



Laboratório Nacional de Energia e Geologia, I.P.

**UNIDADE DE ENERGIAS RENOVÁVEIS E INTEGRAÇÃO
DE SISTEMAS DE ENERGIA**

PLANEAMENTO DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS OFFSHORE EM PORTUGAL

D4.1 – Definição de cenários de otimização

LNEG, fevereiro 2019



Resumo

O presente documento foi elaborado pelo Laboratório Nacional de Energia e Geologia, I.P. (LNEG) como parte das atividades de R&D do projeto POSEUR-01-1001-FC-000007 “OffshorePlan - Planeamento do Aproveitamento das Energias Renováveis Offshore em Portugal”. De acordo com o plano de atividades da Tarefa 4 - “Desenvolvimento de modelos matemáticos de otimização técnico-económica de cenários de evolução do sector renovável offshore”, este relatório tem como objetivo apresentar as cenarizações impostas no modelo matemático de planeamento otimizado da instalação da geração *offshore* (eólica e de ondas).

Estas pretendem auxiliar os decisores políticos na identificação dos locais que apresentam maior benefício para a economia nacional, nomeadamente, numa perspetiva de minimização dos reforços da rede elétrica e proximidade entre a geração de energia e os grandes centros consumidores; aos investidores através da identificação das regiões e tecnologias que lhes permitem uma rápida e segura recuperação do investimento; e às entidades regionais e locais concretizar ou reforçar de estratégias de desenvolvimento de novos *clusters* industriais ligados às energias renováveis *offshore*.

Assim, o modelo matemático desenvolvido visa otimizar espacialmente (e ao longo do tempo) a integração de geração *offshore* na rede e no sistema elétrico, através da identificação das tecnologias técnica e economicamente mais adequadas à costa portuguesa.

Índice

Resumo	2
1. Introdução	4
2. Modelo OREOL – Localização ótima da geração de energia renovável Offshore	5
2.1. Descrição do modelo matemático	8
2.1.1. Escalares	8
2.1.2. Conjuntos	9
2.1.3. Parâmetros	9
2.1.4. Variáveis Binárias	10
2.1.5. Variáveis reais positivas	10
2.1.6. Variáveis reais	10
2.1.7. Equações	11
2.2. Modelo matemático	12
2.2.1. Equações de Configuração do Caso de Estudo	12
2.2.2. Configuração dos cabos de ligação à RNT	14
2.2.3. Potência instalada	14
2.2.4. Restrições da potência instalada	15
2.2.5. Restrições da injeção de energia	15
2.2.6. Produção de energia	16
2.2.7. LCOE das instalações	16
2.2.8. Funções Objetivo	17
3. Modelo OREOL – Dados	18
3.1. Identificação da capacidade de receção da Rede Nacional de Transporte	18
4. Definição dos Cenários	20
4.1. Parâmetros comuns dos cenários	20
4.1.1. Evolução da capacidade da geração de energia renovável offshore	20
4.1.2. Identificação da potência máxima injetável nas subestações da RNT	21
4.2. Definição dos cenários	22
5. Notas finais	23
Referências	25



1. Introdução

O presente relatório de progresso foi desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG) como parte das atividades de R&D do projeto *OFFSHORE-Plan: PLANEAMENTO DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS OFFSHORE EM PORTUGAL*. De acordo com o plano de atividades da Tarefa 4 - “Desenvolvimento de modelos matemáticos de otimização técnico-económica de cenários de evolução do sector renovável offshore”, o objetivo principal deste relatório passa pela definição das cenarizações (e.g., a imposição a evolução temporal da capacidade renovável *offshore* instalada) estabelecidas para alimentar o modelo matemático de planeamento otimizado da instalação da geração *offshore* (eólica e de ondas). Nesse sentido, e de forma a compreender as cenarizações, apresenta-se igualmente o modelo matemático, as premissas estabelecidas e os principais dados necessários para correr o modelo.

Os modelos desenvolvidos neste trabalho, visam a programação (temporal) da instalação de tecnologias *offshore*, em especial, os aproveitamentos de tecnologias de produção de energia eólica *offshore* em mar profundo – tecnologias flutuantes e de energia das ondas, que constituem as tecnologias mais promissoras na costa portuguesa - tendo em consideração aspetos como:

- locais possíveis de instalação para cada tipo de recurso primário e respetivos potenciais e tecnologias;
- caracterizações técnico económicas das diferentes tecnologias;
- pontos de interligação à rede elétrica nacional, e potências de ligação disponíveis;
- cenários de crescimento da capacidade instalada no horizonte temporal considerado.

Na Figura 1 apresenta-se o fluxograma dos principais dados e passos do modelo matemático de otimização técnico-económica de cenários de evolução da instalação do setor renovável *offshore* desenvolvido neste projeto. De forma a compreender os dados requeridos nesta tarefa, bem como as cenarizações definidas na secção seguinte apresenta-se uma breve descrição do modelo matemático. De referir que, usando diferentes ficheiros de parametrização, o modelo implementado permite a otimização de diversos casos de estudo sem necessitar de alterar o núcleo do modelo matemático.

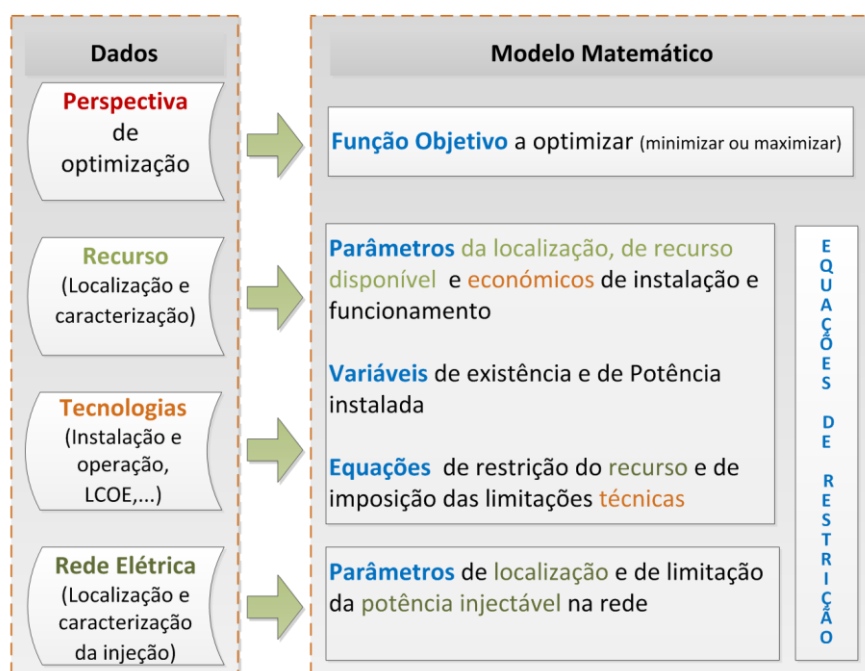


Figura 1. Fluxograma dos principais dados e passos do modelo matemático de otimização técnico-económica de cenários de evolução da instalação do setor renovável *offshore*.

Na secção 2 apresenta-se em detalhe o modelo *OREL - Localização ótima da geração de energia renovável Offshore*, nomeadamente, as equações estabelecidas com base nas premissas definidas no projeto. Na secção 3 um resumo dos dados mais relevantes para alimentar o modelo matemático é apresentado. A definição e motivação dos diferentes cenários abordados neste trabalho são discutidas na secção 4. Por fim, na secção 5 algumas notas finais sobre o objetivo desta tarefa são providenciadas.

2. Modelo OREOL – Localização ótima da geração de energia renovável Offshore

O modelo matemático é baseado numa representação discreta no tempo, ao longo do horizonte temporal imposto, com um intervalo de tempo de um ano. De acordo com o plano de trabalhos, o modelo de base inicial foi adaptado aos requisitos resultantes do trabalho entretanto desenvolvido nas outras atividades do projeto que permitiram mapear o recurso existente, identificar o tipo de instalação possível, selecionar as zonas para possível geração *offshore*, verificar os possíveis pontos de injeção na rede elétrica e a respetiva capacidade, além de definir todo o conjunto de valores necessários à parametrização do modelo, isto é, à definição do caso de estudo. Assim, as seguintes premissas foram consideradas no modelo:

- Consideram-se vinte e três zonas com potencial de geração *offshore*;
- Para cada zona é usado um “*layout*” de nove localizações para instalação de unidades de produção renovável, interconectadas por cabos elétricos;
- A localização central (o centroide da zona) liga toda a zona a um ou mais pontos de injeção vizinhos;
- Identificaram-se onze pontos de injeção e as respetivas potências de injeção disponíveis, a partir dos dados apresentados pelos relatórios anuais da Rede Elétrica Nacional (REN);
- Assume-se que, independentemente do tipo de recurso a explorar, a capacidade *offshore* a instalar em cada local disponível é de 50 MW com todos os n elementos necessários para atingir essa capacidade a serem instalados em simultâneo;
- O modelo permite a escolha entre uma conexão em corrente alternada (CA) ou corrente contínua (CC) para transportar a energia gerada de um conjunto predeterminado de locais *offshore* até pontos de injeção predefinidos da rede elétrica de transporte/distribuição em território continental
- Dado não se dispor da *projeção* futura do conjunto de valores de instalação e manutenção ou dos fatores de evolução tecnológica, os valores das estimativas atuais são mantidos constantes ao longo de todo o horizonte temporal o que conduz a valores contantes do LCOE (acrónimo inglês para “*Levelized Cost Of Energy*);
- A ligação elétrica à rede nacional de transporte de energia é considerada da responsabilidade do operador do sistema e, como tal, não diretamente suportada pelos investidores, mas podendo eventualmente ser refletido no modelo mediante a introdução de um taxa do transporte de energia nessas ligações.

O modelo permite com base em diferentes funções objetivo (e.g., a minimização do LCOE agregado dos diversos elementos instalados) definir o escalonamento ótimo da instalação da geração renovável *offshore* para os diversos cenários considerados. Além das equações que definem as possíveis funções objetivo (OF), as limitações técnicas (e.g., capacidade de transporte nos cabos de conexão) são impostas como um conjunto de restrições (desigualdades). Para fins computacionais, são usadas as unidades monetárias de um milhão de euros (M €) para todos os custos e lucros, o megawatt (MW) para todas as capacidades de energia e o megajoule (MWh) para a energia produzida. O modelo foi desenvolvido com recurso ao *software* GAMS. Na Figura 2 apresenta-se a localização de alguns elementos conceptuais para a modelação da geração renovável *offshore*.

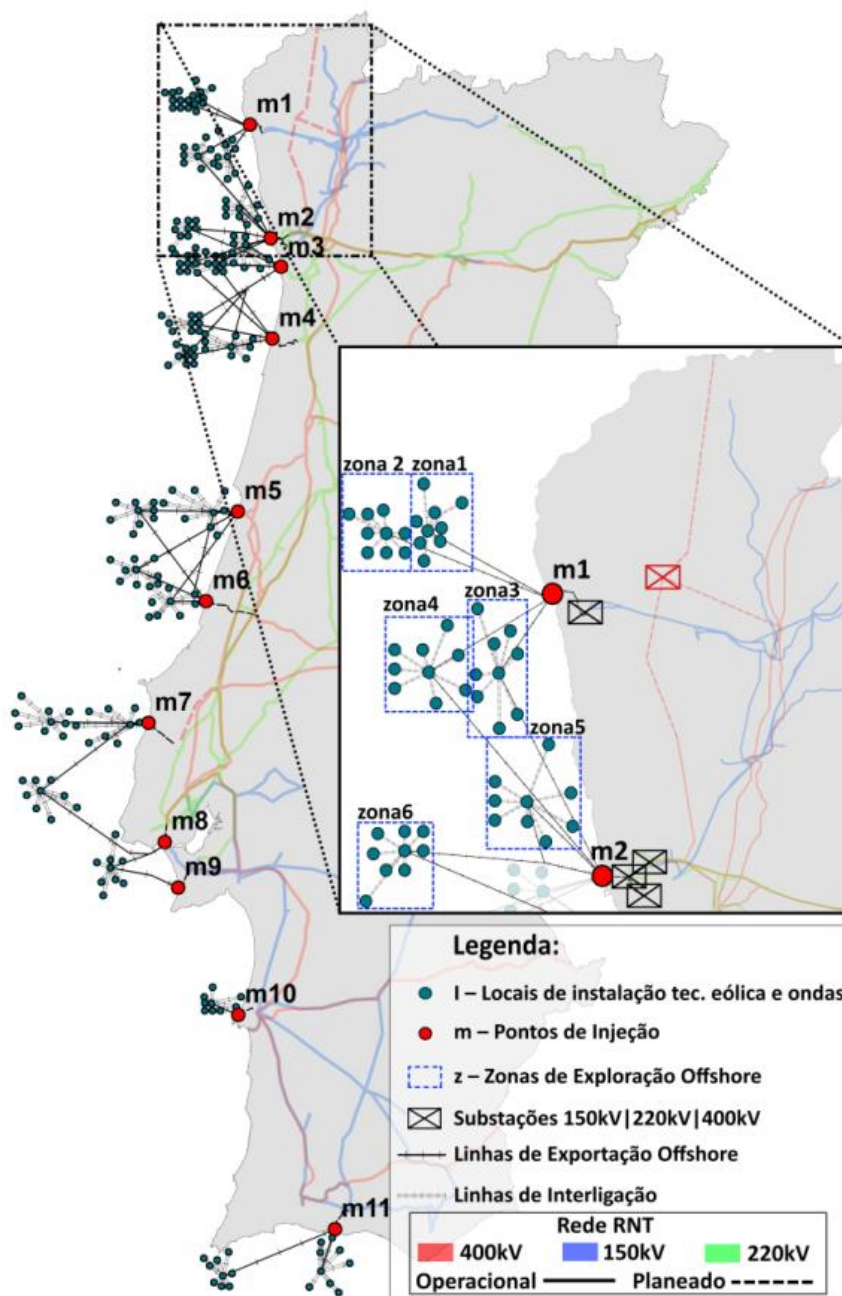


Figura 2. Mapa ilustrativo da localização e de alguns elementos conceptuais para a modelação da geração renovável offshore.

As soluções do problema de otimização permitem selecionar os locais que apresentam maior benefício para a economia nacional, definindo as regiões, e o escalonamento da instalação integrada das diversas tecnologias que permitam uma rápida e segura recuperação do investimento.

2.1. Descrição do modelo matemático

O modelo usa um conjunto de índices, identificadas como conjuntos, dados de parametrização, identificados como parâmetros ou tabelas, e dados de diversos valores, escalares, que uma vez especificados definem o caso de estudo e os respetivos cenários. Todos estes elementos de parametrização são gravados num arquivo independente de GAMS que é inserido no núcleo do modelo usando o comando GAMS, *\$Include*. No núcleo do modelo matemático são definidas as variáveis utilizadas nas equações do modelo, declaradas por sua vez como equações e de seguida explicitamente escritas. Usando diferentes ficheiros de parametrização, a implementação do modelo permite a otimização de diversos casos de estudo sem necessitar de alterar o núcleo do modelo matemático. Por motivos de consistência com os resultados obtidos na tarefa 3 deste projeto, nesta tarefa aplicou-se igualmente a fórmula simplificada do LCOE.

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} : \begin{cases} I_t & \text{Custo do investimento no ano } t \text{ (inclui financiamento)} \\ M_t & \text{Custo da operação e manutenção no ano } t \\ E_t & \text{Energia produzida no ano } t \\ r & \text{discount rate} \\ n & \text{vida útil do sistema} \end{cases}$$

2.1.1. Escalares

Nome	Descrição	Domínio
<i>HT</i>	Horizonte temporal <i>HT</i> = 31, de 2020 a 2050	[ano]
<i>LS</i>	Vida útil dos parques eólicos/ondas (25 anos por defeito)	[ano]
<i>rD</i>	Valor a usar para o <i>Discount rate</i>	
<i>LxD</i>	Valor imposto para a capacidade instalada na região de Lisboa	[MW]
<i>DeltCap</i>	Valor da tolerância permitida para a potência instalada	[MW]
<i>Aux</i>	Escalar auxiliar para fins computacionais	
<i>NmbrI</i>	Limite da capacidade de instalação anual (número de instalações)	
<i>NMaxC</i>	Número máximo de cabos para ligação à rede elétrica nacional	
<i>XCabl</i>	Fração do custo do cabo suportado pelos produtores ¹ <i>offshore</i>	

¹ Permite calcular a taxa de transporte de energia.

2.1.2. Conjuntos

Nome	Descrição	Domínio
z	Zonas de exploração <i>offshore</i>	$z = 1, \dots, Z$
k	Tipo de tecnologias usadas ²	$k = 1, \dots, K$
kk	Um alias de k	$kk = 1, \dots, K$
l	Localizações ³ de possíveis instalações	$l = 1, \dots, L$
ll	Um alias de l	$ll = 1, \dots, L$
m	Pontos de injeção na rede nacional de transporte de energia	$m = 1, \dots, M$
toc	Tipos dos cabos ⁴ para transporte de energia AC/DC	$toc = 1, \dots, T$
t	Intervalos de tempo (ano) do horizonte temporal	$t = 1, \dots, HT$
tt	Um <i>alias</i> de t	$tt = 1, \dots, HT$

2.1.3. Parâmetros

Nome	Descrição	Domínio
$P_{toc}(toc)$	Potência limite dos cabos do tipo toc	$[MW]$
$CostIConn(z, m, toc)$	Custo da ligação de z a m com cabo do tipo toc	$[M€]$
$CostMConn(z, m, toc, t)$	Custo de manutenção em t os cabos tipo toc entre z e m	$[M€]$
$TechR(k)$	Tipo de recurso da tecnologia k (TechR=1-> vento, TechR= 2-> ondas)	
$Connzm(z, m)$	Ligação entre zona z e ponto de injeção m (Possível = 1, Outra = 0)	
$Zzkl(z, k, l)$	Tipo de tecnologias k instaláveis na localização l da zona z	
$CostInst(z, k, l)$	Custo da instalação do tipo k em l na zona z	$[€]$
$CostMan(z, k, l, t)$	Custo de operação e manutenção da instalação do tipo k em l de z	$[€]$
$AEP(z, k, l)$	Produção de energia anual com a tec. k em l na zona z	$[MJ]$
$Pzkl(z, k, l)$	Potência nominal da instalação do tipo k em l da zona z	$[MW]$
$PI_{mt}(m, t)$	Potência máxima injetável no ano t no ponto m	$[MW]$
$PD_{wind}(t)$	Potência a instalar para exploração do recurso eólica no ano t	$[MW]$
$PD_{wave}(t)$	Potência a instalar para exploração da energia das ondas no ano t	$[MW]$
$PI_{maxz}(z)$	Capacidade máx. de injeção de z na rede nacional com um único cabo	$[MW]$
$LCOE_{zkl}(z, k, l)$	Valor do LCOE para tecnologia do tipo k instalada em l na zona z	$[€/MW]$
$DR(t)$	Parâmetro, dado por $(1+rD)^t$ onde $t \in [1, \dots, LS]$	
$EnergyVal(t)$	Valor médio da energia no mercado para o ano t	$[M€/MW]$

² Este conjunto decorre da instanciação das diversas tecnologias e possíveis estruturas de suporte.

³ Os elementos do conjunto l são reiniciados em cada zona.

⁴ Este conjunto ordena a apresentação dos cabos por ordem crescente do custo dos cabos AC seguidos dos cabos DC.

2.1.4. Variáveis Binárias

Nome	Descrição	Condição
$Yzm(z, m)$	Restringe a ligação de z a m ao <i>layout</i> predefinido	$Yzm = 1$
$Y2m(z)$	Define duas ligações de z à rede nacional ⁵	$Y2m = 0$
$Yzmtoc(z, m, toc)$	Define o tipo toc do cabo a instalar para ligar m a z	$Yzmtoc = 1$
$Yzkl(z, k, l, t)$	Define a instalação no ano t em l da tecnologia k na zona z	$Yzkl = 1$
$Yzkl(z, k, l, t)$	Define a existência no ano t em l da tecnologia k na zona z	$Yzkl = 1$

2.1.5. Variáveis reais positivas

Nome	Descrição
$LCOEzkl(z, k, l, t)$	LCOE em t da tecnologia do tipo k instalado no local l da zona z
$Ezkl(z, k, l, t)$	Energia gerada em t da tecnologia do tipo k instalado no local l da zona z
$Ezkt(z, k, t)$	Energia gerada em t da tecnologia do tipo k instalado na zona z
$Ezt(z, t)$	Energia gerada em t na zona z
$Et(t)$	Energia total gerada durante o ano t
Et_{total}	Energia total gerada no decorrer do horizonte temporal
$Pzkl(z, k, l, t)$	Potência total instalada em t no local l com tecnologia do tipo k na zona z
$Pkt(k, t)$	Potência total instalada em t com tecnologia do tipo k
$Pzt(z, t)$	Potência total instalada em t na zona z
$Pzm(z, m, t)$	Parte da potência instalada em z para ser transportada para m no ano t
$PCmt(m, t)$	Potência <i>offshore</i> total ligada a m no ano t
$PWindt(t)$	Potência total da exploração do recurso eólico no ano t
$PWavet(t)$	Potência total da exploração do recurso da energia das ondas no ano t
$Cost0$	Variável do custo da energia produzida para avaliação do LCOE
$LxInst$	Potência <i>offshore</i> instalada na proximidade de Lisboa
$CableCost$	Custo de instalação dos cabos de injeção usados

2.1.6. Variáveis reais

Nome	Descrição
$Cost$	Custo total da produção <i>offshore</i> ao longo do horizonte temporal
$Value$	Valor total da produção <i>offshore</i> ao longo do horizonte temporal
$Profit$	Lucro total da produção <i>offshore</i> ao longo do horizonte temporal
$NCables$	Número de cabos instalados

⁵ Impõe duas ligação quando $Y2m = 1$.

2.1.7. Equações

Nome	Descrição
$Eq_YzmUL(z, m)$	Permite a instalação do cabo de acordo com o <i>layout</i> pré-estabelecido
$Eq_Yzm1(z)$	Impõe pelo menos uma conexão ao continente para a zona z quando aberta
$Eq_Yzm(z, m)$	Restringe a conexão ao continente em m à abertura da zona z
$Eq_Yzm2(z)$	Restringe o número de cabos de injeção instalados na zona z
$Eq_Y2m(z)$	Define a instalação a um ou dois cabos de injeção em função da potência em z
$Eq_Yzt0(z, k)$	Restringe a abertura com tecnologia k da zona z , em $l1$, ao <i>layout</i> imposto
$Eq_Yzlt(z, k, l, t)$	Restringe as instalações em l à abertura anterior da zona z em $l1$
$Eq_Yzl0(z, l)$	Permite a instalação de apenas um tipo de tecnologia na localização l de z
$Eq_Yzll(z, k, l)$	Restringe a instalação da tecnologia k no local l da zona z ao <i>layout</i> imposto
$Eq_InstCap(t)$	Limita a capacidade anual de instalação
$Eq_Yzkl(z, k, l, t)$	Impõe que as instalações, uma vez instaladas, permaneçam instaladas
$Eq_Yzkl(t, z, k, l, t)$	Obtém as variáveis de existência a partir das de instalação
$Eq_Connzm(z, m)$	Garante que apenas um tipo de cabo seja usado para conectar z a m
$Eq_Czm(z, m)$	Impõe um cabo com capacidade superior à potência injetada por z em m
$Eq_Pzkl(t, z, k, l, t)$	Potência total instalada no ano t em l com tecnologia k na zona z
$Eq_Pkt(k, t)$	Potência total instalada no ano t com tecnologia k
$Eq_Pzt(z, t)$	Potência total instalada no ano t na zona z
$Eq_PWindt(t)$	Potência total instalada no ano t para exploração da energia eólica
$Eq_PWavet(t)$	Potência total instalada no ano t para exploração da energia das ondas
$Eq_PDWindtl(t)$	Mínimo da potência instalada para exploração do recurso eólico no ano t
$Eq_PDWindtu(t)$	Máximo da potência instalada para exploração do recurso eólico no ano t
$Eq_PDWavetl(t)$	Mínimo da potência instalada para exploração da energia das ondas no ano t
$Eq_PDWavetu(t)$	Máximo da potência instalada para exploração da energia das ondas no ano t
$Eq_PDLisbon$	Calcula a potência instalada nas proximidades de Lisboa
$Eq_PDLisbonl$	Impõe um limite inferior da capacidade instalada nas proximidades de Lisboa
$Eq_Pzm(z, t)$	Define a potência para a RNT a partir da zona z no ano t
$Eq_PCmt(m, t)$	Potência injetada durante o ano t na RNT em m
$Eq_PImt(m, t)$	Impõe um limite superior à potência injetada em m durante o ano t
$Eq_Ezkl(t, z, k, l, t)$	Energia produzida no ano t pela instalação em l com tecnologia k na zona z
$Eq_Ezkt(z, k, t)$	Energia produzida no ano t pelas instalações com tecnologia k na zona z

Nome	Descrição
$Eq_Ezt(z, t)$	Energia produzida no ano t pelas instalações da zona z
$Eq_Et(t)$	Energia total produzida no ano t
$Eq_LCOEzkl(t, z, k, l, t)$	LCOE da exploração <i>offshore</i> no ano t com tecnologia k em l da zona z
Eq_Etotal	Calcula a energia <i>offshore</i> gerada ao longo do horizonte temporal
Eq_Yzones	Limita o número de cabos de injeção instalados ao longo do horizonte temporal
$Eq_CableCost$	Calcula o custo de instalação dos cabos de injeção
Eq_Cost0	Custo de geração <i>offshore</i> para avaliação do LCOE (€)
Eq_Cost	Custo da produção <i>offshore</i>
Eq_Value	Valor da produção <i>offshore</i>
Eq_Profit	Lucro da produção <i>offshore</i>

2.2. Modelo matemático

A ordem de apresentação das equações segue a sua funcionalidade no modelo, o que, juntamente com o breve comentário que as precede, pretende auxiliar na compreensão da sua finalidade. Além disso, o modelo não contabiliza diretamente os custos das conexões entre o continente e cada zona de exploração, em alternativa é usada uma taxa de transporte de energia, correspondente a 25% do custo total desses cabos. Este valor é integrada no cálculo do custo total e não entra para o custo do LCOE.

2.2.1. Equações de Configuração do Caso de Estudo

As equações apresentadas nesta seção impõem o *layout* de produção *offshore* pela restrição das variáveis binárias associadas à instalação dos diversos elementos ou à existência dos mesmos.

Layout da conexão da zona: impõe o *layout* da conexão *offshore*, por limitação da variável binária de conexão da zona z a um conjunto adequado de pontos de injeção m da rede nacional de transporte (RNT) pré-estabelecidos.

$$Y_{zm}(z, m) \leq Conn_{zm}(z, m) \quad \forall z, m \quad (1)$$

Abertura da ligação à RNT: Impõe a instalação de pelo menos uma conexão da zona z à RNT no ponto de injeção m quando um qualquer tipo de tecnologia k é instalado na localização " l " de z ao longo de todo o horizonte temporal.

$$\sum_m Y_{zm}(z, m) \geq \sum_k \sum_t \sum_{l: ord(l)=1} Y_{zkl}(z, k, l, t) \quad \forall z \quad (2)$$

Restrição da ligação à RNT: Restringe a possibilidade da existência da ligação à RNT em m à abertura da zona z , com a instalação duma qualquer tecnologia na localização central l ao longo do horizonte temporal considerado.

$$Y_{zm}(z, m) \leq \sum_k \sum_t \sum_{l: ord(l)=1} Y_{zkl}(z, k, l, t) \quad \forall z, m \quad (3)$$

Restrição do número de ligações à RNT: Restringe o número de ligações à RNT da zona z a uma ou duas, dependendo do valor da variável binária $Y_{2m}(z)$.

$$\sum_m Y_{zm}(z, m) \leq 2 - Y_{2m}(z) \quad \forall z \quad (4)$$

Número de conexões de injeção, definição binária: Define o valor da variável $Y_{2m}(z) = 1$ quando o valor da potência instalada em z no final do horizonte temporal supera o valor máximo, $P_{imaxz}(z)$, possível de transportar com um único cabo para a RNT.

$$\sum_{t: ord(t)=card(t)} P_{zt}(z, t) \geq (1 - Y_{2m}(z)) \cdot P_{imaxz}(z) \quad \forall z \quad (5)$$

Abertura das zonas: Restringe a abertura da zona z em l ao *layout* de tecnologia permitida.

$$\sum_t \sum_{l: ord(l)=1} Y_{zkl}(z, k, l, t) = l = \sum_{l: ord(l)=1} Z_{zkl}(z, k, l) \quad \forall z, k \quad (6)$$

Abertura do *cluster* das zonas: Restringe a instalação no ano t da tecnologia k em l à abertura prévia da zona z com a instalação em ' l ' dum qualquer tipo de tecnologia kk .

$$Y_{zkl}(z, k, l, t) \leq \sum_{kk} \sum_{tt: ord(tt) \leq ord(t)} \left(\sum_{ll: ord(ll)=1} Y_{zkl}(z, kk, ll, tt) \right) \quad \forall z, k, l, t \quad (7)$$

Restrição da tecnologia instalada: Permite instalar apenas uma tecnologia em todo o horizonte temporal no local l da zona z .

$$\sum_k \sum_t Y_{zkl}(z, k, l, t) = l = 1 \quad \forall z, l \quad (8)$$

Layout da tecnologia a instalar: Permite que a tecnologia k seja instalada na localização l da zona z apenas se for tecnicamente viável⁶.

$$\sum_t Y_{zkl}(z, k, l, t) = l = Z_{zkl}(z, k, l) \quad \forall z, k, l : ord(l) \geq 2 \quad (9)$$

⁶ Esta equação pode eliminar a necessidade de escrever a equação (6) removendo a condição imposta a l

Capacidade da instalação anual: Limita o número de instalações anuais à capacidade de instalação prevista na cenarização.

$$\sum_z \sum_k \sum_l Yzkl(z, k, l, t) \leq NmbrI \quad \forall t \quad (10)$$

Existência da instalação: Esta equação impõe que a instalação uma vez instalada permanece instalada.

$$Yzkl(z, k, l, t) \geq Yzkl(z, k, l, t-1) \quad \forall z, k, l, t \quad (11)$$

Instalação de elementos: Relaciona a variável binária de instalação com a variável binária de existência da instalação.

$$Yzkl(z, k, l, t) = Yzkl(z, k, l, t) - Yzkl(z, k, l, t-1) \quad \forall z, k, l, t \quad (12)$$

2.2.2. Configuração dos cabos de ligação à RNT

Tipo de cabos: Assegura que uma conexão de z a m , se existir, usa apenas um tipo de cabo.

$$\sum_{toc} Yzmtoc(z, m, toc) = Yzm(z, m) \quad \forall z, m : Connzm(z, m) = 1 \quad (13)$$

Potência do cabo: Impõe uma capacidade para o cabo de injeção em m superior à capacidade instalada em z .

$$\sum_{t: ord(t)=card(t)} Pzm(z, m, t) \leq \sum_{toc} (P_{toc}(toc) \cdot Yzmtoc(z, m, toc)) \quad \forall z, m : Connzm(z, m) = 1 \quad (14)$$

2.2.3. Potência instalada

Potência local instalada: Identificação da potência instalada no ano t na localização l da instalação com tecnologia k na zona z .

$$Pzkl(z, k, l, t) = Pzkl(z, k, l) \cdot Yzkl(z, k, l, t) \quad \forall z, k, l, t \quad (15)$$

Potência anual da tecnologia: Potência total no ano t das instalações com tecnologia k

$$Pkt(k, t) = \sum_z \sum_l Pzkl(z, k, l, t) \quad \forall k, t \quad (16)$$

Potência anual das zonas: Potência total no ano t instalada na zona z

$$Pzt(z, t) = \sum_k \sum_l (Pzkl(z, k, l) \cdot Yzkl(z, k, l, t)) \quad \forall z, t \quad (17)$$

2.2.4. Restrições da potência instalada

Potência eólica instalada: Potência *offshore* instalada no ano t a explorar a energia eólica.

$$P_{Wind}(t) = \sum_{k: TechR(k)=1} P_{kt}(k, t) \quad \forall t \quad (18)$$

Potência instalada para explorar a energia das ondas: Potência instalada no ano t a explorar a energia das ondas.

$$P_{Wavet}(t) = \sum_{k: TechR(k)=2} P_{kt}(k, t) \quad \forall t \quad (19)$$

Mínimo da capacidade de exploração eólica *offshore*: Impõe um mínimo à capacidade instalada para explorar a energia eólica no ano t

$$PD_{Wind}(t) \geq PD_{wind}(t) \quad \forall t \quad (20)$$

Máximo da capacidade de exploração eólica *offshore*: Impõe um máximo à capacidade instalada para explorar a energia eólica no ano t

$$PD_{Wind}(t) \leq PD_{wind}(t) + DeltCap \quad \forall t \quad (21)$$

Mínimo da capacidade de exploração da energia das ondas: Impõe um mínimo à capacidade instalada para explorar a energia das ondas no ano t

$$PD_{Wavet}(t) \geq PD_{wave}(t) \quad \forall t \quad (22)$$

Máximo da capacidade de exploração da energia das ondas: Impõe um máximo à capacidade instalada para explorar a energia das ondas no ano t

$$PD_{Wavet}(t) \leq PD_{wave}(t) + DeltCap \quad \forall t \quad (23)$$

Potência instalada na proximidade de Lisboa: Define a capacidade instalada na proximidade de Lisboa com base em pontos predeterminados de injeção m

$$LxInst = \sum_z \sum_{m: (ord(m)>6) \wedge (ord(m)<10)} P_{zm}(z, m) \quad (24)$$

Potência mínima instalada na proximidade de Lisboa: Impõe um valor mínimo à capacidade instalada na proximidade de Lisboa

$$LxInst \geq LxD \quad (25)$$

2.2.5. Restrições da injeção de energia

Potência anual instalada: Iguala a potência instalada no ano t na zona z à potência injetável na RNT.

$$Pzt(z, t) = \sum_{m: Connzm(z, m)=1} Pzm(z, m, t) \quad \forall z, t \quad (26)$$

Potência anual injetada na RNT: Calcula a potência total injetada no ano t em m .

$$PCmt(m, t) = \sum_{z: Connzm(z, m)=1} Pzm(z, m, t) \quad \forall m, t \quad (27)$$

Limite da potência anual injetável em m : Limitação da injeção de potência na RNT em m no ano t

$$PCmt(m, t) \leq PImt(m, t) \quad \forall m, t \quad (28)$$

2.2.6. Produção de energia

Produção local de energia: Energia produzida no ano t em l pela instalação com tecnologia k na zona z

$$Ezkl(z, k, l, t) = AEP(z, k, l) \cdot Yzkl(z, k, l, t) \quad \forall z, k, l, t \quad (29)$$

Produção anual por tecnologia por zona: Energia produzida no ano t , pelas instalações com tecnologia k na zona z

$$Ezkt(z, k, t) = \sum_l Ezkl(z, k, l, t) \quad \forall z, k, t \quad (30)$$

Produção anual das zonas: Energia gerada durante o ano t pelas instalações da zona z

$$Ezt(z, t) = \sum_k Ezkt(z, k, t) \quad \forall z, t \quad (31)$$

Produção anual total: Energia total produzida durante o ano t

$$Et(t) = \sum_z Ezt(z, t) \quad \forall t \quad (32)$$

2.2.7. LCOE das instalações

Nesta secção apresenta-se a expressão que calcula o LCOE em função do tempo para as instalações existentes.

LCOE das instalações: LCOE para a energia *offshore* explorada em t com tecnologia k na localização l da zona z .

$$LCOEzkl(z, k, l, t) = LCOEzkl(z, k, l) \cdot Yzkl(z, k, l, t) \quad \forall z, k, l, t \quad (33)$$

2.2.8. Funções Objetivo

Ao longo do trabalho foram analisadas, de forma individual, diferentes funções objetivo, que se apresentam seguidamente:

Produção total: Calcula a energia *offshore* produzida ao longo do horizonte temporal.

$$E_{total} = \sum_t E_t(t) \quad (34)$$

Número de cabos de injeção instalados: Limita o número de cabos de injeção instalados ao longo de todo o horizonte de tempo⁷

$$NCables = \frac{1}{N_{MaxC}} \sum_z \sum_m \sum_{toc} Y_{zmtoc}(z,m,toc) \quad (35)$$

Custo total dos cabos de injeção: Calcula o custo dos cabos de injeção

$$CableCost = \sum_z \sum_m \sum_{toc} CostIConn(z, m, toc) \cdot Y_{zmtoc}(z, m, toc) \quad (36)$$

Custo total da produção *offshore*: Custo total da produção *offshore* em euro (€) para cálculo do LCOE global.

$$Cost0 = \sum_z \sum_k \sum_l \sum_t LCOE_{zkl}(z, k, l) \cdot E_{zkl}(z, k, l, t) \quad : Z_{zkl}(z, k, l) = 1 \quad (37)$$

Custo total: Custo total associado à exploração da geração renovável *offshore* (M€).

$$Cost = 10^{-6} \cdot Cost0 + x_{Cabl} \cdot CableCost \quad (38)$$

Valor total: Valor total da geração *offshore*

$$Value = \sum_t E_y(t) \cdot EnergyVal(t) \quad (39)$$

Lucro total: Lucro total da geração *offshore*

$$Profit = Value - Cost \quad (40)$$

⁷ O factor $\frac{1}{N_{MaxC}}$ é usado para converter um número inteiro num número real, como requerido pelo GAMS para as variáveis de otimização

3. Modelo OREOL – Dados

3.1. Identificação da capacidade de receção da Rede Nacional de Transporte

A identificação da capacidade de receção disponível na Rede Nacional de Transporte (RNT) para escoamento da energia elétrica produzida pelos sistemas de energia renovável *offshore* é crucial para o planeamento otimizado das futuras instalações. Nesse sentido, na Tarefa 3 deste projeto (Garcia et al. 2018), procedeu-se a um levantamento exaustivo da informação sobre a *i)* RNT e *ii)* distribuição espacial do consumo de energia elétrica em Portugal – Figura 3.

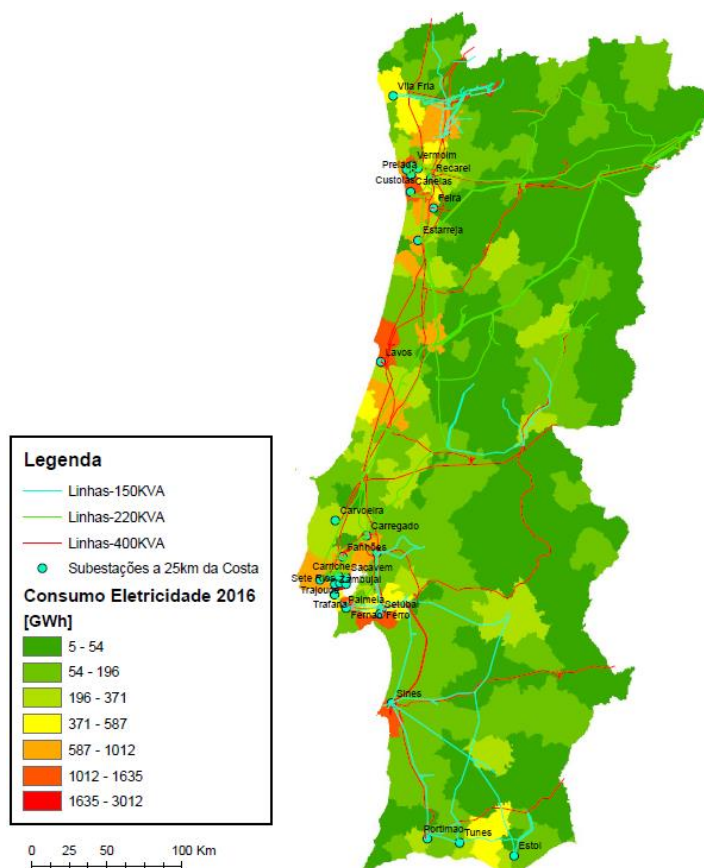


Figura 3. Sobreposição da RNT e subestações a 25km da linha de costa no mapa de consumo de eletricidade 2016 por concelho.

Como base nesta informação e com o objetivo de triar as zonas de interesse com possibilidade de injeção na RNT, foram selecionados locais perto da costa através dos seguintes critérios:

- Potencial energético renovável disponível para as diferentes tecnologias.
- Distância entre subestações da RNT a costa inferior a 25 km.
- Proximidade a zonas de consumo em Portugal Continental.

Foram definidos os traçados dos cabos submarinos de transporte da geração *offshore* para a RNT, com as seguintes condicionantes:

- Os cabos submarinos, junto à costa, até uma profundidade de 50 metros têm de estar enterrados;
- A localização dos cabos evita zonas rochosas e áreas protegidas.

Foram igualmente definidos os pontos de interligação *offshore*, com a possibilidade de ligação de várias centrais *offshore*, além da definição do respetivo ponto de interligação na costa. Adicionalmente, os respetivos traçados dos cabos *onshore* de conexão dos pontos de interligação na costa às subestações da RNT foram conjecturados, recorrendo a imagens de satélite através dos seguintes critérios:

- Evitar zonas urbanas.
- Seguir estradas de terra, municipais, nacionais e/ou autoestradas.
- Traçado com menor comprimento possível.

Na Figura 4 apresenta-se o planeamento estabelecido neste projeto do traçado i) dos cabos submarinos de transporte da geração *offshore* para a RNT e ii) de conexão dos pontos de interligação na costa às subestações da RNT. Estes resultados encontram-se apresentados e discutidos de forma exaustiva em (Garcia et al. 2018).

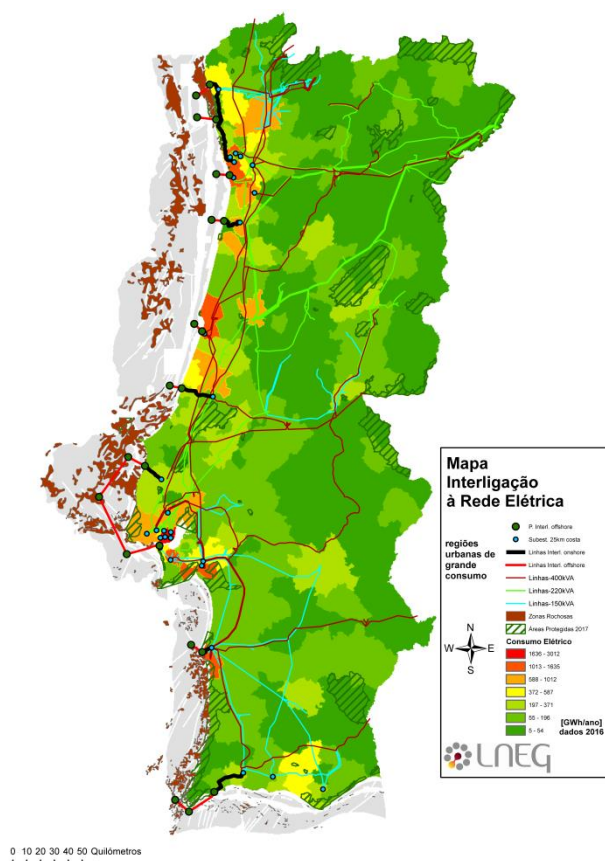


Figura 4. Planeamento injeção *offshore* na RNT - Portugal Continental.

Com base nas localizações anteriormente definidas e nas premissas identificadas na secção 2.1, processaram-se todos os parâmetros descritos na secção 2.1.3 para alimentar o modelo.

4. Definição dos Cenários

Tal como anteriormente referido, o cenário é definido pelos valores usados na parametrização do modelo matemático e pela escolha da função objetivo usada para otimização da perspetiva pretendida.

4.1. Parâmetros comuns dos cenários

Neste trabalho foram usados um conjunto de fatores comuns cujos valores são:

Nome	Descrição	Valor
rD	<i>Discount rate</i> , valor adimensional usado no cálculo do LCOE	0.065
HT	Número de anos no horizonte temporal [<i>anos</i>]	31
LS	Define o tempo de vida útil das instalações/equipamentos [<i>anos</i>]	25
$DeltCap$	Valor limite do <i>overflow</i> da potência a instalar [<i>MW</i>]	50
$NmbrI$	Valor limite do número de instalações <i>offshore</i> anuais	15
$NMaxC$	Valor máximo do número de cabos de ligação à RNT	44
$Eval$	Valor pago pela energia <i>offshore</i> [€MW^{-1}]	140
$XCabl$	Parte do custo do cabo de ligação à RNT imputado ao transporte de energia	0.25
LxD	Imposição duma potência <i>offshore</i> mínima instalada perto de Lisboa ⁸ [<i>MW</i>]	[0,1200]

O valor de LxD é usado com valor diferente de zero apenas para o cenário com reforço do abastecimento das zonas de grande consumo. Dispensou-se a imposição de um fator equivalente para a zona do Grande Porto por se ter verificado que a configuração do caso de estudo usado já conduz naturalmente a valores que permitem dispensar essa imposição.

4.1.1. Evolução da capacidade da geração de energia renovável *offshore*

Na Figura 5 são apresentados os valores do escalonamento anual imposto à instalação das unidades de geração de energia renovável *offshore*, usados na otimização do modelo matemático, para os recursos eólicos e das ondas ao longo da costa portuguesa para o horizonte temporal de 2020 a 2050. Estes valores impostos foram estimados tendo em consideração os indicadores apresentados no PNEC 2030 cenário “42% RES”. Uma vez que estes indicadores são apenas disponibilizados até 2040, o restante período foi estimado com base no crescimento linear identificado no período compreendido entre 2020 e 2040.

⁸ Este valor é usado com valor diferente de zero apenas para o cenário com reforço do abastecimento das zonas de grande consumo.

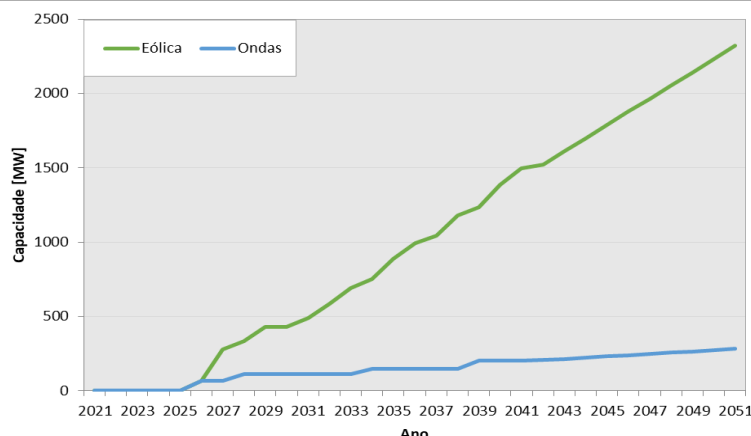


Figura 5. Valores do escalonamento anual imposto à instalação das unidades de geração de energia renovável *offshore*.

Como pode verificar-se na figura anterior, considera-se que no período de 2020 a 2024 não são instaladas unidades de geração de energia renovável *offshore*, i.e., não se impõe a entrada em funcionamento de unidade para exploração do recurso *offshore* por se considerar estarem a decorrer a elaboração e aprovação do projeto e a posterior fabricação e instalação das respetivas estruturas *offshore*. Os valores apresentados são considerados como valores mínimos a instalar sendo permitido um sobredimensionamento de até 50 MW adicionais.

4.1.2. Identificação da potência máxima injetável nas subestações da RNT

Os valores da potência máxima injetável nas subestações da RNT ao longo da costa portuguesa (que foram considerados constantes ao longo do horizonte temporal) são apresentados na Figura 6.

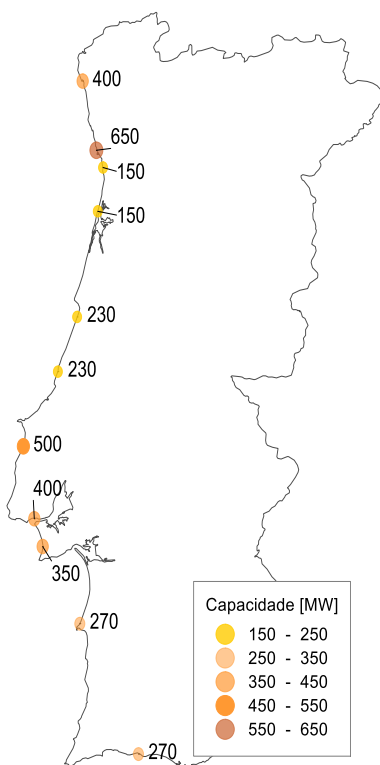


Figura 6. Potência máxima injetável.

4.2. Definição dos cenários

Os cenários definidos pretendem auxiliar as entidades licenciadoras na identificação dos locais que apresentam maior benefício para a economia nacional, numa perspetiva de minimização dos reforços da rede elétrica e proximidade entre a geração de energia e os grandes centros consumidores (e.g., áreas urbanas); aos investidores, conhecer as regiões e tecnologias que lhes permitem uma rápida e segura recuperação do investimento; às entidades regionais e locais concretizar ou reforçar de estratégias de desenvolvimento de novos *clusters* industriais ligados às energias renováveis *offshore*.

- **Cenário A – Minimização do custo total da geração *offshore***

Neste cenário é usada como função objetivo “**custo total**”, que calcula os custos totais da geração *offshore* de energia acrescidos de 25% do custo de instalação dos cabos usados para ligação à rede nacional de transporte de energia. Com $LxD = 0$, isto é, sem imposição do valor mínimo de potência *offshore* a instalar na proximidade de Lisboa.

- **Cenário B – Reforço do abastecimento das zonas de grande consumo**

Neste cenário é analisada a sensibilidade das soluções à variação dos valores mínimos de potência *offshore* impostos à instalação na proximidade de Lisboa. Para este cenário foram estudados quatro casos:

- Caso 1 (Cenário B.I) – Minimiza o **custo total**, impõe uma variação dos valores mínimos de potência *offshore* à instalação na proximidade de Lisboa de 0 MW a 1200 MW com um passo de **100 MW**.
- Caso 2 (Cenário B.II) – Minimiza o **custo total**, impõe uma variação dos valores mínimos de potência *offshore* à instalação na proximidade de Lisboa de 600 MW a 1200 MW com um passo de **50 MW**.
- Caso 3 (Cenário B. III) – Minimiza o **número de cabos de injeção instalados**, impõe uma variação dos valores mínimos de potência *offshore* impostos à instalação na proximidade de Lisboa de 0 MW a 1200 MW com um passo de **100 MW**.
- Caso 4 (Cenário B. IV) – Minimiza o **número de cabos de injeção instalados**, impõe uma variação dos valores mínimos de potência *offshore* impostos à instalação na proximidade de Lisboa de 600 MW a 1200 MW com um passo de **50 MW**.

- **Cenário C – Minimização do custo versus maximização da geração offshore**

Este cenário permite proceder a uma análise comparativa das soluções obtidas para dois casos:

- Caso 1 (Cenário C.I) – Minimiza a **custo total** com $LxD = 0$, isto é, sem imposição do valor mínimo de potência *offshore* a instalar na proximidade de Lisboa.
- Caso 2 (Cenário C.II) – Maximiza a **produção total**, que calcula o total da energia produzida em *offshore* durante todo o horizonte temporal, com $LxD = 0$.

- **Cenário D – Minimização do custo versus maximização da geração offshore com aumento significativo da capacidade de injeção na RNT**

Este cenário permite, tal como no anterior, proceder a uma análise comparativa das soluções obtidas para dois casos mas considerando uma capacidade de 100MW para todos os pontos: de injeção na RNT, sem exigência de instalação de produção *offshore* na proximidade de Lisboa. Adicionalmente foram estudados os mesmos casos mas com a imposição da instalação de 1000MW de capacidade *offshore* perto de Lisboa.

- Caso 1 (Cenário D.I) – Minimiza a **custo total** com $LxD = 0$, isto é, sem imposição do valor mínimo de potência *offshore* a instalar na proximidade de Lisboa.
- Caso 2 (Cenário D.II) – Maximiza a **produção total**, que calcula o total da energia produzida em *offshore* durante todo o horizonte temporal, com $LxD = 0$.
- Caso 3 (Cenário D.III) – Minimiza a **custo total** com $LxD = 1000$, isto é, com imposição do valor mínimo de potência *offshore* a instalar na proximidade de Lisboa.
- Caso 4 (Cenário D.IV) – Maximiza a **produção total**, que calcula o total da energia produzida em *offshore* durante todo o horizonte temporal, com $LxD = 1000$.

5. Notas finais

O presente relatório apresenta as cenarizações estabelecidas no âmbito da “Atividade 4 - Desenvolvimento de modelos matemáticos de otimização técnico-económica de cenários de evolução do sector renovável offshore”. De forma a compreender as cenarizações estabelecidas, apresentou-se o modelo matemático e um enquadramento dos trabalhos desenvolvidos nas outras atividades do projeto que permitiram, por exemplo, mapear o recurso existente, verificar os possíveis pontos de injeção na rede elétrica, identificar custos de operação e manutenção, etc.

As cenarizações estabelecidas contemplam a minimização do custo total da geração *offshore* (cenário A), reforço do abastecimento das zonas de grande consumo, *i.e.*, imposição de valores mínimos de potência *offshore* (cenário B), Minimização do custo *versus* maximização da geração *offshore* (cenário C) e, minimização do custo *versus* maximização da geração *offshore* com aumento significativo da capacidade de injeção na RNT (cenário D). Estas cenarizações permitem abranger um espectro alargado de opções técnicas e económicas possibilitando a construção de cenários de desenvolvimento do sector renovável *offshore* através da identificação das tecnologias mais promissoras na costa portuguesa e sua respetiva localização.

Os resultados da aplicação do modelo para os diferentes cenários serão apresentados no relatório D4.2 - *Cenarização do escoamento de energia produzida pelos sistemas de conversão de energia renovável offshore*.

Referências

Garcia, G. et al., 2018. Planeamento do Aproveitamento das Energias Renováveis Offshore em Portugal”. D3.1 - Definição e implementação das metodologias e identificação de áreas de interesse para a instalação de sistemas de produção renovável *offshore*. *LNEG - relatório técnico projeto OFFSHOREPlan*, p.49.