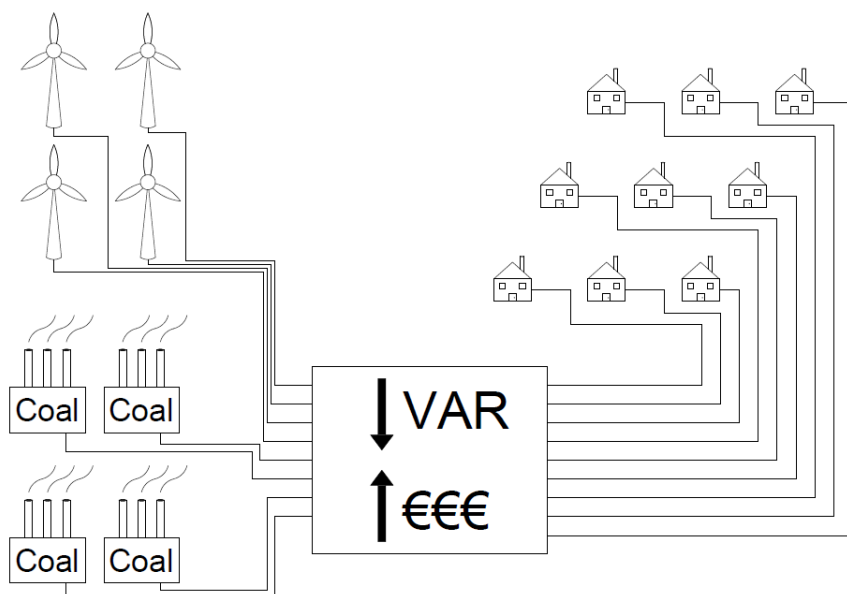




INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia de Sistemas de Potência de Automação

ISEL



Localização ótima de potência eólica para integração no sistema elétrico português

JOÃO VENCESLAU PEREIRA
(Licenciado em Engenharia Eletrotécnica)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Electrotécnica – ramo de Energia

Orientadores:

Professor Jorge Alberto Mendes de Sousa
Professora Ana Alexandra Antunes Figueiredo Martins

Júri:

Presidente: Professor José Manuel Igreja
Vogais:
Professor Jorge Alberto Mendes de Sousa
Professor Rui José Oliveira Pestana

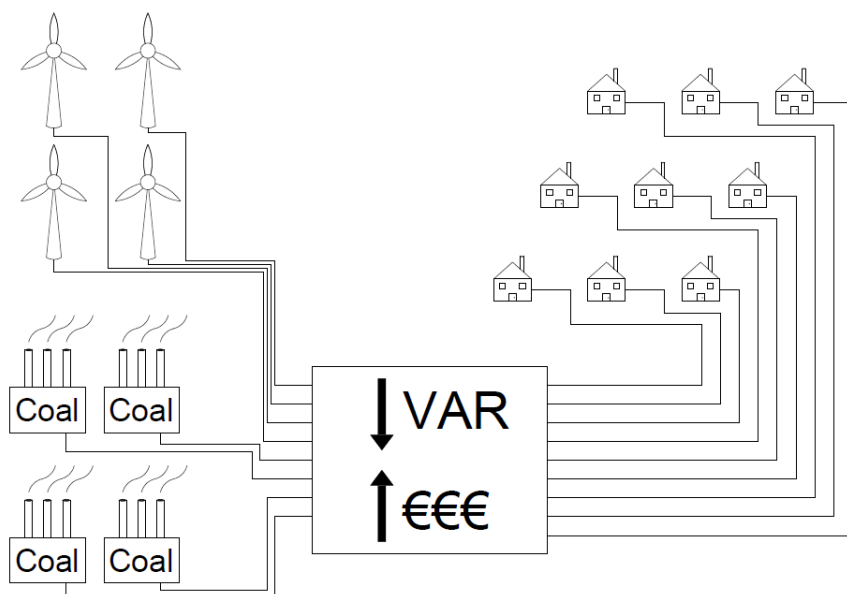
dezembro de 2014



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia de Sistemas de Potência de Automação

ISEL



Localização ótima de potência eólica para integração no sistema elétrico português

JOÃO VENCESLAU PEREIRA
(Licenciado em Engenharia Eletrotécnica)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Electrotécnica – ramo de Energia

Orientadores:

Professor Jorge Alberto Mendes de Sousa
Professora Ana Alexandra Antunes Figueiredo Martins

Júri:

Presidente: Professor José Manuel Igreja
Vogais:
Professor Jorge Alberto Mendes de Sousa
Professor Rui José Oliveira Pestana

dezembro de 2014

Agradecimentos

Este capítulo serve para mostrar a minha gratidão a todos os que me ajudaram, de uma forma ou de outra, na realização deste trabalho final. No entanto apenas vou mencionar aqueles que mais estiveram envolvidos no processo, por isso deixo aqui um agradecimento geral a todos os outros.

As pessoas que mais estiveram envolvidas na realização da tese e que mais apoio deram foram, sem dúvida, o Professor Jorge Alberto Mendes de Sousa e a Professora Ana Alexandra Antunes Figueiredo Martins que foram os meus orientadores neste longo caminho percorrido. As reuniões semanais ajudaram a que o trabalho que desenvolvi continua-se no caminho certo para que chega-se mais rápido a resultados concretos e relevantes para o tema em questão.

Aproveito para deixar um agradecimento aos meus pais que tornaram possível, não só a realização da minha tese, como também todo o meu percurso no ensino superior através de constante motivação.

Por fim agradeço a todos os meus colegas de curso, principalmente aqueles com os quais fiz amizade e que permitiram que existisse uma competição saudável entre todos com o intuito de melhores resultados académicos. Deixo também um agradecimento especial ao meu colega Ruben Ferreira com quem publiquei um artigo, o facto de estarmos a desenvolver trabalhos com pontos semelhantes permitiu ver o mesmo assunto de perspetivas diferentes e assim enriquecer ainda mais a tese de cada um.

Resumo

As energias renováveis apresentam características que lhes conferem preferência na realização de um despacho económico, no entanto, tendo em conta que o recurso utilizado pelas mesmas é pouco controlável e algumas vezes imprevisível, a sua utilização sofre de algumas restrições devido ao seu output de energia extremamente irregular.

A produção eólica tem um output extremamente variante e a sua presença em grande escala num sistema nacional de energia pode trazer vários problemas, não só de gestão de produção, como também ao nível do transporte.

Tendo isso em conta, esta dissertação introduz um método que pode ser utilizado na decisão de investimentos futuros no que toca à escolha da localização geográfica onde deve ser instalada capacidade eólica. Este estudo é feito através da análise de perfis de produção de um dado parque eólico que é representativo da sua região, ou seja, o comportamento de produção de um parque é extrapolado para toda uma região.

O objetivo desta análise passa por facilitar a penetração crescente de energia eólica, neste caso, em Portugal, através do melhoramento da relação entre a produção eólica e a produção térmica. A combinação de perfis eólicos vai ser feita de acordo com certos parâmetros intrínsecos a cada perfil com o intuito de reduzir a variância e o custo da produção térmica, ou seja, aumentando a eficiência das centrais térmicas e ao mesmo tempo reduzindo as emissões de gases causadores de efeito de estufa.

Índice

1.Enquadramento ao tema	1
1.1.Motivações ambientais	2
1.2.Centrals térmicas	8
1.3.Energia eólica	10
2.Estado da Arte	14
2.1.Metas a cumprir	15
2.2.Consequencias do aumento de capacidade eólica	16
2.3.Gestão de produção eólica	18
2.4.Operação e planeamento da rede elétrica	21
2.5.Variância da produção eólica	23
2.6.Comportamento face a defeitos	25
2.7.Relação da produção eólica com produção térmica.....	29
3.Metodologia	31
3.1.Minimização da variância da produção térmica	32
3.2.Minimização do custo de produção térmica.....	36
4.Caso em Estudo	39
5.Resultados	43
5.1.Comparação de Variâncias Mantendo a Quota	44
5.2.Gradientes de Quota	48
5.3.Anulação das restrições (variância).....	51
5.4.Comparação de Custos Mantendo a Quota.....	53
5.5.Anulação das restrições (custos).....	55
6.Conclusões	57
7.Referencias.....	60
8.Anexos	64

Índice de figuras

Figura 1: Procura mundial de energia [19].....	2
Figura 2: Evolução da temperatura global e do nível médio da água do mar ao longo dos anos [20].	3
Figura 3: Emissões de gases causadores de efeito de estufa (toneladas de carbono) [21].....	4
Figura 4: Fontes de emissões de gases com efeito de estufa [19].....	6
Figura 5: Comportamento da geração térmica durante um dia aleatório [18].	8
Figura 6: Primeira turbina eólica construída em 1887 em Cleveland [22].....	11
Figura 7: Relação entre carga e um cenário de 100% de penetração eólica [23].....	12
Figura 8: Comparação do comportamento de uma central a carvão com um parque eólico durante 1 semana [19].	12
Figura 9: Evolução da produção renovável na satisfação da procura [19].	13
Figura 10: Principais objetivos para uma penetração eólica segura no sistema [14].....	16
Figura 11: Comportamento da Hídrica-Bombagem durante uma semana [13].	20
Figura 12: Índice de eolicidade mensal de Portugal continental [17].....	23
Figura 13: Oscilações sobre a Eolicidade de Portugal continental [17].	24
Figura 14: Controlos Pitch, Stall e Ride Trough Fault [25] [26].	25
Figura 15: Ligação da turbina eólica á rede [24].	26
Figura 16: Estrutura de um Gerador Duplamente Excitado com rotor “Crow Bar” [9].	27
Figura 17: Estrutura do Gerador Duplamente Excitado com sistema RTF [9].	28
Figura 18: Relação entre os valores reais e a reta traçada representativa de uma central equivalente.....	37
Figura 19: Localização dos parques eólicos e os respetivos dados distritais.	39
Figura 20. Diagramas de caixa do parque eólico A.	40
Figura 21: Histograma dos 6 parques com os dados de produção anuais.....	40
Figura 22: Exemplo de curva de potência de uma turbina eólica.....	41
Figura 23: Potências instaladas originais e otimizadas para uma quota de 14,27% na minimização da variância.	44
Figura 24: Histogramas de produção eólica de dados originais e otimizados.	45
Figura 25: Contribuição de cada distrito na satisfação da quota.....	48
Figura 26: Método de aumento de quota uniforme.	49
Figura 27: Comparação de Variâncias para vários valores de quota eólica.....	49
Figura 28: Potências instaladas originais e otimizadas para uma situação sem restrições.	51
Figura 29: Potências instaladas originais e otimizadas para uma quota de 14,27% na minimização dos custos.	53
Figura 30: Potências instaladas originais e otimizadas para uma situação sem restrições (Custos).	55

Índice de tabelas

Tabela 1: Coeficientes de correlação entre distritos e procura.....	43
Tabela 2: Variância e fator de utilização de cada perfil analisado.....	43
Tabela 3: Comparação de variâncias para uma quota de 14,27%.....	46
Tabela 4: Comparação de variâncias para uma quota de 14,27% com “B” e “D” somados.....	47
Tabela 5: Resultados da anulação das restrições.....	52
Tabela 6: Comparação de variâncias e de custos totais para uma quota de 14,27%.....	54
Tabela 7: Resultados da anulação das restrições.....	55

1.Enquadramento ao tema

Neste capítulo vão ser abordadas as causas de existir uma penetração renovável tão grande nos sistemas de potência mundiais. A crescente capacidade renovável existente em todo o mundo tem origem numa tentativa de diminuir a dependência que existe nos combustíveis fósseis, combustíveis esses que estão a danificar seriamente a atmosfera que é fundamental para a vida na terra, entre outras coisas.

Depois de esclarecido o problema, a energia eólica vai estar em destaque na segunda metade deste capítulo. Tendo em conta que a sua relação com a produção térmica é algo que vai ser abordado ao longo de toda a dissertação, é necessário entender um pouco a evolução histórica da tecnologia eólica e os benefícios que a relação desta com a produção térmica pode trazer ao objetivo máximo que é a satisfação da procura da melhor forma do ponto de vista ambiental e económico.

1.1.Motivações ambientais

No presente, a demanda energética aumenta a um ritmo exponencial. No último século, a evolução da tecnologia levou a que muitas tarefas, no dia-a-dia de cada um, necessitem de energia elétrica, quando outrora não o requeriam. Do ponto de vista do consumidor, este aumento de consumo é algo que lhe permite poupar tempo e aumentar o seu nível de conforto tanto no interior como no exterior de sua casa. No entanto, do ponto de vista do produtor, este aumento da procura tem que ser respondido com um aumento de produção. Tendo isto em conta, é necessário que existam métodos de otimização e previsão capazes de responder a este desafio. A figura 1 mostra a evolução da procura energética ao longo dos anos bem como uma previsão até ao ano 2035.

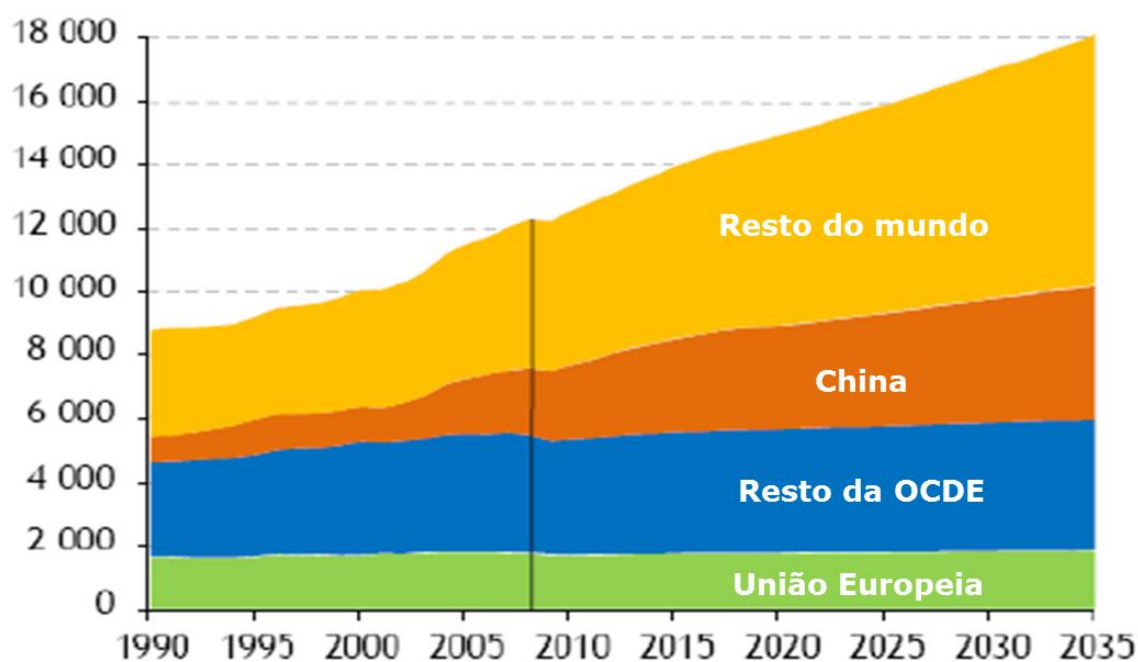


Figura 1: Procura mundial de energia [19].

As alterações climáticas têm vindo a ser identificadas como uma das maiores ameaças ambientais, sociais e económicas que o planeta e a humanidade enfrentam na atualidade. A temperatura média da superfície da Terra aumentou 0,74°C desde o final de 1800. É previsto um aumento de 1,8 a 4°C até ao ano de 2100, o que implica alterações climáticas drásticas caso não se tomem medidas essenciais para resolução deste problema. Mesmo que ocorra apenas o aumento mínimo previsto, este será superior a qualquer subida de temperatura registada nos últimos 10000 anos. A atual tendência de aquecimento global poderá causar extinções de inúmeras espécies vegetais e animais

que já se encontram enfraquecidas pela poluição e pela perda dos seus habitats naturais. Os seres humanos, apesar de não serem confrontados com ameaças idênticas, estarão sujeitos a diversas adversidades. Eventos climáticos como tempestades severas, inundações e secas são cada vez mais frequentes ultimamente, indicando que os cenários previstos pelos especialistas são cada vez mais uma realidade.

A figura 2 reflete a evolução da temperatura global e do nível médio da água do mar ao longo dos anos, os valores de temperatura representam anomalias referentes á média global das temperaturas no período de 1901 até 2000 e os valores de nível representam uma subida do mesmo relativamente ao ano anterior.

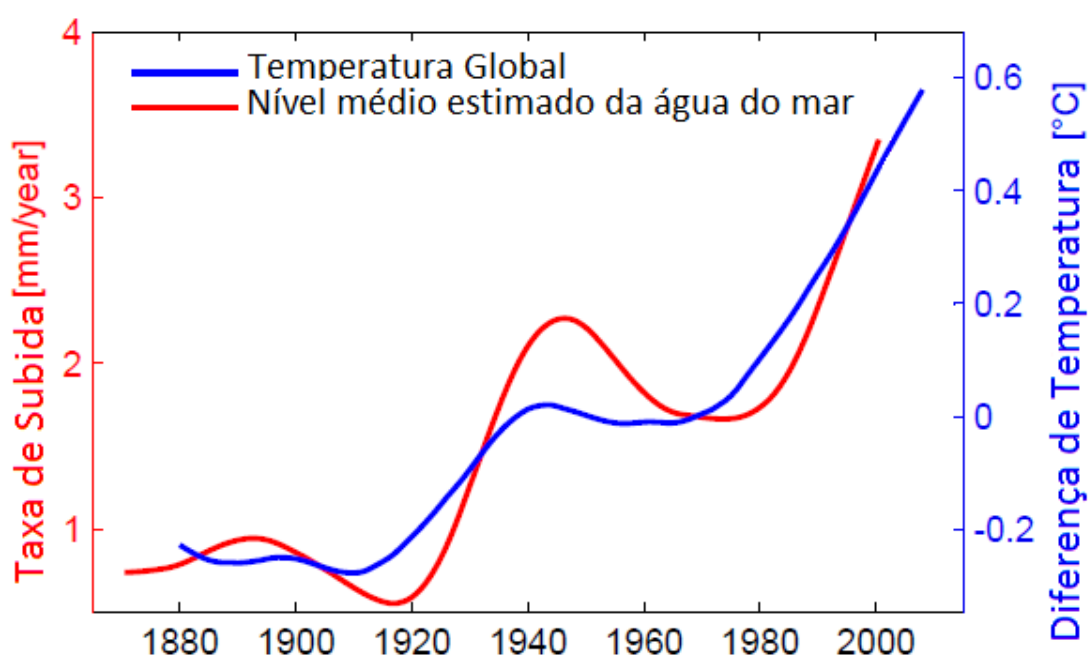


Figura 2: Evolução da temperatura global e do nível médio da água do mar ao longo dos anos [20].

Continuando a análise da figura 2 no que toca á relação que existe entre os dois fenómenos representados, o nível médio da água do mar subiu entre 10 a 20 centímetros durante o século XX, e um aumento adicional de 18 a 59 centímetros é previsto até ao ano 2100. As temperaturas elevadas provocam a expansão do volume do oceano que é consequência do degelo de glaciares e calotas de gelo. Se o pior cenário previsto é alcançado, o mar pode inundar as costas densamente povoadas de países como o Bangladesh, provocar o desaparecimento total de algumas nações, privar bilhões de pessoas a reservas de água doce e estimular migrações em massa.

Esta subida abrupta de temperatura deve-se a um século e meio de industrialização. A queima de quantidades cada vez maiores de petróleo, gasolina e carvão leva ao

desaparecimento de florestas. Estas atividades têm aumentado a quantidade de gases de efeito de estufa presentes na atmosfera, maioritariamente o dióxido de carbono, óxido nítrico e metano. Estes gases são fundamentais para a vida na Terra absorvendo parte da radiação infravermelha refletida pela superfície terrestre, impedindo-a de retornar ao espaço. Sem estes gases o mundo seria um local estéril e frio na medida em que a temperatura média terrestre seria 33°C mais baixa, inviabilizando a vida no planeta tal como a conhecemos nos dias de hoje. Tendo isto em conta pode-se concluir que o efeito de estufa é originado por um fenómeno natural, necessário para a conservação da vida no planeta. No entanto, em grandes quantidades, estes gases são responsáveis pelo aumento da temperatura global para níveis demasiado elevados e, consequentemente, pela alteração do clima. Onze dos doze últimos anos foram os mais quentes até a data, sendo 1998 o ano mais quente registado.

A figura 3 representa as emissões de dióxido de carbono (um dos gases responsáveis pelo efeito de estufa). A revolução industrial trouxe um crescimento na recolha de energia do carvão, nomeadamente a invenção da máquina a vapor que, quando instalada em locomotivas, trouxe um grande avanço no que diz respeito a longas viagens. O facto de existir uma grande preocupação com estas emissões deve-se ao crescimento galopante das mesmas, chegando a um ponto em que a concentração destes gases na atmosfera está a mudar o ecossistema do planeta.

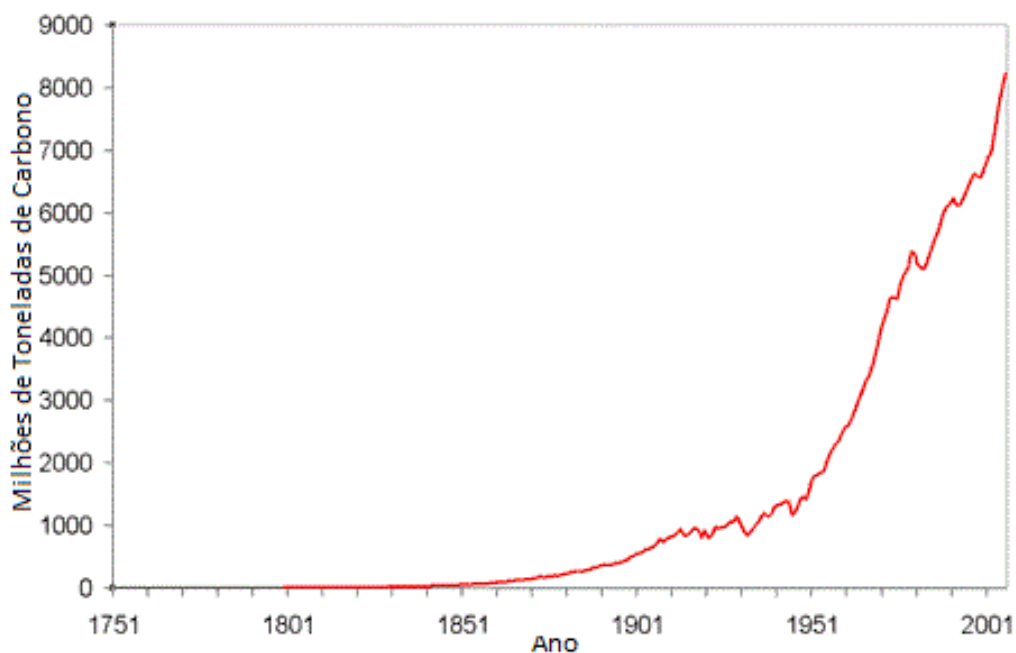


Figura 3: Emissões de gases causadores de efeito de estufa (toneladas de carbono) [21].

Tendo em conta todas estas consequências nocivas que advêm da libertação de gases nocivos para atmosfera. Gerou-se alguma preocupação a nível mundial sobre as alterações atmosféricas provocadas pela libertação destes gases bem como soluções para travar ou mesmo inverter esta situação. Como já foi mencionado anteriormente, a concentração excessiva destes gases na atmosfera pode trazer consequências catastróficas para o planeta e conseqüentemente para os seus habitantes. Neste momento, face a todas estas consequências indesejáveis, é uma prioridade reduzir as emissões destes gases com grande urgência. 80% do gás que é emitido para a atmosfera deve-se á queima de combustível, o que significa que uma parte razoável desses 80% são as emissões de CO₂ feitas pelas centrais a carvão. Essas centrais utilizam o carvão como combustível de forma a produzir energia elétrica através dos gases provenientes da combustão. Resumindo, na alimentação da procura cada vez maior, haverá um esforço no sentido de utilizar tecnologias que não recorram a este tipo produção. As energias renováveis são um excelente candidato pois utilizam matéria-prima não poluente e inesgotável, no entanto, a sua utilização na satisfação da procura não é tão adaptável como uma central a carvão.

A figura 4 mostra algumas causas da subida de emissões considerada na figura 3. A indústria e o transporte são a maior parte das fontes que emitem este tipo de gás. A evolução da civilização até aos dias de hoje deve-se a estes dois fatores que possibilitaram comunicação e partilha de culturas de uma forma que não existia anteriormente.

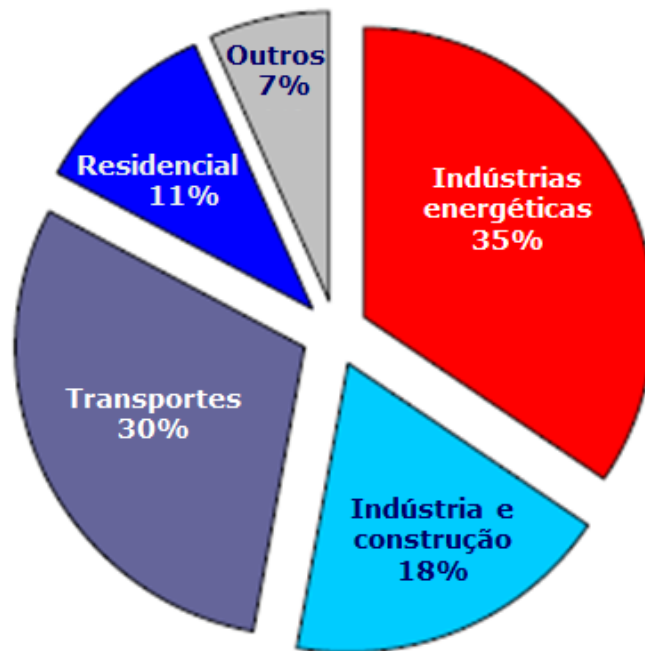


Figura 4: Fontes de emissões de gases com efeito de estufa [19].

O grande alarmismo em torno de questões ambientais ao nível das emissões de gases nocivos originou uma campanha de redução de emissão desses mesmos gases, e assim surgiu o protocolo de Quioto. O protocolo de Quioto teve origem numa sucessão de outros eventos como a *Toronto Conference on the Changing Atmosphere*, no Canadá em outubro de 1988, seguida pelo *IPCC's First Assessment Report* em Sundsvall, Suécia em agosto de 1990 e que culminou com a *Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança Climática* no Rio de Janeiro, Brasil em junho de 1992. Constitui-se no protocolo de um tratado internacional com compromissos mais rígidos para a redução da emissão dos gases que agravam o efeito estufa considerados de acordo com a maioria das investigações científicas, como causa do aquecimento global. Debatido e ajustado em Quioto, Japão em 1997, foi aberto para assinaturas em 11 de Dezembro desse mesmo ano e validado em 15 de março de 1999. Para este entrar em vigor foi necessária a adesão de 55 países, que juntos, produzem 55% das emissões a nível mundial. Este tratado propõe um calendário segundo o qual os países-membros (principalmente os desenvolvidos) têm obrigação de reduzir a emissão de gases de efeito de estufa em 5,2% no mínimo em relação aos níveis de 1990 no período entre 2008 e 2012, também chamado de *primeiro período de compromisso* (para muitos países, como os membros da EU, isso corresponde a 15% abaixo das emissões esperadas para 2008). As metas de redução não foram homogéneas a todos os países, colocando níveis diferenciados para os 38 países que mais emitem gases. Países em

franco desenvolvimento como Brasil, México, Argentina e Índia não receberam metas de redução para este período. A redução das emissões ocorre em várias atividades económicas, sendo uma delas a promoção do uso de fontes energéticas renováveis. Pode-se concluir que este protocolo teve uma grande influência na impulsão do investimento no desenvolvimento da tecnologia e na construção de centrais no que diz respeito as energias renováveis.

1.2. Centrais térmicas

A procura energética numa escala diária tem os seus picos e as suas baixas, pois depende do nível de atividade dos consumidores. Tendo isso em conta, uma central a carvão tem, não só o problema da emissão de CO₂, como também tem um rendimento bastante baixo devido a toda a energia dissipada em forma de calor, entre outros fatores. No entanto a sua energia é retirada da queima do carvão o que significa que, enquanto o produtor de energia inserir carvão á entrada do sistema, vai obter energia elétrica á saída. Este tipo de produção é bastante vantajoso tendo em conta os altos e baixos de consumo mencionados no início deste parágrafo. É nesta resposta á variação da procura que as energias renováveis falham.

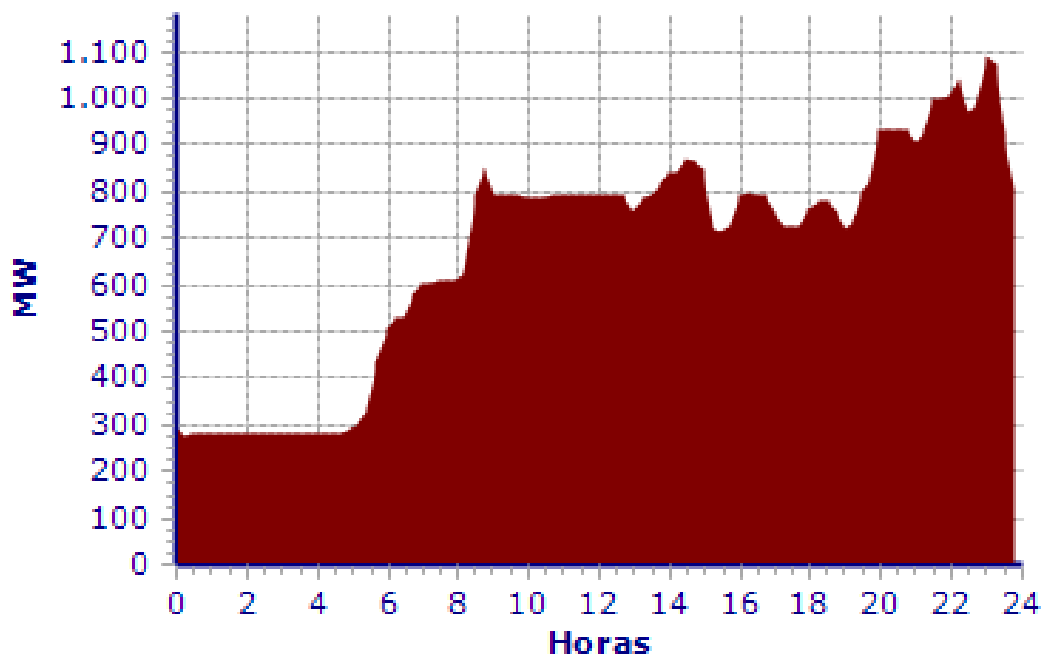


Figura 5: Comportamento da geração térmica durante um dia aleatório [18].

A figura 5 mostra o comportamento da produção térmica durante um dia inteiro. É visível que existe uma subida de produção a partir das 5 da manhã (quando algumas pessoas começam o seu dia) e nota-se também que a sua produção tem um comportamento instável mas atenuado devido á ação das energias renováveis. Apesar de produção de origem renovável estar presente, a produção térmica continua a ter uma variância considerável.

Apesar da sua produção “limpa” de energia, as tecnologias de produção que utilizam recursos renováveis estão dependentes desses mesmos recursos que não são controlados totalmente pelo Homem. Os painéis fotovoltaicos produzem energia através da radiação solar, o que implica produção apenas durante o dia. As turbinas eólicas dependem da velocidade do vento, que é algo bastante inconstante e resulta num fornecimento de energia bastante variante e pouco previsível. A tecnologia renovável mais controlável é a hídrica, que conta com barragens para o armazenamento de água que pode ser turbinada mais tarde.

1.3. Energia eólica

A energia eólica é aproveitada há centenas de anos, sendo alguns exemplos da sua utilização a moagem de cereais e bombeio de água. Com o surgimento da eletricidade no final do século XIX, os primeiros protótipos de turbinas eólicas modernas foram concebidos, utilizando tecnologia baseada no tradicional moinho de vento. Desde então, decorreu um processo moroso até que a energia eólica fosse aceite como um método de produção de energia economicamente viável. A crise petrolífera dos anos 70 e o movimento anti energia nuclear nos anos 80 aumentou o interesse pelas energias alternativas e intensificaram a investigação no sentido de encontrar novas formas económica e ecologicamente viáveis de produção de energia. As turbinas eólicas construídas nesse período eram utilizadas principalmente para pesquisa e eram extremamente dispendiosas. Com a ajuda de programas de gestão e investigação internacionais financiados pelo governo, bem como da criação de institutos de investigação, nos anos 80 continuaram a ser desenvolvidos e implementados novos métodos de produção de energias renováveis. Institutos de investigação como o Instituto de Energia Eólica Alemão (DEWI) e o Instituto de Investigação Dinamarquês Risø, bem como vários programas de investigação e cooperação internacionais no setor da energia eólica, contribuíram para os avanços industriais e tecnológicos dos pioneiros da mesma. Foram desenvolvidos e implementados padrões internacionais, uma regulamentação precisa e um *design* cada vez mais eficiente, tendo resultado em parques eólicos modernos e economicamente viáveis.

A figura 6 representa a primeira turbina produtora de eletricidade. Esta turbina carregava uma bateria e foi instalada em julho de 1887, tinha 18 metros de altura, pesava 4 toneladas e gerava 12kW.

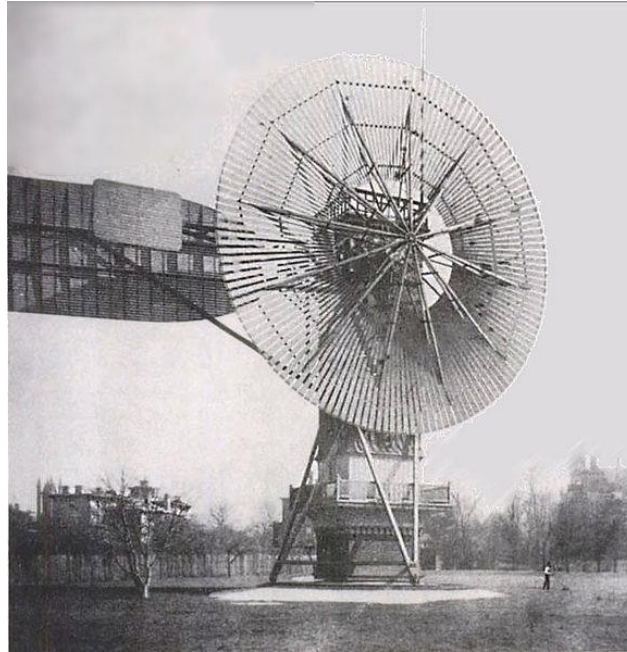


Figura 6: Primeira turbina eólica construída em 1887 em Cleveland [22].

O recurso renovável que pode ser considerado um dos mais imprevisíveis e variáveis é o recurso eólico pois a velocidade do vento está em constante mudança e a sua intensidade é pouco padronizável. Querendo isto dizer que, ao longo do tempo, não apresenta um comportamento constante de produção com momentos de grande e pequena produção definidos. No entanto, como já foi dito, a energia eólica tem vindo a ser utilizada durante séculos, antes até da utilização doméstica da energia elétrica que se vive nos dias de hoje. Atualmente, o vento é um dos recursos renováveis de produção de energia elétrica mais utilizado em todo o mundo, sendo alvo de uma progressiva expansão. No entanto algumas das suas características são consideradas nefastas ao bom funcionamento do sistema elétrico quando neste existe uma grande penetração de energia eólica.

A figura 7 representa um cenário em que existe 100% de penetração eólica num dado sistema em comparação com a procura do mesmo. É possível que os valores médios das 2 curvas sejam os mesmos, no entanto analisando os valores instantâneos é perceptível que seria uma situação completamente incomportável. Em determinados momentos existiria uma sobre produção elevada e noutros a produção simplesmente não chegaria para satisfazer toda a procura. Este cenário talvez funcionasse em conjunto com um sistema de bombagem dotado de grande capacidade de armazenamento de forma a bombear e produzir sempre que estas discrepâncias ocorressem.

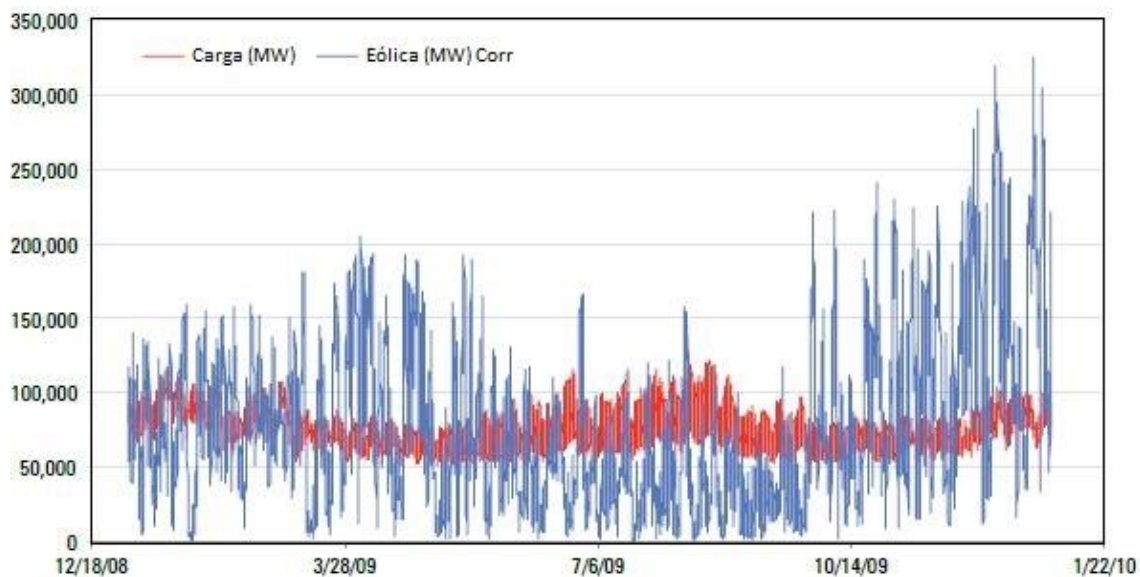


Figura 7: Relação entre carga e um cenário de 100% de penetração eólica [23].

Esta análise mostra que, com a tecnologia atual, é impossível satisfazer as necessidades energéticas dos consumidores apenas com energia recolhida através do recurso eólico, o que significa que o seu uso pode ser benéfico em conjunto com outros tipos de produção. A figura 8 mostra a diferença do comportamento de produção de energia entre uma central a carvão e um parque eólico durante uma semana. É visível a discrepância tendo em conta que a central a carvão é completamente controlável enquanto que a produção eólica é fortemente dependente do fluxo de vento, sendo ele forte ou quase inexistente.

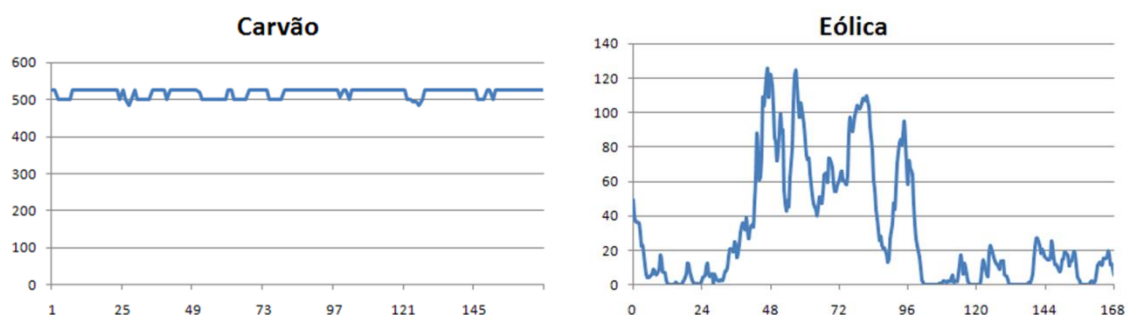


Figura 8: Comparação do comportamento de uma central a carvão com um parque eólico durante 1 semana [19].

O grande aumento de capacidade eólica instalada mundialmente deve-se a dois motivos distintos: Preocupação ambiental e desenvolvimentos tecnológicos das turbinas eólicas. Segundo a *World Wind Energy Association*, a capacidade eólica instalada mundialmente no ano de 2007 atingiu 19,696 GW, no fim desse ano a potência eólica instalada era de 93,849 GW o que significa que, no começo de 2008, cerca de 21% da capacidade eólica tinha sido instalada no ano anterior. Esta informação traduz não só a necessidade de

uma energia com menos consequências ambientais, mas também um aumento de credibilidade da mesma tendo em conta as descobertas tecnológicas feitas até então.

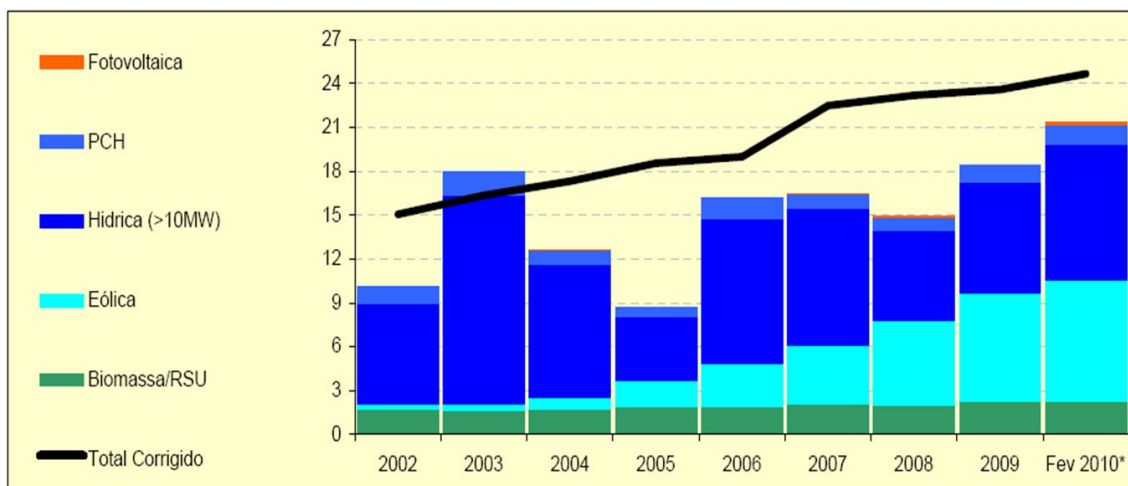


Figura 9: Evolução da produção renovável na satisfação da procura [19].

A figura 9 representa o aumento de produção eólica ao longo dos últimos anos. Esta figura traduz o investimento brutal que tem sido feito em parques eólicos em comparação com os restantes recursos. Em fevereiro de 2010 a produção eólica representa quase 50% de toda a produção renovável representada neste gráfico o que significa uma produção bastante grande quando comparado com o ano de 2002 em que a produção eólica é comparativamente insignificante.

Os capítulos seguintes vão ter como foco a energia eólica de forma a encontrar uma solução viável que torne vantajosa a sua utilização em maior quantidade. O seguinte capítulo foca-se maioritariamente na energia eólica em termos de pesquisa feita neste campo de forma a identificar nitidamente os problemas da sua utilização e algumas soluções para colmatar os mesmos.

2.Estado da Arte

Este capítulo contém informações sobre artigos e literatura específica que foi utilizada de forma a enriquecer toda a parte de desenvolvimento teórico dos modelos e a sua posterior aplicação em cenários específicos.

Vão ser apresentados objetivos que foram estipulados mundialmente com o intuito de reduzir as emissões de gases responsáveis pelo efeito de estufa excessivo bem como consequências de uma crescente penetração eólica. Algumas soluções são também apresentadas de forma a mitigar alguns dos problemas a nível de produção da energia como também do transporte da mesma.

2.1.Metas a cumprir

Como já foi dito no enquadramento, de forma a reduzir a emissão de gases que provocam o efeito de estufa, fontes de energia renovável foram impulsionadas mundialmente. A um nível europeu, a diretiva 2009/28/EC estabelece metas a serem cumpridas no que diz respeito a percentagem de procura satisfeita por energias renováveis, bem como um tempo limite para que essa cota seja atingida [1]. Os objetivos da estratégia Europa 2020 no que diz respeito a alterações climáticas e sustentabilidade energética são os seguintes:

- Reduzir as emissões de gases com efeito de estufa em 20% (ou em 30% se forem reunidas as condições necessárias) relativamente aos níveis registados em 1990;
- Obter 20% da energia a partir de fontes renováveis;
- Aumentar em 20% a eficiência energética.

Estas metas traduzem-se num investimento progressivo de desenvolvimento tecnológico e instalação de potência de forma a obter maior quota renovável na satisfação da procura, logo é importante existirem métodos de otimização que facilitem a integração desta nova potência no sistema elétrico.

2.2. Consequências do aumento de capacidade eólica

A penetração de energias renováveis nos sistemas de potência permite uma redução no consumo de combustíveis fósseis e nos impactos ambientais provocados por estes. Tendo isso em conta, investimentos consideráveis foram feitos de forma a aumentar a capacidade instalada no que toca a energias renováveis, como consequência disso, Portugal tornou-se no segundo país do mundo com a mais alta quota eólica em 2010 [13].

Apesar de ser tecnicamente possível existir uma grande penetração de energia eólica, isso significa que os seus custos de integração também aumentam. Tendo isto em conta, qualquer energia eólica produzida traduz-se em menor produção térmica, o que por sua vez e com algumas regras significa poupança de combustível que, como foi dito anteriormente, é uma das razões principais para o investimento progressivo que está a ser feito [15].

Como consequência desta rápida expansão de potência eólica instalada, é necessário abordar algumas consequências negativas que advêm desse rápido crescimento. No início de 2006 foi iniciada uma cooperação internacional chamada “Task 25” que tem como função indicar formas de operação de sistemas de potência com alta penetração eólica. A figura 10 representa as questões estudadas por esta cooperação internacional.

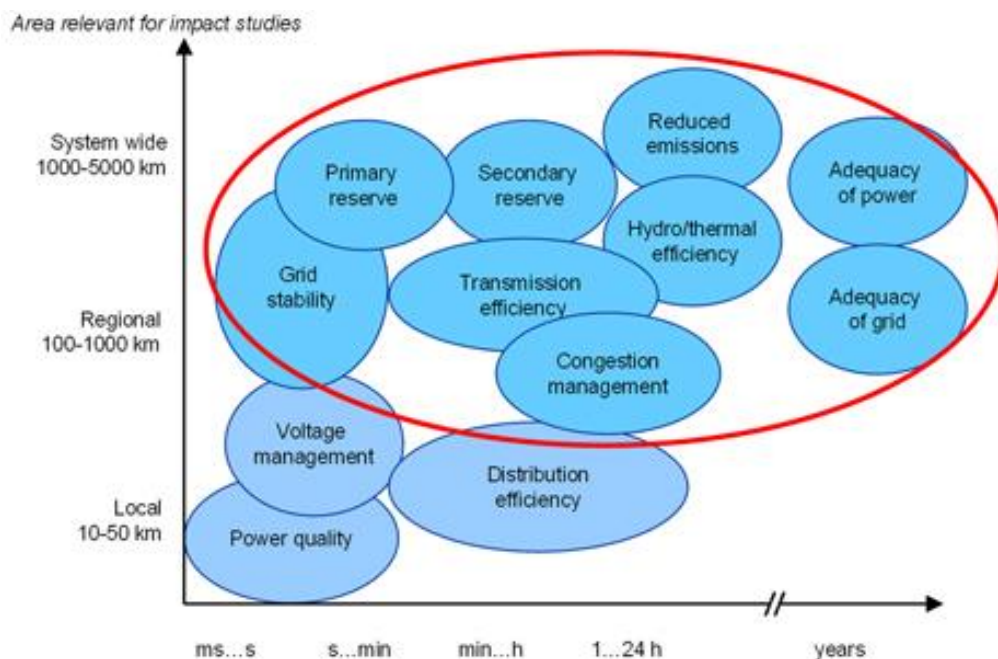


Figura 10: Principais objetivos para uma penetração eólica segura no sistema [14].

A figura 10 indica as preocupações a ter num sistema com grande quota eólica numa escala espaço-temporal de forma a priorizar os problemas a resolver. Numa escala de tempo pequena situa-se a estabilidade da rede que contém fenómenos de muito curta duração mas que mesmo assim a podem comprometer. Numa escala maior aborda-se a adequação da rede e de potência em trânsito. Numa escala mais local existe exemplos de gestão de congestionamento que afeta o sistema numa escala mais regional e as emissões de gases nocivos que é algo que se alastra por todo o sistema.

Tendo em conta alguns dos pontos que foram apresentados, a previsão da velocidade do vento é um requisito muito importante quando se fala em integração de energia eólica em massa. Tendo em conta que cada país tem os seus próprios problemas de integração de energia eólica, as flutuações de produção de energia resultantes desse recurso são algo que é independente do sistema de potência de cada local, dependem sim das condições atmosféricas. Sabendo isto, é impossível evitar estas flutuações através da previsão das condições atmosféricas visto que é possível prever a variabilidade do vento com algum grau de precisão mas impossível reduzir a sua amplitude. No entanto a partir da previsão é possível tentar encontrar outras soluções de produção no que diz respeito ao despacho energético [14].

2.3. Gestão de produção eólica

A penetração de energia eólica no sistema Português, ou em qualquer outro sistema, encontra barreiras à medida que aumenta. O fornecimento de energia no que toca a turbinas eólicas depende largamente do fluxo de vento na área o que é algo bastante incontável e com uma previsibilidade imperfeita. Este fenómeno não é um problema quando a energia presente na rede proveniente deste tipo de recurso apresenta uma pequena percentagem quando comparado com a procura. No entanto prevê-se uma penetração crescente de energia eólica no sistema elétrico global. Isso significa que vai existir uma grande componente de energia a satisfazer a procura com uma grande variabilidade. Este fator cria um cenário em que existe a hipótese de, num dado momento, por uma ponta esporádica de produção eólica, o nível de produção de energia elétrica ultrapasse a procura, o que é indesejável na conjuntura atual do sistema português. Para mitigar esta situação existe um leque de hipóteses, cada uma com as suas vantagens e desvantagens, as hipóteses a considerar são as seguintes:

- Paragem de centrais térmicas;
- Armazenamento da energia adicional através de bombagem ou ar comprimido;
- Paragem das turbinas eólicas.

A paragem de centrais térmicas é completamente posta de parte devido ao elevado custo que essa ação iria ter.

Utilizar as pontas de eólica em bombagem nas centrais hídricas ou para armazenamento de ar comprimido é a opção mais viável caso exista condições para tal, o que nem sempre acontece devido à capacidade limitada de armazenamento de água. A viabilidade económica de construção de um sistema de armazenamento adicional é conseguida se a sua anuidade for menor do que a redução de custos anual na geração térmica provocada por esse mesmo sistema [13]. Isto significa que, caso a capacidade de armazenamento atinja o seu limite máximo, o desperdício de energia tem que ser de tal forma elevado que torne mais barato a construção de um sistema de armazenamento novo de forma a armazená-la.

A última hipótese, também um pouco desinteressante, é a travagem das turbinas eólicas, que se traduz num desperdício de um recurso natural cujo custo marginal é nulo. Em resposta a este facto, desenvolvimentos tecnológicos na área das *smart grids* e dos veículos elétricos melhoram a resposta da procura energética de forma a absorver estes picos de geração eólica. No entanto, a falta de poder de armazenamento e escoamento destes picos, a opção mais viável a tomar em termos económicos é mesmo a travagem das turbinas.

O conceito de armazenamento de energia eólica, bem como outras energias provenientes de recursos altamente variáveis, está a ser utilizado presentemente. A possibilidade de contribuir para o bom funcionamento do sistema elétrico utilizando armazenamento adicional em conjunto com produção eólica permitiu a apresentação de soluções bastante inovadoras como baterias de vanádio e outras possibilidades mais clássicas como o armazenamento em barragens.

Quando a bombagem está disponível, deverão ser usados métodos para identificar a melhor estratégia a utilizar da combinação entre produção eólica e bombagem. De forma a conseguir este feito são necessárias as previsões de produção eólica nas horas vindouras, assim como as previsões do preço da energia.

Nos sistemas de potência, a geração total tem que ser continuamente ajustada de forma a coincidir com a procura e manter a variação da frequência dentro dos limites impostos. A natureza estocástica do vento torna o ajuste de geração difícil pelo que é empreendido pela geração térmica e hídrica. Alta penetração eólica requer um grande poder de regulação, por exemplo reservas girantes que se obtém aumentando o binário dos geradores já em funcionamento.

A solução para uma integração mais fácil de energia eólica na rede passa por ter um sistema de potência onde a resposta a grandes flutuações seja fácil e automática sem incorrer a custos adicionais. Sistemas com uma grande percentagem de capacidade hídrica, principalmente quando essa capacidade tem possibilidade de armazenamento, são ideais para adaptar uma vasta gama de flutuações de vento e contribuir para uma fácil gestão do sistema. De acordo com o resultado das simulações deste estudo [13], o número de centrais hídricas com bombagem previstas no futuro não vão ter capacidade suficiente para absorver o excesso de energia proveniente dos parques eólicos, pelo que cortes na sua geração vão existir. Uma das principais razões deste fenómeno é a

combinação entre alta introdução de energia eólica no sistema e geração hídrica de fio de água, ambos os recursos são incontrolláveis pelo Homem.

Estudos foram feitos de forma a prever um cenário onde a energia eólica representa mais de 25% da potência instalada em Portugal, cenário esse que será realidade num futuro muito próximo. Alguns dos resultados debruçaram-se sobre os parâmetros que mais influencia têm no corte de energia proveniente das turbinas, estes parâmetros são a taxa de crescimento da procura, o regime hidrológico e a capacidade instalada de energia eólica. O corte de energia eólica é uma consequência da necessidade de manter o equilíbrio entre a geração e a procura, por isso, quando a procura aumenta a necessidade energética também aumenta, logo, mais geração eólica é integrada [13]. Este estudo utilizou um modelo que teve em conta dados das centrais térmicas, bem como dos parques eólicos. A figura 11 dá a entender a importância que o sistema de bombagem tem no sistema elétrico.

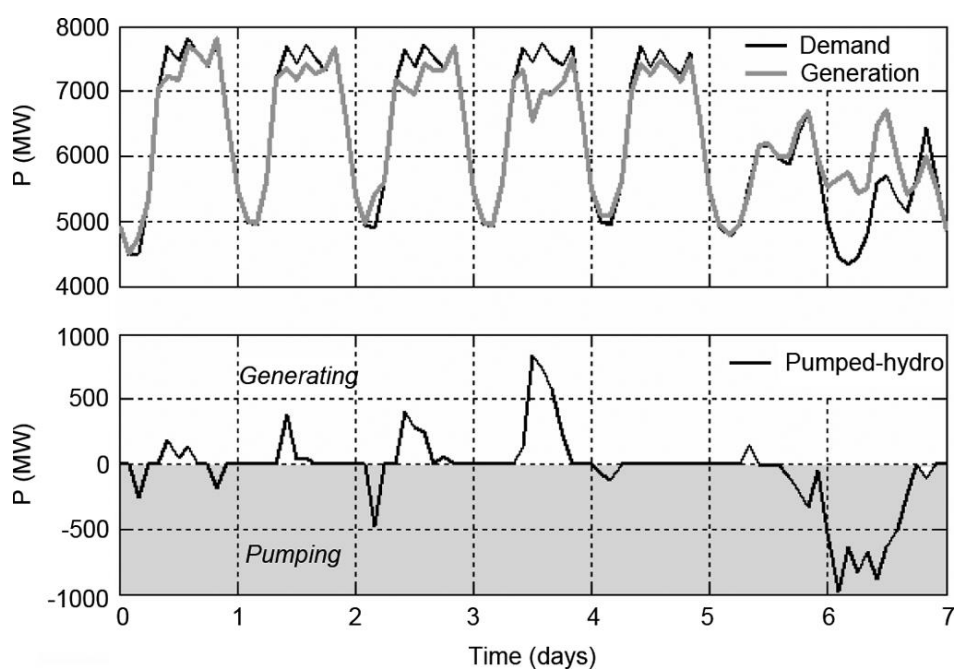


Figura 11: Comportamento da Hídrica-Bombagem durante uma semana [13].

Como se pode constatar na figura acima, o facto de existir bombagem significa que as variações da geração térmica são menores até um certo limite. Quanto maior for a capacidade hídrica de armazenamento, mais flexível é o sistema e a produção térmica aproxima-se cada vez mais de uma produção constante, com uma variância muito reduzida.

2.4. Operação e planeamento da rede eléctrica

Em [12] são abordados os inconvenientes de ter uma penetração eólica cada vez maior no que toca á operação da rede de transporte de energia. Se existirem vários parques eólicos muito próximos ligados apenas a um ramo da rede eléctrica nacional significa que este ramo pode estar sujeito a picos altíssimos de produção. Certamente que, caso seja uma linha de transporte antiga, a sua capacidade de transporte foi dimensionada tendo em conta produções térmicas previsíveis e controláveis, ou seja, a capacidade de transporte das linhas é algo a ter em conta aquando a construção de novos parques eólicos. Em alguns países os investidores de parques eólicos estão a ser obrigados a reforçar eles próprios a rede eléctrica da região para que possam construir o parque de forma a garantir a segurança da mesma, o que pode ser algo desencorajador do ponto de vista dos investidores, no entanto é necessário de forma a salvaguardar o estado da rede.

O planeamento da rede eléctrica tem que ter em conta as características particulares da geração eólica nomeadamente a sua variabilidade e o facto de que, em grande parte do tempo, a geração proveniente dos parques é bastante mais baixa do que a sua capacidade instalada. Se, através de métodos probabilísticos, se determinar que as ocorrências de potências nominais fornecidas pelos parques são baixas o suficiente, pode ser realizado um controlo de geração de pico durante momentos de grande carga na rede, ou seja, nesses raros momentos a geração eólica é cortada o que significa recurso desperdiçado, embora sendo muito reduzido.

A produção eólica desenvolveu-se de maneiras diferentes pelos vários países onde está presente. Em alguns sistemas de potência como na Dinamarca e na Holanda, a produção eólica continua a ser essencialmente um meio de produção bastante distribuído ligado á média tensão e por vezes também a baixa. Por outro lado, em sistemas como os de Espanha, Portugal e EU esta topologia está a ser superada através da instalação de parques eólicos extremamente grandes com uma potência instalada na ordem das centenas de MW ligados a linhas de alta tensão. Esta tendência da indústria eólica requer uma adaptação no que toca á operação destas centrais. Em Espanha, a geração destes parques de grande potência é agregada e gerida de forma central. Esta agregação espacial da geração eólica tem algumas consequências positivas na medida em que

permite tirar partido de uma das características mais básicas do recurso eólico que é a sua baixa correlação espacial no que toca a flutuações rápidas da velocidade do vento.

Tendo em conta as limitações que podem existir a nível de rede, existem impedimentos no que toca á construção dos parques a nível económico. Tem que existir um equilíbrio económico e geográfico na escolha da área em que vai ser construído o parque. Um local onde o fluxo de vento é ideal pode ser algo remoto, o que implica custos acrescidos na construção de infraestruturas de ligação á rede, custos estes que podem inviabilizar o projeto [2].

2.5. Variância da produção eólica

Em [17] são abordados os índices de eolicidade de Portugal continental. O índice de eolicidade tem como objetivo quantificar as flutuações de produção de energia elétrica de um parque eólico em torno do seu valor médio, ou seja, o princípio de cálculo é semelhante ao da variância. Este índice é calculado através da relação entre a eolicidade de um determinado período e a eolicidade de um período maior generalizado. A eolicidade representa o nível de recurso eólico disponível num determinado período e é calculado tendo por base produções reais de parques em exploração, selecionados de forma a serem fidedignos e representativos da área onde estão construídos. A figura 12 representa os índices de eolicidade mensais de vários anos em comparação com a respetiva média em Portugal continental.

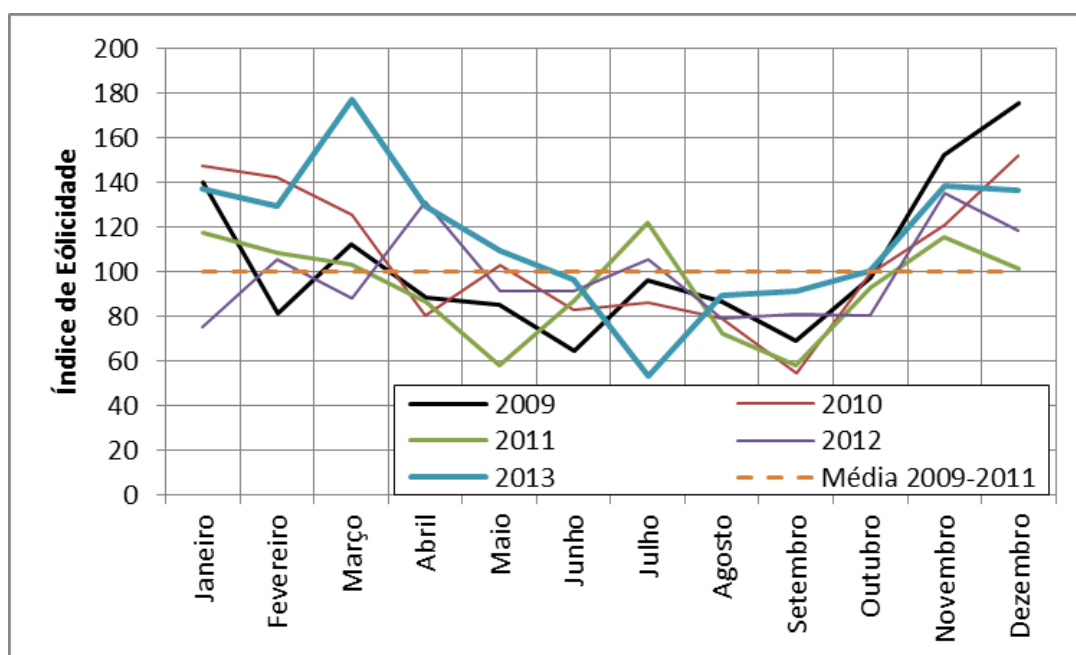


Figura 12: Índice de eolicidade mensal de Portugal continental [17].

O índice de oscilação representado na figura 13 mostra o desvio de cada ano tendo em conta a média de índices de eolicidade de um mês. Como se pode constatar, o índice de eolicidade atinge valores máximos de 77% acima da média e 47% abaixo, o que mostra claramente a natureza variante dos valores de produção utilizados.

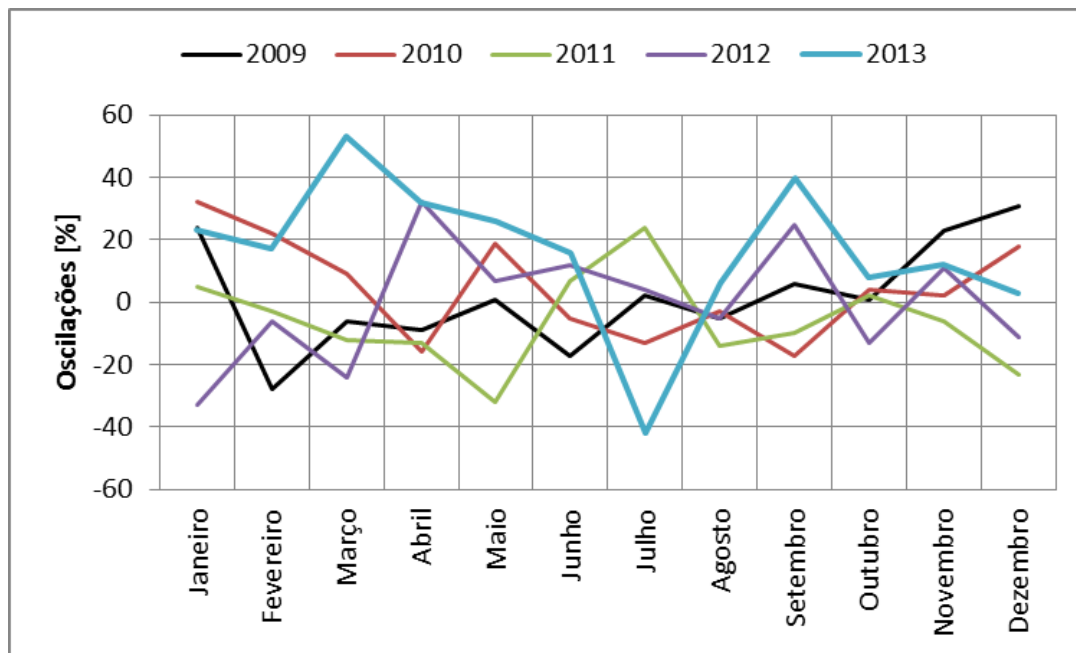


Figura 13: Oscilações sobre a Eólicidade de Portugal continental [17].

As oscilações que representam diferenças de índices de eolicidade entre os mesmos meses em anos diferentes também mostram diferenças tendo em conta que estamos a falar em períodos iguais em anos diferentes. Apesar das oscilações positivas poderem ser explicadas pelo aumento de potência instalada ao longo dos anos, os valores negativos das mesmas descreditam um pouco essa hipótese. É visível que o índice de eolicidade anual e as oscilações são maiores em 2013 o que, para além de mostrar um aumento de potência eólica instalada, mostra também que essa instalação não foi feita com a minimização da variância em vista. O modelo apresentado nos próximos capítulos tem como objetivo minimizar este índice de uma forma indireta, tendo como objetivo principal a variância e os custos de produção.

2.6. Comportamento face a defeitos

Para além da variabilidade, os parques eólicos sofrem também de alguma fragilidade na medida em que podem desconectar-se da rede quando confrontados com um defeito (cava de tensão), o que vai agravar ainda mais esse defeito. Tendo em conta que o vento não é constante, se a turbina estivesse apenas á mercê das correntes de ar, a sua frequência iria ser bastante inconstante e inoportável no que toca a produção de energia. Para resolver essa situação existem 2 tipos de controlo *pitch* e *stall* que reagem de maneiras diferentes ao mesmo fenómeno: como impedir a turbina de acelerar quando existe uma velocidade demasiado elevada do vento? O controlo *stall* mais antigo é feito no modo de construção da pás que são construídas de maneira a que, a partir de um certo limite, quanto maior for a velocidade do vento menor é a energia recolhida pela turbina, não existindo nenhum controlo secundário que a estabilize. O controlo *pitch* mais moderno regula o angulo das pás da turbina para que o binário produzido nas mesmas seja menor, este controlo permite que a produção de energia seja constante quando atinge um certo nível máximo. No entanto nenhum destes tipos de controlo exerce qualquer ação adicional em caso de defeito. Nessas situações é utilizado um sistema denominado “*ride trough fault*” que permite ao gerador síncrono fornecer energia reativa ao sistema, o que aumenta o seu nível de tensão e consequentemente estabiliza a frequência em níveis normais de funcionamento. As seguintes imagens representam o comportamento de cada um desses controlos [12].

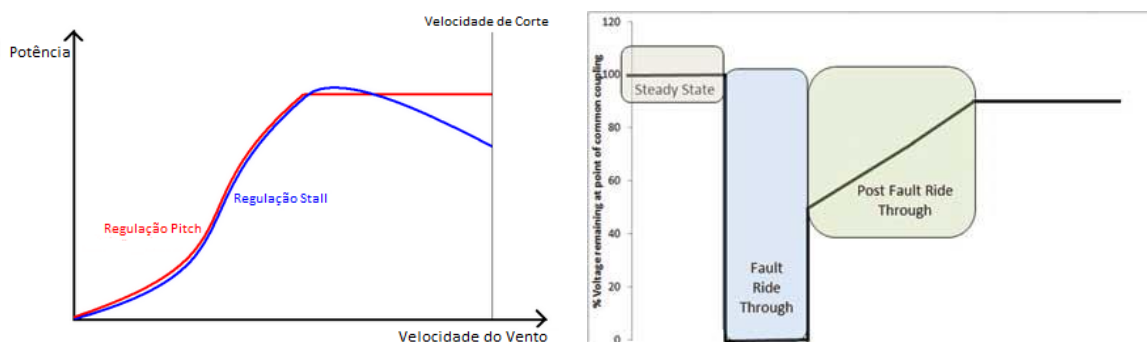


Figura 14: Controlos Pitch, Stall e Ride Trough Fault [25] [26].

O controlo mencionado anteriormente (Pitch e Stall) está relacionado com a regulação da potência mecânica admitida pela turbina, esta pode ser ainda dividida em turbinas de velocidade fixa e turbinas de velocidade variável. As turbinas de velocidade fixa estão equipadas com geradores assíncronos ligados diretamente á rede. Quando os parques

eólicos são totalmente constituídos por estes geradores, é usual utilizar baterias de condensadores de modo a suportar variações de tensão. As turbinas de velocidade variável estão munidas de eletrónica (conversores de potência) que permite um funcionamento em velocidade variável e controlo sobre a potência reativa. Estas são caracterizadas por melhor qualidade de energia produzida e menores esforços mecânicos [2]. A figura 15 apresenta um esquema de ligações que traduz aquilo que acabou de ser mencionado, em que se pode ver toda a parte de geração, incluindo turbina, gerador e respetiva excitação, o possível uso de baterias de condensadores no caso de estarmos perante geradores assíncronos, um sistema inversor equipado com baterias que garante um certo nível de tensão á saída do mesmo, um filtro que melhora a qualidade da energia fornecida e por fim um controlador que regista todos os dados necessários para que seja produzida energia com a melhor qualidade e segurança.

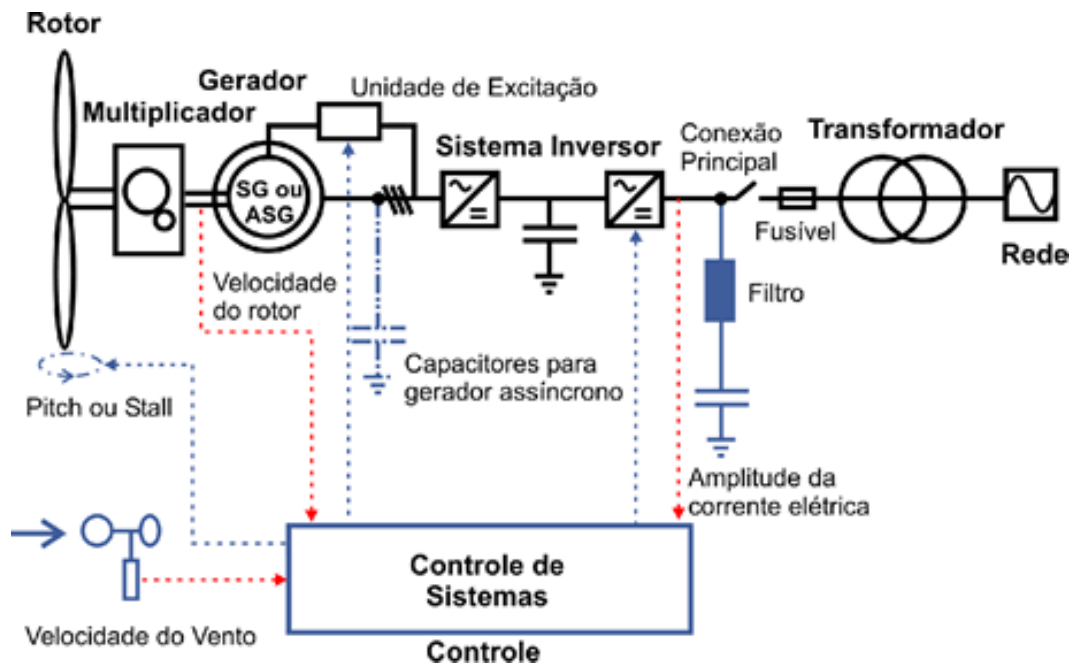


Figura 15: Ligação da turbina eólica á rede [24].

Em [9] é abordado o caso alemão de rápido crescimento de penetração eólica e são apresentadas soluções no que toca ao comportamento das turbinas eólicas face a um defeito. A maioria das turbinas eólicas utiliza geradores de excitação dupla. O estator destas máquinas é ligado diretamente á rede enquanto que os enrolamentos trifásicos do rotor são alimentados através de um conversor de tensão. Variando a amplitude da tensão e frequência é possível controlar as potências ativa e reativa logo a velocidade da máquina pode ser otimizada para cada velocidade do vento. O curto-circuito na rede provoca correntes elevadas que resultam em binários que colocam o rotor em esforço

mecânico. Dependendo da distância do curto-circuito, a corrente de pico varia entre 5 e 8 vezes a corrente nominal do estator, para além disso a corrente que circula no conversor pode gerar sobrecargas aumentando a tensão DC. A maioria dos fabricantes protege o conversor destes efeitos através de um sistema chamado "*Crow Bar*". Quando o "*Crow Bar*" atua, o conversor e o rotor são desacoplados e os circuitos do rotor fecham-se pelas resistências deste. No entanto, esta medida protege a eletrónica de potência mas não muda significativamente o comportamento das correntes e o binário desenvolvido. Enquanto o "*Crow Bar*" estiver ativo, a turbina eólica funciona como um consumidor de potência reativa, o que provoca uma queda ainda mais acentuada da tensão do sistema. Assim que o defeito estiver resolvido, a tensão regressa ao seu valor normal. A figura 16 representa um esquema do sistema que acabou de ser descrito.

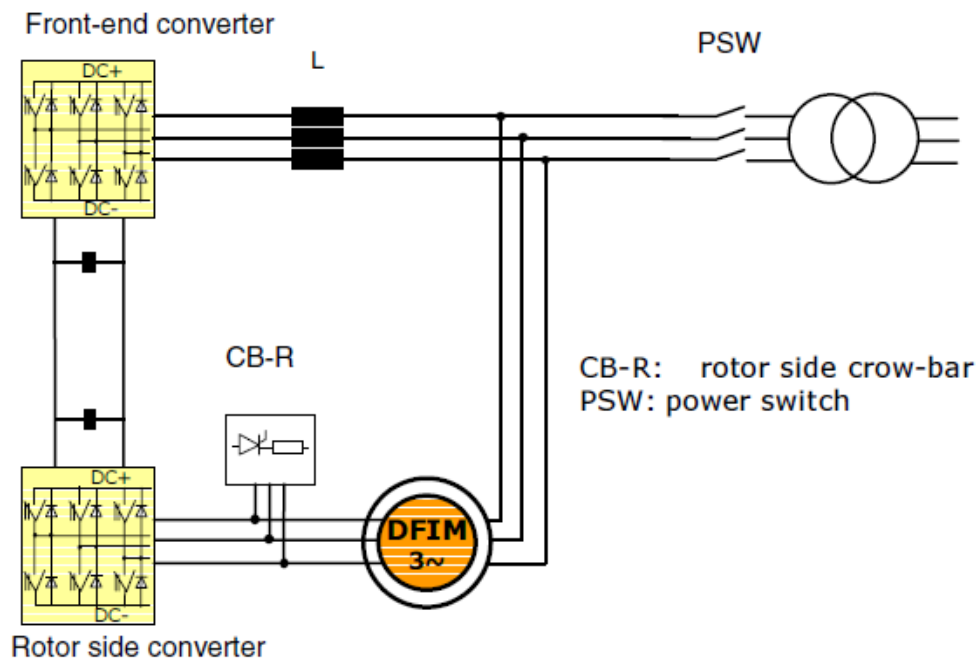


Figura 16: Estrutura de um Gerador Duplamente Excitado com rotor "Crow Bar" [9].

Turbinas eólicas equipadas com este sistema conseguem manter-se conectadas a rede durante defeitos. No entanto, não fornecem a potência reativa á rede de forma a manter a tensão nos seus valores normais, pelo contrário, funcionam como consumidores. A figura 17 mostra um esquema alternativo de maneira a mitigar esta situação.

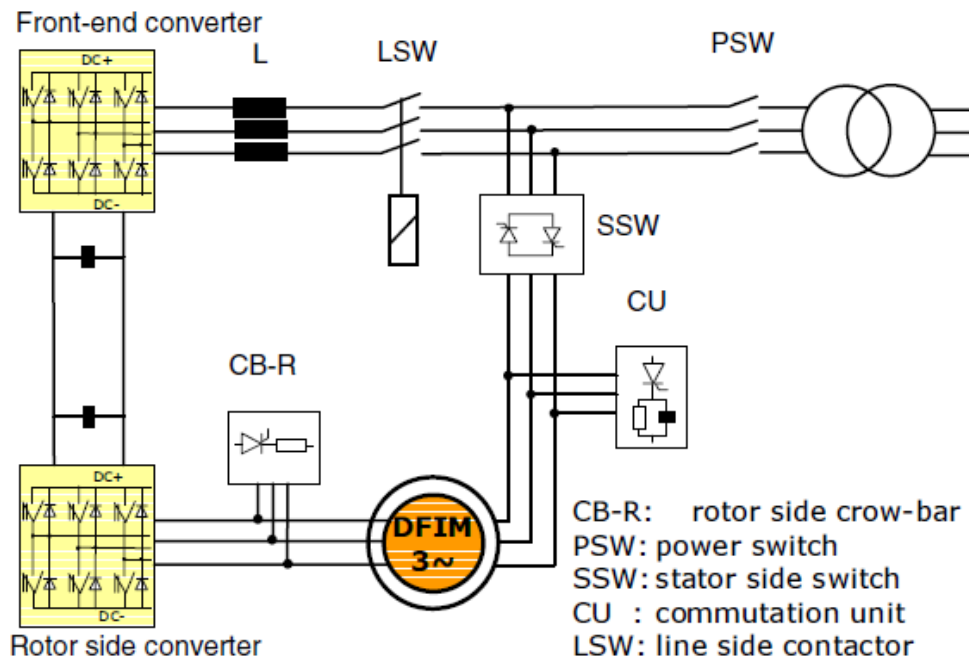


Figura 17: Estrutura do Gerador Duplamente Excitado com sistema RTF [9].

São instalados tirístores do lado do estator que conseguem interromper as correntes de curto-circuito num espaço de tempo de 10ms, logo a corrente é interrompida antes de atingir o seu pico e o esforço mecânico no veio do rotor é consideravelmente mais baixo. Ao mesmo tempo, a unidade de comutação atua e o conversor do lado do rotor deixa de funcionar o que significa que o gerador vai sofrer uma desmagnetização forçada. No entanto, o outro conversor continua ligado á rede e é controlado de forma a fornecer o máximo de potência reativa possível a esta durante um curto espaço de tempo. Depois da desmagnetização do rotor, o conversor deste é reiniciado e controlado de maneira a sincronizar-se com a rede através dos tirístores. Mesmo tendo uma tensão baixa, o estator está sincronizado com a rede, logo a turbina eólica pode fornecer potência ativa e reativa de novo á rede.

2.7. Relação da produção eólica com produção térmica

Até agora têm sido apontadas algumas barreiras bem como algumas soluções face a uma grande penetração de energia eólica no sistema de potência, no entanto, esta penetração também pode ter efeitos negativos no que toca às centrais térmicas. A penetração em grandes quantidades de energia proveniente do vento tem também como grande obstáculo os limites técnicos das centrais térmicas. Nas alturas em que a carga é baixa, tendo em conta que os mínimos técnicos de produção (produção mínima que a central pode entregar enquanto está a funcionar) das centrais térmicas são bastante elevados, esta vai ser alimentada maioritariamente por estas centrais, sendo que a sua paragem de funcionamento não é instantânea nem aconselhável, colocando os parques eólicos numa posição de paragem ou armazenamento de produção.

As centrais térmicas têm como opção, caso haja um período de baixa procura e uma grande penetração eólica á qual se dê prioridade, de funcionar abaixo do seu mínimo estipulado. No entanto esta opção requer, por motivos de segurança da caldeira, que se utilize mais combustível o que significa custos acrescidos [15].

Existem tarifas que, numa tentativa de aumentar o investimento em renováveis (neste caso em eólica), permite aos operadores dos parques eólicos fornecer toda a energia que produzem para a rede. Porém, para uma maior percentagem de energia eólica a satisfazer a procura, o corte de produção será exercido de forma a manter um funcionamento economicamente e operacionalmente viável por parte das centrais térmicas. Tendo esta informação presente, é natural concluir que se o sistema elétrico não for flexível o suficiente, vão existir interrupções de produção eólica para manter o equilíbrio e a segurança do sistema.

Em períodos de baixa demanda é imperativo que existam centrais térmicas a funcionar para que o sistema tenha capacidade de resposta suficiente para possíveis picos de procura. Tendo em conta que as centrais térmicas não recomeçam instantaneamente após uma paragem de funcionamento, o custo adicional e o risco de avaria do sistema ao tira-las de funcionamento é bastante elevado, pelo que a opção mais viável é mesmo a paragem das turbinas eólicas. Esta interrupção de energia tende a aumentar á medida que a penetração eólica também aumenta.

O despacho económico de energia é algo de extrema importância na distribuição ótima da procura pelos vários produtores pois este não pode ser feito da mesma maneira para as energias renováveis como é feito para as centrais térmicas. As centrais térmicas são controláveis no que toca a potência de entrada, o mesmo não acontece com os parques eólicos, pois apenas existe potência de entrada quando sopra o vento. Tendo isto em conta a grande vantagem da utilização deste tipo de energia é a sua independência em relação a combustíveis fósseis. Com uma penetração grande de energia eólica, esta deve ser observada em tempo real por centros de controlo de maneira a que o operador tenha a hipótese de parar o funcionamento de turbinas de forma a garantir a segurança da rede.

O modelo matemático apresentado nesta dissertação tem origem num modelo existente que foi utilizado para otimizar a potência instalada de três tecnologias distintas (Hídrica, Eólica e Fotovoltaica) para o mês de Janeiro do ano de 2011 [3]. O modelo que vai ser descrito mais à frente contém algumas diferenças face ao modelo apresentado em [3] e ao contrário deste, que abrange várias tecnologias renováveis, o modelo a ser apresentado foca-se mais na energia eólica e tenta que os parques entre si consigam melhores resultados do que abordando a tecnologia como um todo, num espaço de tempo maior utilizando dados de um ano inteiro.

O modelo utilizado na minimização da variância foi também utilizado em [16] com duas abordagens diferentes, uma abordagem em que são utilizadas várias tecnologias assim como em [3] de forma a estudar as relações de cada tecnologia renovável com a procura e entre si. A outra abordagem é uma abordagem mais espacial em que são estudados os melhores distritos na instalação de capacidade eólica, é esta abordagem que vai ser estudada mais ao pormenor nos próximos capítulos.

O objetivo desta dissertação é tentar responder aos problemas descritos nos subcapítulos anteriores de outra forma. Tendo em conta que já existe potência instalada eólica em Portugal e que essa potência vai certamente aumentar, o modelo construído foca-se na escolha geográfica da instalação de nova potência de maneira a que a sua integração no sistema não sofra de alguns problemas que já foram colocados.

3. Metodologia

Neste capítulo vão ser descritos os modelos utilizados de forma a obter a melhor combinação de parques eólicos no que toca a sua disposição geográfica no país. Esta organização geográfica vai ser feita de 2 maneiras distintas:

- Minimização da variância da procura residual;
- Minimização do custo de produção térmica.

Ambos os pontos apresentados anteriormente possuem, por si só, algum significado físico, daí ser interessante efetuar a análise dos dois de forma a retirar algumas conclusões sobre a aplicação de cada modelo bem como a relação que podem vir a ter entre si.

3.1.Minimização da variância da produção térmica

De forma a identificar a melhor combinação de parques eólicos que permite uma melhor integração desta tecnologia renovável no setor elétrico português, foi utilizado um modelo que tem como objetivo minimizar a variância da produção térmica. O problema de otimização é representado na seguinte equação:

$$\min_{a_i} \left\{ \text{VAR} \left(D_t - H_t - Ph_t - \sum_{i=1}^I a_i R_{it} \right) \right\} \quad (1)$$

Em que:

- a_i é a variável de decisão deste modelo e representa a potência eólica instalada no parque i ;
- D_t representa a procura residual elétrica num determinado tempo t ;
- H_t representa a produção hídrica num determinado tempo t ;
- Ph_t representa a produção fotovoltaica num determinado tempo t ;
- R_{it} mostra a produção eólica real de um determinado parque i num tempo t . Esta produção é normalizada, o que significa que cada valor de produção no período de tempo estudado foi dividido pelo seu valor máximo, pelo que o seu valor está compreendido entre 0 e 1.

Entende-se por procura residual, a percentagem da procura total que é satisfeita pela produção térmica e pelas renováveis em estudo (hídrica, fotovoltaica e eólica). Existem também restrições inerentes a este modelo para que os resultados tenham algum significado físico, sendo que estas restrições representam limitações reais no âmbito desta simulação. A primeira restrição representa uma limitação de potência em relação á procura para que possamos limitar a nossa penetração eólica no sistema.

$$\sum_{i=1}^I a_i R_{it} \leq \epsilon D_t \quad (2)$$

O termo ϵ exibido em (2) representa a percentagem de energia eólica máxima que pode satisfazer a procura instantaneamente. Se ϵ tomar o valor 0 significa que não é permitido que exista qualquer capacidade eólica instalada. No entanto se $\epsilon = 1$ significa

que, em cada momento, a potência eólica instalada não deve ultrapassar a procura residual.

A segunda restrição dita que a quota eólica obtida depois da otimização tem que ser igual á quota real, como é demonstrada na seguinte equação:

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I a_i R_{it} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I R_{oit} \quad (3)$$

Em que R_{oit} representa a produção real em MW de um parque i no instante t . Esta restrição serve apenas para uma melhor comparação de resultados. Visto que a variância tende a aumentar com a quota, é imperativo realizarmos uma análise com uma quota ótima semelhante á real de forma a constatar se efetivamente o modelo cumpre o objetivo almejado.

A equação que está a ser minimizada no modelo utilizado tem o seguinte aspeto:

$$\text{VAR}(a'X) = a' \Sigma a \quad (4)$$

O símbolo Σ em (4) representa a matriz das variâncias e das covariâncias da matriz X que relaciona os valores da demanda com todos os perfis eólicos bem como os perfis entre si. Esta matriz contém valores de dispersão estatística de cada variável, bem como a relação ou dependência entre variáveis. As variáveis de decisão vão estar multiplicadas por todos estes apontadores estatísticos, ou seja, vão funcionar como pesos que o algoritmo determina que cada parcela da função deve ter. A seguinte equação demonstra (4) um pouco mais desenvolvido.

$$\begin{aligned} & \text{VAR}(a'X) \\ &= [1 \quad -a_1 \quad -a_2 \quad -a_3 \quad -a_4 \quad -a_5 \quad -a_6] \\ & \times \begin{bmatrix} \sigma_D^2 & \sigma_{DR1} & \sigma_{DR2} & \sigma_{DR3} & \sigma_{DR4} & \sigma_{DR5} & \sigma_{DR6} \\ & \sigma_{R1}^2 & \sigma_{R1R2} & \sigma_{R1R3} & \sigma_{R1R4} & \sigma_{R1R5} & \sigma_{R1R6} \\ & & \sigma_{R2}^2 & \sigma_{R2R3} & \sigma_{R2R4} & \sigma_{R2R5} & \sigma_{R2R6} \\ & & & \sigma_{R3}^2 & \sigma_{R3R4} & \sigma_{R3R5} & \sigma_{R3R6} \\ & & & & \sigma_{R4}^2 & \sigma_{R4R5} & \sigma_{R4R6} \\ & & & & & \sigma_{R5}^2 & \sigma_{R5R6} \\ & & & & & & \sigma_{R6}^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 \\ -a_1 \\ -a_2 \\ -a_3 \\ -a_4 \\ -a_5 \\ -a_6 \end{bmatrix} \quad (5) \end{aligned}$$

É visível que o parâmetro “a” se desdobra numa matriz com 7 elementos em que o primeiro de todos é 1, isto porque, de acordo com as regras de multiplicação de matrizes, a potência instalada não multiplica por nada que tenha a ver com a procura. A matriz Σ representa na sua diagonal principal as variâncias de cada perfil de geração bem como a variância da procura, fora da diagonal principal estão representadas as covariâncias entre perfis de produção e de cada um com a procura, estas covariâncias vão multiplicar com as potências instaladas e vão influenciar a quantidade de potência instalada para que o resultado final destas multiplicações, a variância, seja a menor possível.

Se (5) for completamente desenvolvida através da multiplicação de matrizes, chegamos a uma função simples que mostra quatro componentes importantes que pesam na otimização:

$$\sigma_D^2 + \sum_{i=1}^I a_i^2 \sigma_{R_i}^2 + 2 \sum_{i < j} a_i a_j \sigma_{R_i R_j} - 2 \sum_{i=1}^I a_i \sigma_{DR_i} \quad (6)$$

Em que:

- σ_D^2 – Variância da procura;
- $\sigma_{R_i}^2$ – Variância do perfil de geração i;
- $\sigma_{R_i R_j}$ – Covariância entre perfis de geração i e j;
- σ_{DR_i} – Covariância entre a procura e o perfil de geração i.

Colocando de parte a variância da procura que é algo que está presente na equação mas não existe qualquer tipo de controlo sobre ela, para além dos três restantes parâmetros acima referidos, existe ainda o fator de utilização. Este parâmetro representa a relação entre energia produzida durante um certo período de tempo e a energia máxima que poderia ter sido produzida durante esse mesmo tempo.

Resumindo, é possível afirmar que um perfil de geração contribui mais para a minimização da variância da procura residual se apresentar as seguintes características:

- Baixa variância;
- Alta covariância com a procura;
- Baixa covariância com outros perfis;
- Alto fator de utilização.

Um perfil eólico com baixa variância e alta covariância com a procura provoca um alto coeficiente de correlação entre esse perfil e a procura, o que contribui para uma baixa variância da produção térmica.

É preferível que a covariância entre perfis eólicos seja baixa, isto significa que os comportamentos de cada um são pouco relacionáveis entre si, o que traduz uma complementaridade que é favorecida pelo modelo.

O fator de utilização, apesar de não estar presente fisicamente nas equações referidas, é algo que precisa de ser tido em conta. O significado físico do fator de utilização é algo muito simples, para parques eólicos com um maior fator de utilização não é precisa muita potência instalada para atingir um certo nível de energia produzida, enquanto que um parque eólico com um baixo fator de utilização necessita de mais potência instalada para obter a mesma energia produzida. A razão pela qual o fator de utilização está presente está relacionado com o facto de o modelo penalizar potências instaladas elevadas, como se pode ver em (6) (quanto maior for a potência instalada de um determinado perfil, maior é a variância desse perfil), o que significa que se o modelo conseguir obter a quota necessária com menor potência instalada, a variância é minimizada, o que mostra o peso do fator de utilização.

3.2.Minimização do custo de produção térmica

A minimização da variância por si só representa uma redução de custos indireta tendo em conta o princípio de funcionamento das centrais térmicas. No entanto, é importante realizar uma análise á função de custos de uma central térmica de forma a conseguir reduzir os custos de forma direta a partir da instalação de potência eólica em diversos locais tendo em conta as características de cada um.

Tendo isto em conta, o modelo a utilizar para as simulações de custos vai ter o seguinte aspeto:

$$\min_{P_t} \left\{ \sum_{t=1}^T (a_1 + b_1 \times P_t + c_1 \times P_t^2) \right\} \quad (7)$$

Em que:

- a_1 , b_1 e c_1 representam parâmetros da curva de custos da central;
- P_t representa a produção térmica otimizada no instante t ;

A produção térmica em cada instante é obtida pela seguinte equação.

$$P_t = D_t - \sum_{i=1}^I a_i R_{it} \quad (8)$$

Em que:

- D_t representa a procura residual no instante t ;
- a_i é a variável de decisão deste modelo e representa a potência eólica instalada no parque i ;
- R_{it} mostra a produção eólica real de um determinado parque i num tempo t . Esta produção é normalizada, o que significa que cada valor de produção no período de tempo estudado foi dividido pelo seu valor máximo, pelo que o seu valor está compreendido entre 0 e 1.

As duas equações representadas acima são as únicas alterações que o modelo apresentado anteriormente sofre, querendo isto dizer que as restrições apresentadas anteriormente são utilizadas da mesma forma.

É necessário definir os parâmetros referentes a curva de custos da central térmica a utilizar, neste caso a_1 , b_1 e c_1 . Para que estes parâmetros sejam o mais próximo possível da realidade, foram retirados custos de produção de 5 centrais distintas espalhadas pelo país. Esses 5 valores foram ordenados e em seguida desenhou-se uma reta compreendida entre o valor mínimo e o valor máximo da relação preço potência desse conjunto de valores. Esta reta representa a curva de custos marginais da “central equivalente” que vai ser utilizada no modelo, ou seja, uma central fictícia cujos valores a utilizar estão compreendidos entre o mínimo e o máximo real do país.

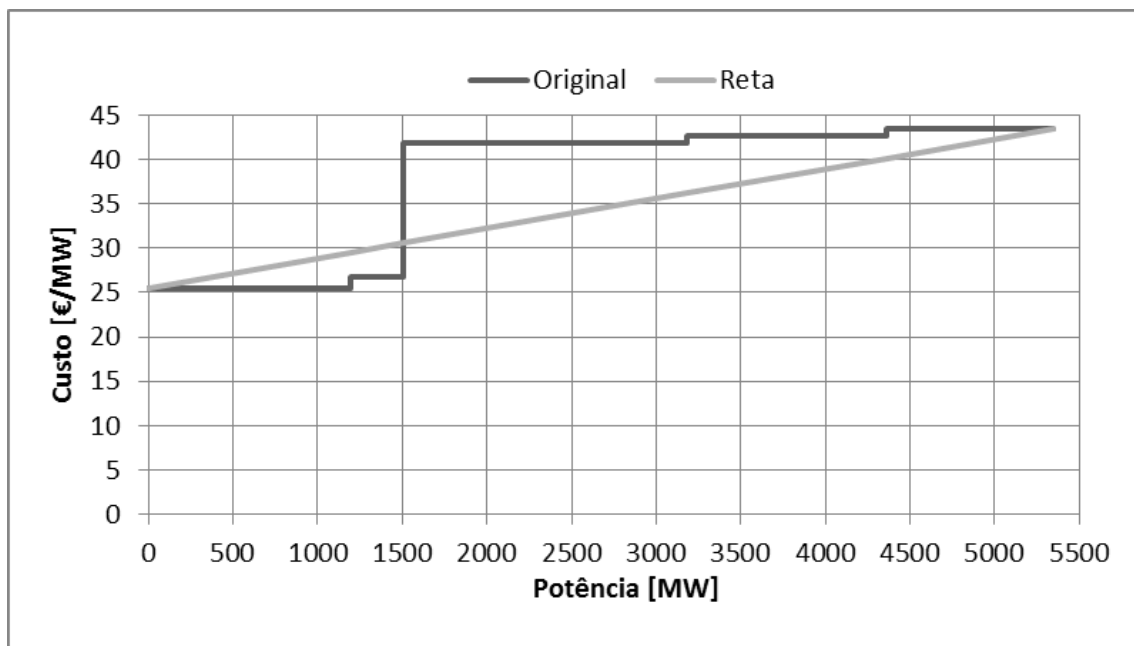


Figura 18: Relação entre os valores reais e a reta traçada representativa de uma central equivalente.

Tendo em conta que os 2 pontos extremos desta reta são conhecidos, é possível determinar a sua equação.

$$y = ax + b \rightarrow y = 0.0033x + 25.5204 \quad (9)$$

Apesar de termos determinado a reta representativa dos custos marginais da central usada para análise, a curva que realmente interessa é a curva de custos totais. Para isso, é necessário calcular o integral da equação da reta que foi calculada de forma a obter a equação que realmente interessa, as equações (10) e (11) representam o processo.

$$y = ax + b \rightarrow y = k + bx + \frac{a}{2}x^2 \quad (10)$$

$$y = a_1 + b_1x + c_1x^2 \rightarrow y = a_1 + 25.5204x + 0.00165x^2 \quad (11)$$

O parâmetro a_1 é considerado uma indeterminação na medida em que, para o obter seria necessário integrar a função, o que resultaria numa constante desconhecida que não é relevante tendo em conta a utilização que se vai fazer da equação. Resumindo, a equação final a ser utilizada no modelo que representa o custo total de produção térmica num determinado espaço de tempo vai possuir o aspeto representado em (12).

$$C_t = 25.5204P_t + 0.00165P_t^2 \quad (12)$$

As simulações que vão ser realizadas com esta função objetivo têm como alvo a redução de custos da produção térmica em estudo. Os valores reais dos custos que foram utilizados na determinação dos parâmetros da função objetivo têm em conta os custos de emissões de CO_2 e os custos de combustível. Isto significa que, ao tentarmos otimizar a produção térmica relacionando-a com uma renovável (neste caso eólica) estamos a reduzir estes custos, o que significa também reduzir as emissões e contribuir para os objetivos ambientais estabelecidos no nosso país para 2020.

4.Caso em Estudo

Os dados do problema vão ser a procura residual e a produção de cada parque eólico em intervalos de 15 minutos durante todo o ano de 2012 em Portugal. A produção analisada está dividida entre 6 parques eólicos escolhidos de forma a cobrirmos uma grande parte do país.

Na figura 19 está representada a localização exata de cada parque.

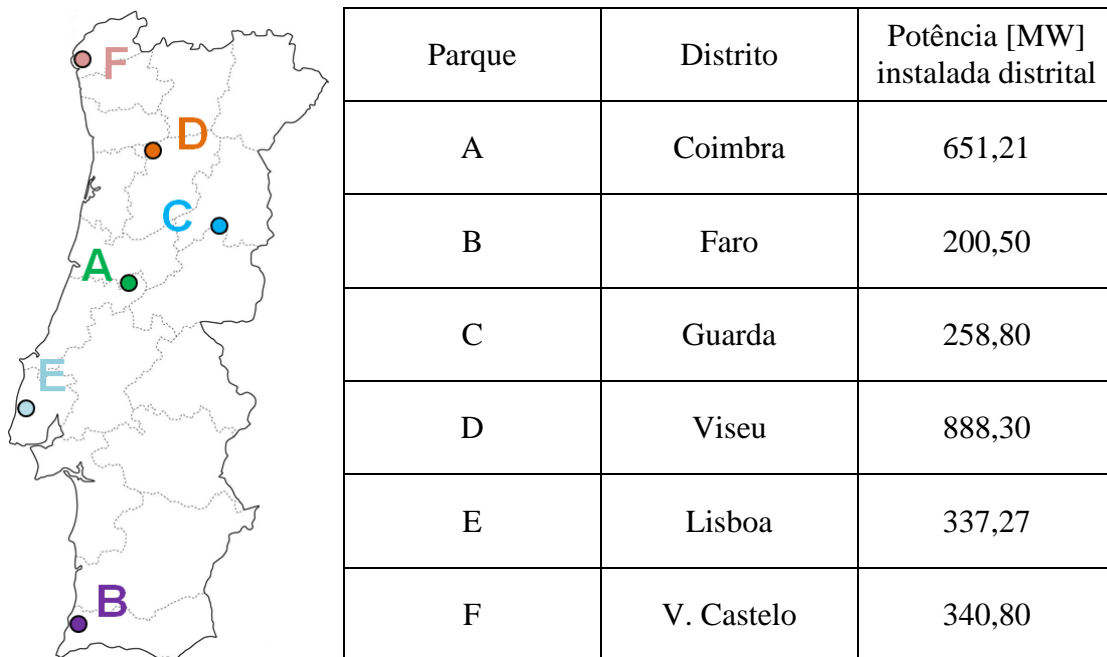


Figura 19: Localização dos parques eólicos e os respetivos dados distritais.

As simulações a realizar têm como objetivo validar o modelo utilizado e mostrar a sua utilidade futura.

A figura 20 representa diagramas de caixa que foram feitos de cada mês para 5 dias aleatórios, o seguinte exemplo é o do parque A:

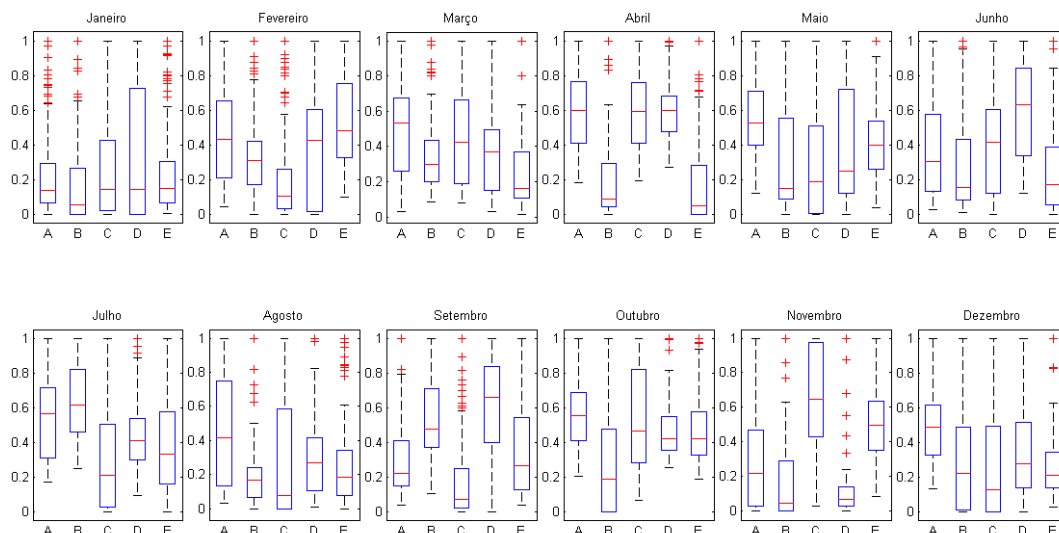


Figura 20. Diagramas de caixa do parque eólico A.

Na figura 20 é possível determinar visualmente que não existe um padrão definido no que toca a comportamento dos valores ao longo dos meses, no entanto, podemos constatar que na maior parte dos casos analisados, a maioria dos valores encontra-se muito abaixo do valor máximo registado de produção, sendo este muitas vezes um valor atípico (outlier).

Pela análise dos dados originais pode-se concluir que os valores normais de funcionamento dos parques eólicos estão concentrados abaixo de 60% do valor máximo obtido, ou seja, uma produção de energia muito baixa na maior parte do tempo face à potência instalada. A figura 21 representa um histograma de valores de todos os parques analisados num espaço temporal anual:

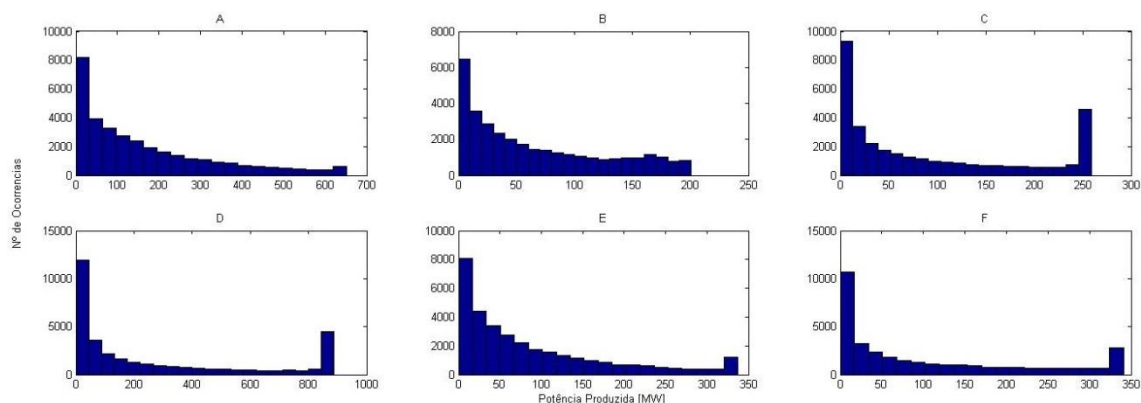


Figura 21: Histograma dos 6 parques com os dados de produção anuais.

Podemos visualmente constatar na figura 21 que existe uma concentração de ocorrências no valor mais alto de produção observável, este comportamento deve-se às curvas de potência das turbinas eólicas, um exemplo dessa curva está representado na figura 22.

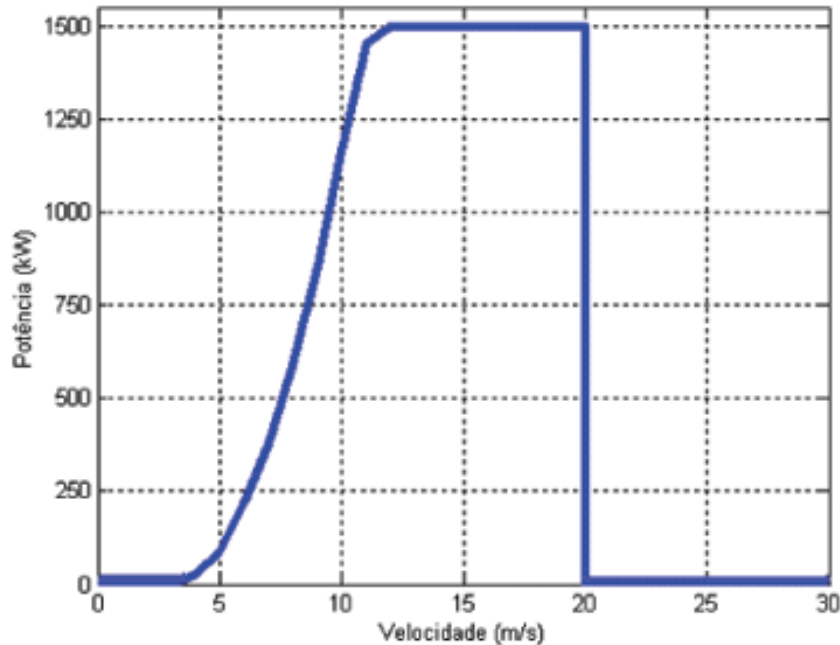


Figura 22: Exemplo de curva de potência de uma turbina eólica.

Como se pode constatar, existe um intervalo de vento (sensivelmente entre 12 e 20 m/s) em que a potência fornecida pela turbina é sempre a mesma, isto faz com que este valor de potência comum a varias velocidades de vento apareça com mais frequência do que os restantes valores de potência elevados que provêm de velocidades altas do vento. Esta frequência elevada de apenas um valor é visualmente perceptível em alguns histogramas da figura 20.

Conclui-se nesta análise que a variação de produção de energia é algo intrínseco à geração eólica, tendo em conta que depende da velocidade do vento que é altamente inconstante e não tem qualquer opção de armazenamento de energia em grande escala que satisfaça completamente estas pontas de produção.

Tendo em conta as variáveis que estamos a utilizar e aplicando-as no modelo apresentado no capítulo anterior, a função de minimização vai ter o seguinte aspeto:

$$\min_{a_i} \{ \text{VAR}(D_t - H_t - Ph_t - (a_1 W_{At} + a_2 W_{Bt} + a_3 W_{Ct} + a_4 W_{Dt} + a_5 W_{Et} + a_6 W_{Ft})) \} \quad (13)$$

A função de minimização engloba os valores iniciais dos 6 parques eólicos considerados, bem como as potências instaladas que são as variáveis a otimizar.

De seguida são representadas as restrições correspondentes:

$$a_1 W_{At} + a_2 W_{Bt} + a_3 W_{Ct} + a_4 W_{Dt} + a_5 W_{Et} + a_6 W_{Ft} \leq \varepsilon D_t \quad (14)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{t=1}^T a_1 W_{At} + a_2 W_{Bt} + a_3 W_{Ct} + a_4 W_{Dt} + a_5 W_{Et} + a_6 W_{Ft} \\ = & \sum_{t=1}^T a_1 W_{Aot} + a_2 W_{Bot} + a_3 W_{Cot} + a_4 W_{Dot} + a_5 W_{Eot} + a_6 W_{Fot} \end{aligned} \quad (15)$$

5.Resultados

A partir dos modelos apresentados anteriormente e utilizando os casos de estudo, vão ser realizadas algumas simulações com o intuito de provar a utilidade e o potencial dos modelos utilizado. Em primeiro lugar é necessário caracterizar os dados de forma a entender os resultados da melhor maneira possível, a tabela 1 contem os coeficientes de correlação entre os perfis de produção dos distritos e a demanda.

Tabela 1: Coeficientes de correlação entre distritos e procura.

	A	B	C	D	E	F
Dem	0,248	0,117	0,201	0,187	0,252	0,175
A	1,000	0,462	0,523	0,326	0,621	0,523
B	0,462	1,000	0,299	-0,098	0,490	0,181
C	0,523	0,299	1,000	0,430	0,426	0,384
D	0,326	-0,098	0,430	1,000	0,225	0,446
E	0,621	0,490	0,426	0,225	1,000	0,527

Como foi referido na metodologia, existem parâmetros adicionais que podem ser considerados essenciais na compreensão do modelo, esses parâmetros estão representados na tabela 2:

Tabela 2: Variância e fator de utilização de cada perfil analisado.

	A	B	C	D	E	F
Variância	0,066	0,087	0,126	0,127	0,073	0,110
Fator de utilização	0,259	0,333	0,351	0,308	0,265	0,310

Os dados apresentados são dados fixos, ou seja, independentemente da simulação que se esteja a realizar ou modelo que se esteja a utilizar, os dados da tabela 1 e 2 são intrínsecos á própria produção eólica e, portanto, são apresentados antes de qualquer resultado.

Todas as simulações apresentadas na secção de resultados foram realizadas com dados de produção que representam a produção eólica de todo o ano de 2012, ou seja, todos os resultados apresentados são relativos á análise de 1 ano de dados.

5.1. Comparação de Variâncias Mantendo a Quota

A partir dos parâmetros apresentados nas duas primeiras tabelas desta dissertação é possível interpretar os seguintes resultados. Tendo em conta que está a ser feita uma extrapolação do perfil de vento de cada parque para o respetivo distrito, é necessário forçar a potência instalada distrital em apenas um parque localizado nesse mesmo distrito. Ao realizar essa conversão em cada parque, chega-se a uma quota eólica de 14,27% da procura. A seguinte simulação foi feita tendo em conta um cenário onde não existe qualquer potência instalada em nenhum destes locais, atribuindo a responsabilidade dessa instalação ao modelo. Introduzindo os dados de produção no modelo obtém-se o seguinte resultado de potências instaladas (Estes resultados foram obtidos com $\epsilon=100$, o que garante ao modelo total liberdade no que toca a produção instantânea).

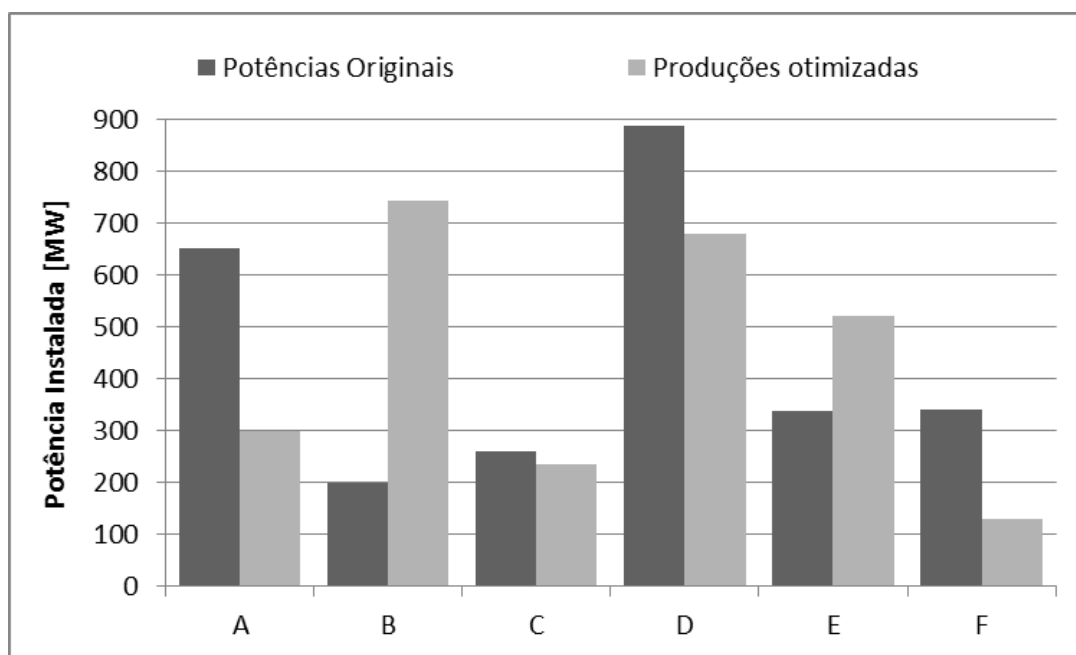


Figura 23: Potências instaladas originais e otimizadas para uma quota de 14,27% na minimização da variância.

Os resultados obtidos sem qualquer restrição mínima de potência instalada podem ser interpretados da seguinte maneira:

- Pode-se constatar que os locais com maior potência instalada são os distritos “B” e “D”, apesar da sua variação e o seu fator de utilização não serem os mais favoráveis. Estes dois perfis de vento são os únicos negativamente correlacionados entre si, ou seja, os seus comportamentos são algo

complementares o que é bastante vantajoso na minimização da variância da procura residual;

- O perfil de vento “E” também se destaca com uma potência instalada acima da média. Apesar da sua variância relativamente reduzida, o seu fator de utilização é bastante desfavorável, no entanto, a sua correlação com a procura é a maior dos casos estudados tomando o valor de 0,25. Este valor confere a este perfil de vento individual alguma facilidade de integração sendo que vai causar uma redução na variância da produção térmica.
- Existe uma clara distinção dos distritos que contribuem mais para a minimização da variância dos que não contribuem. Segundo o modelo, o perfil de vento “F” é aquele que menos facilidade tem de ser integrado na satisfação da procura e, por isso, tem a potência instalada mais baixa. O facto de que este perfil de vento não se destacar positivamente em nenhum dos parâmetros estudados provoca desinteresse por parte do modelo na simulação e por conseguinte confere-lhe esta baixa potência instalada.

A figura 24 representa dois histogramas que representam as diferenças de produção eólica em relação a dados originais e também aos resultados.

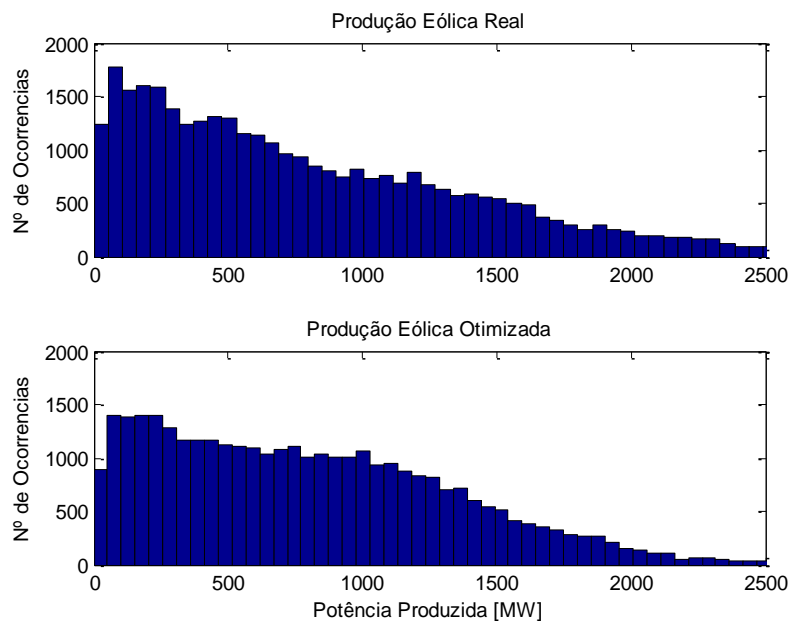


Figura 24: Histogramas de produção eólica de dados originais e otimizados.

Analisando a figura 24, é notória a uniformização dos valores, pois é claro que o número de ocorrências de valores de baixa potência reduziu consideravelmente, assim como as ocorrências de valores máximos também reduziram, o que significa que a potência instalada está a aproveitar melhor os recursos disponíveis. Caso existissem muitas ocorrências de baixas potências, isso mostraria que existe potência instalada em excesso e que o investimento realizado foi demasiado elevado tendo em conta o recurso existente. No entanto, se as ocorrências de valores de potência fossem muito elevadas, ocorreria o caso contrario, muito recurso não aproveitado devido ao fraco investimento existente.

Tendo em conta que o objetivo destas simulações é minimizar a variância, a tabela 3 representa alguns indicadores (incluindo a variância) que mostram os benefícios desta redistribuição de capacidade.

Tabela 3: Comparação de variâncias para uma quota de 14,27%.

Produção Térmica	Variância	Desvio padrão	Coef. de variação
Original	714683,7868	845,3897	0,4174
Otimizado	669851,7577	818,4447	0,4041
Melhoria	<u>6,2730%</u>	-	-

É possível ver que existe alguma queda na variância da procura residual como seria de esperar, isto deve-se a 2 fatores: Esta análise foi feita com uma quota muito baixa da procura, mais á frente vai ser feito um gradiente de quota em que a diferença de variâncias se vai acentuar. Está a ser feito um estudo apenas com energia eólica que, como já foi referido, tem uma natureza bastante flutuante e incerta. As suas correlações com a procura são bastante baixas, ou seja, apesar de estarmos a analisar perfis diferentes, existem características intrínsecas a este método de recolha de energia independentes do local onde esta esteja a ser feita.

Foi também feita uma análise de forma a provar o benefício dado por ter perfis de vento com comportamentos complementares. O procedimento é exatamente igual ao anterior, no entanto as produções de energia originais de “B” e “D” foram somadas e vão ser analisadas como se de uma região só se trata-se, as variâncias dos dados iniciais são as seguintes.

Tabela 4: Comparação de variâncias para uma quota de 14,27% com “B” e “D” somados.

	A	BD	C	E	F
Variância	0,066	0,085	0,126	0,073	0,110

Como se pode constatar, a junção das 2 produções tem uma variância menor do que cada uma delas em separado, isto pode ser explicado pela correlação negativa que existe entre os dois perfis. Apesar da sua correlação conjunta com a procura também ser maior, a queda de variância ficou apenas pelos 2% ao contrário dos 6 conseguidos na análise anterior, isto deve-se á diminuição de possibilidades de escolha do modelo. Quantos mais perfis de vento o modelo tiver disponível, melhor é o resultado pois, como já foi visto na análise anterior, a escolha de instalar potência num determinado local depende de vários parâmetros que interligam os perfis de vento uns com os outros e com a procura. Se a escolha for menor, apesar de existir um perfil com parâmetros um pouco mais favoráveis, a redução de variância vai ser menor.

Os resultados apresentados anteriormente mostram que a melhor combinação dos perfis de produção dependem de uma combinação de vários parâmetros, o que torna a análise bastante complexa pois não existe um caminho definido a seguir que torna fácil a escolha de potência a instalar em cada local. A existência de um modelo matemático facilita bastante esta análise que, caso contrário, seria praticamente impossível.

5.2. Gradiente de Quota

Os resultados anteriores mostram a eficácia do modelo apresentado, no entanto, o contexto em que este está a ser aplicado não é realista na medida em que já existe potência instalada nos locais que estão a ser estudados. De forma a dar mais credibilidade ao modelo, o próximo resultado a ser mostrado vai ser um gradiente de quota no qual vão ser impostos como valores mínimos a série de dados “Potências Originais” mostrada na figura 23.

A figura 25 mostra a satisfação de cada valor de quota através de colunas acumuladas em que cada série representa um perfil de vento.

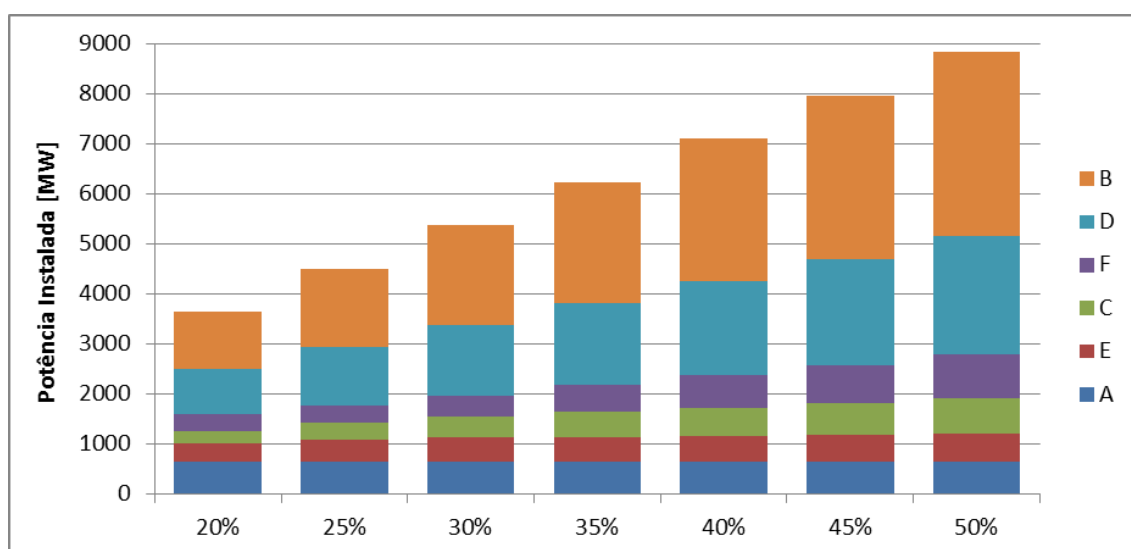


Figura 25: Contribuição de cada distrito na satisfação da quota.

Como seria de esperar pelos resultados analisados no subcapítulo anterior, os distritos “B” e “D” em conjunto mostram ter um impacto bastante positivo no sistema, visto que são os que têm maior crescimento com a subida da quota. A produção em “A” mostra mais uma vez que não se coaduna com o comportamento ideal esperado e por isso não possui qualquer crescimento. No entanto esta análise é mais próxima da realidade, na medida em que mostra cenários de quota que traduzem um crescimento eólico previsível que aconteça no futuro. Apesar de esta análise ser feita num espaço de tempo específico com dados de produção específicos, é possível extrapolar para um caso de previsão para anos seguintes e realizar investimentos conscientes de forma a tornar a penetração eólica menos negativa.

Apesar dos resultados anteriores mostrarem as escolhas feitas pelo modelo num possível caso de aumento de quota eólica na satisfação da procura, não temos qualquer informação sobre o verdadeiro objetivo que é a minimização da variância. De forma a compararmos variâncias é necessário que a quota se mantenha, pois é natural que a variância aumente com a quota logo não existe nenhum ponto de referência com o qual comparar a variância otimizada. De forma a conseguir analisar esta otimização, na análise seguinte vão ser comparadas 2 situações: a situação em que os dados de potência instalada que foram analisados anteriormente vão ser os dados de entrada do modelo já representado, a outra situação baseia-se num aumento de quota repartido igualmente pelos 6 distritos em estudo.

De forma a perceber melhor o que vai ser mostrado, a figura 26 representa o método utilizado na 2ª situação de forma a aumentar a quota, neste caso para 20%:

$$\boxed{\begin{array}{c} \text{Dados de Produção Iniciais} \\ \text{(Quota: 14,27\%)} \end{array}} \times \boxed{\begin{array}{c} \text{Fator de Escala} \\ \text{(20\%/14,27\%)} \end{array}} = \boxed{\begin{array}{c} \text{Dados de Produção} \\ \text{Corrigidos para 20\% de Quota} \end{array}}$$

Figura 26: Método de aumento de quota uniforme.

Este método permite o aumento de potência instalada uniforme nos 6 locais estudados. A comparação das 2 situações vai mostrar se a instalação estratégica de produção eólica é benéfica para a sua própria implementação no sistema.

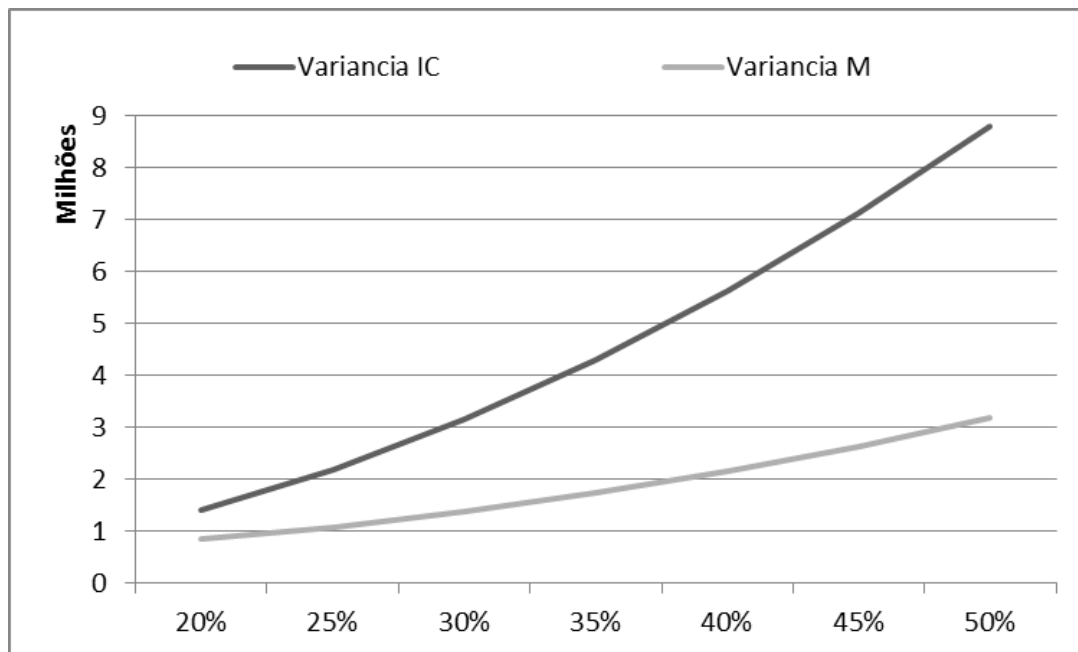


Figura 27: Comparação de Variâncias para vários valores de quota eólica.

Na figura 27 estão a ser comparadas 2 situações distintas:

- Variância IC é a situação que o aumento de quota é distribuído pelos 6 distritos de igual forma (Variância Igual Crescimento);
- Variância M representa a série de dados que resulta da otimização feita pelo modelo descrito anteriormente (Variância Modelo).

Esta simulação foi também feita com $\epsilon=100$, caso contrário estas situações seriam incomparáveis visto que a série de dados IC foi obtida sem qualquer limitação máxima.

Os resultados obtidos mostram que o efeito benéfico do modelo no sistema elétrico é proporcional á variação da quota, ou seja, ao comparar as situações extremas (neste caso quota de 20 e 50%) a queda da variância evolui de 40% para cerca de 65%.

Os resultados podem ser explicados pelo facto de as potências envolvidas serem maiores, o que significa que a variância também vai ser maior, logo o modelo é mais influente sendo que as amplitudes de produção podem ser muito mais atenuadas.

Comparativamente com o subcapítulo anterior, talvez os resultados não fossem os esperados, por exemplo, o perfil de vento “F” foi o mais penalizado em 6.1, no entanto em 6.2 obteve algum crescimento na evolução de quota, o que mostra mais uma vez a não linearidade deste modelo de otimização.

5.3. Anulação das restrições (variância)

A seguinte análise tem como objetivo estudar o comportamento do modelo num cenário com mais liberdade em que não existem limites mínimos a serem cumpridos nem uma quota alvo, ou seja, a quota vai ser uma consequência da simulação e não uma imposição. A figura 28 representa as potências instaladas originais e otimizadas deste estudo.

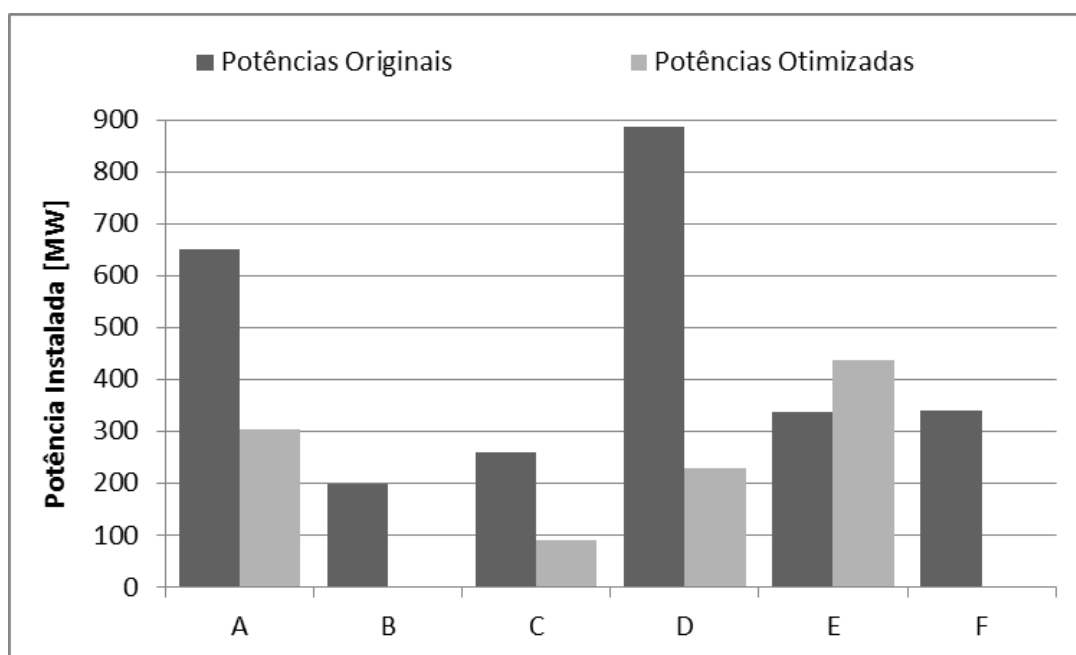


Figura 28: Potências instaladas originais e otimizadas para uma situação sem restrições.

A figura 28 mostra uma queda bastante acentuada de potência instalada no caso otimizado o que faz também prever uma queda abrupta de quota eólica. É visível também que perfis de vento que foram considerados prejudiciais á minimização da variância em simulações anteriores estão com mais potência instalada relativamente a outros que nessas mesmas simulações eram mais favoráveis. Este fenómeno pode ser explicado pela liberdade do algoritmo de minimização nesta análise. É claramente visível que a correlação de cada local com a procura é fator preponderante neste último estudo pois os perfis com maior potência instalada são os mais correlacionáveis com a demanda. A tabela 5 mostra a diferença de quota e mostra também se o objetivo foi cumprido, ou seja, se a variância diminuiu e para quanto.

Tabela 5: Resultados da anulação das restrições.

	Quota	Variância
Potências originais	14,267%	714683,787
Potências otimizadas	5,332%	562157,573
Melhoria		21,342%

Com os dados que dispomos, o valor máximo de queda de variância que o modelo consegue ronda os 20%, que é um valor bem superior aos 6% que foi conseguido ao manter a quota original. É de notar também que o modelo tinha total liberdade de colocar uma quota eólica nula se assim acha-se necessário de forma a reduzir ainda mais a variância, no entanto esta simulação prova que pelo menos alguma eólica é mais benéfica do que nenhuma no que toca a estabilização da produção térmica.

Analisando os resultados podemos concluir, não só que o modelo cumpre o seu principal objetivo que é a minimização da variância, mas também fornece dados de instalação de potência adicional para que esta potência seja bem inserida no sistema português.

5.4.Comparação de Custos Mantendo a Quota

A seguinte análise já foi feita anteriormente, no entanto vai ser analisado o custo de produção em vez da variância e tentar entender as diferenças entre os 2 objetivos. A figura 29 representa os resultados desta simulação que foi feita mantendo a quota eólica original e permitindo ao modelo distribuir potência instalada como se não houvesse anteriormente.

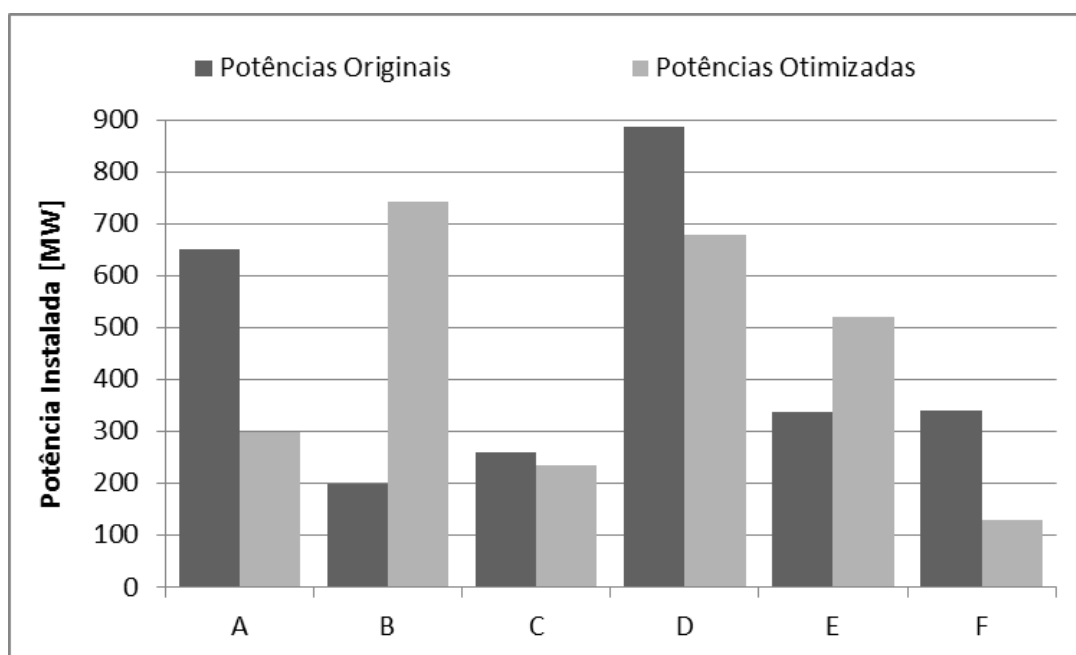


Figura 29: Potências instaladas originais e otimizadas para uma quota de 14,27% na minimização dos custos.

Como se pode constatar, a diferença entre as potências instaladas na minimização da variância e dos custos de produção é quase imperceptível, os seus valores diferem de uma simulação para a outra em apenas algumas décimas de MW. Este acontecimento pode ser explicado pela natureza quadrática da função de custos, ou seja, se a energia produzida for muito variante, o seu custo é maior pois essas variações são traduzidas em grandes flutuações de custos que são dispensáveis. Este raciocínio é o mesmo que se aplica á minimização da variância, pois o objetivo é minimizar as flutuações de produção térmica.

Tendo em conta que o objetivo desta simulação é minimizar o custo, a tabela 6 representa a diferença de custo da situação real para a otimizada, bem como a diferença de variância.

Tabela 6: Comparação de variâncias e de custos totais para uma quota de 14,27%.

	Custo total [€/TWh]	Variância
Potências reais	2014,97140861	714683,79
Potências otimizadas	2012,47209022	669851,76
Melhoria	<u>0,12%</u>	<u>6,27%</u>

É possível tirar 2 conclusões destes resultados: A redução de custos não é muito acentuada quando comparada com a redução de variância que, como seria de esperar, é bastante semelhante nas duas simulações. Esta última conclusão reforça ainda mais a ideia de que a variância de produção tem um forte impacto no custo, sendo que a minimização dos dois produz os mesmos resultados.

5.5. Anulação das restrições (custos)

A seguinte simulação têm como objetivo minimizar o custo de produção térmica num cenário em que não existem restrições de potências instaladas mínimas nem quotas a cumprir. A figura 30 representa a distribuição de potências que foi feita tendo em conta este objetivo em comparação com as potências reais instaladas.

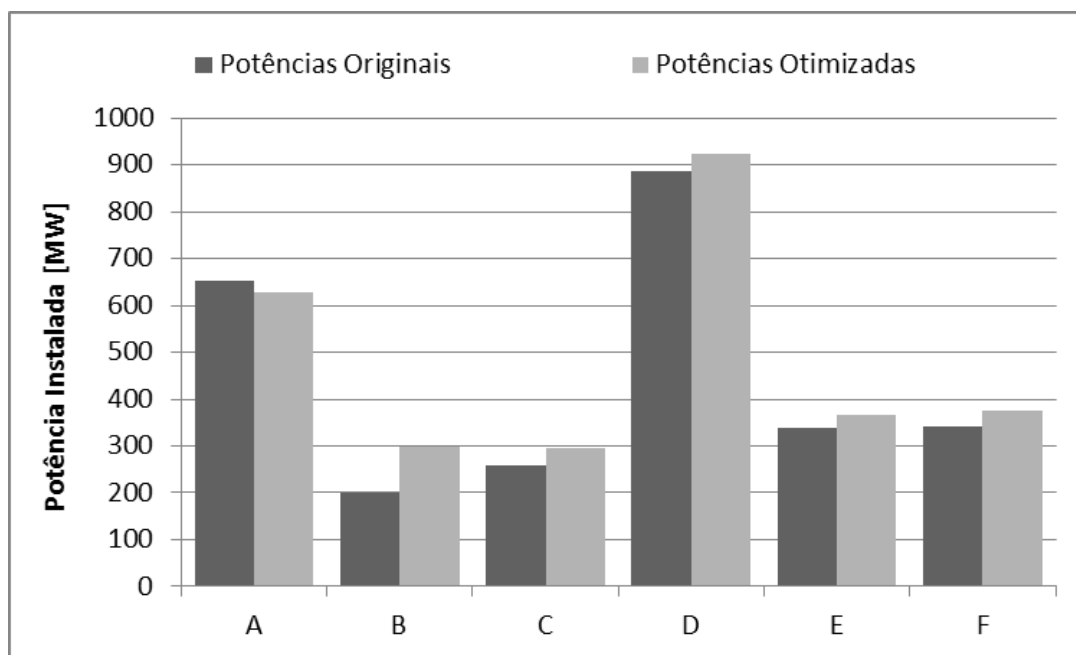


Figura 30: Potências instaladas originais e otimizadas para uma situação sem restrições (Custos).

É visível na figura 30 que não existiu grande mudança de capacidade instalada em cada local, o que significa que o custo total não assume um comportamento linear em relação á quota eólica. A tabela 7 mostra as diferenças em termos de custo total e variância entre os valores reais e os otimizados.

Tabela 7: Resultados da anulação das restrições.

	Variância	Custo total [€/TWh]	Quota
Potências originais	714683,787	2014,971408613	14,267%
Potências otimizadas	743966,515	1942,519272557	15,493%
Melhoria	<u>-4,097%</u>	<u>3,596%</u>	

É possível constatar nos resultados da tabela 7 que, ao mesmo tempo que ocorreu uma redução de custos de cerca de 3,5%, a variância aumentou mais de 4%.

É de salientar que, apesar de a variância estar de alguma forma relacionada com a função de custos como já foi mostrado anteriormente, este resultado mostra que essa relação não é absoluta. Já foi demonstrado que a variância da produção eólica varia proporcionalmente com a sua quota, e esta simulação não é a exceção, no entanto se a quota eólica aumentou isso significa que a produção térmica que satisfaz a procura residual diminuiu. Ou seja, nesta simulação foi encontrado um equilíbrio entre quantidade produzida e variância de produção térmica, pois uma pequena produção muito variante pode acarretar tantos custos como uma produção elevada pouco variante.

6. Conclusões

A realização da presente dissertação deu algum entendimento, pela análise dos capítulos de enquadramento e estado da arte, sobre a problemática das consequências ambientais provenientes do uso desmedido de combustíveis fósseis no dia-a-dia de cada um. Essas consequências ambientais são o verdadeiro impulsionador do desenvolvimento tecnológico que se tem dado de forma a tentar reduzir a dependência que foi criada nesses combustíveis, desenvolvimento esse onde esta dissertação se encaixa.

É também possível constatar que a elevada penetração eólica num dado sistema de potência tem vindo a ser estudado através da criação de cenários que por sua vez mostram os problemas que advêm dessa elevada quota eólica. Os modelos apresentados são uma de muitas maneiras de integrar de forma mais segura a crescente capacidade eólica que esta a ser instalada, não só em Portugal, como também em todo o mundo.

O caso de estudo utilizado conseguiu alcançar o objetivo de aproximar as simulações realizadas da realidade na medida em que são utilizados dados físicos de produção para que, no fim das simulações, sejam obtidos novos valores de potência instalada. Para além de este facto dar significado ao modelo, torna-o também expansível, pois pode ser utilizado noutros países desde que se obtenha dados para o efeito.

As simulações feitas no capítulo de resultados têm como objetivo não só fornecer entendimento prático sobre os modelos apresentados como também provar que estes funcionam, cada um com as suas limitações, porém o objetivo é cumprido tendo em conta as restrições do sistema que servem para dar significado e aproximar cada vez mais a utilização do modelo em aplicações reais.

É demonstrado pelos resultados obtidos que a minimização da variância da procura residual tem muitos aspetos em comum com a minimização de custos de produção térmica. Apesar de se tratar de modelos diferentes com funções objetivos bem distintas, os resultados diferem muito pouco na realização de algumas simulações. A componente quadrática de cada um dos modelos reage da mesma forma com o algoritmo de minimização o que leva a uma semelhança de resultados, no entanto este facto não tira veracidade aos mesmos.

Tendo em conta o objetivo principal da dissertação, a análise dos resultados mostra que efetivamente é possível, através da instalação estratégica de potência eólica, minimizar a variância da produção térmica e reduzir o seu custo de produção. Os vários cenários colocados mostram que tanto numa situação em que não existe potência instalada inicial como numa situação de expansão da mesma, a maneira como os perfis de vento de cada local analisado se relacionam entre si e com a demanda têm um forte impacto na integração da energia eólica no sistema elétrico Português.

Conclui-se pela análise dos subcapítulos 5.1 e 5.4 que, com os dados utilizados, existem perfis de vento que são completamente contraproducentes e que o modelo decide rejeitá-los por completo, dada a liberdade para tal, de forma a otimizar a distribuição de potência mantendo a quota. Tendo em conta que estas simulações fornecem os primeiros resultados obtidos na utilização de cada modelo, é interessante perceber numa primeira fase a importância que a escolha geográfica para a instalação dos parques tem para a sua própria integração na rede e, conseqüentemente, para o objetivo desta dissertação.

A simulação feita em 5.2 mostra um gradiente de quota em que os valores mínimos de potência instalada são os existentes. É mostrado mais uma vez a importância da escolha geográfica dos parques mas agora num cenário de expansão. O modelo continua a penalizar os mesmos locais que em 5.1 o que mostra a incompatibilidade de alguns perfis de vento não só em acompanhar a procura como também a relacionar-se com outros parques eólicos de uma forma positiva. Esta simulação mostra também que a otimização do modelo é mais eficaz com uma quota maior, logo é adequado a uma realidade muito próxima de grande penetração eólica.

As simulações 5.3 e 5.5 têm como objetivo testar o modelo quanto ao seu objetivo principal sem ter quaisquer barreiras a comprometer os resultados, ou seja, foi permitido ao modelo efetuar a otimização máxima possível tendo em conta os dados de entrada. Esse objetivo foi cumprido tendo em conta que em 5.3 foi obtida a maior queda de variância dos resultados otimizados em relação aos originais, o mesmo aconteceu em 5.5 para o custo. A simulação 5.5 mostrou também que nem sempre a variância e o custo de produção térmica variam da mesma forma, o que é positivo pois mostra que, apesar da sua relação, são dois parâmetros diferentes que devem ser tidos em conta de forma separada.

Apesar do aspeto positivo dos resultados, é necessário constatar algumas fraquezas dos modelos propostos, ou seja, alguns parâmetros que não são considerados pelos modelos mas que são decisivos num sistema de potência real. Como foi abordado nos capítulos introdutórios, a escolha da localização geográfica da construção de um novo parque eólico é fortemente afetada pelo estado da rede elétrica nesse mesmo local, querendo isto dizer que a capacidade das linhas onde o parque se vai conectar e a sua carga habitual pesam nessa decisão e, como tal, deveriam ser considerados de algum modo no modelo utilizado. A capacidade de armazenamento também deveria ser considerada, pois permite que a produção eólica ultrapasse a procura em termos de potência instantânea, o que seria uma grande ajuda tendo em conta a natureza variante do recurso e, conseqüentemente, da sua potência de saída.

No que toca a desenvolvimentos futuros, existem dois caminhos principais que deviam ser tomados de forma a expandir o modelo e a torna-lo mais funcional.

Como é referido no capítulo 3 desta dissertação, os dados que estão a ser usados são dados de 6 parques eólicos representativos de cada um dos seus distritos. De forma a dar mais abrangência aos resultados, seria interessante aumentar os dados de entrada para que, pelo menos, existam dados de produção eólica de 1 parque por distrito, de forma a ter acesso a mais perfis de vento que oferecem outras combinações de instalação de potência.

Apesar dos resultados apresentados aferirem a funcionalidade dos modelos, os dados utilizados são dados históricos. Para que o modelo seja aplicado num âmbito de despacho económico, seria interessante utilizar dados de produção previstos de acontecer no futuro de forma a determinar, por exemplo, os parques cuja produção é utilizada na satisfação direta da procura e os parques cuja produção pode ser armazenada, dependendo do perfil de vento que caracteriza cada local.

7.Referencias

- [1] Directive 2009/28/EC of the European parliament and of the council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources, Apr. 2009.
- [2] J. Kabouris and F. D. Kanellos, “Impacts of large-scale wind penetration on designing and operation of electric power systems,” *IEEE Trans. Sustainable Energy*, vol. 1, pp. 107-114, Jul. 2010.
- [3] J. Sousa and A. Martins, “Optimal Renewable Generation Mix of Hydro, Wind and Photovoltaic for Into the Portuguese Power System,” in *Proc. 2013 10th International Conference on the European Energy Market (EEM)*.
- [4] P. Moura and A.T. Almeida, “Multi-objective optimization of a mixed renewable system with demand-side management,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp. 1461-1468, Jun. 2010.
- [5] H. Lund, “Large-scale integration of optimal combinations of PV, wind and wave power into the electricity supply,” *Renewable Energy*, vol. 31, pp. 503-515, Apr. 2006.
- [6] D. A. Halamay, T. K. A. Brekken, A. Simmons, and S. McArthur, “Reserve requirements impacts of large-scale integration of wind, solar and ocean wave power generation,” *IEEE Trans. Sustainable Energy*, vol. 2, pp. 321-328, Jul. 2011.
- [7] B. C. Ummels, M. Gibescu, E. Pelgrum, W. Kling, and A. Brand, “Impacts of wind power on thermal generation unit commitment and dispatch,” *IEEE Trans. Energy Conv.*, vol. 22, no. 1, pp. 44-51, Mar. 2007.
- [8] S. Faias, J. Sousa, and R. Castro, “Environmental dispatch of the Portuguese power system for CO2 emissions reduction,” in *Proc. EEM11*, May 2011, pp. 389-394.

- [9] I. Erlich, W. Winter, and A. Dittrich, "Advanced grid requirements for the integration of wind turbines into the german transmission system," in *Proc. IEEE PES General Meeting*, Montreal, Canada, Jun. 2006.
- [10] A. K. Singh and S. K. Parida, "Need of Distributed Generation for Sustainable Development in Coming Future," 2012 *IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems* December 16-19, 2012, Bengaluru, India.
- [11] L. Hofmann, A. Orths, H. Holttinen, Y. Wan, and A. Tuohy, "Experience From Wind Integration in Some High Penetration Areas," *Energy*, vol. 22, 2007, pp. 4-12.
- [12] A. Estanqueiro, J. M. Ferreira de Jesus, J. Ricardo, A. Santos, and J. A. Lopes, "Barriers (and Solutions...) to very high wind penetration in power systems," *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pp. 1-7, 2007.
- [13] S. Faias, J. Sousa, F. Reis, R. Castro, "Assessment and optimization of wind energy integration into the power systems: Application to the Portuguese system," *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, Vol. 3, No. 4, Oct. 2012.
- [14] A. Estanqueiro, "Impact of wind generation fluctuations in the design and operation of power systems," 7th *International Workshop on Large Scale Integration of Wind Power and on Transmission Networks for Offshore Wind Farms*, Madrid, May 2008.
- [15] G. Yan, Y. Li, G. Mu, T. Yuan, and H. Liu, "Net Benefit Evaluation of Wind Power Considering Operational Regulation cost of Thermal Plants for Balancing Wind Power," in *Proc. 2010 International Conference on Power System Technology*.

- [16] J. Pereira, R. Ferreira, J. Sousa, A. Martins and J. Lagarto, “Optimizing the Renewable Generation Mix in the Portuguese Power System based on Temporal and Spatial Diversity”, *EEM-14: The European Electricity Market, Cracóvia, Maio 2014*.
- [17] C. Costa and R. A. Guedes, “Índice de Eolicidade de Portugal Continental 4º trimestre de 2013” [Online]. Available: http://www.apren.pt/fotos/editor2/14mjr012_apren_publicacao_do_ie_trimestre_4_2013_1394446414.pdf.
- [18] REN, technical data 2012, [Online]. Available: www.centrodeinformacao.ren.pt [Accessed in Jan 10, 2014].
- [19] Sítio da internet acedido em 11-12-2013 em <http://moodle.isel.pt/adespa/mod/resource/view.php?id=4899>
- [20] Sítio da internet acedido em 03-06-2014 em <http://www.realclimate.org/index.php/archives/2013/01/sea-level-rise-where-we-stand-at-the-start-of-2013/>
- [21] Sítio da internet acedido em 03-06-2014 em <https://www.skepticalscience.com/Industrial-Revolution-global-warming.htm>
- [22] Sítio da internet acedido em 03-06-2014 em http://en.wikipedia.org/wiki/Wind_turbine
- [23] Sítio da internet acedido em 03-06-2014 em <http://www.globalwarming.org/2012/10/04/why-cant-we-get-all-our-electricity-from-wind/>
- [24] Sítio da internet acedido em 03-06-2014 em <http://www.cresesb.cepel.br/content.php?cid=241>

[25] Siteo da internet aeedido em 03-06-2014 em
<http://www.bindichen.co.uk/post/Fundamentals/Pitch-regulated-and-Stall-regulated-Wind-Turbine.html>

[26] Siteo da internet aeedido em 03-06-2014 em
<http://www.powerengineeringint.com/articles/print/volume-20/issue-5/features/seeking-synchronicity-designing-generators-for-code-compliance.html>

8. Anexos

Este capítulo contém um artigo que foi publicado aquando a realização desta dissertação, partilhando o tema desta. Este artigo é mencionado nos primeiros capítulos desta dissertação através da referência nº 16.

Optimizing the Renewable Generation Mix in the Portuguese Power System based on Temporal and Spatial Diversity

João Pereira Rúben Aires Ferreira
ISEL/ADESPA
Lisbon, Portugal
joao.v.pereira.90@gmail.com
rubenferreira2791@gmail.com

Jorge A. M. Sousa João Lagarto
ISEL/ADESPA; INESC-ID
Lisbon, Portugal
jsousa@deea.isel.ipl.pt
jlagarto@deea.isel.ipl.pt

Ana Martins
ISEL; BRU-UNIDE
Lisbon, Portugal
anamartins@deea.isel.ipl.pt

Abstract—Renewable energy sources (RES) have unique characteristics that grant them preference in energy and environmental policies. However, considering that the renewable resources are barely controllable and sometimes unpredictable, some challenges are faced when integrating high shares of renewable sources in power systems. In order to mitigate this problem, this paper presents a decision-making methodology regarding renewable investments. The model computes the optimal renewable generation mix from different available technologies (hydro, wind and photovoltaic) that integrates a given share of renewable sources, minimizing residual demand variability, therefore stabilizing the thermal power generation. The model also includes a spatial optimization of wind farms in order to identify the best distribution of wind capacity. This methodology is applied to the Portuguese power system.

Index Terms-- Renewable generation mix, Large-scale integration, Power systems, Temporal and spatial analysis, Wind power generation.

I. INTRODUCTION

Environmental concerns have taken the spotlight worldwide. In order to attend to these concerns, renewable power generation has been greatly promoted so that greenhouse gas emissions to the atmosphere are reduced. At the European level, the Directive 2009/28/EC endorses mandatory national targets concerning RES for 2020, consistent with a 20% share in the energy consumption and a minimum 10% share in the transportation sector in all European Union Member States [1]. In order to achieve this share, a progressive investment in renewable technologies has been made, raising its share and gradually reducing the existent dependence on thermal production.

Despite of being environmentally positive, the increase of renewable share that satisfies demand raises additional problems to grid operators. This paper covers

three distinct renewable technologies: hydro (run of rivers and special hydro production only), wind and photovoltaic (PV). These three technologies have unique characteristics. However, all of them have one thing in common which is its controllability being little or none. Their energy output depends on the available resource, which depends on climatic conditions. Taking into account that renewable energy supply and demand do not follow the same pattern, there might be some barriers regarding renewable energy large-scale integration in power systems.

Based on the technical problems regarding renewable energy sources, namely operational problems, renewable energy production and consumption have to be balanced by the grid operator, which can be hard to achieve due to its unpredictability, instability and variability. Other technical problems exist that are mentioned by Kabouris and Kanellos [2]. These problems, regarding wind power large-scale integration raise some technical issues like frequency and voltage regulation and available carrying capacity in the power transmission grid in order to accommodate the renewable energy sources due to wind variability and uncertainty.

Load follow up is one of the main restrictions pointed out by Kabouris and Kanellos [2] concerning the power systems wind penetration.

Solutions such as the renewable generation optimal mix identification referred by Sousa and Martins [3] are extremely relevant to this paper. A multi-objective function minimization is presented in [4] to integrate renewable production in the Portuguese system. Unlike one single renewable technology, various renewable resources combined allow variation minimization between consumption and renewable production as it is demonstrated in the study.

The integration of renewable energy depends not only on variations of renewable sources, but also on variations of demand and response capability of the supply system [5]. Therefore, this helps in thermal production stabilization and investment reduction in backup technologies [6].

In order to have increasing renewable energy integration in the power systems various factors must be accounted for. Operationally speaking, power generation has to balance demand in every moment of time, which makes the variability and unpredictability of renewable sources a challenge for power systems operation and control.

In order to deal with this problem some solutions are appointed: storage capacity for the excess of renewable production, backup capacity for the exact opposite situation, grid improvement to increase its capacity and forecast improvement to reduce unpredictability [6].

In this context, this paper proposes a methodology to evaluate the optimal renewable generation mix from different available technologies (hydro, wind and photovoltaic) that integrates a given share of renewable sources, minimizing the variability of residual demand, therefore stabilizing thermal power generation. The model also includes a spatial optimization of wind farms in order to identify the best distribution of wind capacity. The proposed methodology is applied to a case study of the Portuguese power system.

II. METHODOLOGY

To identify the optimal renewable mix that allows a better integration of renewables in the power system, a model is formulated to minimize the residual demand variance, that is, the variance of the difference between demand and renewable generation. This optimization problem is presented in (1):

$$\min_{a_i} \left\{ \text{VAR} \left(D_t - \sum_{i=1}^I a_i R_{it} \right) \right\} \quad (1)$$

where D_t represents the electricity demand at time t ($t=1, \dots, T$); R_{it} ($i=1, \dots, I$) the renewable generation profile of a specific technology located in a certain geographic location at time t , normalized by the maximum value observed in the considered period of time; a_i represents the decision variables that match the optimal installed capacity for the profile i .

In the model, two constraints are considered which are described by (2) and (3), as follows:

$$\sum_{i=1}^I a_i R_{it} \leq \varepsilon D_t \quad (2)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I a_i R_{it} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I R_{oit} \quad (3)$$

Constraint (2) represents the maximum instantaneous share of renewable generation, where ε represents the percentage of demand that can be satisfied by renewable production at time t .

Constraint (3) states that the optimized renewable generation must be equal to the original renewable generation (R_{oit}) in the analysed period.

The objective function in (1) can be written as follows:

$$\sigma_D^2 + \sum_{i=1}^I a_i^2 \sigma_{R_i}^2 + 2 \sum_{i < j} a_i a_j \sigma_{R_i R_j} - 2 \sum_{i=1}^I a_i \sigma_{DR_i} \quad (4)$$

where:

σ_D^2 is the variance of demand;

$\sigma_{R_i}^2$ is the variance of renewable generation profile i ;

$\sigma_{R_i R_j}$ is the covariance between renewable generation profiles i and j ;

σ_{DR_i} is the covariance between demand and renewable generation profile i .

Taking into account (3) and (4), it is possible to state that a given renewable generation profile contributes more to the residual demand variance minimization when it presents the following characteristics:

- Low variance;
- High covariance with the demand;
- Low covariance with other renewable profiles;
- High capacity factor, which is defined as the ratio between the energy produced by a technology during a period of time and the total energy that can be potentially produced.

A renewable generation profile with low variance and high covariance with demand represents a higher correlation factor between the renewable generation profile and demand, which contributes to a lower residual demand variance and thus to a more stable thermal production.

It is preferred that the covariance between two renewable generation profiles is represented by a low value. In fact, the lower the covariance between two renewable generation profiles, the higher is allowed to be their installed capacities since they have opposing behaviours.

Concerning the capacity factor, since it is an indicator of the resource availability, the model values high capacity factors that translate in energy production that is closer to the rated power.

III. CASE STUDY

The previously described methodology is applied to a real case, considering data from the Portuguese power system of the year 2012 with a 15-minute interval [7].

A. Optimization based on temporal diversity

The first step consists of finding the optimal renewable generation mix of the three considered renewable generation profiles: hydro, wind and PV, regardless of their location.

Problem (1) can be rewritten to specify these three renewable generation profiles:

$$\min_{a_i} \text{VAR}(D_t - (a_1 H_t + a_2 PV_t + a_3 W_t)) \quad (5)$$

where:

a_1 is the optimal installed capacity for hydro;

a_2 is the optimal installed capacity for PV;

a_3 is the optimal installed capacity for Wind;

H_t is the hydro generation profile at time t ;

PV_t is the PV generation profile at time t .

W_t is the wind generation profile at time t ;

Constraints (2) and (3) are rewritten as follows:

$$a_1 H_t + a_2 PV_t + a_3 W_t \leq \varepsilon D_t \quad (6)$$

$$\sum_{t=1}^T (a_1 H_t + a_2 PV_t + a_3 W_t) = \sum_{t=1}^T R_{ot} \quad (7)$$

This first step, which considers the problems temporal dimension, is accomplished with the computation of the optimal installed capacity for the three technologies.

B. Optimization based on spatial diversity

A second optimization is pursued taking into account the spatial diversity of wind generation profiles. For this purpose, six geographical locations are considered, representing different wind generation profiles in the Portuguese system, as shown in Fig. 1.

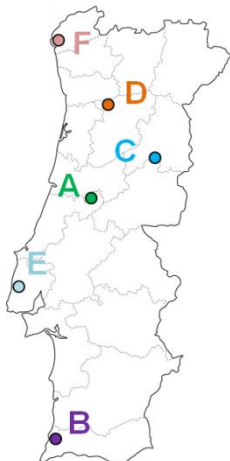


Figure 1. Location of wind farms under analysis.

This spatial optimization problem of wind location can be written as follows:

$$\min_{b_j} \text{VAR} \left(D_t - \left(a_1 H_t + a_2 PV_t + \sum_{j=1}^6 b_j W_{jt} \right) \right) \quad (8)$$

where b_j represents the decision variables that match the optimal installed capacity for the wind generation profile of location j ($j=A, \dots, F$). The optimal installed capacities for hydro (a_1) and for PV (a_2) are those obtained in the optimization based on temporal diversity. The model's constraints are established in accordance.

IV. RESULTS

A. Optimization based on temporal diversity

The results for the optimal installed capacity for each renewable technology considered are presented in Table I, where the estimated variance, correlation with demand (ρ_{DR_i}) and capacity factor of each renewable generation profile are also presented.

TABLE I. OPTIMAL CAPACITY (MW), ESTIMATED VARIANCE (MW^2), CORRELATION WITH DEMAND AND CAPACITY FACTOR OF EACH RENEWABLE GENERATION PROFILE

Technology	a_i	$\hat{\sigma}_{R_i}^2$	ρ_{DR_i}	Capacity factor
Hydro	3825	0.025	0.363	0.197
Wind	1449	0.049	-0.027	0.304
PV	1736	0.093	0.316	0.234

For a better understanding of the results, Table II presents the correlations among renewable generation profiles.

TABLE II. CORRELATION COEFFICIENTS AMONG THE RENEWABLE GENERATION PROFILES

	Wind	PV
Hydro	0.071	-0.190
Wind	1.000	0.015

The simulation procedure using the optimization problem presented in (5)-(7) provides an optimal installed capacity regarding renewable generation profiles of 3825 MW for hydro, 1736 MW for PV and 1449 MW for wind.

These results can be analysed taking in consideration (4), having in mind that the model will assign a higher

installed capacity to the renewable generation profile that presents a better combination of lower variance, higher correlation with demand, lower correlation with other renewable generation profiles and higher capacity factor.

In this particular case, hydro is the preferred renewable profile because of its lower variance (0.025) combined with a higher correlation with demand (0.363). Besides, the hydro generation profile presents a lower correlation with PV generation profile (-0.190). This later feature, combined with the fact that the PV generation profile has the second best correlation with demand (0.316), led PV to be the second largest generation optimal capacity, followed by wind.

Fig. 2 presents a comparison between the real and the optimized installed capacity for each renewable technology.

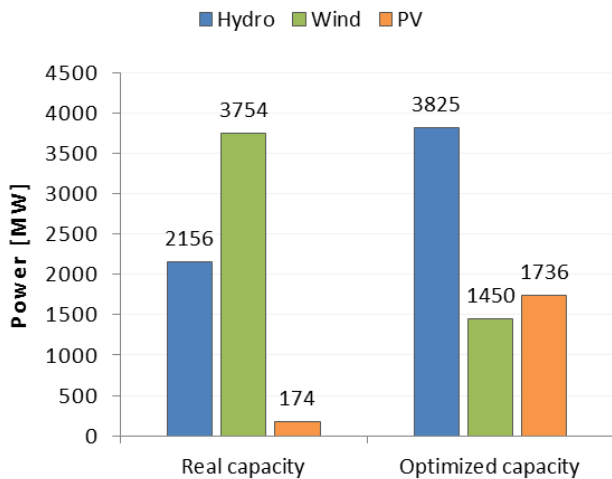


Figure 1. Real and optimized capacity of each renewable technology.

Fig. 3 and 4 present the demand and the real renewable generation (upper plot), demand and optimized renewable generation (lower plot), for the whole year of 2012 and for April 2012, respectively.

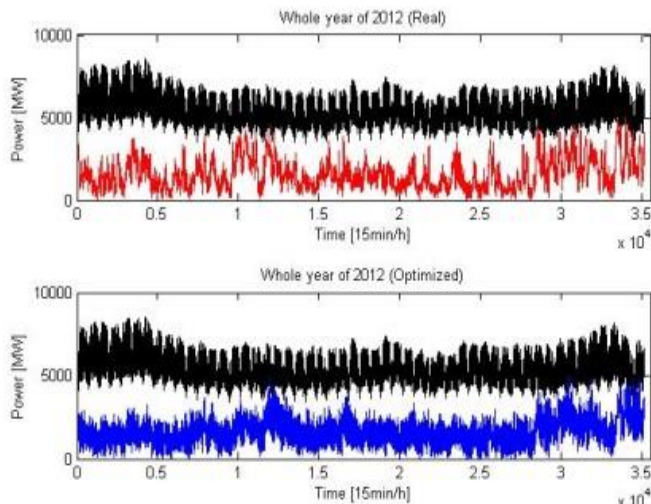


Figure 2. Demand and total renewable generation. Real and optimized results for the whole year of 2012.

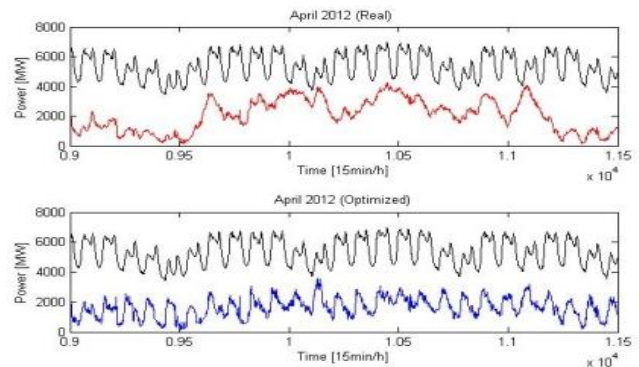


Figure 3. Demand and total renewable generation. Real and optimized results for April 2012.

It can be concluded from the analysis of Fig. 3 and 4 that the optimal case has a much lower variance than the original one, which results in a much more stable thermal generation. According to the data obtained by the simulation, the initial standard deviation is 1265 MW and the optimized one is 982 MW. These results show that the methodology developed attained the proposed objectives.

B. Optimization based on spacial diversity

Taking into account the wind share previously obtained, a spatial discretization was performed in order to analyse wind generation profiles of various country sites. In this paper, six wind generation profiles were analysed, each one corresponding to a wind farm location. Fig. 5 and Table III show the share of the optimal wind capacity distributed by the various wind generation profiles considered, computed by the model presented in (8).

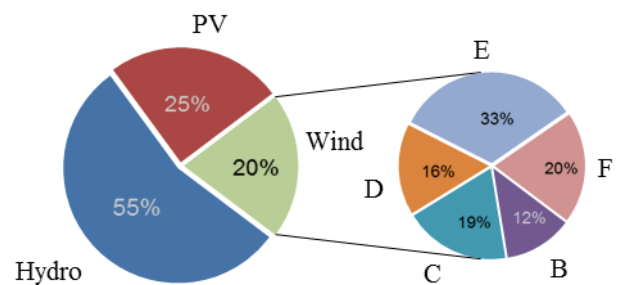


Figure 2. Optimal share of the renewable installed capacity taking into account the temporal diversity of hydro, PV and wind and the spatial diversity of wind profiles in the Portuguese power system.

TABLE III. OPTIMAL INSTALLED CAPACITY OF THE WIND GENERATION PROFILES (MW)

A	B	C	D	E	F
0	174	270	232	473	284

In order to understand these results, Table IV presents the correlation coefficients among the wind generation profiles considered.

Table V presents the estimated variance and capacity factor of each wind generation profile.

TABLE IV. CORRELATION COEFFICIENTS AMONG THE WIND GENERATION PROFILES AND DEMAND

	A	B	C	D	E	F
Demand	-0.047	-0.107	0.012	-0.008	0.037	0.030
A	1.000	0.462	0.523	0.326	0.621	0.523
B	0.462	1.000	0.299	-0.098	0.490	0.181
C	0.523	0.299	1.000	0.430	0.426	0.384
D	0.326	-0.098	0.430	1.000	0.225	0.446
E	0.621	0.490	0.426	0.225	1.000	0.527

TABLE V. ESTIMATED VARIANCE (MW²) AND CAPACITY FACTOR OF THE WIND GENERATION PROFILES

	$\hat{\sigma}_{w_i}^2$	Capacity Factor
A	0.066	0.259
B	0.087	0.333
C	0.126	0.351
D	0.127	0.308
E	0.073	0.265
F	0.110	0.310

The obtained results can be explained mostly by the correlation of each wind generation profile and demand. In fact, the wind generation profile E presents the higher optimal installed capacity because it presents the highest correlation with the demand (0.037) and a low variance (0.073), which is the second lowest of all. The following profiles presenting a higher installed capacity are C and F due to the high correlation with demand, 0.012 and 0.030, respectively. The reason why wind generation profile A does not present any installed capacity, despite being the profile with the lowest variance (0.066), relies on the fact that it presents one of the lowest correlations with the demand (-0.047), the lowest capacity factor (0.259) and high correlations with the other wind generation profiles.

V. CONCLUSIONS

The study presented in this paper is based on an optimization problem which minimizes the variance of residual demand faced by the thermal production. The problems solution allowed understanding on how parameters such as variance, correlation with demand, capacity factor of renewable generation profiles and correlations among renewable generation profiles play a role in the optimal renewable energy mix identification.

The results obtained for the Portuguese case showed the improvement in the renewable integration since there was a significant decrease in the residual thermal demand

variance, which means an increase in thermal production stability and a decrease in storage and backup capacity needs.

Future developments go towards the insertion of a function that represents renewable energy sources costs, namely investment costs and reserve requirements.

VI. ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by national funds through FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, under project PEst-OE/EEI/LA0021/2013.

The authors express their gratitude to Eng. Rui Pestana for his support in data collection.

VII. REFERENCES

- [1] Directive 2009/28/EC of the European parliament and of the council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources, Apr. 2009.
- [2] J. Kabouris and F. D. Kanellos, "Impacts of large-scale wind penetration on designing and operation of electric power systems," *IEEE Trans. Sustainable Energy*, vol. 1, pp. 107-114, Jul. 2010.
- [3] J. Sousa and A. Martins, "Optimal Renewable Generation Mix of Hydro, Wind and Photovoltaic for Into the Portuguese Power System," in *Proc. 2013 10th International Conference on the European Energy Market (EEM)*.
- [4] P. Moura and A.T. Almeida, "Multi-objective optimization of a mixed renewable system with demand-side management," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp. 1461-1468, Jun. 2010.
- [5] H. Lund, "Large-scale integration of optimal combinations of PV, wind and wave power into the electricity supply," *Renewable Energy*, vol. 31, pp. 503-515, Apr. 2006.
- [6] D. A. Halamay, T. K. A. Brekken, A. Simmons, and S. McArthur, "Reserve requirements impacts of large-scale integration of wind, solar and ocean wave power generation," *IEEE Trans. Sustainable Energy*, vol. 2, pp. 321-328, Jul. 2011.
- [7] REN, technical data 2012, [Online]. Available: www.centrodeinformacao.ren.pt [Accessed in Jan 10, 2014].

