análise de reserva estática e da reserva operacional para os diferentes cenários analisados apresentados anteriormente.

TABELA I. RESULTADOS DE SEGURANÇA DE ABASTECIMENTO PARA OS CENÁRIOS ANALISADOS

Caso	Tipo Estudo	Tipo Reserva	LOLE (h/ano)	EENS (MWh/ano)	Tempos Computação
C1	Nó isolado, sem rede de transporte	Estática	0,225	22,940	< 10 min.
C2	Nó isolado, sem rede de transporte	Operacional	1,309	423,942	< 25 min
C3	Com rede de transporte e sem indisponibilidades	Estática	0,469	63,870	> 1 dia
C4	Com rede de transporte e sem indisponibilidades	Operacional	4,754	661,720	> 1 dia
C5	Com rede de transporte e com indisponibilidades	Estática	40,559	1263,990	> 1 dia
C6	Com rede de transporte e com indisponibilidades	Operacional	46,824	2422,999	> 1 dia

Da análise dos resultados da Tabela I constata-se que o sistema elétrico Português em nó isolado apresenta na análise estática um LOLE de 0,225 h/ano e uma EENS de 22,94 MWh/ano. Considerando a análise da reserva operacional (capacidade do sistema eletroprodutor para responder a perturbações do equilíbrio oferta-procura) verifica-se um incremento do LOLE e da EENS para 1,309 h/ano e 423,942 MWh/ano, respetivamente. Este incremento inclui a insuficiência de reserva estática e reserva operacional no sistema elétrico Português para fazer face à procura e a variações da procura e da oferta num período de uma hora (necessidades de reserva operacional), pelo que é expectável que o seu valor seja superior ao da análise estática.

Os cenários C3 e C4 correspondentes à análise estática e operacional do sistema isolado com rede de transporte detalhada e sem indisponibilidades conduzem a um LOLE de 0,469 h/ano e de 4,754 h/ano, respetivamente; e a uma EENS de 63,870 MWh/ano e de 661,720 MWh/ano, respetivamente. Desta análise conclui-se que a consideração do sistema eletroprodutor e da rede de transporte detalhada para o sistema elétrico Português conduz a índices de segurança de abastecimento da mesma ordem de grandeza, concluindo sobre a robustez de ambos os sistemas para este horizonte de estudo (geração e transporte).

Adicionalmente, e para analisar o impacto da consideração de indisponibilidades (neste caso apenas programadas) na rede de transporte, os resultados dos cenários C5 e C6 configuram um agravamento considerável dos índices de segurança de abastecimento dependendo da região, do período temporal e gravidade das indisponibilidades consideradas. Nesta análise, e apenas para efeitos de teste do modelo nesta componente, foi simulado um conjunto extremado de eventos, considerando a falha programada de um grupo alargado de elementos de rede (linhas), durante uma semana, enfraquecendo as condições de abastecimento a uma região específica em Portugal. Nestes cenários o LOLE para a reserva estática e reserva operacional agrava-se para 40,559 h/ano e 46,824 h/ano respetivamente, enquanto que a EENS aumenta para 1263,99 MWh/ano e 2422,999 MWh/ano respetivamente. Com o objetivo de analisar mais profundamente a contribuição da componente geração (G), transporte (T) e geração e transporte (G+T) no LOLE da análise de reserva estática e operacional nos cenários C3, C4, C5 e C6 apresentam-se na Tabela II os resultados desagregados para este indicador.

TABELA II. RESULTADOS DO LOLE ESTATICO E OPERACIONAL PARA OS CENÁRIOS C3, C4, C5 E C6 DESAGREGADOS PELAS COMPONENTES G, T e G+T

Caso	Tipo Estudo	Tipo Reserva	LOLE (h/ano)	LOLE G (h/ano)	LOLE T (h/ano)	LOLE G+T¹ (h/ano)
C3	Com rede de transporte e sem indisponibilidades	Estática	0,469	0,438	0,000	0,031
C4	Com rede de transporte e sem indisponibilidades	Operacional	4,754	3,286	0,061	1,408
C5	Com rede de transporte e com indisponibilidades	Estática	40,559	0,438	40,090	0,031
C6	Com rede de transporte e com indisponibilidades	Operacional	46,824	3,286	42,131	1,408

Da análise ao estudo C3 constata-se que a rede não apresenta qualquer falha e dessa forma nenhum contributo para o LOLE do subsistema de transporte. O maior contributo corresponde a falhas no subsistema eletroprodutor, apresentando a falha simultânea de capacidade de produção e da rede de transporte, um valor bastante residual e igual a 0,031 h/ano.

No estudo C4, que analisa o impacto da reserva operacional relativamente ao estudo C3, verifica-se um aumento desprezável do LOLE decorrente do sistema afeto à rede de transporte, sendo que o maior contributo para o LOLE total continua a ser da falha do subsistema de geração ou, deste subsistema em conjunto com o a rede de transporte. De salientar que estes estudos foram realizados em nó isolado (sem apoio das interligações com o sistema vizinho), pelo que na realidade da operação do sistema elétrico Português, seria expectável que estes índices de segurança de abastecimento fossem inferiores ou praticamente nulos, dado que existe naturalmente apoio do sistema vizinho.

¹ Contempla falhas de abastecimento de consumos afetos, quer ao sistema de geração, quer ao sistema de transporte.

Pela análise dos estudos C5 e C6 verifica-se que a introdução de falhas (programadas) na rede de transporte conduz a um aumento do LOLE do sistema, sendo que na situação simulada, com condições muito extremadas, a contribuição é totalmente proveniente do LOLE afeto à rede de transporte.

4 CONCLUSÕES

O planeamento da produção e da rede de transporte de eletricidade deve promover o cumprimento dos requisitos de adequação e segurança de abastecimento, mesmo tendo em consideração a transição energética em curso, decorrente da evolução rápida do setor elétrico para alcançar a meta de 100% renovável, o que certamente incluirá a utilização de metodologias probabilísticas neste exercício de planeamento. Assim, será necessário ter em conta o comportamento das atuais e novas tecnologias de produção e de transporte de eletricidade através de modelos elétricos representativos, novas regras de mercado e procedimentos operacionais mais relevantes.

A simulação dos sistemas elétricos através de ferramentas avançadas de planeamento, como o modelo PS-MORA, oferece a possibilidade de analisar uma multiplicidade de configurações associadas à sua futura expansão do sistema (produção, consumo e rede de transporte) tendo em conta o comportamento estocástico dos seus principais componentes (geradores e elementos da rede de transporte), a natureza probabilística da disponibilidade dos recursos primários afetos à produção renovável e por fim, os vetores emergentes do lado do consumo de eletricidade (exemplo da mobilidade elétrica e o desenvolvimento e incorporação de gases renováveis).

Neste trabalho, a utilização do modelo PS-MORA considerando uma configuração do sistema elétrico Português com a representação detalhada da RNT permitiu concluir sobre o correto comportamento do modelo de avaliação dos índices de segurança de abastecimento globais, por sistema de geração e transporte e por barramento, bem como o impacto esperado nesses índices da ocorrência de eventuais falhas (fortuitas e/ou programadas) de elementos da rede. Adicionalmente, o PS-MORA apresenta relevante poder discriminatório relativamente à identificação dos elementos da rede mais importantes nos sistemas elétricos, na garantia e continuidade do abastecimento dos consumos, na ocorrência de eventuais contingências ou indisponibilidades.

Por fim, refere-se que a versão atual da ferramenta PS-MORA e usada nos estudos neste artigo expostos, apresenta alguns pontos que carecem de melhoria e novos desenvolvimentos, como por exemplo a não consideração de falhas fortuitas nos elementos de rede de transporte dos sistemas elétricos, tempos de computação elevados em estudos de rede com grande detalhe e uma série de refinamentos dos modelos internos à ferramenta, como o modelo hídrico e dos veículos elétricos. Assim, encontra-se já em desenvolvimento avançado uma nova versão da ferramenta (PS-MORA 2.0) com base em computação paralelizada, no sentido de colmatar as limitações identificadas, bem como apresentar um conjunto vasto de outras performances.

5 CITAÇÕES BIBLIOGRÁFICAS

- [1] P. Vieira, M. Rosa, L. Bremermann, E. Pequeno, and S. Miranda, “Long-term Static and Operational Reserves Assessment Considering Operating and Market Agreements Representation to Multi-Area Systems,” *Energies*, vol. 13, no. 6, Mar. 2020.
- [2] H. Azevedo, et al., “Long-term Operational Reserves Evaluation of Multi-Area Systems – Portuguese Case Study, in 2022 CIGRE Session, Paris, Aug. 2022.
- [3] R. Y. Rubinstein and D. P. Kroese, *Simulation and the Monte Carlo Method*, 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc., 2008.
- [4] B. Stott, J. Jardim, and O. Alsac, “DC Power Flow Revisited,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 3, pp. 1290–1300, 2009.
- [5] R. N. Allan and R. Billinton, *Reliability Evaluation of Power Systems*, 2nd ed. Plenum Press, 1996.
- [6] M. Matos et al., “Probabilistic evaluation of reserve requirements of generating systems with renewable power sources: The Portuguese and Spanish cases,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 31, no. 9, pp. 562–569, 2009.
- [7] J. Grainger and William Stevenson Jr., *Power System Analysis*. McGraw-Hill Publishing Co., 1994.
- [8] M. V. F. Pereira and N. J. Balu, “Composite generation/transmission reliability evaluation,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 80, no. 4, pp. 470–491, 1992.