



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Forecasting Tools and Probabilistic Scheduling Approach Incorporating Renewables Uncertainty for the Insular Power Systems Industry

Gerardo José Osório da Silva

Tese para obtenção do grau de Doutor em
Engenharia e Gestão Industrial
(3º Ciclo de Estudos)

Orientador: Prof. Doutor João Paulo da Silva Catalão
Coorientador: Prof. Doutor João Carlos de Oliveira Matias

Covilhã, julho de 2015

This thesis was supported by FEDER funds (European Union) through COMPETE and by Portuguese funds through FCT, under Projects FCOMP-01-0124-FEDER-014887 (Ref. PTDC/EEA-EEL/110102/2009), FCOMP-01-0124-FEDER-020282 (Ref. PTDC/EEA-EEL/118519/2010) and PEst-OE/EEI/LA0021/2013. Also, the research leading to these results has received funding from the EU 7th Framework Programme FP7/2007-2013 under grant agreement no. 309048.



Resumo Alargado

Nos dias de hoje, com o novo paradigma relacionado com a sustentável gestão da indústria elétrica, o advento das redes de eletricidade inteligentes, denominadas na sua simplicidade como *smart grids*, ou ainda, com as imposições obrigatórias para uma redução gradual dos gases com efeitos estufa, com efeito no sector elétrico, os produtores com aproveitamentos renováveis, em especial os produtores eólicos, e conseqüentemente, toda a indústria elétrica enfrentam inúmeros problemas relacionados com a adequada e sustentada gestão do sector elétrico nas suas diferentes áreas, como também enfrentam a crescente competitividade e desregulação do sector elétrico, com especial incidência no mercado elétrico liberalizado.

Como ponto de partida, e reflexo de algumas investigações realizadas nos últimos anos nas áreas de conhecimento que a presente tese aborda, as indústrias elétricas dos sistemas insulares são profundamente dependentes da energia importada, nomeadamente, da energia fóssil, dependem do comportamento do turismo sazonal o qual também influencia profundamente a economia insular local, e além disso, é muito sensível às condições climáticas e às mudanças ambientais.

Outros fatores, e em comparação com os sistemas elétricos continentais, o comportamento e a gestão de um sistema elétrico insular também é influenciado pelos efeitos de calendário e sociais, pela natureza estocástica de alguns recursos endógenos e renováveis, os quais comprometem, apesar das suas mais-valias, a sua devida e correta gestão, tornando-os ainda mais difíceis de gerir de forma sustentada e rentável.

Ainda em comparação com as estruturas dos sistemas elétricos continentais, os sistemas insulares são infraestruturas mais dispendiosas, e possuem outras restrições ao nível económico, ambiental ou social, às quais poderão ter um carácter insustentável.

A rede elétrica insular e conseqüentemente a indústria elétrica é usualmente mais sensível aos parâmetros de qualidade do sistema elétrico, tais como, a frequência, o desvio de tensão, entre outros fatores, os quais têm mais influência quando na realidade existe uma integração massiva do potencial endógeno e renovável no sistema elétrico, os quais poderão minimizar a fiabilidade e a segurança do sistema elétrico.

Em contra partida, tais sistemas endógenos e renováveis de abastecimento de energia com as adequadas regras, incentivos e gestão devidamente suportada, podem significativamente mitigar a forte dependência dos recursos fósseis e por sua vez mitigar às emissões de gases com efeito estufa.

Na mesma revisão bibliográfica consta que às indústrias elétricas insulares são consideradas como excelentes pontos de partida e estudo para testar os impactos dos novos modelos, caminhos e estratégias da sustentada gestão do sistema elétrico.

Os objetivos da presente Tese estão incididos na criação de algumas ferramentas que possam auxiliar às tomadas de decisão dos agentes de mercado elétrico liberalizado, altamente concorrencial e organizado, onde são inseridos os produtores de eletricidade, de forma a garantir o *mix*, a robustez e qualidade do sistema electroprodutor.

Numa primeira fase, ir-se-á, descrever uma nova ferramenta híbrida, evolucionária e adaptativa para a previsão dos preços em mercado de eletricidade e da potência eólica no curto prazo temporal.

A ferramenta apresentada é baseada na bem-sucedida combinação de algumas técnicas bem conhecidas na comunidade científica, tais como a informação mútua, transformadas de *wavelets*, otimização evolucionária de enxame de partículas e o sistema neuro-difuso adaptativo.

A ferramenta desenvolvida foi testada em casos de estudos reais, provando a sua superioridade numa extensiva e cuidada comparação com outras técnicas anteriormente publicadas na literatura científica, providenciando em tempo útil, os resultados necessários para as estratégias dos agentes de mercado de forma mais exata.

Na segunda parte deste trabalho, e de forma a providenciar algumas ferramentas alternativas para a gestão de pequenos sistemas elétricos, como é o caso dos sistemas insulares; onde a indústria elétrica tem maiores dificuldades devido às restrições atrás referidas, tais como, o isolamento, transporte de energia fóssil, custos de geração de eletricidade, e ainda os custos dos projetos de carácter renovável, lucros, a reserva rodante disponível, os excessos ou défices de eletricidade produzida, apresentar-se-á uma nova metodologia para resolver o despacho económico considerando a incerteza da geração eólica e a capacidade de resposta dos sistemas térmicos convencionais de produção de eletricidade.

Nesta metodologia a função de distribuição de probabilidade correspondente do potencial eólico disponível é realizada de forma discreta e introduzida no problema de otimização de forma a descrever, de forma probabilística, a geração elétrica de cada unidade térmica, a redução da produção eólica, a energia não fornecida, o excesso da geração de eletricidade, e o custo total de geração.

A fiabilidade de cada unidade de geração é introduzida através da estimação da distribuição de função de probabilidade conjunta, relacionada com a geração elétrica e possíveis falhas, enquanto a função de distribuição de probabilidade da energia não fornecida é introduzida pela convolução da função de distribuição de probabilidade da energia não fornecida devido aos erros de previsão e possíveis falhas.

A performance da metodologia atrás proposta foi analisada através da análise de dois casos de estudo compostos com sistemas convencionais térmicos, localizadas em pequenos sistemas insulares. Os resultados da metodologia proposta foram comparados com a metodologia de simulação de Monte Carlo.

O presente trabalho propõe também uma nova metodologia para o problema do compromisso de geração de eletricidade, ou *unit commitment problem*, aplicado num sistema elétrico insular com significativa integração do potencial renovável.

A metodologia proposta é baseada na combinação de uma metodologia de geração e redução de cenários com uma metodologia designada por lista prioritária, ou *priority list*, sob o ponto de vista probabilístico, ou seja, através da determinação da função de distribuição de probabilidade de uma dada unidade seja colocada ou não a produzir eletricidade.

Esta abordagem é importante para adquirir o custo efetivo e a solução de fiabilidade. As capacidades e performance da metodologia proposta foram ilustradas através da análise de um caso de estudo onde os requerimentos da reserva rodante, ou *spinning reserve*, foram verificados.

Por último, também é proposto neste trabalho, uma nova estratégia de controlo e gestão para o agendamento do próximo dia/semana de um sistema elétrico insular com um sistema de armazenamento de energia composto de baterias.

A metodologia proposta incorpora os efeitos dos componentes mais relevantes tais como os geradores convencionais térmicos, a geração eólica, os conversores de potência, os controladores de carga, e o sistema de armazenamento de energia, introduzidos no processo de agendamento do sistema elétrico insular como sendo uma nova contribuição em relação a estudos anteriores.

Os resultados obtidos com a aplicação da metodologia proposta mostram uma poupança de combustível na ordem dos 2% (i.e., de 115755,80 litros para 113784,30 litros) num único dia, e uma melhoria do aproveitamento do potencial eólico na ordem dos 20% (i.e., de 79340,90kWh para 99620,70kWh) o que é significativo.

A contribuição do trabalho de investigação proposto e realizado na presente tese terá como enfoque o desenvolvimento de algumas ferramentas alternativas capazes de auxiliar na correta gestão e previsão dos parâmetros fundamentais dos sistemas elétricos insulares, proporcionando uma resposta fiável em tempo útil, capazes ainda de garantir a fiabilidade, robustez e qualidade do sistema elétrico e consequentemente da indústria elétrica.

Contribuições Resultantes do Trabalho de Investigação

Esta secção apresenta as várias publicações resultantes no trabalho de investigação realizado ao longo desta tese, apresentadas em revistas de arbitragem científica internacional, capítulos de livro e catas de conferências internacionais.

Revistas de Arbitragem Científica Internacional

[JP1] G.J. Osório, J.M. Lujano-Rojas, J.C.O. Matias, J.P.S. Catalão, “A fast method for the unit scheduling problem with significant renewable power generation”, *Energy Conversion and Management* (ELSEVIER), Vol. 94, pp. 178-189, Abril 2015 (Fator Impacto 4.380, Q1 Quartil na Categoria de ENERGY & FUELS of ISI Web of Knowledge).

<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.01.071>

[JP2] G.J. Osório, J.M. Lujano-Rojas, J.C.O. Matias, J.P.S. Catalão, “A probabilistic approach to solve the economic dispatch problem with intermittent renewable energy sources”, *Energy* (ELSEVIER), Vol. 82, pp. 949-959, Março 2015 (Fator Impacto: 4.844, Q1 Quartil na Categoria de ENERGY & FUELS of ISI Web of Knowledge).

<http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2015.01.104>

[JP3] G.J. Osório, J.C.O. Matias, J.P.S. Catalão, “Short-term wind power forecasting using adaptive neuro-fuzzy inference system combined with evolutionary particle swarm optimization, wavelet transform and mutual information”, *Renewable Energy* (ELSEVIER), vol. 75, pp. 301-307, Março 2015 (Fator Impacto 3.476, Q1 Quartil na Categoria de ENERGY & FUELS of ISI Web of Knowledge, contando com 6 citações de outros autores).

<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2014.09.058>

[JP4] G.J. Osório, J.M. Lujano-Rojas, J.C.O. Matias, J.P.S. Catalão, “A new scenario generation-based method to solve the unit commitment problem with high penetration of renewable energies”, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* (ELSEVIER), vol. 64, pp. 1063-1072, Janeiro 2015 (Fator Impacto de 3.432, Q1 Quartil na Categoria de ENGINEERING, ELECTRICAL & ELECTRONIC of ISI Web of Knowledge contando com 1 citação de outros autores).

<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.09.010>

[JP5] G.J. Osório, J.C.O. Matias, J.P.S. Catalão, “Electricity prices forecasting by a hybrid evolutionary-adaptive methodology”, *Energy Conversion and Management* (ELSEVIER), vol. 80, pp. 363-373, Abril 2014 (Fator Impacto 4.380, Q1 Quartil na Categoria ENERGY & FUELS of ISI Web of Knowledge, contando com 5 citações de outros autores).

<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2014.01.063>

Capítulo de Livro

[BC1] G.J. Osório, J.M. Lujano-Rojas, J.C.O. Matias, J.P.S. Catalão, “A heuristic approach for economic dispatch problem in insular power systems”, em: *Technological Innovation for Cloud-based Engineering Systems*, Eds. L.M. Camarinha-Matos et al., DoCEIS 2015, **SPRINGER**, Heidelberg, Alemanha, Abril 2015.

Atas de Conferências Internacionais

[PC1] G.J. Osório, J.M. Lujano-Rojas, M. Shafie-khah, J.C.O. Matias, J.P.S. Catalão, “Managing vanadium redox batteries towards the optimal scheduling of insular power systems”, em: *Proceedings of the 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting – PESGM 2015*, Denver, Colorado, USA, 26-30 Julho, 2015 (aceite).

[PC2] G.J. Osório, J.M. Lujano-Rojas, J.C.O. Matias, J.P.S. Catalão, “Including forecasting error of renewable generation on the optimal load dispatch”, em: *Proceedings of the IEEE Power Tech 2015 Conference*, Eindhoven, Países Baixos, 29 junho - 2 Julho, 2015 (aceite).

[PC3] G.J. Osório, J.M. Lujano-Rojas, J.C.O. Matias, J.P.S. Catalão, “Fast method to the unit scheduling of power systems with renewable power sources”, em: *Proceedings of the International Conference on Renewable Energies and Power Quality – ICREPQ’15*, La Coruña, Espanha, 25-27 Março, 2015 (aceite).

[PC4] G.J. Osório, J.M. Lujano-Rojas, J.C.O. Matias, J.P.S. Catalão, “Probability theory-based economic dispatch model for insular power systems”, em: *Proceedings of the 24th Australasian Universities Power Engineering Conference – AUPEC 2014 (tecnicamente co-patrocinada pelo IEEE)*, Perth, Australia, USB flash drive, 28 Setembro - 1 outubro, 2014.

[PC5] G.J. Osório, J.C.O. Matias, J.P.S. Catalão, “Hybrid evolutionary-adaptive approach to predict electricity prices and wind power in the short-term”, em: *Proceedings of the 18th Power Systems Computation Conference – PSCC 2014 (tecnicamente co-patrocinada pelo IEEE)*, Wroclaw, Polónia, USB flash drive, 18-22 Agosto, 2014.

[PC6] G.J. Osório, J.C.O. Matias, J.P.S. Catalão, “A review of short-term wind power forecasting approaches”, em: *Proceedings of the 2nd IET Renewable Power Generation Conference – RPG 2013*, Beijing, China, USB flash drive, 9-11 Setembro, 2013.

[PC7] G.J. Osório, J.C.O. Matias, J.P.S. Catalão, “A review of short-term hydro scheduling tools”, em: *Proceedings of the 48th International Universities' Power Engineering Conference – UPEC 2013 (tecnicamente co-patrocinada pelo IEEE)*, Dublin, Irlanda, USB flash drive, 2-5 Setembro, 2013.

[PC8] G.J. Osório, J.C.O. Matias, J.P.S. Catalão, “Intelligent and hybrid techniques to predict short-term electricity prices: a review”, em: *Proceedings of the 17th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems – ISAP 2013 (tecnicamente co-patrocinada pelo IEEE)*, Tokyo, Japan, USB flash drive, 1-4 Julho, 2013.