Planeamento Ótimo de Microrredes Alimentadas por Fontes de Energia Renováveis

Guilherme Costa e Castro

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientadores: Prof. Pedro Manuel Santos de Carvalho
Prof. Célia Maria Santos Cardoso de Jesus

Júri

Presidente: Prof. Horácio Cláudio De Campos Neto
Orientador: Prof. Pedro Manuel Santos de Carvalho
Vogal: Prof. Duarte de Mesquita e Sousa

Junho de 2018

Declaração

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.

Resumo

O ciclo de energia elétrica baseou-se, durante um longo período de tempo, exclusivamente na utilização das grandes centrais produtoras de energia elétrica, a qual era depois transmitida através de linhas de alta tensão ao longo de grandes distâncias e, posteriormente, distribuída aos consumidores na tensão adequada para consumo.

Nos últimos anos, os sistemas de energia elétrica têm atravessado uma fase de transição, integrando um novo conceito de produção dispersa de energia elétrica de pequenas potências, utilizando recursos renováveis ou tecnologias de geração eficientes, ligados diretamente às redes de média ou baixa tensão.

De forma a poder integrar estas duas ideias, surge o conceito de microrrede, uma rede de média ou baixa tensão capaz de funcionar em interligação com a rede de distribuição local, ou em regime isolado (desligado da rede de distribuição), alimentada pelos geradores locais.

O tema desta dissertação foca-se na microrrede e, em especial, no problema da operação e integração nas redes de energia elétrica e as questões económicas associadas. O consumo de energia numa microrrede pode ter diferentes custos, consoante o tipo de geração local, o tipo de ligação à rede de distribuição ou até o tamanho da microrrede. É, por isso, importante fazerem-se estudos económicos de forma a poder identificar as soluções economicamente mais viáveis, em relação às formas de alimentação das cargas de uma microrrede.

Tendo em vista a resolução do problema enunciado, são analisados vários casos de estudo de microrredes a funcionar em modo interligado e/ou isolado que se diferenciam pela dimensão das cargas da microrrede, a tecnologia do gerador local e o tipo de linha de ligação à rede. Para cada caso é feita uma avaliação qualitativa de alguns parâmetros relacionados com estas variáveis de forma a poder identificar a solução economicamente mais vantajosa.

O indicador económico usado é o custo médio atualizado (LCOE – Levelized Cost Of Energy, na terminologia inglesa). Este indicador é habitualmente usado para calcular o custo de produção de eletricidade numa central elétrica, mas nesta tese este conceito é estendido ao custo de transmissão de energia numa linha elétrica, integrando o custo fixo, custo variável e custo das perdas.

Palavras-chave: Microrrede, Produção Distribuída, Geração Local, Redes de Distribuição, Energias Renováveis, Planeamento de Redes; Análise Económica.

Abstract

In the past, the electricity cycle was based exclusively on the use of large power plants, which then transmitted the power through high voltage lines over long distances and then distributed it to consumers at the appropriate voltage for consumption. In recent years, electric power systems have gone through a transition phase, integrating a new concept of dispersed small-scale power generation using renewable resources or efficient generation technologies directly connected to medium (MV) or low voltage (LV) networks.

In order to be able to integrate these ideas, the concept of micro-grid (MG) arises: a MG is a MV or LV network capable of operating in interconnection with the local distribution network, or in isolated mode (disconnected from the distribution network), powered by local generators.

The topic of this thesis is focused on the MG and, in particular, on the problem of operation and integration in electric energy networks and related economic issues. The energy consumption in a MG may have different costs, depending on the type of local generation, the type of interconnection to the distribution network or even the size of the MG. Therefore, it is relevant to perform economic studies in order to identify the most economically viable solutions in relation to the feeding of the loads of a MG.

In order to make a contribution to the problem assessment, several cases of MGs operating in interconnected and/or isolated mode are analysed, which are differentiated by the size of the MG loads, the local generator technology and the type of network interconnection line. For each case, a quantitative evaluation of some parameters related to these variables is made in order to identify the most economically advantageous solution.

The economic indicator used is the Levelized Cost of Energy (LCOE). This indicator is usually used to calculate the cost of producing electricity in a power plant, but, in this thesis, this concept is extended to the cost of energy transmission in a power line, integrating the fixed cost, variable cost and losses cost.

***Index Terms*: Micro-grid; Distributed Production; Local Generation; Distribution Networks; Renewable Energy; Network Planning; Economic Analysis.**

Agradecimentos

Aos meus orientadores, Prof. Pedro Carvalho e Prof. Célia de Jesus, pela confiança depositada em mim, pelo apoio, colaboração e contributo cientifico.

A todos os meus colegas no Técnico que me apoiaram e ajudaram sempre que possível, alguns dos quais com quem partilhei esta fase final do curso.

Aos meus colegas na REN, empresa na qual estagiei enquanto finalizava esta dissertação, pela amizade, pela força e palavras de incentivo.

Aos meus colegas do futsal da AM Portela, pelos bons momentos passados nos pavilhões de futsal, durante este período.

A todos os restantes amigos, pela confiança, pelo companheirismo e pela amizade de sempre.

Por fim, o mais importante, a toda a minha família, em especial, os meus pais e irmão, pelo carinho, por acreditarem em mim e nas minhas capacidades, pelas opiniões dadas e pelas críticas sempre construtivas com o objetivo de melhorar ao máximo este trabalho.

Índice

Declaração i
Resumo ii
Abstract iii
Agradecimentos iv
Índice v
Lista de Figuras vii
Lista de Tabelas ix
Abreviaturas e Símbolos xii
1. Introdução 1
1.1. Enquadramento 1
1.2. Motivação e Objetivos 2
1.3. Estrutura da Tese 3
2. A Mudança de Paradigma e o Conceito de Microrrede 4
2.1. Microrrede 6
2.1.1. Conceito, estrutura e características 6
2.1.2. Funcionamento e Operação 9
2.2. Microgeração 10
2.2.1. Conceito 10
2.2.2. Tecnologias 11
2.2.3. Baterias 15
2.3. Ligação à Rede de Distribuição 16
3. Modelo Económico de Análise 18
3.1. Levelized Cost of Energy (LCOE) 18
3.1.1. Caso geral 19
3.1.2. Caso particular da linha de transmissão 21
3.1.3. Expressão geral de cálculo do LCOE 25
3.2. Condições de Simulação 26
3.2.1. Dimensão da Microrrede 27
3.2.2. Tipo de Microgeração 30
3.2.3. Linha de ligação à rede 31
3.3. Descrição do modelo económico 33
4. Apresentação e Avaliação dos Resultados 39

4.1. Casos de Estudo de Referência 39
4.2. Definição dos parâmetros das linhas 41
4.3. Casos de estudo 42
4.3.1. Casos de estudo 1 – Uso de secção normalizada 44
4.3.2. Caso de estudo 2 – Uso da secção ótima 56
4.4. Análise de Sensibilidade 60
4.4.1. Análise de sensibilidade 1 – Variação no Investimento dos geradores 62
4.4.2. Análise de sensibilidade 2 – Variação no Investimento da linha 69
4.4.3. Análise de sensibilidade 3 – Variação no custo de combustível do gerador (Diesel e GN) 76
5. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros 79
Referências 83
Anexos 85
Anexo A – Casos de estudo com cabo subterrâneo 85
Anexo B – Casos de estudo, com o uso da secção ótima na MR média 95

Lista de Figuras

Figura 1 – SEE característico do século XX 4
Figura 2 – Esquema representativo de um SEE do século XX (à esquerda) e de um SEE atual (à direita); PD –Produção Dispersa; G – Geração; 2 circunferências interlaçadas – transformadores; seta – carga de BT 5
Figura 3 – Ilustração de uma microrrede 7
Figura 4 – Exemplos de diagramas de carga diários 8
Figura 5 – Microrrede do futuro 10
Figura 6 – a) Gerador Fotovoltaico b) gerador a diesel c) gerador a GN 12
Figura 7 – Sistema de geração FV 13
Figura 8 – Esquema de um gerador de combustível fóssil 14
Figura 9 – Esquema de uma bateria 16
Figura 10 – a) linhas aéreas b) corte transversal de um cabo subterrâneo 17
Figura 11 – Diagrama de carga por patamares 22
Figura 12 – Diagrama de perdas por patamares 23
Figura 13 – Esquema com os vários parâmetros em estudo 27
Figura 14 – Diagrama de carga diário da MR pequena 28
Figura 15 – Diagrama de carga diário da MR média 28
Figura 16 – Diagrama de carga diário da MR grande 29
Figura 17 – Exemplo de diagramas de carga diários e de potência do gerador diesel 34
Figura 18 – Exemplo de diagramas de carga diários e de potência do gerador diesel + linha 34
Figura 19 – Exemplo de diagrama diário de geração solar 35
Figura 20 – Exemplo de diagramas de carga diários e de potência do gerador FV + bateria 36
Figura 21 – Fluxograma do modelo económico de análise 38
Figura 22 – Casos de estudo de referência; MR pequena 40
Figura 23 – Casos de estudo de referência; MR média 40
Figura 24 – Casos de estudo de referência; MR grande 41
Figura 25 – Evolução do LCOE; MR pequena + Linha BT (secção normalizada) para diferentes tipos de geração 53
Figura 26 – Evolução do LCOE; MR média+ Linha BT (secção normalizada) para diferentes tipos de geração 54
Figura 27 – Evolução do LCOE; MR média + Linha MT (secção normalizada) para diferentes tipos de geração 54
Figura 28 – Evolução do LCOE; MR grande + Linha MT (secção normalizada) para diferentes tipos de geração 55

Figura 29 – Evolução do LCOE; MR pequena + Linha BT (secção ótima) para diferentes tipos de geração..... 59
Figura 30 – Evolução do LCOE; MR pequena + Linha MT (secção ótima) para diferentes tipos de geração..... 60

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Características elétricas das MR. 29
Tabela 2 – Energia anual consumida pelas MR. 30
Tabela 3 – Custos dos geradores. 30
Tabela 4 – Custos dos cabos e linhas aéreas. 31
Tabela 5 – Parâmetros considerados. 32
Tabela 6 – Cenários analisados 36
Tabela 7 – Parâmetros da linha aérea de BT 42
Tabela 8 – Parâmetros da linha aérea de MT 42
Tabela 9 – Caso de estudo 1.1. - Linha aérea BT 44
Tabela 10 – Caso de estudo 1.1. - Linha aérea MT 44
Tabela 11 – Caso de estudo 1.2. - Linha aérea BT 45
Tabela 12 – Caso de estudo 1.2. - Linha aérea MT 45
Tabela 13 – Caso de estudo 1.3. - Linha aérea BT 46
Tabela 14 – Caso de estudo 1.3. - Linha aérea MT 46
Tabela 15 – Caso de estudo 1.4. - Linha aérea BT 47
Tabela 16 – Caso de estudo 1.4. - Linha aérea MT 47
Tabela 17 – Caso de estudo 1.5. - Linha aérea BT 48
Tabela 18 – Caso de estudo 1.5. - Linha aérea MT 48
Tabela 19 – Caso de estudo 1.6. - Linha aérea BT 49
Tabela 20 – Caso de estudo 1.6. - Linha aérea MT 49
Tabela 21 – Caso de estudo 1.7. - Linha aérea BT 50
Tabela 22 – Caso de estudo 1.7. - Linha aérea MT 50
Tabela 23 – Caso de estudo 1.8. - Linha aérea BT 51
Tabela 24 – Caso de estudo 1.8. - Linha aérea MT 51
Tabela 25 – Caso de estudo 1.9. - Linha aérea BT 52
Tabela 26 – Caso de estudo 1.9. - Linha aérea MT 52
Tabela 27 – Resultados dos casos de estudo em forma compacta; Sim = a construção da linha é economicamente vantajosa; Não = a construção da linha não é economicamente vantajosa; NA – Não se aplica; Sim 50% - a construção da linha é economicamente vantajosa para repartições de carga superiores a 50% da potência de ponta. 55
Tabela 28 – Caso de estudo 2.1.- Linha aérea BT 56
Tabela 29 – Caso de estudo 2.1. - Linha aérea MT 56
Tabela 30 – Caso de estudo 2.2. - Linha aérea BT 57
Tabela 31 – Caso de estudo 2.2. - Linha aérea MT 57
Tabela 32 – Caso de estudo 2.3. - Linha aérea BT 58
Tabela 33 – Caso de estudo 2.3. - Linha aérea MT 58

Tabela 34 – Análise de sensibilidade 1 - Gerador Diesel e linha aérea BT; MR pequena e média 62
Tabela 35 – Análise de sensibilidade 1 - Gerador Diesel e linha aérea MT; MR média e grande 63
Tabela 36 – Análise de sensibilidade 1 - Gerador GN e linha aérea BT; MR pequena e média 64
Tabela 37 – Análise de sensibilidade 1 - Gerador GN e linha aérea MT; MR média e grande 65
Tabela 38 – Análise de sensibilidade 1 - Gerador FV + Bateria e linha aérea BT; MR pequena e média 66
Tabela 39 – Análise de sensibilidade 1 - Gerador FV + Bateria e linha aérea MT; MR média e grande 67
Tabela 40 – Análise de sensibilidade 2 - Gerador Diesel e linha aérea BT; MR pequena e média 69
Tabela 41 – Análise de sensibilidade 2 - Gerador Diesel e linha aérea MT; MR pequena, média e grande 70
Tabela 42 – Análise de sensibilidade 2 - Gerador GN e linha aérea BT; MR pequena e média 71
Tabela 43 – Análise de sensibilidade 2 - Gerador GN e linha aérea MT; MR pequena, média e grande 72
Tabela 44 – Análise de sensibilidade 2 - Gerador FV + Bateria e linha aérea BT; MR pequena e média 73
Tabela 45 – Análise de sensibilidade 2 - Gerador FV + Bateria e linha aérea MT; MR pequena, média e grande 74
Tabela 46 – Análise de sensibilidade 3 - Gerador Diesel e linha aérea BT; MR pequena e média 76
Tabela 47 – Análise de sensibilidade 3 - Gerador Diesel e linha aérea MT; MR média e grande 76
Tabela 48 – Análise de sensibilidade 3 - Gerador GN e linha aérea BT; MR pequena e média 77
Tabela 49 – Análise de sensibilidade 3 - Gerador GN e linha aérea MT; MR média e grande 77
Tabela 50 – Parâmetros do cabo subterrâneo de BT 85
Tabela 51 – Parâmetros do cabo subterrâneo de MT 85
Tabela 52 – Caso de estudo 1 - Cabo subterrâneo BT 86
Tabela 53 – Caso de estudo 1 - Cabo subterrâneo MT 86
Tabela 54 – Caso de estudo 2 - Cabo subterrâneo BT 87
Tabela 55 – Caso de estudo 2 - Cabo subterrâneo MT 87
Tabela 56 – Caso de estudo 3 - Cabo subterrâneo BT 88
Tabela 57 – Caso de estudo 3 - Cabo subterrâneo MT 88

Tabela 58 – Caso de estudo 4 - Cabo subterrâneo BT 89
Tabela 59 – Caso de estudo 4 - Cabo subterrâneo MT 89
Tabela 60 – Caso de estudo 5 Cabo subterrâneo BT 90
Tabela 61 – Caso de estudo 5 - Cabo subterrâneo MT 90
Tabela 62 – Caso de estudo 6 - Cabo subterrâneo BT 91
Tabela 63 – Caso de estudo 6 - Cabo subterrâneo MT 91
Tabela 64 – Caso de estudo 7 - Cabo subterrâneo BT 92
Tabela 65 – Caso de estudo 7 - Cabo subterrâneo MT 92
Tabela 66 – Caso de estudo 8 - Cabo subterrâneo BT 93
Tabela 67 – Caso de estudo 8 - Cabo subterrâneo MT 93
Tabela 68 – Caso de estudo 9 - Cabo subterrâneo BT 94
Tabela 69 – Caso de estudo 9 - Cabo subterrâneo MT 94
Tabela 70 – Caso de estudo 1 - Linha aérea BT 95
Tabela 71 – Caso de estudo 1 - Linha aérea MT 95
Tabela 72 – Caso de estudo 2 - Linha aérea BT 96
Tabela 73 – Caso de estudo 2 - Linha aérea MT 96
Tabela 74 – Caso de estudo 3 - Linha aérea BT 97
Tabela 75 – Caso de estudo 3 - Linha aérea MT 97

Abreviaturas e Símbolos

- Sistema de Energia Elétrica– SEE
- Microrrede – MR
- Microgeração – MG
- Produção Dispersa – PD
- Baixa Tensão – BT
- Média Tensão – MT
- Alta Tensão – AT
- Microfonte – MF
- Gás Natural – GN
- Fotovoltaico – FV
- Levelized Cost of Energy – LCOE

1. Introdução

1.1. Enquadramento

No passado, os Sistemas de Energia Elétrica (SEE) baseavam-se em grandes centrais produtoras de energia elétrica, usando combustíveis fósseis (principalmente, gás natural e carvão). A energia elétrica assim produzida era depois transmitida através de linhas de Muito Alta Tensão (MAT) a grandes distâncias, sendo, por fim, distribuída aos consumidores já numa tensão adequada ao consumo. O fluxo energético fazia-se unicamente de montante (centrais produtoras) para jusante (consumidores).

Este paradigma tem, ao longo dos últimos anos, sofrido alterações, passando a integrar um novo conceito de produção descentralizada de energia elétrica de pequena potência, utilizando recursos renováveis ou tecnologias de geração mais eficiente. Os sistemas passivos com fluxo de energia unidirecional das altas para as baixas tensões tendem a tornar-se redes ativas com fluxo de energia bidirecional [1].

Esta mudança tem sido impulsionada pelos desenvolvimentos nos sistemas de produção de energia de baixa potência, ao nível da microgeração (MG) que, juntamente com as preocupações ambientais e políticas energéticas de suporte e apoio, possibilitou o crescimento das fontes de Produção Dispersa (PD), principalmente usando energias renováveis, diretamente ligadas nas redes de Baixa Tensão (BT) ou Média Tensão (MT).

Estes fatores levaram a uma alteração/evolução do sistema elétrico que se traduziu no aparecimento do conceito de microrrede (MR): uma rede de distribuição local em BT que associa equipamentos de PD (painéis fotovoltaicos, células de combustível, etc.), dispositivos de armazenamento (baterias, bancos de condensadores, …), cargas (consumidores) e uma estrutura de controlo responsável pela gestão e controlo da MR [2].

Uma das características distintivas das MR é a capacidade de poderem operar, tanto interligadas com a rede de distribuição de MT ou BT local, como de forma isolada da rede. Desta maneira, a fiabilidade da MR é aumentada, uma vez que passa a haver duas formas de alimentar as cargas (a rede local de BT ou MT e as fontes de MG da MR).

Dado a elevada integração de PD, a MR pode proporcionar uma distribuição de energia mais eficiente. Por exemplo, as perdas energéticas nas linhas reduzem-se, dado que a distância elétrica entre produção e consumo fica diminuída. A diminuição de perdas e o aumento da eficiência energética podem levar a ganhos relevantes a nível económico. Desta forma, a sustentabilidade da produção de energia centralizada tem sido questionada, porque a construção e expansão de novas centrais tradicionais obriga a uma reestruturação e investimento na rede de energia elétrica existente. As MR, apesar de não conseguirem competir em termos de capacidade de produção com as centrais convencionais existentes, podem ser competitivas,

acompanhando o crescimento do sistema elétrico, e tornando os mercados de eletricidade menos voláteis e com preços mais acessíveis.

O aparecimento da PD interligada na rede BT ou MT tem potencial para diminuir, a prazo, o custo da fatura energética dos consumidores, bem como proporcionar já a produção de energia livre da poluição associada aos combustíveis fósseis. No entanto, os SEE tradicionais oferecem ainda riscos menores e maior segurança para os consumidores e estão fortemente implantados na sociedade atual [3].

O principal obstáculo na economia das MR está associado aos seus custos de instalação, que podem ser proibitivamente elevados, inviabilizando, assim, a expansão das MR, em especial quando comparados com as soluções de abastecimento tradicionais através da rede local. Os custos de instalação devem, no entanto, ser analisados de forma abrangente, tendo em consideração a evolução económica das MR (a tendência é para a diminuição dos custos de produção de energia usando fontes renováveis) e os benefícios para os consumidores. A capacidade de funcionamento em sistema isolado deve ser explorada, não descurando os custos adicionais de manutenção da MR para garantir a respetiva fiabilidade [4].

1.2. Motivação e Objetivos

Tudo aponta para que o futuro do SEE se encontre intrinsecamente ligado ao conceito de MR, o que torna este tema muito aliciante de ser estudado. Com a massificação da utilização de MG e a crescente integração de PD, a passagem do conceito de MR da teoria à prática, está a tornar-se uma realidade. A possibilidade de identificar possíveis soluções para a expansão das MR, em particular através de uma análise económica da sua operação, quer em funcionamento isolado, quer interligadas com a rede local, é a principal motivação para esta dissertação.

A aceitação das MR e a sua viabilidade estão significativamente relacionadas com questões de natureza económica. Um dos aspetos mais importantes da economia de uma MR é a sua relação com o sistema de distribuição de eletricidade local. Na verdade, como se referiu anteriormente, a MR pode funcionar ligada à rede de distribuição, através de uma linha aérea ou cabo subterrâneo de BT ou MT, dependendo do nível de tensão da rede, ou isoladamente, recorrendo a geradores locais [4].

O objetivo principal desta dissertação é identificar e avaliar as situações em que é economicamente vantajoso construir uma linha de interligação à rede local. O parâmetro de comparação é o custo médio atualizado de energia ou LCOE – Levelized Cost Of Energy, como é vulgarmente conhecido [5]. Este indicador é habitualmente usado para calcular o custo de produção de eletricidade numa central elétrica, mas nesta tese este conceito é estendido ao custo de transmissão de energia numa linha elétrica, integrando o custo fixo, custo variável e custo das perdas.

Para o efeito do cumprimento do objetivo enunciado, construiu-se um modelo económico de análise, cujas entradas são os diversos custos (por exemplo, investimento no sistema de MG, custos de operação e manutenção, custos de combustível, investimento total na linha, incluindo custos das perdas, etc.) e a saída é o LCOE, para cada cenário representativos da MR a operar tanto no modo isolado, como no modo interligado. De forma a atingir cenários credíveis, variaram-se a dimensão das cargas da MR (pequena, média e grande), a tecnologia de MG (diesel, gás natural, solar fotovoltaico associado a bateria) e o tipo de linha de ligação à rede (linha aérea ou cabo subterrâneo, BT ou MT) e, para cada caso, estudou-se qual a situação mais atrativa financeiramente.

A estimação de custos é reconhecidamente uma tarefa difícil, pelo que se complementou o estudo realizado para os custos de referência, com uma análise de sensibilidade à variação dos diversos custos envolvidos.

1.3. Estrutura da Tese

Esta dissertação é constituída por 5 capítulos.

O presente capítulo é uma introdução com o objetivo de enquadrar o assunto tratado, onde se estabelecem os principais objetivos que se pretendem alcançar, assim como a motivação que levou à escolha do tema.

O segundo capítulo aborda a mudança de paradigma que está a ocorrer no SEE atualmente, nomeadamente o conceito de MR. É feito, igualmente, um levantamento possível do que é conhecido atualmente acerca do tema e da sua envolvente. Mais concretamente, abordam-se os conceitos e características da microgeração, microrredes e linhas de transporte de energia.

No terceiro capítulo é explicado o método utilizado para realizar o presente estudo, designadamente o indicador económico de comparação e avaliação das diferentes opções, e faz-se uma descrição das condições de simulação, ou seja, é feita a escolha e dimensionamento das variáveis de análise, de forma a poder construir diferentes casos de estudo.

No quarto capítulo, expõem-se os resultados numéricos alcançados através das simulações efetuadas, faz-se uma análise qualitativa dos mesmos e realizam-se alguns estudos de sensibilidade.

Por fim, retiram-se as conclusões da análise levada a cabo no capítulo anterior e sugerem-se futuros desenvolvimentos nesta área.

2. A Mudança de Paradigma e o Conceito de Microrrede

Nos primeiros tempos de produção e fornecimento de eletricidade, cada cidade tinha a sua central de produção de energia elétrica, a qual supria as necessidades energéticas através de uma pequena rede elétrica local. O SEE era constituído por um conjunto de redes isoladas.

Os progressos entretanto verificados na transmissão da energia elétrica permitiram que os sistemas elétricos se desenvolvessem em redes malhadas, o que, aliado à convicção que as reservas de combustíveis fósseis de fácil extração eram praticamente inesgotáveis, levou a que a produção de energia elétrica se concentrasse em poucas centrais de elevada potência instalada, beneficiando da inerente economia de escala.

Estas centrais atingem atualmente potências instaladas superiores a 1000 MW, sendo as tensões de geração da ordem das dezenas de kV. Através dos transformadores elevadores, a tensão é elevada para níveis adequados ao transporte a grandes distâncias (150 kV, 220 kV, 400 kV) até às proximidades dos locais de consumo, sendo a energia elétrica entregue aos utilizadores por uma série de transformações de redução da tensão. Os fluxos de energia são unidirecionais, sempre de níveis superiores de tensão para níveis inferiores. A Fig. 1 [6] ilustra um SEE do século XX.

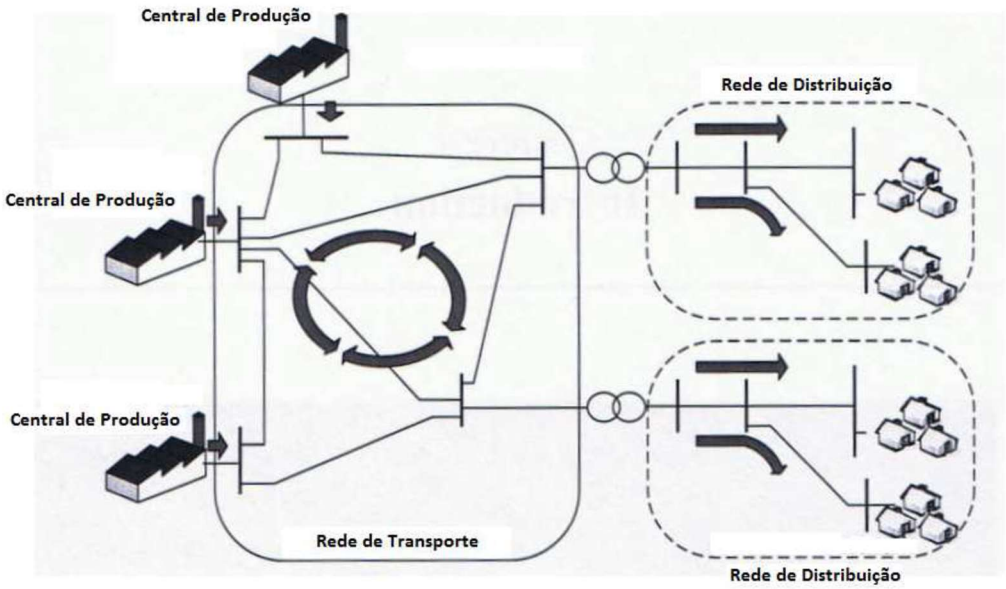

Figura 1 – SEE característico do século XX

A partir do início deste século, consolidou-se a realização de que os recursos petrolíferos eram finitos e a necessidade de reduzir as emissões de CO2, para enfrentar a ameaça das alterações climáticas. Estes factos, juntamente com os tempos de grande evolução tecnológica

que assistimos, originaram uma grande aposta na exploração de recursos não-poluentes para a produção de eletricidade.

Nos países da União Europeia (UE), em particular, foram definidas metas ambiciosas de forma a combater o aquecimento global. Os principais objetivos consistem na redução de agentes poluentes (emissões de CO2 e NOx, principalmente), aumento da eficiência energética e na diversificação das fontes de produção de energia com a utilização de energias renováveis. Na UE, os objetivos definidos para 2020 consistem na redução dos gases de efeito de estufa em 20% relativamente aos níveis de 1990, no aumento da eficiência energética em 20% e promover a utilização de energias renováveis de tal forma que o seu peso no conjunto energético global atinja os 20% [7].

As políticas de suporte e apoio promovidas pelos governos para responder a estas estratégias, originaram a proliferação de unidades de microgeração em vários locais da rede de distribuição, reforçando, assim, o conceito de produção dispersa e a ideia da utilização dos recursos energéticos distribuídos, recorrendo a fontes de produção não convencionais (por exemplo, cogeração, resíduos sólidos urbanos, gás natural) e energias renováveis (por exemplo, biogás, energia eólica, fotovoltaica, ondas e marés, células de combustível, microturbinas).

Em geral, a PD pode ser ligada em vários níveis de tensão da rede de distribuição. Os geradores mais pequenos podem ser ligados à rede de distribuição BT, mas também existe a possibilidade de ligar geradores de potências superiores à rede de distribuição, quer em MT, quer em AT. Quando a ligação se dá em BT ou MT costuma falar-se em microgeração; se a ligação for em AT, fala-se em produção descentralizada. Na Fig. 2 [6] mostra-se, do lado esquerdo, um SEE do século XX, e do lado direito, um SEE atual.

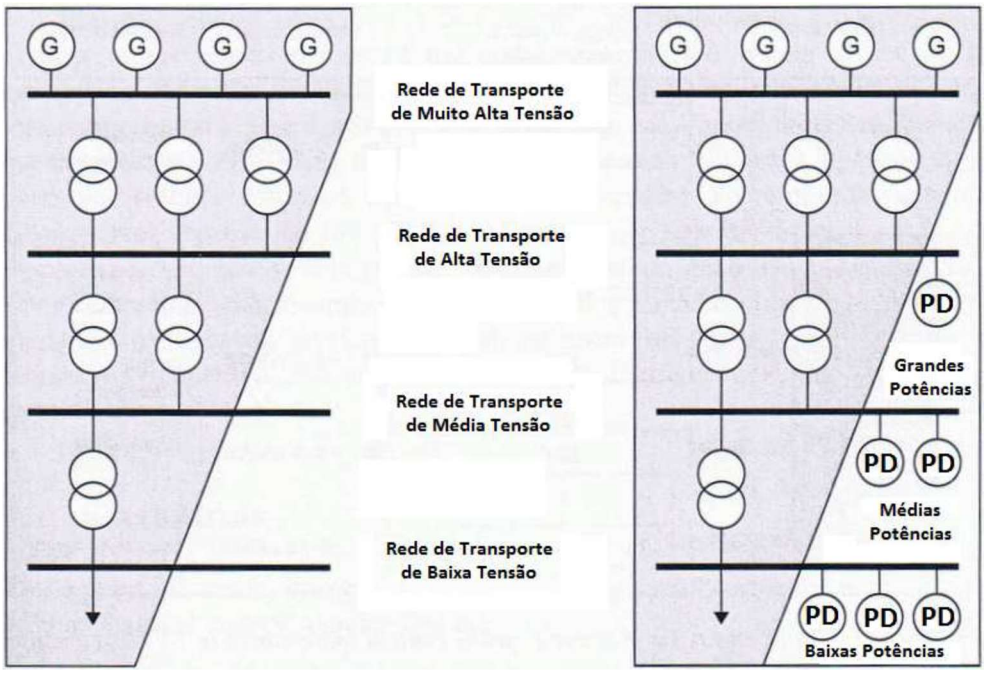

Figura 2 – Esquema representativo de um SEE do século XX (à esquerda) e de um SEE atual (à direita); PD –Produção Dispersa; G – Geração; 2 circunferências interlaçadas – transformadores; seta – carga de BT

Conforme referido anteriormente, a integração de PD no SEE implica que a rede de distribuição evolua de uma rede passiva para uma rede ativa. A ligação das unidades de microgeração sobre as redes de BT ou MT, em conjunto com o controlo da procura, pode configurar o aparecimento de um novo tipo de agente – a Microrrede [8].

Neste capítulo, procederemos à revisão dos principais conceitos falados até aqui e que são relevantes para a compreensão do problema em estudo. É apresentado o conceito, a estrutura e os modos de funcionamento e de operação das microrredes. Vamos, igualmente, expor o conceito de microgeração e referir as tecnologias de microgeração existentes, centrando, especificamente, no gerador solar fotovoltaico (FV), gerador a diesel e a gás natural. Referem-se também as tecnologias de armazenamento de energia, essenciais numa MR, destacando-se, em particular, as baterias. Por fim, serão apresentadas as características das linhas de transporte de energia, com especial foco nas linhas de baixa e média tensão.

2.1. Microrrede

2.1.1. Conceito, estrutura e características

O conceito de microrrede consiste num sistema integrado com recursos de energia distribuídos e várias cargas elétricas que operam como uma rede única e autónoma. As microrredes geram, distribuem e regulam o fluxo de eletricidade aos consumidores. Elas, no fundo, imitam, em menor escala, o grande sistema elétrico centralizado. Mas, ao contrário da rede centralizada, não são as empresas de serviço público de energia elétrica que são as suas proprietárias e as gerem. As microrredes podem ser propriedades construídas e operadas por uma comunidade, universidade, corporação, hospital, de forma individual, ou por qualquer outra entidade que tenha autoridade legal sobre sua infraestrutura de energia elétrica [9].

As MR apresentam três elementos chaves ligados entre si numa rede de distribuição de BT, comandados por um sistema de controlo e gestão. Estes elementos chave são as unidades de microgeração, os armazenadores de energia e as cargas. Na Fig. 3 mostra-se o conceito de MR. Nela podem ver-se, por exemplo, os microgeradores (eólicos e FV), as baterias centralizadas, os veículos elétricos, com as respetivas baterias descentralizadas, as cargas, representadas por setas azuis, etc. Pode ainda ver-se o transformador MT/BT e as linhas elétricas BT.

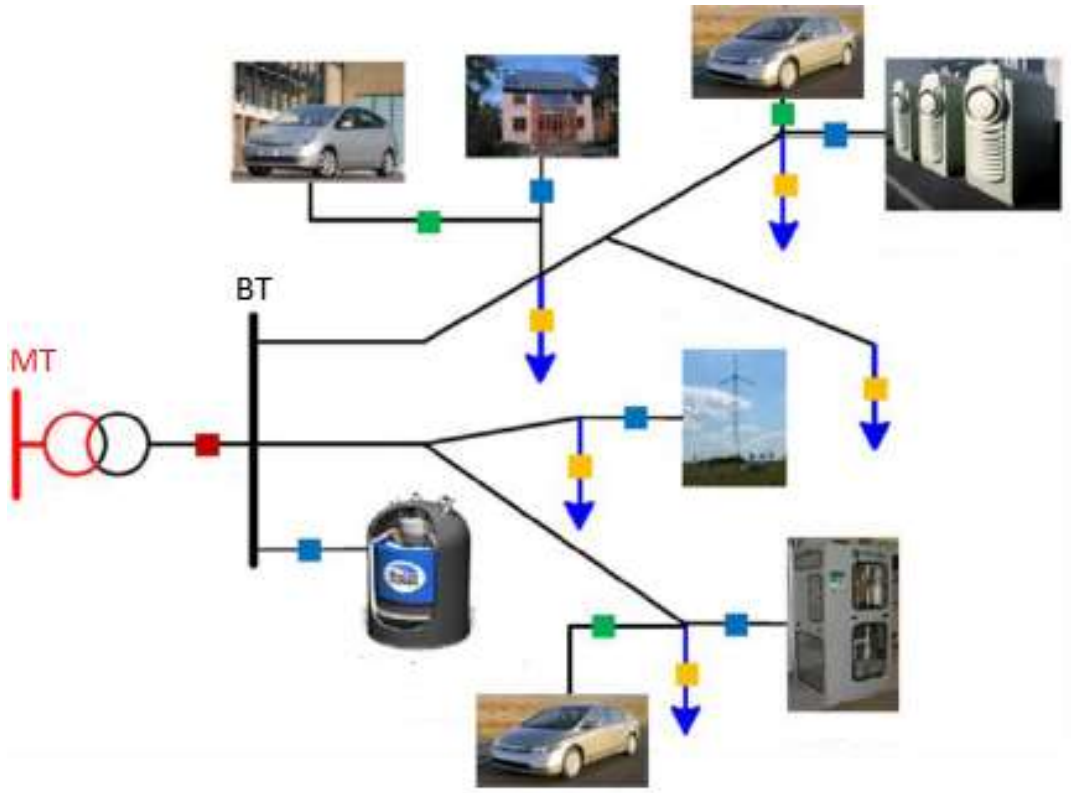

Figura 3 – Ilustração de uma microrrede

Os microgeradores, dos quais iremos falar mais detalhadamente na secção 2.2, são geralmente de origem renovável, mas não obrigatoriamente, e geram energia no nível da tensão de distribuição BT.

Os sistemas de armazenamento de energia, em particular as baterias, (de que falaremos na secção 2.1.3) são extremamente importantes nas MR, principalmente quando estamos a lidar com fontes de energia "não despacháveis", como são a maioria das energias renováveis, de forma a garantir um fornecimento seguro e ininterrupto de energia. As baterias dos veículos elétricos podem ser geridas como se de qualquer outra bateria se tratasse.

As cargas numa MR referem-se aos consumidores de energia elétrica. Existem diversos tipos de consumidores: domésticos, comerciais, industriais, hotelaria, entre outros. Cada um destes consumidores tem necessidades de consumo específicas. Na Fig. 4 [10] podemos ver exemplos de diagramas de carga diários característicos, dos consumidores mencionados anteriormente.

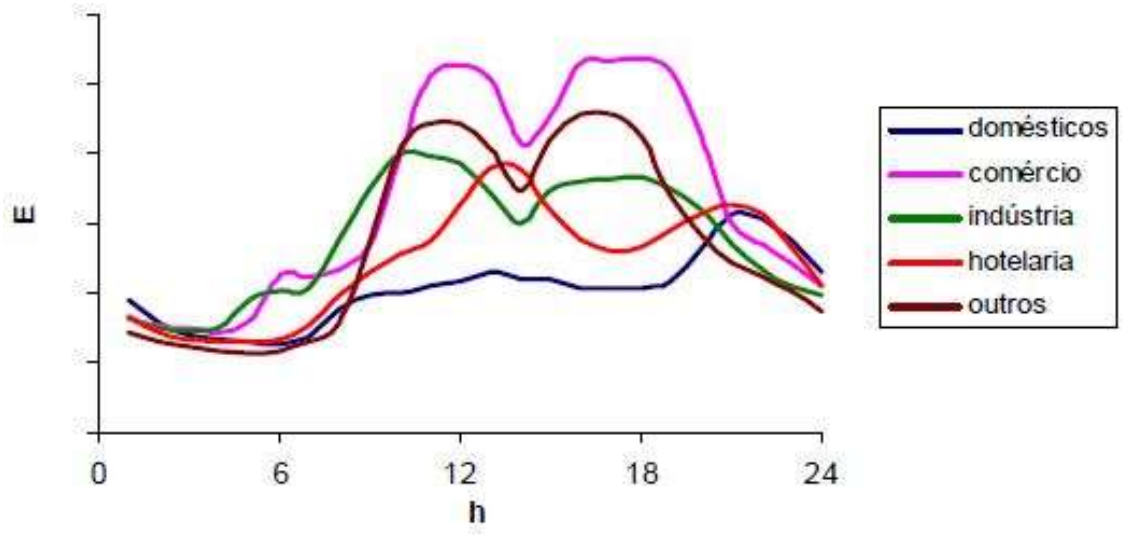

Figura 4 – Exemplos de diagramas de carga diários

A ligação entre a MG e a rede de distribuição é feita com recurso a sistemas de eletrónica de potência, os inversores. Não é possível ligar diretamente os microgeradores à rede, uma vez que estes geram energia em corrente contínua (como é caso das células de combustível ou painéis FV) ou em corrente sinusoidal, mas a altas frequências (microturbinas a gás), sendo necessária a ligação de um inversor entre MG e a rede para proceder à conversão de frequências.

A principal diferença das microrredes, quando comparadas com a rede de energia convencional que existe hoje em dia, é o facto de se trabalhar numa escala muito mais pequena, tanto a nível de tensões e potências, como a nível de infraestruturas. Assim, numa MR [1]:

- os sistemas de microgeração são de muito menor capacidade quando comparados com os geradores das grandes centrais elétricas;
- a energia é gerada em BT ou MT podendo ser fornecida diretamente às cargas, através dos inversores; esta proximidade entre fontes e cargas permite uma redução das perdas e um fornecimento de energia mais eficiente;
- os habituais consumidores podem ser, simultaneamente, produtores de energia, dando origem ao conceito de prosumer (producer+consumer).

A implementação e desenvolvimento das microrredes no sistema elétrico podem trazer benefícios, dos quais se destacam [11]:

- O aumento da fiabilidade – as microrredes podem ligar-se à rede pública, ou até a outras microrredes, quando a procura é elevada.
- Facilitam a resposta ao crescimento da procura – as microrredes permitem que comunidades locais, vizinhanças e até mesmo prédios individuais aumentem rapidamente o fornecimento de eletricidade com recurso a pequenos geradores locais.

- Incentivam as energias renováveis – o facto de as microrredes incluírem, localmente, baterias e armazenadores de energia, permite uma maior flexibilidade para explorar uma gama muito maior de fontes de energia, nomeadamente aquelas que se apresentam como um desafio para o atual sistema centralizado, tais como a eólica ou solar fotovoltaica.
- Maior controlo sobre o preço da eletricidade – as microrredes podem ser construídas à escala dos seus consumidores, seja um único edifício, seja uma pequena comunidade, podendo, por isso, ser estabelecidos serviços personalizados de energia com o melhor preço para cada consumidor. Desta forma, existiriam vantagens tanto para os consumidores, que teriam controlo sobre o preço que pagam pela eletricidade, como para os produtores que teriam um incentivo de mercado (a concorrência) para aumentarem a sua eficiência.

2.1.2. Funcionamento e Operação

A MR tem dois modos de funcionamento distintos: modo normal interligado ou modo isolado [12].

No primeiro, a Microrrede está ligada à rede pública de BT ou, sendo alimentada total ou parcialmente por esta, e podendo inclusive haver injeção de potência na rede pública quando a potência gerada pela microgeração é superior à consumida na Microrrede. Esta opção pode aumentar capacidade, fiabilidade e eficiência, tanto da rede pública de eletricidade como da própria MR.

No modo isolado, a MR funciona desligada da rede pública, operando de uma forma autónoma, satisfazendo o consumo energético com base apenas nos recursos locais.

Atualmente, o modo de operação mais utilizado é o interligado à rede, sendo o modo isolado utilizado apenas em situações de emergência, nomeadamente, aquando da ocorrência de um defeito na rede pública de energia. O futuro, no entanto, deve passar pelo funcionamento isolado autossustentável, onde cada MR poderá interagir com as MR vizinhas, num sistema ativo, inteligente e cooperativo (ver Fig. 5).

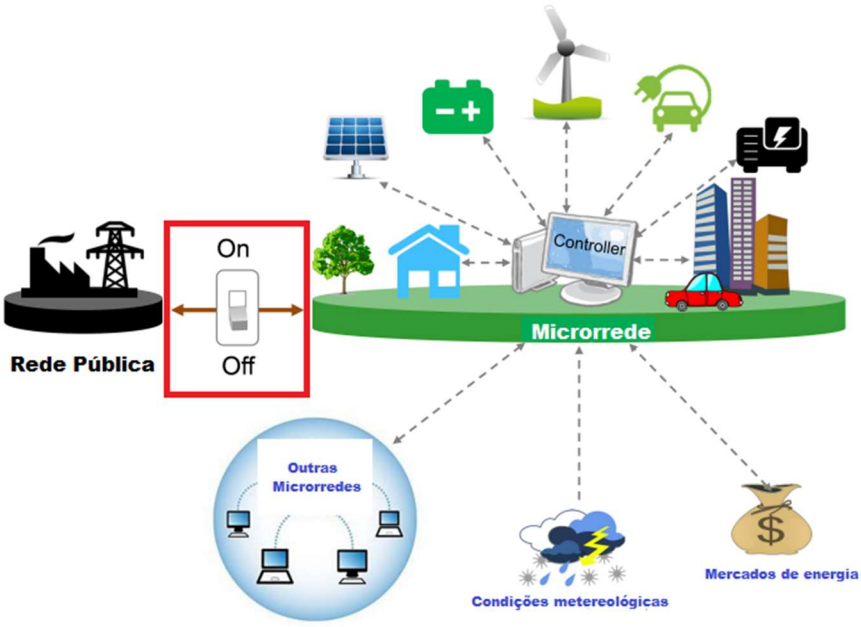

Figura 5 – Microrrede do futuro

Estas características das MR tornam possível o fornecimento de energia a locais remotos, onde o abastecimento de energia é difícil, devido ao terreno acidentado ou clima instável.

A arquitetura da microrrede é definida conforme o segmento em que ela é aplicada [3]:

- MR comunitária – associada a uma comunidade;
- MR da distribuidora – é construída e mantida pela empresa distribuidora, está localizada próximo de um grande centro de carga e que a utiliza como forma de reduzir perdas e suprir picos de carga;
- MR comercial/industrial – associada a centros comercias, fábricas ou hospitais, locais onde o fornecimento de energia deve ser ininterrupto;
- MR militar – as bases militares precisam de estar ativas em caso de guerra e de uma possível falha na rede elétrica.

2.2. Microgeração

2.2.1. Conceito

A microgeração pode ser definida como um sistema de produção de energia elétrica a partir de instalações de dimensões e potências pequenas, adequadas à BT, ou eventualmente à MT. As unidades geradoras de energia, em microgeração, são chamadas de microfontes (MF) ou microgeradores e podem funcionar recorrendo a recursos renováveis ou não renováveis. O

investimento na MG, em particular da renovável, é fortemente incentivado pelas entidades oficiais devido, principalmente, às vantagens ecológicas e ambientais que daí advêm, mas não só. A integração da MG na rede tem também benefícios no funcionamento do SEE, dos quais de destacam [13]:

- Descongestionamento de linhas de distribuição e consequente redução de perdas;
- Melhoria de qualidade de serviço e aumento de fiabilidade do sistema;
- Evita o investimento no reforço das infraestruturas da rede;
- Dá mais autonomia e poder de decisão aos consumidores individuais e às comunidades locais.

No entanto, a inclusão destas tecnologias descentralizadas, traz consigo novos problemas e desafios ao nível do funcionamento do SEE. O trânsito de potência, que era originalmente apenas unidirecional (das centrais produtoras para os consumidores), passa agora a poder ser bidirecional, uma vez que os consumidores podem também ser produtores e injetarem energia na rede, o que representa, por si só, um novo desafio relativamente ao dimensionamento da rede e dos seus componentes [13].

De destacar, igualmente, os possíveis problemas operacionais na rede, que a introdução da MG pode trazer, se for feita de forma desregulada e massiva, como por exemplo:

- Alteração dos perfis de tensão
- Aumento da potência de curto-circuito
- Aumento da taxa de distorção harmónica

Adicionalmente às dificuldades técnicas, a inclusão da microgeração levanta outras questões. Como medir essa geração? Qual é o preço justo a pagar pela energia vinda de uma microrrede? Como podem as microrredes ser despachadas ou controladas, especialmente as que são desenvolvidas pelos próprios consumidores?

Desta forma, quando se pensa num elevado volume de integração de MG numa dada rede, é importante considerar a necessidade de proceder a uma mudança de paradigma na operação da mesma, sendo que o principal objetivo passa por combinar todos os benefícios das fontes de energia de pequena potência de forma a melhorar a qualidade na produção de energia e aumentar a eficiência.

2.2.2. Tecnologias

Os microgeradores ou as microfontes integradas nas microrredes utilizam, na maior parte das vezes, recursos renováveis, embora também haja sistemas de microgeração que funcionam com base em combustíveis fósseis, nomeadamente aqueles que estão associados à geração de *backup* ou emergência. No entanto, o plano, na implementação das MR, passa por uma maior aposta nas energias renováveis, de forma a contribuir para um planeta mais limpo e sustentável.

Dentro dos geradores de fontes renováveis distinguem-se, por exemplo, o solar FV, o eólico ou o mini-hídrico. Na geração com base em recursos não-renováveis temos, por exemplo, os geradores a combustível *diesel* ou a gás natural (GN).

Existem 3 fatores que são considerados quando se avaliam as fontes de energia: a estabilidade da geração de energia, a capacidade de acompanhar as mudanças de carga e a disponibilidade da fonte. Os geradores baseados na combustão são mais estáveis, pois a taxa de queima da mistura combustível/ar controla a geração de energia, ou seja, a saída de potência ativa é controlável sendo, por isso, capaz de responder rapidamente às mudanças de carga. As microturbinas eólicas e painéis fotovoltaicos produzem uma saída variável de energia que não é, normalmente, controlável. Um problema destes equipamentos nas microrredes é a possibilidade de gerar um efeito chamado "voltage flicker" devido à forma inconstante da tensão de saída. Nenhum destes geradores é capaz de acompanhar as mudanças de carga [14].

Em conclusão, relativamente ao despacho nestes tipos de microgeração, os equipamentos baseados na combustão são facilmente despacháveis. Painéis fotovoltaicos e geração eólica não são despacháveis, pois, a fonte de energia nem sempre está disponível. Pequenas unidades hidroelétricas podem ou não ser despacháveis, dependendo do nível do reservatório.

Neste capítulo, vamos dar destaque ao gerador solar fotovoltaico e ao gerador tanto a *diesel* como a GN, porque irão ser os utilizados no estudo económico que iremos fazer mais à frente neste trabalho (ver Fig. 7).

Figura 6 – a) Gerador Fotovoltaico b) gerador a diesel c) gerador a GN

2.2.2.1. Gerador Solar Fotovoltaico

Um sistema fotovoltaico gera energia elétrica a partir da radiação solar. A geração fotovoltaica é obtida por um processo de conversão realizado através de células de silício que, ligadas em série e montadas numa estrutura, formam um módulo ou painel. A energia em corrente contínua produzida pelos módulos fotovoltaicos transforma-se mediante um inversor de corrente contínua para corrente alternada na mesma tensão e frequência que a do distribuidor. Na Fig. 7 mostra um sistema de geração FV para uso doméstico.

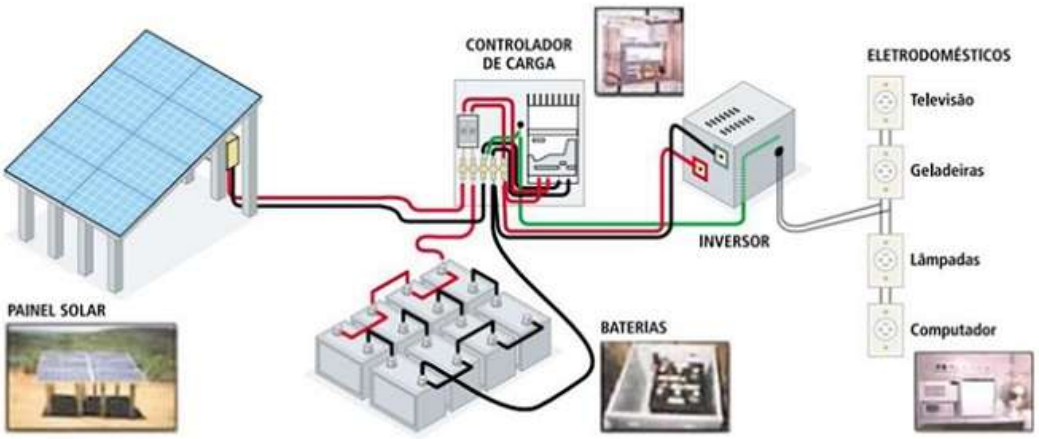

Figura 7 – Sistema de geração FV

Uma célula fotovoltaica é capaz de gerar uma tensão em circuito aberto entre 0,5V e 1,0V e uma corrente de curto-circuito de algumas dezenas de miliamperes por cm^2. Dado que estes valores são muito diminutos para a maioria das aplicações, agregam-se várias células fotovoltaicas em paralelo e em série, de modo a obter os valores de tensão e corrente desejados.

Os módulos comercialmente disponíveis, atualmente, têm um rendimento de aproximadamente 15% e podem produzir potências da ordem das centenas de watt. Aliado ao baixo rendimento obtido, a energia solar não está sempre disponível. A radiação solar varia ao longo do ano e do dia e depende das condições climatéricas e, por isso, não deve ser utilizada como única forma de alimentar uma carga isolada. Associado ao gerador fotovoltaico, deve estar, por isso, um sistema de armazenamento de energia (bateria) ou um gerador a *diesel*, de forma a poder suprir possíveis falhas na procura de energia por parte do consumidor, quando a radiação solar é nula ou diminuta. Este problema não se coloca quando a instalação FV está a injetar na rede toda a sua produção.

Estes sistemas apresentam um impacto ambiental reduzido, baixo custo de manutenção (não há partes móveis), um funcionamento silencioso e um elevado tempo de vida útil (entre 20 a 30 anos). Têm como fonte, um recurso gratuito e inesgotável, como é sol, o que contribui para uma redução no preço de produção de energia, por serem nulos os custos de combustível, embora os custos de investimento não o sejam [15].

Nos últimos anos, os painéis FV registaram uma diminuição significativa do seu custo de investimento, sendo hoje uma tecnologia economicamente competitiva, tanto com outras renováveis, como é o caso do eólico e do hídrico, como com tecnologias baseadas em combustíveis fósseis.

2.2.2.2. Geradores de combustível fóssil (Diesel e GN)

Dentro dos grupos geradores não-renováveis, consideraram-se duas hipóteses de combustível, *diesel* e gás natural (GN), cada um com as suas caraterísticas próprias.

Estes geradores são equipamentos capacitados para fornecer energia elétrica por meio da queima de um combustível. São compostos, essencialmente, por um tanque de combustível, um motor e um alternador, como se pode ver na Fig. 8.

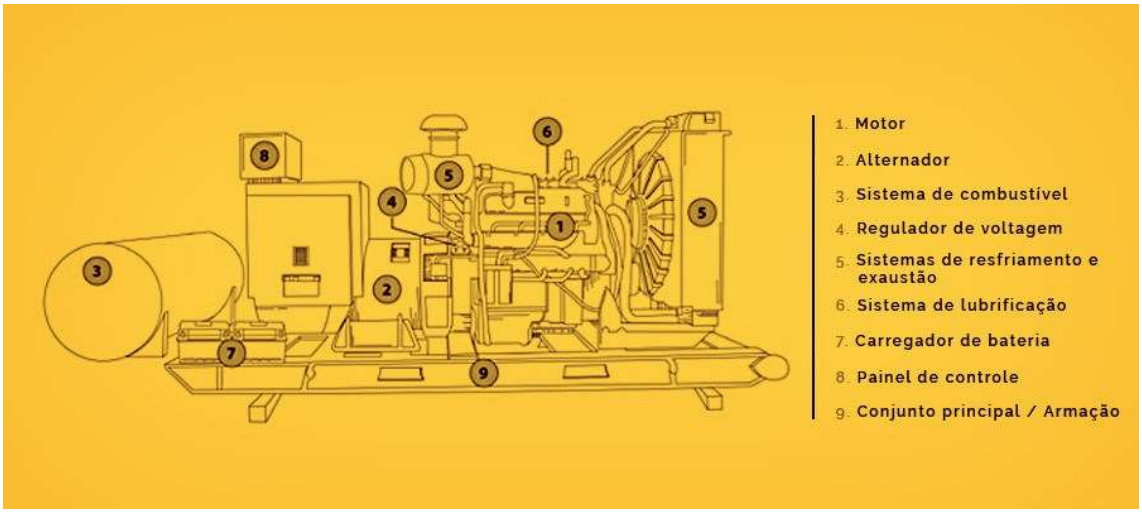

Figura 8 – Esquema de um gerador de combustível fóssil

O motor, responsável pelo acionamento do grupo gerador, inicia o processo de compressão do ar, sendo, ou simultaneamente injetado o gás natural, ou injetado posteriormente o combustível, no caso do diesel. Esta combinação gera calor, fazendo com que o combustível inflame e ocorra a queima do mesmo, que, por sua vez, movimenta o eixo central. Com a ajuda de um alternador, a energia mecânica derivada dessa movimentação é transformada em energia elétrica.

Os grupos geradores são controlados por sensores e equipamentos prontos para supervisionar o funcionamento de todo o conjunto de forma independente, a fim de inspecionar a temperatura, pressão, rotação, nível de óleo, tensão, frequência, entre outros fatores que são primordiais para que o grupo gerador forneça a potência solicitada de forma segura.

Analisando os dois tipos de geradores em estudo, diesel e GN, ambos são considerados fontes de energia poluentes, uma vez que os dois funcionam com base na combustão do combustível, que resulta na emissão de gases nocivos para a atmosfera. Assim, usam-se catalisadores, de forma a reduzir estas emissões, embora não as evitando totalmente. O GN é, no entanto, considerado um combustível mais limpo que outros combustíveis não renováveis, uma vez que as suas emissões são inferiores.

Em termos de rendimento, os valores são idênticos para os dois sistemas, entre os 30 e 40%, com um consumo típico de 0,25 litros por kWh gerado para o *diesel* e de 0,3 Nm^3/kWh para o GN.

Em relação aos custos, existem algumas diferenças. Por exemplo, o investimento inicial num sistema de GN é cerca do dobro dum sistema *diesel*, quando comparado em € por kW de potência instalada, pois o gerador e o sistema de controlo são mais exigentes. No entanto, o motor a GN tem maior durabilidade e, como consequência, menor custo de manutenção [16].

Em zonas urbanas, num gerador a *diesel,* existe a necessidade de armazenamento do combustível, como tal são precisos cuidados adicionais e medidas de segurança, para prevenir o risco de incêndios. No caso do gás natural, este problema é minorado, pois o gás é canalizado pela concessionária. No entanto, no caso de se tratar de uma MR localizada num local remoto, onde não existe uma rede elétrica, nem muito menos, uma rede de gás, esta vantagem da canalização do GN deixa de existir e é necessário haver um reservatório para o armazenamento de GN, à semelhança do que acontece com o diesel.

O *diesel* é fortemente recomendado para aplicações como fonte de emergência, sendo que o GN é mais indicado para situações de cogeração.

2.2.3. Baterias

Nos SEE tradicionais, as fontes de energia (carvão ou petróleo) são “despacháveis”, ou seja, operam em função da procura de energia. Por outro lado, a produção de energia a partir de recursos renováveis, apesar das suas vantagens ambientais, caracteriza-se por serem fontes intermitentes, pois estão dependentes das condições meteorológicas. São, por isso, fontes limitadas e restritivas. Esta característica é uma desvantagem, porque a oferta e a procura num SEE devem ser equilibradas num curto espaço de tempo.

Desta forma, o armazenamento de energia e a gestão ativa de carga são essenciais para assegurar o sucesso da implementação da MG a partir de energias renováveis. De facto, o sistema de armazenamento é um processo chave, dado que irá permitir transferir os excessos de energia, armazenada anteriormente nas horas de baixo consumo, para as horas de ponta. Estes sistemas são extremamente importantes nas MR, de forma a providenciar energia sempre que ela é necessária.

Os principais meios para armazenar energia existentes atualmente são as baterias, os bancos de super condensadores e as baterias eletromecânicas (flywheels). No estudo que vai ser realizado, vamos trabalhar com baterias, das quais vamos falar mais detalhadamente, de seguida.

A bateria é um sistema que armazena energia elétrica através de um processo eletroquímico. É constituída por células eletrolíticas, sendo que cada uma destas é, por sua vez, constituída por dois elétrodos, um positivo e um negativo, e por um eletrólito que pode ser sólido ou líquido. Quando aplicada uma carga a uma bateria carregada, a corrente fluirá no exterior da bateria, enquanto no interior, os iões, em cada célula, se deslocam de um elétrodo para outro, sendo a bateria descarregada durante este processo, como se pode observar na Fig.9. Esta reação é reversível, ou seja, é possível recarregar a bateria, sendo para tal necessário aplicar uma tensão aos terminais da mesma [17].

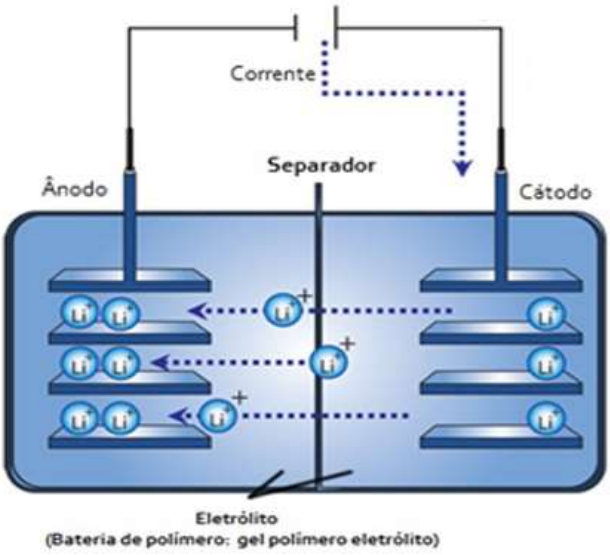

Figura 9 – Esquema de uma bateria

Apesar de ser considerado um sistema de armazenamento muito eficiente e o mais utilizado atualmente, as baterias tem duas desvantagens principais:

- Para armazenar quantidades de energia significativas, as baterias ocupam uma grande dimensão e são ainda proibitivamente dispendiosas.
- Têm um tempo de vida útil reduzido. Não são capazes de aguentar um grande número de ciclos de carga/descarga, sem que as suas capacidades e caraterísticas sejam diminuídas.

Ainda assim, espera-se que num futuro próximo, com o rápido avanço da tecnologia, estes inconvenientes sejam ultrapassados.

2.3. Ligação à Rede de Distribuição

Tal como foi referido anteriormente, uma microrrede pode funcionar isoladamente, mas também ligada à rede principal de distribuição. Esta ligação é feita através de linhas de transporte de energia, que podem ter diferentes particularidades.

As linhas podem ser aéreas ou subterrâneas, tomando neste caso o nome de cabos.

No caso da rede aérea, as linhas são constituídas por materiais condutores, em cobre ou alumínio, sendo suportados por apoios que podem ser de betão armado, madeira ou metálicos. Este tipo de rede é mais frequentemente utilizado nas zonas rurais e suburbanas.

Numa rede subterrânea, os cabos são igualmente compostos por cobre ou alumínio e são isolados por um material isolante, como por exemplo, o PVC (Policloreto de Vinilo). São instalados diretamente no solo, a uma profundidade mínima de 1 metro, ou em condutas nas

vias públicas. A rede subterrânea é utilizada preferencialmente em zonas urbanas e zonas de interesse arquitetónico, de modo a limitar o seu impacto visual.

Figura 10 – a) linhas aéreas b) corte transversal de um cabo subterrâneo

A instalação de cabos é bastante mais cara que a instalação de linhas aéreas, contudo, as linhas subterrâneas têm diversas vantagens associadas, nomeadamente: uma maior segurança, a já referida minimização de impactes visuais, minimização de custos de manutenção, uma vez que os cabos estão mais protegidos, o que se reflete num maior tempo de vida destes, menos perdas, entre outras. A grande desvantagem, a juntar ao custo elevado, está relacionada com a mais difícil resolução de avarias, pois tornam-se mais difíceis de localizar e implicam mais mão-de-obra e custos mais elevados.

As MR podem ser ligadas à rede de distribuição principal tanto em baixa como em média tensão.

As linhas de distribuição de baixa tensão constituem o veículo de distribuição de energia aos clientes de BT, a 400 V, no caso das alimentações trifásicas, e a 230 V, no caso das alimentações monofásicas. Uma linha com este nível de tensão tem grandes limitações ao nível do seu comprimento, uma vez que as perdas são muito significativas, sendo que as linhas de BT não costumam ter mais do que 1 km, de forma a manter a queda de tensão num valor aceitável [18].

Assim, quando a MR se encontra longe da rede, a ligação é feita a partir de linhas de MT e de um transformador MT/BT. As linhas de MT têm uma margem maior em termos de comprimento típico, podendo ter até mais de 5 km.

3. Modelo Económico de Análise

Tendo em conta a complexidade do problema e a variabilidade de cenários que se podem criar é necessário arranjar um método eficaz e eficiente que nos permita explorar o problema na sua plenitude.

Para isso, expõe-se, neste capítulo, o modelo económico construído para avaliar a rentabilidade económica da operação de uma MR, quer em funcionamento isolado, quer interligada à rede.

Em primeiro lugar, iremos quantificar o custo da eletricidade produzida por uma unidade de produção ou transportada por um sistema de transporte, de forma a poder comparar os diferentes casos de estudo e poder retirar resultados numéricos. Para tal, utilizou-se o custo médio atualizado de energia, ou Levelized Cost of Energy (LCOE), como passaremos a designá-lo. O LCOE é um indicador económico utilizado para medir o custo da unidade de eletricidade produzida (ou transportada) durante o ciclo de vida de um sistema produtor (ou de transporte) de energia elétrica [5].

De seguida, são descritas neste capítulo, as condições de simulação, nomeadamente as características e os custos associados das entidades que estão em jogo, ou seja, a MR, a tecnologia de MG e a linha de ligação à rede.

Por fim, é feita uma explicação do método utilizado para analisar os cenários de estudo.

3.1. Levelized Cost of Energy (LCOE)

O principal indicador do custo da eletricidade produzida durante o tempo de vida de uma unidade produtora de energia elétrica, seja ela de origem renovável ou não, é o custo médio atualizado da energia (Levelized Cost of Energy, com a sigla LCOE, em inglês) que permite comparar diferentes tecnologias de produção de eletricidade.

Este indicador é dado em €/kWh e considera os custos totais de um sistema produtor de energia elétrica durante o tempo de vida do sistema, nos quais se incluem os custos de investimento, os custos de operação e manutenção e os custos associados ao consumo de combustíveis fósseis, por unidade de eletricidade que o sistema irá produzir durante o mesmo período [5].

Nesta dissertação, vamos aplicar este indicador de uma forma inovadora, ou seja, para além de utilizá-lo num sistema de produção de energia, como habitualmente, vamos aplicá-lo para avaliar o custo médio atualizado da unidade de energia transportada por um sistema de transporte de energia. Esta é uma extrapolação que faz sentido, uma vez que os custos associados ao transporte de energia podem ser equiparados aos custos de um sistema produtor de energia. Assim, neste caso, serão incluídos os custos fixo e variável de investimento num sistema de transporte, o custo de venda de energia à MR por parte de um fornecedor externo, bem como o custo das perdas neste processo.

3.1.1. Caso geral

Em termos matemáticos, a expressão de cálculo é dada por:

$$LCOE = \frac{I_t + C_{o.m}k_a + C_{comb}k_a}{E_a k_a} = \frac{\frac{I_t}{k_a} + C_{o.m} + C_{comb}}{E_a} \quad (3.1)$$

com:

I_t – Investimento total [€]

$C_{o.m}$ – Custos anuais de Operação e Manutenção [€]

C_{comb} – Custos anuais de Combustível [€]

E_a – Energia elétrica produzida anualmente [kWh]

k_a – Fator de atualização

Considera-se que o investimento é totalmente realizado em t=0, que os custos de operação e manutenção e os custos de combustível são constantes em cada ano de análise e que a energia produzida anualmente também é constante.

O fator de atualização, k_a, é:

$$k_a = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{(1+a)^i} = \frac{(1+a)^n - 1}{a(1+a)^n} \quad (3.2)$$

a – Taxa de atualização

n – Tempo de vida útil do sistema [anos]

O LCOE é um custo antecipado e, para a sua mais correta determinação, é importante, não só a especificação correta dos diferentes custos associados a este indicador, assim como um conhecimento acertado da estimativa da energia elétrica produzida ao longo do ano. Torna-se, por isso, necessário conhecer com rigor o desempenho e respetiva variação do sistema em estudo ao longo do tempo de vida deste.

O tempo de vida do sistema depende da tecnologia envolvida e é medido em anos.

No caso dos geradores a gás natural ou a *diesel*, o custo de investimento é obtido de acordo com a potência nominal e tecnologia do sistema produtor, é dado em €, e calcula-se da seguinte forma:

$$I_t = I_t^{'} P_n \quad (3.3)$$

$I_t^{'}$ – Investimento unitário [€/kW]

P_n – Potência nominal do gerador [kW]

No caso de a tecnologia ser a solar FV, o sistema de produção inclui baterias, pelo que, em alternativa, o investimento será:

$$I_t = I_t^{'} P_p + I_t^{''} E_{armB} \tag{3.4}$$

P_p – Potência pico do sistema FV [kWp]

$I_t^{''}$ – Investimento unitário na bateria [€/kWh]

E_{armB} – Energia armazenada na bateria [kWh]

O custo anual total de operação e manutenção depende da energia produzida pelo gerador ao longo de um ano.

$$C_{o.m} = C_{o.m}^{'} E_a^{'} \tag{3.5}$$

$C_{o.m}^{'}$ – Custo unitário de operação e manutenção do gerador [€/kWh]

$E_a^{'}$ – Energia anual fornecida pelo gerador [kWh]

Os custos anuais totais de combustível referem-se ao custo de produção de energia, estando igualmente dependentes da energia produzida anualmente pelo gerador. Para o caso dos sistemas renováveis, este custo é nulo.

$$C_{comb} = C_{comb}^{'} E_a^{'} \tag{3.6}$$

$C_{comb}^{'}$ – Custo unitário de combustível gasto pelo gerador [€/kWh]

A estimativa da energia elétrica consumida pela carga durante o tempo de vida vai depender da análise da carga em estudo. Neste trabalho, a investigação partiu de diagramas de carga diários, sendo que se considerou estes diagramas iguais para todos os dias do ano. A aproximação é algo grosseira, porque o diagrama de carga diário é diferente do fim-de-semana e nos dias de semana, é diferente consoante a estação do ano, além de outros fatores que o influenciam. No entanto, considerou-se que esta aproximação é aceitável para aquilo que queremos estudar.

A energia anual consumida é dada por:

$$E_a = E_d 365 \tag{3.7}$$

E_d – Energia elétrica diária consumida [kWh]

E_a – Energia elétrica anual consumida [kWh]

A taxa de atualização é um parâmetro utilizado na análise de investimentos. Quanto maior for o risco de um investimento maior é a taxa de atualização atribuída. Em geral, para projetos que envolvem um risco acrescido, derivado da inovação das soluções propostas, utilizam-se valores entre 6 e 8%.

3.1.2. Caso particular da linha de transmissão

Tal como foi referido anteriormente, neste estudo, as MR para além de poderem ser alimentadas pelo sistema de microgeração, o que lhes permite funcionar de forma isolada, têm também a possibilidade de funcionarem interligadas à rede local de energia, através de uma linha de ligação. Entre outras características, estas podem ser aéreas ou subterrâneas, ser de Média Tensão ou Baixa Tensão e o seu comprimento é um parâmetro variável.

Em termos gerais, o LCOE é um custo atualizado de produção, pelo que se aplica a instalações de produção de energia. Contudo, neste trabalho, considerou-se conveniente, generalizar o conceito e aplicá-lo também ao caso em que a MR é alimentada através de uma linha, com as necessárias modificações.

Ao contrário do caso da microgeração, em que podemos encontrar na literatura valores típicos de custos fixos e variáveis, a atribuição desses custos às linhas ou cabos de transporte de energia é mais complexa e existem mais fatores a ter em conta.

Para modelar o custo de investimento da linha de interligação, considerou-se que o investimento podia ser dividido em duas componentes: uma componente, C_F (€/km), dita fixa, porque não depende da secção dos condutores, que depende unicamente do comprimento da linha (refere-se à instalação de postes ou abertura de valas), e uma componente, C_V (€/km.mm^2), dita variável, porque depende do tipo de linha instalada, nomeadamente da sua secção (refere-se ao custo da linha, propriamente dito).

Numa primeira fase, podemos, pois, dizer que o investimento total na linha é dado por:

$$I_{t_{linha}} = C_F l + C_V S l \tag{3.8}$$

Em que:

l – Comprimento da linha [km]

S – Secção da linha [mm^2]

Ao custo de investimento referido anteriormente, há a juntar um custo, de natureza diferente, devido às perdas na linha, o qual equivale a um custo variável. É sobre esta parcela de custo que nos iremos debruçar agora [19].

As perdas por efeito de Joule, P_L, relacionam-se com a potência ativa transmitida na linha por:

$$P_L = 3R_L I^2 = R_L \frac{P^2}{V^2 \cos^2 \varphi} \Leftrightarrow P_L = bP^2 \tag{3.9}$$

R_L – Resistência longitudinal da linha [Ω]

I – Corrente na linha [A]

V – Tensão simples na linha [V]

$\cos\varphi$ – Fator de potência

P – Potência ativa de carga com $P = 3VI\cos\varphi$ [W]

b é uma constante dada por:

$$b = \frac{R_L}{V^2 \cos^2 \varphi} \tag{3.10}$$

A equação (3.9) mostra que, considerando que a tensão e o fator de potência são constantes, a potência de perdas é proporcional ao quadrado da potência de carga, ou, de forma equivalente, ao quadrado da corrente que atravessa a linha.

Qualquer diagrama de duração de carga anual pode ser traçado da forma que se ilustra na Fig. 11 [20].

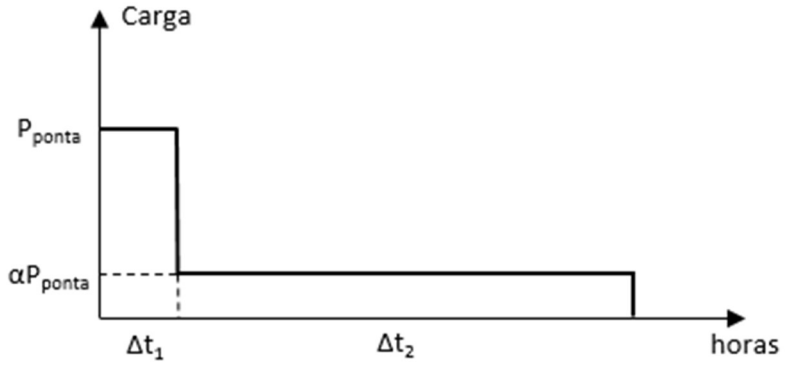

Figura 11 – Diagrama de carga por patamares

Os dois patamares evidenciados na Fig. 11 representam a energia consumida no período de ponta à qual se adiciona a energia consumida no restante período do ano. A área total por baixo da curva é evidentemente igual à energia anual total consumida, pelo que podemos escrever:

$$E_a = P_{ponta}\Delta t_1 + \alpha P_{ponta}\Delta t_2 \tag{3.11}$$

com:

Δt_1 – Período de ponta [h]

Δt_2 – Período fora da ponta [h]

α – Fator de carga

P_{ponta} – Potência de ponta (máxima) da carga [W]

Define-se o fator de carga, α, como:

$$\alpha = \frac{P_{média}}{P_{ponta}} = \frac{E_a}{8760 P_{ponta}} \tag{3.12}$$

$P_{média}$ – Potência média da carga [W]

A fração da energia anual consumida no período de ponta, X, é:

$$XE_a = P_{ponta}\Delta t_1 \tag{3.13}$$

A fração da energia anual consumida no período fora da ponta, 1-X, é:

$$(1-X)E_a = \alpha P_{ponta}\Delta t_2 \tag{3.14}$$

Pelo que:

$$\Delta t_1 = 8760X\alpha \tag{3.15}$$

e

$$\Delta t_2 = 8760(1-X) \tag{3.16}$$

Uma vez que, como vimos, a potência de perdas é proporcional ao quadrado da potência de carga, um possível diagrama de perdas poderia ser o indicado na Fig.12, em que b é uma constante [20].

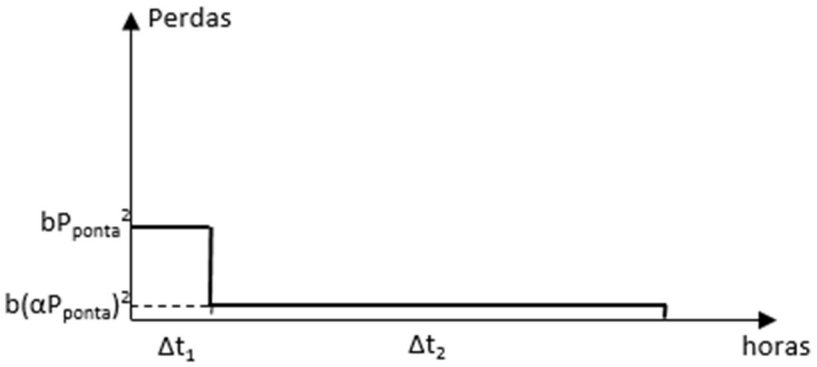

Figura 12 – Diagrama de perdas por patamares

A energia de perdas anual, E_L, vem então:

$$E_L = bP_{ponta}^2\Delta t_1 + b\alpha^2 P_{ponta}^2\Delta t_2 = R_L\frac{P_{ponta}^2}{V^2\cos^2\varphi}(\Delta t_1 + \alpha^2\Delta t_2) = 3R_L I_{ponta}^2(\Delta t_1 + \alpha^2\Delta t_2) \tag{3.17}$$

recordando que $b = \dfrac{R_L}{V^2\cos^2\varphi}$ e $P_{ponta} = 3VI_{ponta}\cos\varphi$

O custo anual das perdas, C_L, será:

$$C_L = 3\rho\frac{l}{S}I_{ponta}^2(\Delta t_1 c_p + \alpha^2\Delta t_2 c_{np}) \tag{3.18}$$

Em que:

ρ – Resistividade do material que constitui a linha/cabo (alumínio ou cobre) [Ωmm²/m]

c_p – Custo unitário das perdas na ponta [€/Wh]

c_{np} – Custo unitário das perdas fora da ponta [€/Wh]

e com $R_L = \rho \frac{l}{S}$

O ativo linha é remunerado a uma taxa de remuneração, r, pelo que o investimento total na linha ao longo dos N anos da sua vida útil é dado por:

$$C_{t_{Linha}} = C_F l + C_V S l + 3\rho \frac{l}{S} I_{ponta}^2 (\Delta t_1 c_p + \alpha^2 \Delta t_2 c_{np}) k_r = l \left(C_F + C_V S + C_L^{'} \frac{I_{ponta}^2}{S} \right) \quad (3.19)$$

e se define o fator da taxa de remuneração da linha, k_r, e o custo "unitário" das perdas, $C_L^{'}$, como:

$$k_r = \sum_{t=1}^{N} \frac{1}{(1+r)^t} \quad (3.20)$$

$$C_L^{'} = 3\rho(\Delta t_1 c_p + \alpha^2 \Delta t_2 c_{np}) k_r \quad (3.21)$$

Em que:

r – Taxa de renumeração da linha

N – Vida útil da linha [anos]

A secção dos condutores é dimensionada de modo a minimizar o custo total da linha, isto é:

$$\frac{\partial C_{t_{Linha}}}{\partial S} = 0 \quad (3.22)$$

Esta condição é equivalente a:

$$C_V S = C_L^{'} \frac{I_{ponta}^2}{S} \quad (3.23)$$

e, portanto, a secção ótima, $S_{ótima}$, obedece a:

$$S_{ótima} = \sqrt{\frac{C_L^{'}}{C_V} I_{ponta}^2} = \sqrt{\frac{3\rho I_{ponta}^2 (\Delta t_1 c_p + \alpha^2 \Delta t_2 c_{np}) k_r}{C_V}} \quad (3.24)$$

Existem alguns aspetos interessantes a reter nas expressões desenvolvidas anteriormente.

A expressão da secção ótima evidencia que, para uma determinada secção, ao custo total mínimo corresponde uma determinada energia de perdas (numerador) e a uma determinada componente variável do investimento, que depende da secção (denominador). Assim, mantendo

a secção, se uma destas parcelas variar, a outra deverá variar de igual forma para que a situação ótima se mantenha. De destacar que a secção ótima não depende do comprimento do cabo.

Substituindo a expressão da secção ótima na expressão do investimento total, verifica-se que o custo mínimo ocorre quando a componente variável do investimento iguala o custo da energia de perdas no cabo no seu ciclo de vida, o que corresponde à chamada Lei de Kelvin.

A partir da expressão da secção ótima, pode deduzir-se a expressão da densidade ótima de corrente, $J_{ótima}$, a qual é dada por:

$$J_{ótima} = \frac{I_{ponta}}{S_{ótima}} = \sqrt{\frac{C_V}{C_L'}} \tag{3.25}$$

Analisando a expressão 3.25, é importante notar o seguinte: a densidade ótima de corrente é independente tanto do valor da corrente verificada na ponta como da secção ótima dos condutores, sendo, ao invés, função dos parâmetros que caracterizam o diagrama de carga de dois patamares, ou seja, a densidade de corrente ótima depende do comportamento das cargas, da resistividade elétrica do material condutor utilizado, de parâmetros económicos e do tempo de vida útil [21].

3.1.3. Expressão geral de cálculo do LCOE

A expressão geral de cálculo do LCOE é:

$$LCOE = \frac{I_t + I_{t_{linha}} + (C_{o.m} + C_{comb} + C_{ve})k_a + C_L k_r}{E_a k_a} \tag{3.26}$$

Onde:

I_t – Investimento total no gerador (inclui bateria quando aplicável) [€]

$I_{t_{linha}}$ – Investimento total na linha [€]

$C_{o.m}$ – Custos anuais totais de operação e manutenção do gerador [€]

C_{comb} – Custos anuais totais de combustível do gerador [€]

k_a – Fator de atualização

k_r – Fator da taxa de remuneração da linha

E_a – Energia elétrica consumida anualmente [kWh]

Na equação 3.26, introduziram-se as seguintes novas parcelas:

$$I_{t_{linha}} = C_F l + C_V S l \tag{3.27}$$

$$C_L = \frac{C'_L}{k_r} \frac{I_{ponta}^2}{S} l \quad (3.28)$$

$$C_{ve} = C'_{ve} E''_a \quad (3.29)$$

com:

C_L – Custo anual total das perdas [€]

C_{ve} – Custo anual total de venda de energia à microrrede por parte de um fornecedor externo [€]

C'_{ve} – Custo anual médio de venda de energia à microrrede por parte de um fornecedor externo [€/kWh]

E''_a – Energia anual fornecida à microrrede por parte de um fornecedor externo [kWh]

Chama-se a atenção para que se desprezou o custo de operação e manutenção associado à linha e que

$$E_a = E'_a + E''_a \quad (3.30)$$

Em que:

E_a – Energia elétrica consumida anualmente [kWh]

E'_a – Energia anual fornecida pelo gerador [kWh]

E''_a – Energia anual fornecida à microrrede por parte de um fornecedor externo [kWh]

Em relação à situação em que se tem uma linha, nota-se que se considera que o investimento associado à linha, contém:

- uma parte fixa, dependente do comprimento da mesma,
- uma parte variável, dependente do comprimento e da parte da secção da linha necessária à alimentação da MR e
- um custo associado às perdas, dependente do comprimento, da parte da secção necessária à alimentação da MR e do quadrado da corrente na ponta.

3.2. Condições de Simulação

No estudo efetuado, variaram-se três parâmetros, como se pode observar na Figura 13:

- A dimensão da microrrede, nomeadamente, o número de consumidores desta (MR pequena, média e grande);
- Tipo de microgeração (gerador diesel, gás natural e solar FV + bateria);

- Tipo de linha que liga a MR à rede de energia (linha aérea ou cabo subterrâneo, BT ou MT);

A variação destes parâmetros vai ter impacto no indicador LCOE.

Nos subcapítulos seguintes vamos descrever e caracterizar cada um destes parâmetros.

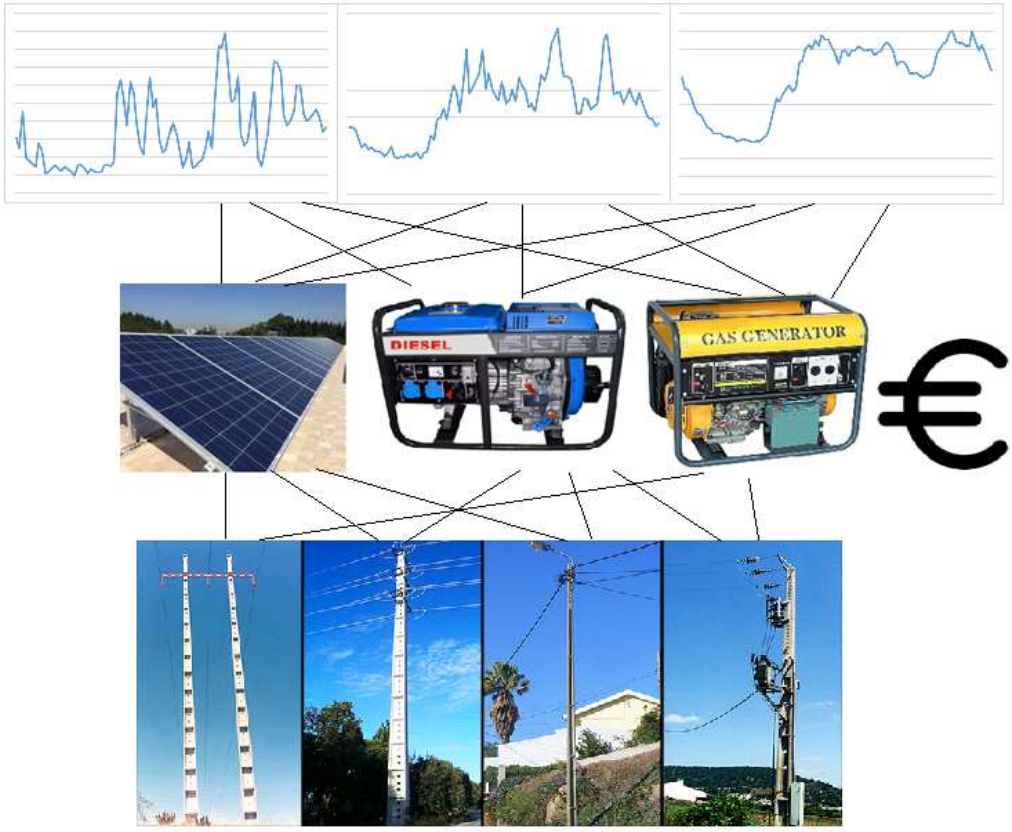

Figura 13 – Esquema com os vários parâmetros em estudo

3.2.1. Dimensão da Microrrede

Este parâmetro considera a dimensão, ou seja, o nº de consumidores da MR. Cada MR é caracterizada pelo seu diagrama de carga diário, que é apresentado na Fig.14 (MR pequena – 10 consumidores), Fig.15 (MR média – 100 consumidores) e Fig.16 (MR grande – 1000 consumidores).

Dos gráficos apresentados, podem retirar-se três importantes informações: potência de ponta (P_{ponta} [kW]), potência média ($P_{média}$ [kW]) e a energia diária (E_d [kWh]):

$$P_{ponta} = Max\{P_i\}; i = 1, 2, ..., 96 \tag{3.31}$$

$$P_{média} = \frac{1}{96}\sum_{i=1}^{96} P_i \tag{3.32}$$

$$E_d = 24 P_{média} \tag{3.33}$$

Recorda-se que os dados estão disponíveis em intervalos de 15 minutos e foram disponibilizados pela EDP Distribuição.

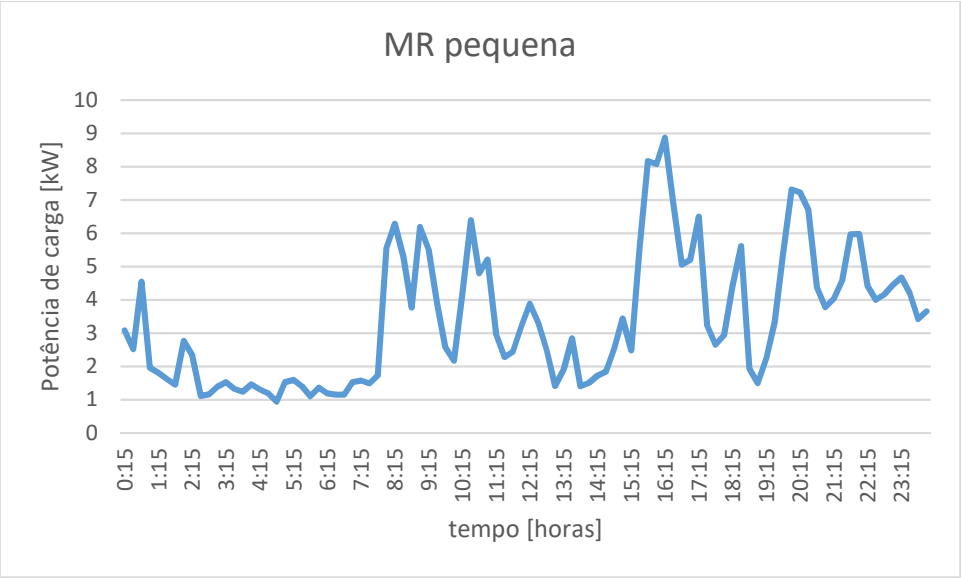

Figura 14 – Diagrama de carga diário da MR pequena

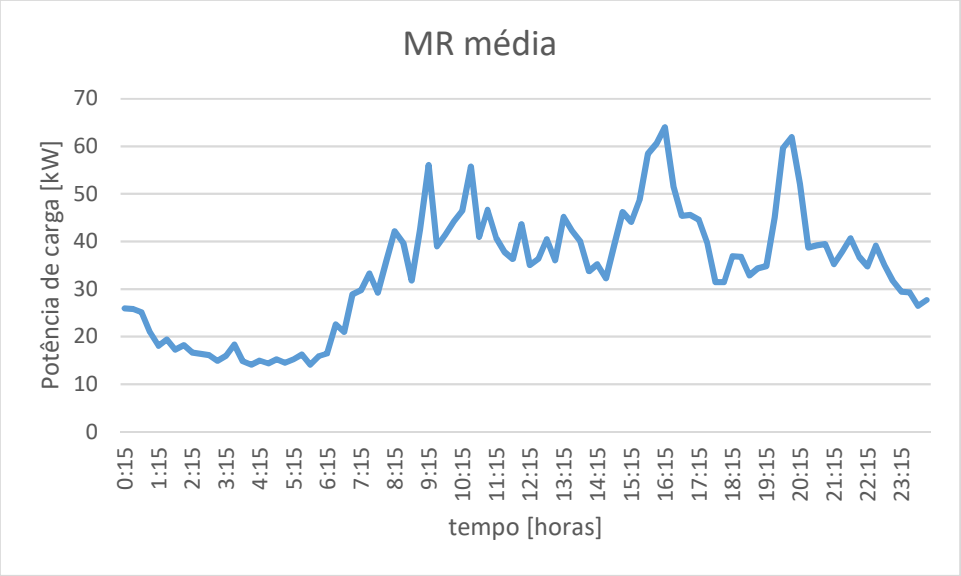

Figura 15 – Diagrama de carga diário da MR média

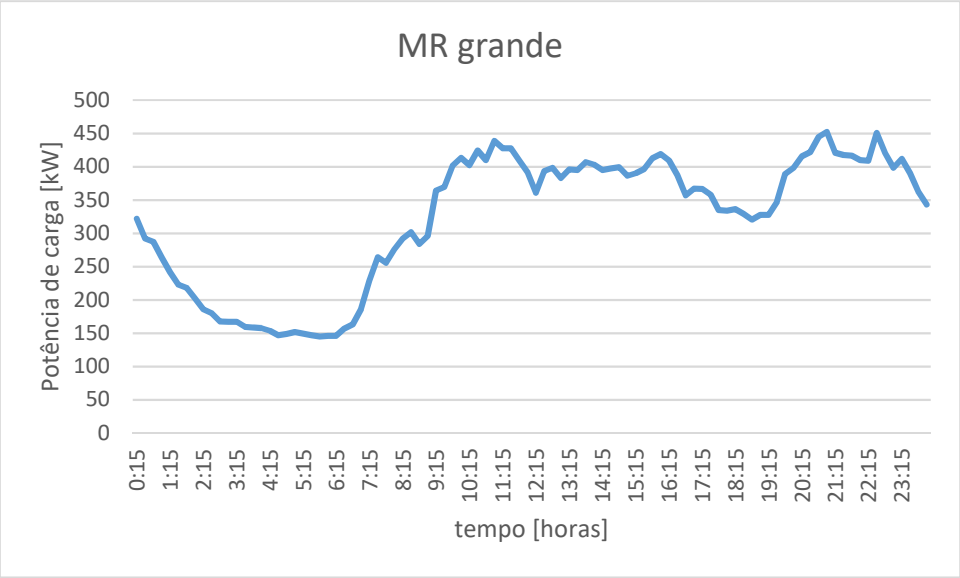

Figura 16 – Diagrama de carga diário da MR grande

Analisando os diagramas de carga, é possível observar que a variação na dimensão da MR, para além da óbvia alteração nos valores de potência e energia, faz com que o padrão do diagrama de carga se altere. À medida que a MR fica maior (com mais consumidores), o diagrama de carga fica mais "suave", mais "alisado", com menos picos, ou seja, existindo uma diferença menor entre a potência média e a potência máxima (fator de carga).

Na Tabela 1 apresenta-se um quadro que sintetiza os dados mais importantes relativos às MR consideradas.

Tabela 1 – Características elétricas das MR.

MR	Nº de consumidores	Potência de ponta [kW]	Potência média [kW]	Fator de carga	Energia total diária [kWh]
Pequena	10	9	3,4	0,378	81,46
Média	100	65	34	0,523	816,16
Grande	1000	453	322,1	0,711	7730,46

A informação mais importante a tirar da tabela anterior para o cálculo do LCOE é a última coluna, E_d, a energia total diária, a qual nos permite calcular o parâmetro E_a, a energia total anual fornecida à MR (Tabela 2).

Tabela 2 – Energia anual consumida pelas MR.

Parâmetro do LCOE	MR pequena	MR média	MR grande
$E_a\,[kWh]$	29 732,9	297 898,0	2 821 619,0

3.2.2. Tipo de Microgeração

O parâmetro que considera o tipo de microgeração presente na MR apresenta duas tecnologias não-renováveis, microgeradores diesel e GN, e uma tecnologia limpa, solar fotovoltaica. Como já referido anteriormente, para o solar FV considerou-se sempre a sua associação com uma bateria para fazer face à "não despachabilidade" da energia FV.

No Capítulo 2, já se referiram algumas das características destes geradores, sendo que agora importa destacar os custos associados à produção de energia destes equipamentos.

Na Tabela 3 apresentam-se os valores considerados para os diversos custos associados aos tipos de geração considerados e que correspondem aos parâmetros necessários para o cálculo do LCOE.

Tabela 3 – Custos dos geradores.

	Tipo de Gerador			
	Não renovável		Renovável	
Parâmetro do LCOE	Diesel	Gás Natural	Solar	Bateria
Investimento unitário, $I_t^{'}$ [€/kW]	200	360	2000	-
Investimento unitário na bateria, $I_t^{''}$ [€/kWh]	-	-	-	500
Custo unitário de operação e manutenção, $C_{o.m.}^{'}$ [€/kWh]	0,012	0,006	0,005	-
Custo unitário de combustível, $C_{comb}^{'}$ [€/kWh]	0,15	0,07	0	-
Vida útil, n [anos]	20			
Taxa de atualização, a	7%			

Comparando os dois tipos de geradores não-renováveis, o microgerador a GN requer um investimento inicial superior, embora, por outro lado, os custos de operação e manutenção e de combustível sejam cerca de metade dos do *diesel*.

O investimento inicial num gerador fotovoltaico é bastante superior comparado com os geradores não-renováveis, apesar da tendência seja para que este preço venha a diminuir no futuro. Nota-se que o investimento unitário (€/kW) do FV decresceu acentuadamente nos últimos anos. Devido a economias de escala, o custo unitário do FV doméstico, o que estamos a considerar aqui, é superior ao custo unitário dos parques FV ligados à rede. De destacar que o custo de combustível é, obviamente, nulo neste tipo de tecnologia. Acoplado a este custo, está

o preço da bateria, que depende da sua capacidade de armazenamento de energia, daí o custo ser dado em €/kWh. Não foi considerado nenhum custo de operação e manutenção para a bateria, por se ter considerado desprezável, face aos valores envolvidos.

Os valores apresentados na Tabela 3 foram adaptados de [22] [23] e obtidos por consulta direta a especialistas do setor.

3.2.3. Linha de ligação à rede

Em relação às componentes do custo de investimento específicas da linha foram considerados os valores representados na Tabela 4, dependendo das características da linha (retirado do Guia Técnico de Planeamento de Redes de Distribuição – EDP Distribuição [20]).

Tabela 4 – Custos dos cabos e linhas aéreas.

Tipo de linha		C_F [k€/km]	C_V [k€/(km.mm²]
BT (400 V)	Aérea	6,054	0,039
	Subterrânea	29,890	0,069
MT (10 kV)	Aérea	27,404	0,039
	Subterrânea	62,000	0,069

De notar que os custos fixos associados aos cabos subterrâneos são cerca de 5 vezes superiores aos da linha aérea, no caso BT, e cerca do dobro, no caso MT. A diferença é menos acentuada no que diz respeito aos custos variáveis.

O custo unitário das perdas é igual ao custo unitário da energia no mercado de eletricidade, porque as perdas têm de ser adquiridas no mercado. Informação histórica permite considerar que o preço médio da energia no mercado (MIBEL) é cerca de 0,05 €/kWh. Nestas condições, entendeu-se razoável atribuir os valores que se indicam na Tabela 5 aos custos das perdas fora da ponta, c_{np}, e na ponta, c_p, respetivamente.

Segundo o Guia Técnico de Planeamento de Redes de Distribuição, o valor da constante característica de perdas, X, varia entre 0,15 e 0,2 na rede de distribuição, pelo que se usa o valor médio deste intervalo, indicado na Tabela 5.

O parâmetro C'_{ve} toma o valor de indicado na Tabela 5 porque se considerou como hipótese tomar o valor médio de venda de energia em MT.

De seguida, na Tabela 5, apresenta-se uma tabela de resumo, com todos os valores usados.

Tabela 5 – Parâmetros considerados.

Parâmetro do LCOE	Valor
Fator de potência, $\cos\varphi$	1
Fração da energia anual consumida no período de ponta, X [%]	17,5
Resistividade do material que constitui a linha/cabo, ρ [Ωm]	3×10^{-8}
Custos das perdas na ponta, c_p [€/kWh]	0,1
Custos das perdas fora da ponta, c_{np} [€/kWh]	0,03
Fator de remuneração, r [%]	10
Vida útil, n [anos]	30
Custo anual médio de venda de energia à microrrede por parte de um fornecedor externo, $C_{ve}^{'}$ [€/kWh]	0,1

No dimensionamento da linha, utilizaram-se duas variações, referentes ao valor da secção a utilizar:

- Uso de secção normalizada – Usaram-se as seguintes secções normalizadas, quer se tratasse de uma linha ou de um cabo, ou quer fosse BT ou MT: 25, 50, 120, 240 mm^2. Esta opção pretende refletir a situação em que a linha é construída para alimentar exclusivamente a MR em estudo.
- Uso da secção ótima – É utilizada a secção ótima calculada a partir da equação 3.24. Esta situação considera uma repartição dos custos da linha, supondo que a linha é partilhada por várias MR e que a cada uma é imputada a parte da secção da linha que está efetivamente a utilizar.

Esta última opção de escolha da secção da linha tem um grande impacto no cálculo dos custos associados à linha, nomeadamente no custo das perdas (equação 3.28), que vai aumentar, e no investimento total na linha (equação 3.8), que vai diminuir.

O custo das perdas aumenta porque é inversamente proporcional à secção (equação 3.28); o investimento diminui porque a secção diminui, e porque, nesta abordagem, se considera que o custo fixo diminui proporcionalmente com a secção:

$$I_{t_{linha}} = C_F l \times \frac{S_{opt}}{S_{norm}} + C_V S_{opt} l \tag{3.34}$$

Para além do critério relacionado com o cálculo da secção da linha, existe igualmente uma limitação no comprimento. É importante saber se o nível de tensão da linha suporta a corrente máxima que a atravessa. Para isso, é necessário calcular a queda de tensão na linha, quando a corrente é máxima. Para linhas curtas (até 80 km), pode desprezar-se a admitância transversal, sendo a linha modelada unicamente pela sua impedância longitudinal [24].

$$Z_L = R_L + jX_L \tag{3.35}$$

Onde a R_L e X_L são a resistência e reatância totais da linha, respetivamente.

A queda de tensão fase-neutro da linha é dada por:

$$\Delta V = R_L I \cos\varphi + X_L I \sin\varphi \tag{3.36}$$

Em linhas de baixa e média tensão, a resistência é dominante, $X_L \ll R_L$, pelo que a queda de tensão se pode calcular aproximadamente por:

$$\Delta V \approx R_L I \cos\varphi \tag{3.37}$$

E para a situação limite (ponta), temos:

$$\Delta V \approx R_L I_{ponta} \cos\varphi \tag{3.38}$$

Sendo a resistência da linha, depois de calculada a secção ótima, dada por:

$$R_L = \rho \frac{l}{S_{ótima}} \tag{3.39}$$

Considerou-se uma queda de tensão máxima admissível igual a 10%. Quando tal não se verifica, ter-se-á de passar para o nível de secção superior ou, no limite, para o nível de tensão superior.

Quanto aos comprimentos da linha, considerou-se o valor de 0,5 km, para a linha de BT e de 5 km, para a linha MT.

3.3. Descrição do modelo económico

O ponto de partida é o caso da MR alimentada exclusivamente por um gerador local, ou seja, não existe ligação à rede pública de energia. O gerador pode ser do tipo *diesel*, GN ou FV + Bateria. Cada um destes casos constitui um caso-base, que tem um determinado LCOE associado, o qual vai ser tomado como valor de referência.

Tomemos como exemplo a situação de uma MR com 100 consumidores, alimentada exclusivamente por um gerador a diesel (para o caso de gerador a GN, o procedimento é o mesmo; para o caso da solução FV + bateria, a situação é diferente e será abordada depois). O

respetivo diagrama de carga diário (que é igual ao diagrama de potência do gerador, uma vez que não estamos a modelar a rede elétrica, e, portanto, não há perdas) é o que se mostra na Fig. 17. Recorda-se que os valores de potência são dados em intervalos de 15 minutos.

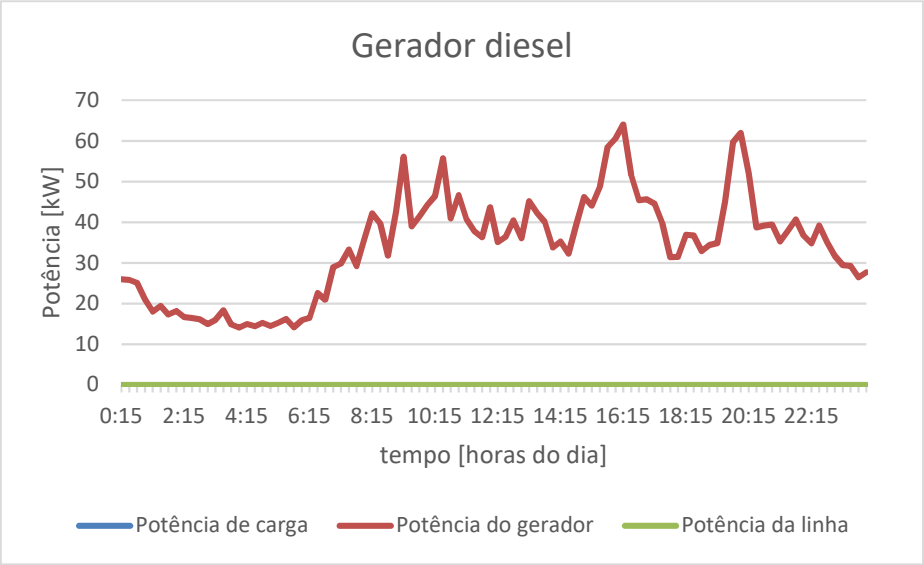

Figura 17 – Exemplo de diagramas de carga diários e de potência do gerador diesel

De seguida, a capacidade máxima do gerador vai ser limitada, sendo a carga remanescente alimentada através da linha de interligação à rede pública.

Nesta situação, o gerador já não é capaz de alimentar a carga sozinho e, como tal, a carga passa a ser alimentada através do conjunto gerador + linha. Nestas condições, teremos a situação que se reporta na Fig. 18.

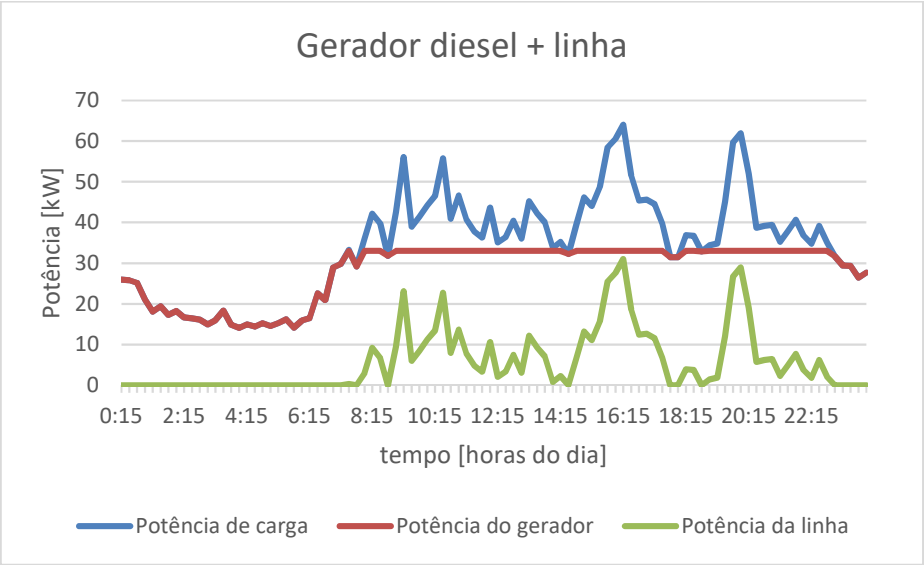

Figura 18 – Exemplo de diagramas de carga diários e de potência do gerador diesel + linha

A esta repartição de carga pelo gerador e linha corresponde um determinado valor de LCOE. No que diz respeito ao gerador, o LCOE é calculado a partir do investimento, custos de operação e manutenção e custos de combustível. Na parte correspondente à linha, a contribuição para o LCOE é calculada com base no comprimento, na secção normalizada ou, em alternativa, na parte da secção da linha necessária à alimentação da MR, e no quadrado da corrente na ponta. Há ainda que adicionar o valor da compra de energia a um fornecedor exterior. Dependendo do valor da corrente na ponta, a linha pode ser de BT ou MT. Avaliaram-se os casos de linhas aéreas e de cabos subterrâneos.

Valores menores do que o LCOE de referência (calculado para o caso em que apenas o gerador diesel alimenta a carga) correspondem aos casos em que a alimentação conjunta é vantajosa. Valores superiores significam que não é vantajosa a presença da linha.

Para a situação em que é utilizada a solução FV + bateria, o modelo é o mesmo, embora o procedimento seja mais complicado devido às particularidades deste tipo de geração.

Como já foi referido anteriormente, não é possível gerir a produção FV em função da carga, ao invés do que acontece com os geradores a diesel ou GN. A geração de energia por parte de um painel fotovoltaico está relacionada principalmente com a exposição solar a que este é sujeito ao longo dia. Um gráfico de geração solar, num dia de verão de céu limpo, tem o formato de um "sino", como se pode verificar na Fig. 19.

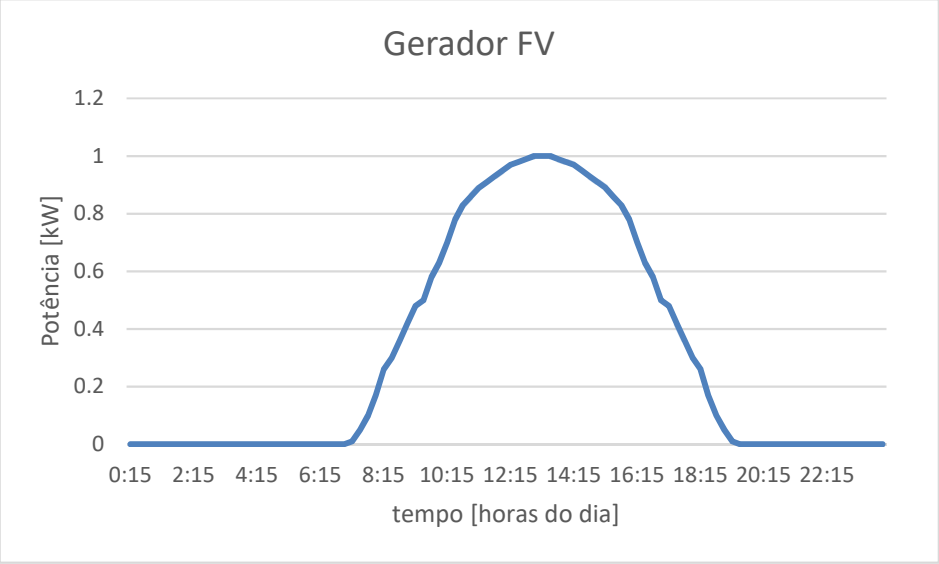

Figura 19 – Exemplo de diagrama diário de geração solar

Para ultrapassar as limitações relacionadas com a impossibilidade de a produção fotovoltaica seguir a carga, são utilizadas baterias que permitem manobrar a produção de energia de acordo com as necessidades de carga.

Ao longo de um dia, podem existir 3 situações:

1. A geração é nula, sendo a carga alimentada exclusivamente pelas baterias.

2. A geração é positiva, mas inferior à carga; nestas circunstâncias, a carga é apenas parcialmente alimentada pelo gerador, sendo a restante sustentada pelas baterias.
3. A geração é positiva e superior à carga; a carga é alimentada exclusivamente pelo gerador FV, sendo o excesso de energia produzida utilizado para carregar as baterias.

Um exemplo dos diagramas de carga em que a produção é assegurada por uma associação gerador FV e bateria é mostrado na Fig. 20.

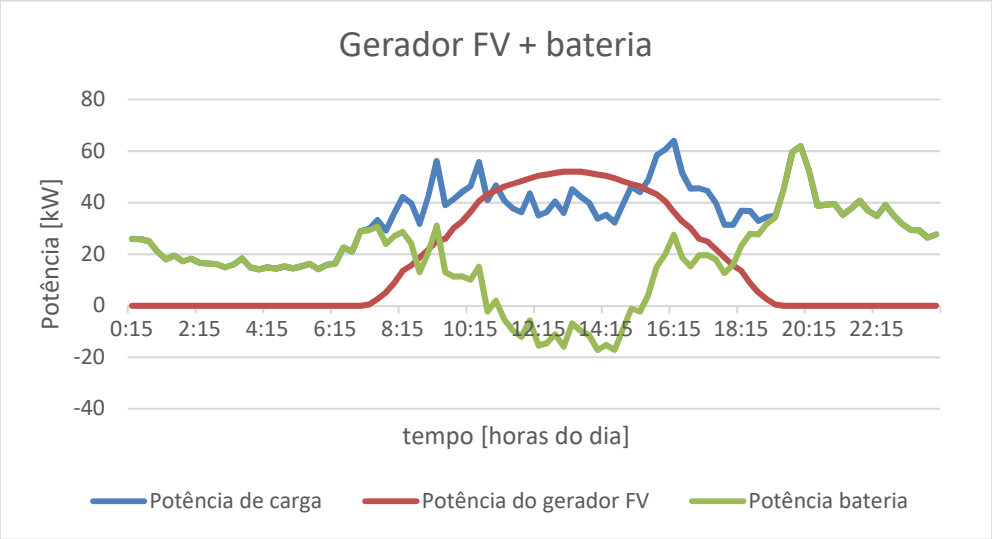

Figura 20 – Exemplo de diagramas de carga diários e de potência do gerador FV + bateria

Tendo por base o método apresentado, criaram-se vários cenários, que resultam das possíveis combinações das variáveis em jogo. A Tabela 6 mostra as diversas combinações estudadas.

Tabela 6 – Cenários analisados

		Tipos de geradores			
		Diesel	GN	FV + Bateria	
Tipos de MR	MR pequena	BT MT	BT MT	BT MT	**Tipos de linhas**
	MR média	BT MT	BT MT	BT MT	
	MR grande	BT MT	BT MT	BT MT	

As diferentes combinações de variáveis produzem alterações no valor do indicador LCOE. O objetivo é identificar as situações, modeladas através dos cenários da Tabela 6, em que é economicamente vantajoso interligar a MR à rede pública. Pretende-se, portanto, avaliar as condições propícias à construção desta interligação.

Na Fig. 21 apresenta-se um fluxograma do modelo económico de análise usado nesta dissertação.

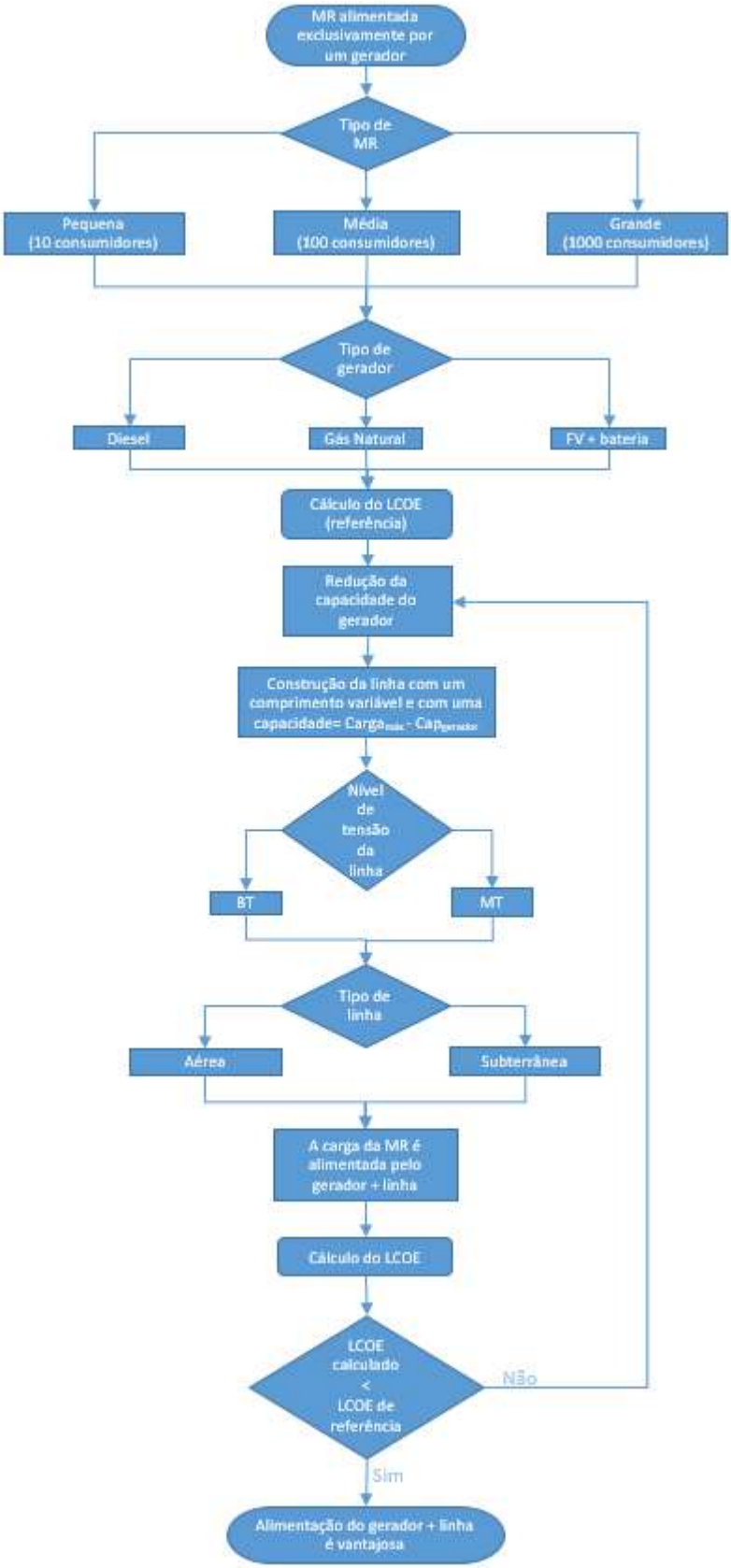

Figura 21 – Fluxograma do modelo económico de análise

4. Apresentação e Avaliação dos Resultados

Como foi possível verificar no Capítulo 3, existem diversas variáveis em jogo, quando se pretende estudar a operação mais económica de uma MR. De facto, a MR pode ter diferentes dimensões, pode ser alimentada recorrendo a vários tipos de tecnologias de geração, como, por exemplo, diesel, GN ou fotovoltaico associado com bateria e, por fim, a linha que liga a MR à rede pública pode ser de BT ou MT, aérea ou subterrânea, podemos considerar a secção ótima ou não, para além do comprimento variável da linha.

Todas estas variáveis podem ser conjugadas de inúmeras formas, criando assim múltiplos casos de estudo. Tendo em conta esta variabilidade tão grande, e por forma a sistematizar o estudo, decidiu-se organizar os resultados da forma que se apresenta a seguir.

Em primeiro lugar, apresentam-se, sob a forma de tabelas, os casos de estudo de referência, ou seja, as situações em que as MR são alimentadas exclusivamente pelos geradores locais. Aqui relembram-se os custos unitários considerados, algumas características importantes e é calculado o valor do LCOE, que vai ser utilizado como referência para aferir a viabilidade da construção da linha de interligação à rede de distribuição.

De seguida, são apresentadas as tabelas com os resultados referentes aos cenários estudados (Tabela 6). Aqui é calculado o LCOE para cada situação em que a carga da MR vai sendo gerida entre o gerador e a linha, variando a respetiva repartição de carga. O LCOE assim obtido é comparado com o LCOE de referência, de modo a verificar a viabilidade económica da construção da linha. Os casos de estudo foram divididos em 2 grupos, que diferem no valor da secção utilizada, opção que foi abordada na secção 3.2.3. O primeiro caso de estudo refere-se à utilização das secções normalizadas, considerando que a linha abastece exclusivamente a MR em estudo; o segundo caso corresponde ao uso da secção ótima necessária ao abastecimento da MR, sendo a restante secção (em relação ao valor normalizado) usada para abastecer outras MR, originando assim uma repartição dos custos da linha.

Uma vez que a estimação de custos, quer os referentes aos geradores, quer os referentes à linha, é sempre uma tarefa difícil, porque os mesmos podem variar numa gama apreciável, no final deste capítulo, é feita uma análise de sensibilidade aos parâmetros que se afigura terem mais influência na determinação do LCOE.

4.1. Casos de Estudo de Referência

Nos esquemas seguintes (Figuras 22 a 24), apresentam-se os valores do LCOE de referência e os custos unitários considerados, para os 3 tipos de geradores em análise, para as MR em estudo (pequena, média e grande).

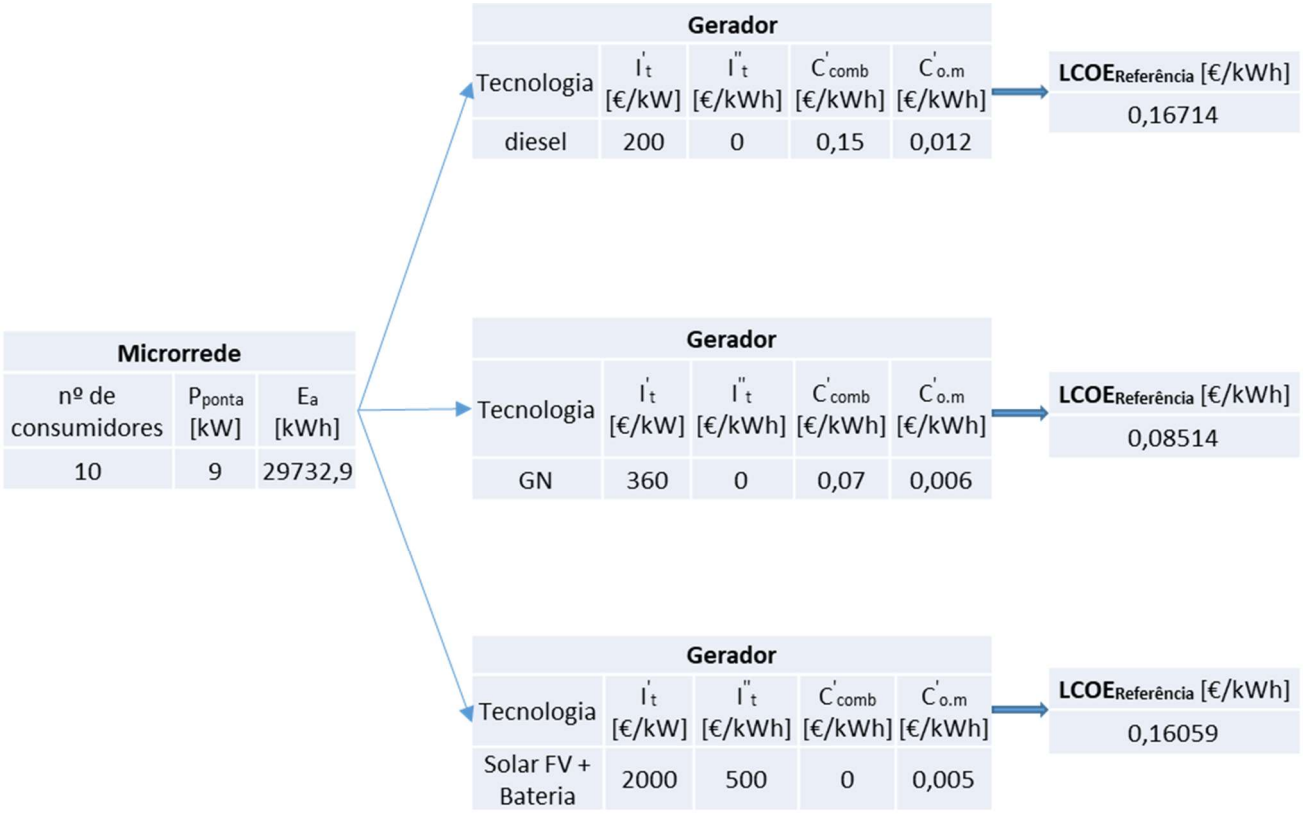

Figura 22 – Casos de estudo de referência; MR pequena

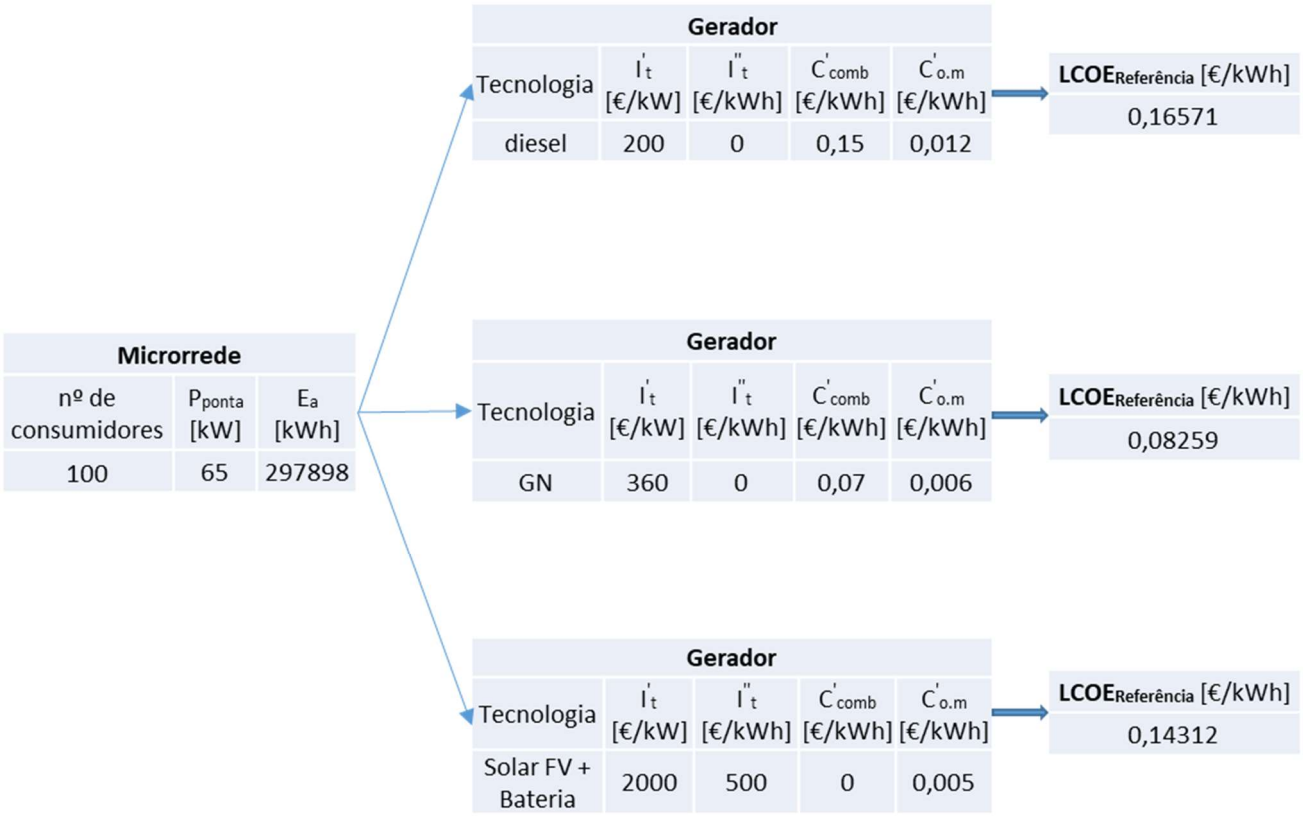

Figura 23 – Casos de estudo de referência; MR média

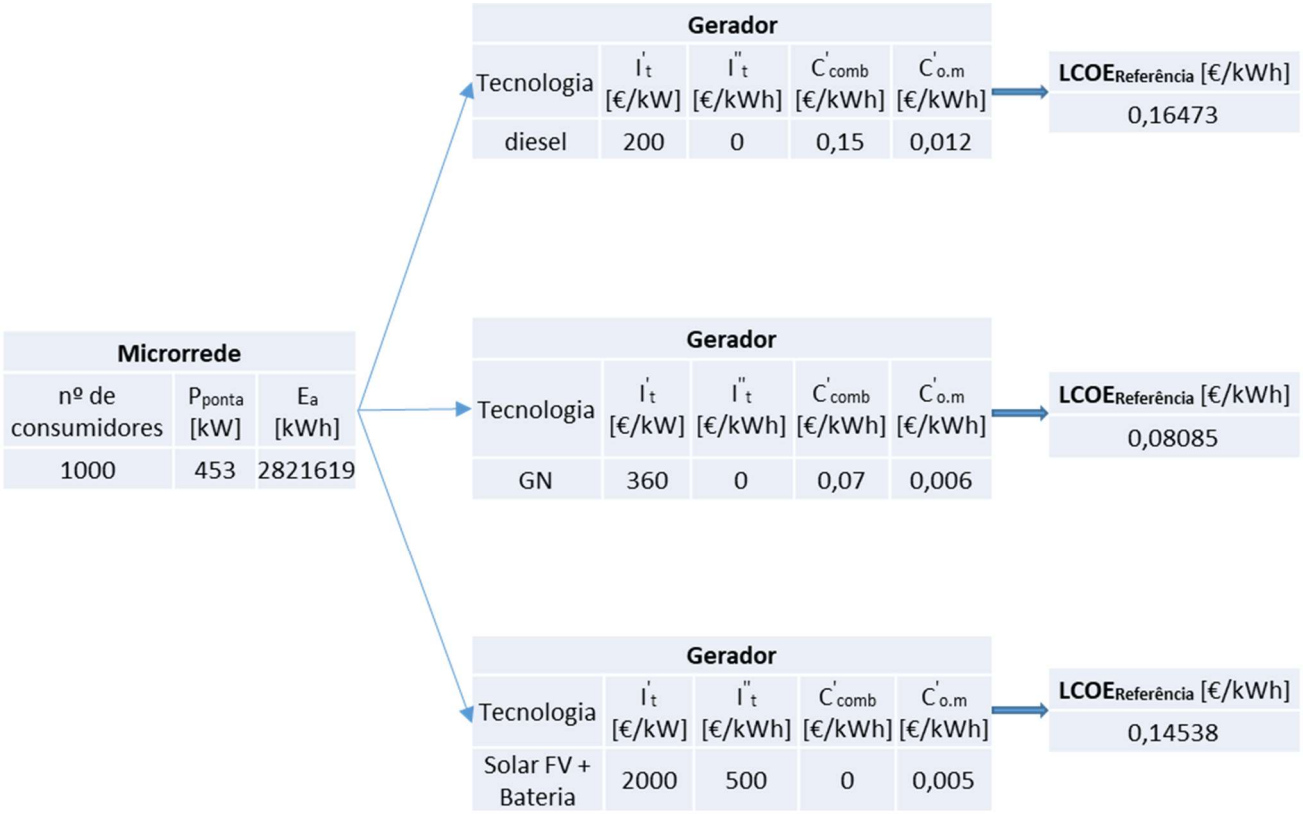

Figura 24 – Casos de estudo de referência; MR grande

A análise das figuras permite concluir que a tecnologia mais barata é, de longe, o GN. As soluções FV + bateria e diesel têm custos aproximados, com uma ligeira vantagem da primeira sobre a segunda. Também é interessante notar que o LCOE diminui com o aumento da dimensão da MR.

4.2. Definição dos parâmetros das linhas

A interligação da MR à rede de distribuição pode ser efetuada de diferentes maneiras: em BT ou em MT; usando linha aérea ou cabo subterrâneo; o comprimento da ligação pode ser variável. No corpo principal desta tese, considerou-se que a alimentação da MR era efetuada apenas por linha aérea, em BT ou MT, com um comprimento fixo (BT: 0,5 km; MT: 5 km) No Anexo A, apresentam-se os resultados para a situação em que a interligação é efetuada com cabos subterrâneos. As razões para esta opção prendem-se com o elevado custo das soluções com cabos subterrâneos, que dificultam a sua viabilidade económica.

Nas Tabelas 7 e 8, resumem-se as principais características das linhas consideradas.

Tabela 7 – Parâmetros da linha aérea de BT

Linha							
Tipo	Tensão	Comprimento [km]	C_F [€/km]	C_V [€/(km.mm2)]	C_p [€/kWh]	C_{np} [€/kWh]	C_{ve} [€/kWh]
Aérea	BT	0,5	6054	39	0,1	0,03	0,1

Tabela 8 – Parâmetros da linha aérea de MT

Linha							
Tipo	Tensão	Comprimento [km]	C_F [€/km]	C_V [€/(km.mm2)]	C_p [€/kWh]	C_{np} [€/kWh]	C_{ve} [€/kWh]
Aérea	MT	5	27404	39	0,1	0,03	0,1

A escolha dos comprimentos fixos para cada um dos níveis de tensão, ou seja, 0,5 km para a BT e 5 km para MT, está relacionado com as características das linhas. Por um lado, não faz sentido uma linha de BT com comprimento longo, uma vez que as perdas seriam muito significativas. Por outro, a linha de MT não pode ser demasiado pequena, pois a sua rentabilidade seria duvidosa, devido ao facto de o custo por km ser muito elevado: o custo fixo de uma linha aérea MT é quase cinco vezes superior ao de uma linha BT.

4.3. Casos de estudo

Tal como foi explicado no Capítulo 3, o método utilizado parte da situação em que a MR é alimentada exclusivamente pelo gerador local. De seguida, a percentagem de geração local que sustenta a carga vai sendo reduzida, à medida que se aumenta a da linha. Interessa clarificar o que se entende por reduzir a percentagem de geração local que abastece a carga. Nesta situação, simula-se um corte na potência de ponta do gerador, correspondente a essa percentagem. Por exemplo, na MR pequena, a potência de ponta é 9 kW; na situação em que a MR é totalmente alimentada pela geração local, a potência de ponta do gerador é 9 kW; quando a repartição de carga é 50% para o gerador e 50% para a linha, a potência de ponta do gerador é reduzida para 4,5 kW. Nota-se que isto é diferente de considerar que 50% do consumo é abastecido pelo gerador.

Nas simulações efetuadas, foram utilizados intervalos de variação de 25% na potência de ponta do gerador, e, para cada um destes casos, calculou-se o respetivo LCOE para verificar a exequibilidade de construção da linha, através da comparação com o LCOE de referência.

Para além do LCOE, são apresentados os custos associados, tanto ao gerador como à linha, assim como alguns parâmetros importantes, como a potência nominal do gerador, a energia produzida por este e a que é suportada pela linha e ainda a respetiva secção. De forma a facilitar a visualização dos resultados, todos os valores foram arredondados à unidade.

Tal como foi referido anteriormente, temos 2 grupos de casos de estudo:

- O primeiro pretende simular a situação de uma MR alimentada exclusivamente por uma linha. É realizado o cálculo da secção ótima, usando-se a secção normalizada mais próxima, que pode ser 25, 50, 120 e 240 mm^2.
- O segundo grupo reflete a situação de partilha de custos de alimentação de MR's por uma só linha. Assim, é usada a secção ótima calculada, sendo que a cada MR é imputada apenas a percentagem de linha que está efetivamente a utilizar.

As Tabelas 9 a 26 mostram os resultados do primeiro grupo, para todos os casos elencados (Tabela 6), com as restrições referidas, ou seja: MR (pequena, média e grande), alimentada com um dos geradores possíveis (diesel, GN e FV + bateria) e/ou por um dos 2 tipos de linhas aéreas consideradas (BT – 0,5 km ou MT – 5 km).

O segundo grupo de casos de estudo está representado nas Tabelas 28 a 33, mas apenas para as MR pequena e média, uma vez que esta repartição de custos da linha faz mais sentido em MR mais pequenas. Na sequência aborda-se o caso da MR pequena, reportando-se no Anexo B o caso da MR média em que os custos da linha são calculados com base na secção ótima.

4.3.1. Casos de estudo 1 – Uso de secção normalizada

Caso de estudo 1.1. – MR pequena – Gerador Diesel

Tabela 9 – Caso de estudo 1.1. - Linha aérea BT

MR	Gerador	$LCOE_{referência}$ [€/kWh]	Linha	Tensão	Comprimento [km]
10	diesel	0,16714	Aérea	BT	0,5

Gerador						Linha							LCOE	A linha compensa?
$\%_{gerador/carga}$	P_n [kW]	E_a [kWh]	I_t [€]	C_{comb} anual [€]	$C_{o.m.}$ anual [€]	$\%_{linha/carga}$	E_a [kWh]	Secção [mm2]	C_F [€]	C_V [€]	C_L anual [€]	C_{ve} anual [€]		
100	9	29733	1620	4460	357	**0**	0	0	0	0	0	0	0,16714	-
75	7	29306	1260	4396	352	**25**	427	25	3027	488	0	43	0,17627	não
50	5	27089	900	4063	325	**50**	2644	25	3027	488	1	264	0,17052	não
25	3	20894	540	3134	251	**75**	8839	25	3027	488	4	884	0,15657	sim
0	0	0	0	0	0	**100**	29733	25	3027	488	27	2973	0,11196	sim

Tabela 10 – Caso de estudo 1.1. - Linha aérea MT

MR	Gerador	$LCOE_{referência}$ [€/kWh]	Linha	Tensão	Comprimento [km]
10	diesel	0,16714	Aérea	MT	5

Gerador						Linha							LCOE	A linha compensa?
$\%_{gerador/carga}$	P_n [kW]	E_a [kWh]	I_t [€]	C_{comb} anual [€]	$C_{o.m.}$ anual [€]	$\%_{linha/carga}$	E_a [kWh]	Secção [mm2]	C_F [€]	C_V [€]	C_L anual [€]	C_{ve} anual [€]		
100	9	29733	1620	4460	357	**0**	0	0	0	0	0	0	0,16714	-
75	7	29306	1260	4396	352	**25**	427	25	137020	4875	0	43	0,61558	não
50	5	27089	900	4063	325	**50**	2644	25	137020	4875	0	264	0,60982	não
25	3	20894	540	3134	251	**75**	8839	25	137020	4875	0	884	0,59576	não
0	0	0	0	0	0	**100**	29733	25	137020	4875	0	2973	0,55049	não

No caso da MR pequena, alimentada com gerador diesel, pode verificar-se que a construção de uma linha BT começa a ser viável quando a geração é reduzida para um quarto da potência de ponta da MR, uma vez que, nesta situação, o LCOE é inferior ao LCOE de referência.

O caso em que a linha abastece a totalidade da carga é o que revela o LCOE mais económico. Isto não constitui uma surpresa, já que a solução diesel é bastante cara, como já tinha sido concluído.

A linha MT não mostra ser uma opção economicamente viável.

Caso de estudo 1.2. – MR pequena – Gerador GN

Tabela 11 – Caso de estudo 1.2. - Linha aérea BT

MR	Gerador	$LCOE_{referência}$ [€/kWh]	Linha	Tensão	Comprimento [km]
10	GN	0,08514	Aérea	BT	0,5

Gerador						Linha							LCOE	A linha compensa?
$\%_{gerador/carga}$	P_n [kW]	E_a [kWh]	I_t [€]	$C_{comb\ anual}$ [€]	$C_{o.m.\ anual}$ [€]	$\%_{linha/carga}$	E_a [kWh]	Secção [mm2]	C_F [€]	C_V [€]	$C_{L\ anual}$ [€]	$C_{ve\ anual}$ [€]		
100	9	29733	2880	2081	178	**0**	0	0	0	0	0	0	0,08514	-
75	7	29306	2240	2051	176	**25**	427	25	3027	488	0	43	0,09462	não
50	5	27089	1600	1896	163	**50**	2644	25	3027	488	1	264	0,09439	não
25	3	20894	960	1463	125	**75**	8839	25	3027	488	4	884	0,09747	não
0	0	0	0	0	0	**100**	29733	25	3027	488	27	2973	0,11196	não

Tabela 12 – Caso de estudo 1.2. - Linha aérea MT

MR	Gerador	$LCOE_{referência}$ [€/kWh]	Linha	Tensão	Comprimento [km]
10	GN	0,08514	Aérea	MT	5

Gerador						Linha							LCOE	A linha compensa?
$\%_{gerador/carga}$	P_n [kW]	E_a [kWh]	I_t [€]	$C_{comb\ anual}$ [€]	$C_{o.m.\ anual}$ [€]	$\%_{linha/carga}$	E_a [kWh]	Secção [mm2]	C_F [€]	C_V [€]	$C_{L\ anual}$ [€]	$C_{ve\ anual}$ [€]		
100	9	29733	2880	2081	178	**0**	0	0	0	0	0	0	0,08514	-
75	7	29306	2240	2051	176	**25**	427	25	137020	4875	0	43	0,53393	não
50	5	27089	1600	1896	163	**50**	2644	25	137020	4875	0	264	0,53369	não
25	3	20894	960	1463	125	**75**	8839	25	137020	4875	0	884	0,53666	não
0	0	0	0	0	0	**100**	29733	25	137020	4875	0	2973	0,55049	não

Para o caso da MR pequena, com gerador a GN, a instalação de uma linha, quer seja BT, quer seja MT, nunca se revela economicamente viável para estas condições de simulação, uma vez que o LCOE de referência é bastante baixo.

Caso de estudo 1.3. – MR pequena – Gerador FV + Bateria

Tabela 13 – Caso de estudo 1.3. - Linha aérea BT

MR	Gerador	$LCOE_{referência}$ [€/kWh]	Linha	Tensão	Comprimento [km]
10	FV+bateria	0,16059	Aérea	BT	0,5

Gerador						Linha							LCOE	A linha compensa?
$\%_{gerador/carga}$	P_n [kW]	E_a [kWh]	I_t [€]	C_{comb} anual [€]	$C_{o.m.}$ anual [€]	$\%_{linha/carga}$	E_a [kWh]	Secção [mm2]	C_F [€]	C_V [€]	C_L anual [€]	C_{ve} anual [€]		
100	12	33179	48828	0	166	**0**	0	0	0	0	0	0	0,16059	-
75	9	24884	33322	0	124	**25**	5967	25	3027	488	3	597	0,14129	sim
50	6	16589	19305	0	83	**50**	13677	25	3027	488	8	1368	0,12148	sim
25	3	8295	7215,5	0	41	**75**	21527	25	3027	488	16	2153	0,10835	sim
0	0	0	0	0	0	**100**	29733	25	3027	488	27	2973	0,11196	sim

Tabela 14 – Caso de estudo 1.3. - Linha aérea MT

MR	Gerador	$LCOE_{referência}$ [€/kWh]	Linha	Tensão	Comprimento [km]
10	FV+bateria	0,16059	Aérea	MT	5

Gerador						Linha							LCOE	A linha compensa?
$\%_{gerador/carga}$	P_n [kW]	E_a [kWh]	I_t [€]	C_{comb} anual [€]	$C_{o.m.}$ anual [€]	$\%_{linha/carga}$	E_a [kWh]	Secção [mm2]	C_F [€]	C_V [€]	C_L anual [€]	C_{ve} anual [€]		
100	12	33179	48828	0	166	**0**	0	0	0	0	0	0	0,16059	-
75	9	24884	33322	0	124	**25**	5967	25	137020	4875	0	597	0,58052	não
50	6	16589	19305	0	83	**50**	13677	25	137020	4875	0	1368	0,56055	não
25	3	8295	7215,5	0	41	**75**	21527	25	137020	4875	0	2153	0,54718	não
0	0	0	0	0	0	**100**	29733	25	137020	4875	0	2973	0,55049	não

Para o caso da MR pequena, com alimentação solar FV + bateria, a instalação de uma linha BT é justificada para todas as possíveis repartições de carga entre o gerador e a linha, já que o LCOE de referência é elevado.

O LCOE mais económico é atingido na situação em que a linha é responsável, em termos de potência de ponta, por 75% do abastecimento da carga, sendo que o LCOE aumenta muito ligeiramente quando a linha passa a abastecer a totalidade da carga.

A construção de uma linha MT continua a não ser economicamente viável.

Caso de estudo 1.4. – MR média – Gerador Diesel

Tabela 15 – Caso de estudo 1.4. - Linha aérea BT

MR	Gerador	$LCOE_{referência}$ [€/kWh]	Linha	Tensão	Comprimento [km]
100	diesel	0,16571	Aérea	BT	0,5

Gerador						Linha							LCOE	A linha compensa?
$\%_{gerador/carga}$	P_n [kW]	E_a [kWh]	I_t [€]	$C_{comb\ anual}$ [€]	$C_{o.m.\ anual}$ [€]	$\%_{linha/carga}$	E_a [kWh]	Secção [mm2]	C_F [€]	C_V [€]	$C_{L\ anual}$ [€]	$C_{ve\ anual}$ [€]		
100	65	297898	11700	44685	3575	**0**	0	0	0	0	0	0	0,16571	-
75	49	290684	8820	43603	3488	**25**	7214	25	3027	488	8	721	0,16443	sim
50	33	248105	5940	37216	2977	**50**	49793	50	3027	975	65	4979	0,15498	sim
25	17	146552	3060	21983	1759	**75**	151346	120	3027	2340	150	15135	0,13362	sim
0	0	0	0	0	0	**100**	297898	240	3027	4680	230	29790	0,10313	sim

Tabela 16 – Caso de estudo 1.4. - Linha aérea MT

MR	Gerador	$LCOE_{referência}$ [€/kWh]	Linha	Tensão	Comprimento [km]
100	diesel	0,16571	Aérea	MT	5

Gerador						Linha							LCOE	A linha compensa?
$\%_{gerador/carga}$	P_n [kW]	E_a [kWh]	I_t [€]	$C_{comb\ anual}$ [€]	$C_{o.m.\ anual}$ [€]	$\%_{linha/carga}$	E_a [kWh]	Secção [mm2]	C_F [€]	C_V [€]	$C_{L\ anual}$ [€]	$C_{ve\ anual}$ [€]		
100	65	297898	11700	44685	3575	**0**	0	0	0	0	0	0	0,16571	-
75	49	290684	8820	43603	3488	**25**	7214	25	137020	4875	0	721	0,20826	não
50	33	248105	5940	37216	2977	**50**	49793	25	137020	4875	2	4979	0,19849	não
25	17	146552	3060	21983	1759	**75**	151346	25	137020	4875	12	15135	0,17647	não
0	0	0	0	0	0	**100**	297898	25	137020	4875	35	29790	0,14507	sim

No caso da MR média, o consumo aumenta significativamente e a construção de uma linha BT é interessante para qualquer repartição de carga entre o gerador e a linha.

O LCOE mínimo é obtido quando a linha alimenta a totalidade da carga, pelo que a construção da linha BT é amplamente justificada.

Mesmo a construção de uma linha MT conduz a um LCOE inferior ao LCOE de referência para o caso em que o consumo é totalmente satisfeito pela linha. Contudo, comparando a instalação da linha BT com a linha MT, verifica-se que o LCOE da situação com linha BT é inferior ao LCOE da situação com linha MT, pelo que a primeira opção seria a preferida.

Caso de estudo 1.5. – MR média – Gerador GN

Tabela 17 – Caso de estudo 1.5. - Linha aérea BT

MR	Gerador	$LCOE_{referência}$ [€/kWh]	Linha	Tensão	Comprimento [km]
100	GN	0,08259	Aérea	BT	0,5

Gerador						Linha							LCOE	A linha compensa?
$\%_{gerador/carga}$	P_n [kW]	E_a [kWh]	I_t [€]	$C_{comb\ anual}$ [€]	$C_{o.m.\ anual}$ [€]	$\%_{linha/carga}$	E_a [kWh]	Secção [mm2]	C_F [€]	C_V [€]	$C_{L\ anual}$ [€]	$C_{ve\ anual}$ [€]		
100	65	297898	20800	20853	1787	**0**	0	0	0	0	0	0	0,08259	-
75	49	290684	15680	20348	1744	**25**	7214	25	3027	488	8	721	0,08269	não
50	33	248105	10560	17367	1489	**50**	49793	50	3027	975	65	4979	0,08482	não
25	17	146552	5440	10259	879	**75**	151346	120	3027	2340	150	15135	0,09207	não
0	0	0	0	0	0	**100**	297898	240	3027	4680	230	29790	0,10313	não

Tabela 18 – Caso de estudo 1.5. - Linha aérea MT

MR	Gerador	$LCOE_{referência}$ [€/kWh]	Linha	Tensão	Comprimento [km]
100	GN	0,08259	Aérea	MT	5

Gerador						Linha							LCOE	A linha compensa?
$\%_{gerador/carga}$	P_n [kW]	E_a [kWh]	I_t [€]	$C_{comb\ anual}$ [€]	$C_{o.m.\ anual}$ [€]	$\%_{linha/carga}$	E_a [kWh]	Secção [mm2]	C_F [€]	C_V [€]	$C_{L\ anual}$ [€]	$C_{ve\ anual}$ [€]		
100	65	297898	20800	20853	1787	**0**	0	25	0	0	0	0	0,08259	-
75	49	290684	15680	20348	1744	**25**	7214	25	137020	4875	0	721	0,12651	não
50	33	248105	10560	17367	1489	**50**	49793	25	137020	4875	2	4979	0,12833	não
25	17	146552	5440	10259	879	**75**	151346	25	137020	4875	12	15135	0,13491	não
0	0	0	0	0	0	**100**	297898	25	137020	4875	35	29790	0,14507	não

O caso da MR média alimentada com um gerador a GN apresenta um LCOE baixo, difícil de bater. Assim, a construção de uma linha, BT ou MT, não se justifica, pois os respetivos LCOE são sempre superiores ao LCOE de referência.

Caso de estudo 1.6. – MR média – Gerador FV + Bateria

Tabela 19 – Caso de estudo 1.6. - Linha aérea BT

MR	Gerador	$LCOE_{referência}$ [€/kWh]	Linha	Tensão	Comprimento [km]
100	FV+bateria	0,14312	Aérea	BT	0,5

Gerador						Linha							LCOE	A linha compensa?
$\%_{gerador/carga}$	P_n [kW]	E_a [kWh]	I_t [€]	$C_{comb\ anual}$ [€]	$C_{o.m.\ anual}$ [€]	$\%_{linha/carga}$	E_a [kWh]	Secção [mm2]	C_F [€]	C_V [€]	$C_{L\ anual}$ [€]	$C_{ve\ anual}$ [€]		
100	114	315196	434970	0	1576	**0**	0	0	0	0	0	0	0,14312	-
75	86	237779	283116	0	1189	**25**	68230	120	3027	2340	60	6823	0,11848	sim
50	57	157598	147742	0	788	**50**	142763	120	3027	2340	162	14276	0,09957	sim
25	29	80181	58000	0	401	**75**	217717	240	3027	4680	145	21772	0,09568	sim
0	0	0	0	0	0	**100**	297898	240	3027	4680	230	29790	0,10313	sim

Tabela 20 – Caso de estudo 1.6. - Linha aérea MT

MR	Gerador	$LCOE_{referência}$ [€/kWh]	Linha	Tensão	Comprimento [km]
100	FV+bateria	0,14312	Aérea	MT	5

Gerador						Linha							LCOE	A linha compensa?
$\%_{gerador/carga}$	P_n [kW]	E_a [kWh]	I_t [€]	$C_{comb\ anual}$ [€]	$C_{o.m.\ anual}$ [€]	$\%_{linha/carga}$	E_a [kWh]	Secção [mm2]	C_F [€]	C_V [€]	$C_{L\ anual}$ [€]	$C_{ve\ anual}$ [€]		
100	114	315196	434970	0	1576	**0**	0	0	0	0	0	0	0,14312	-
75	86	237779	283116	0	1189	**25**	68230	25	137020	4875	5	6823	0,16158	não
50	57	157598	147742	0	788	**50**	142763	25	137020	4875	12	14276	0,14238	não
25	29	80181	58000	0	401	**75**	217717	25	137020	4875	22	21772	0,13784	sim
0	0	0	0	0	0	**100**	297898	25	137020	4875	35	29790	0,14507	não

Para o caso em que se tem uma MR média alimentada por uma solução baseada em FV + bateria, a construção de uma linha BT é amplamente justificada, pois os LCOE obtidos são inferiores ao LCOE de referência.

A repartição de cargas que conduz ao LCOE mais económico corresponde à situação em que o gerador está dimensionado para uma potência de ponta igual a 25% da potência de ponta da MR, sendo o restante alimentado através de uma linha aérea BT.

Em geral, a instalação de uma linha MT não se justifica ainda, apesar de a mesma repartição do que no caso da linha BT conduzir a um LCOE marginalmente inferior ao LCOE de referência.

Caso de estudo 1.7. – MR grande – Gerador Diesel

Tabela 21 – Caso de estudo 1.7. - Linha aérea BT

MR	Gerador	$LCOE_{referência}$ [€/kWh]	Linha	Tensão	Comprimento [km]
1000	diesel	0,16473	Aérea	BT	0,5

Gerador						Linha							LCOE	A linha compensa?
$\%_{gerador/carga}$	P_n [kW]	E_a [kWh]	I_t [€]	C_{comb} anual [€]	$C_{o.m.}$ anual [€]	$\%_{linha/carga}$	E_a [kWh]	Secção [mm2]	C_F [€]	C_V [€]	C_L anual [€]	C_{ve} anual [€]		
100	453	2821619	81540	423243	33859	**0**	0	25	0	0	0	0	0,16473	-
75	340	2533426	61200	380014	30401	**25**	288193	240	3027	4680	314	28819	0,15807	sim
50	227	1861457	40860	279219	22337	**50**	960162	N. A.	-	-	-	-	-	Não se aplica
25	114	998640	20520	149796	11984	**75**	1822979	N. A.	-	-	-	-	-	Não se aplica
0	0	0	0	0	0	**100**	2821619	N. A.	-	-	-	-	-	Não se aplica

Tabela 22 – Caso de estudo 1.7. - Linha aérea MT

MR	Gerador	$LCOE_{referência}$ [€/kWh]	Linha	Tensão	Comprimento [km]
1000	diesel	0,16473	Aérea	MT	5

Gerador						Linha							LCOE	A linha compensa?
$\%_{gerador/carga}$	P_n [kW]	E_a [kWh]	I_t [€]	C_{comb} anual [€]	$C_{o.m.}$ anual [€]	$\%_{linha/carga}$	E_a [kWh]	Secção [mm2]	C_F [€]	C_V [€]	C_L anual [€]	C_{ve} anual [€]		
100	453	2821619	81540	423243	33859	**0**	0	25	0	0	0	0	0,16473	-
75	340	2533426	61200	380014	30401	**25**	288193	25	137020	4875	48	28819	0,16248	sim
50	227	1861457	40860	279219	22337	**50**	960162	25	137020	4875	384	96016	0,14714	sim
25	114	998640	20520	149796	11984	**75**	1822979	50	137020	9750	606	182298	0,12773	sim
0	0	0	0	0	0	**100**	2821619	120	137020	23400	561	282162	0,10554	sim

Para a MR grande, o consumo é bastante significativo, pelo que a alimentação através de uma linha passa a ser opção acertada.

No caso da linha BT, a alimentação neste nível de tensão só é possível para repartições de carga inferiores a 25% da potência de ponta da MR. Para manter as perdas num nível adequado, seria preciso aumentar a secção dos cabos para valores incomportáveis.

Para repartições de carga superiores, é necessária a instalação de uma linha MT, sendo que o LCOE mais baixo é atingido quando a linha MT assegura a totalidade do fornecimento de energia.

Caso de estudo 1.8. – MR grande – Gerador GN

Tabela 23 – Caso de estudo 1.8. - Linha aérea BT

MR	Gerador	$LCOE_{referência}$ [€/kWh]	Linha	Tensão	Comprimento [km]
1000	GN	0,08085	Aérea	BT	0,5

Gerador						Linha							LCOE	A linha compensa?
$\%_{gerador/carga}$	P_n [kW]	E_a [kWh]	I_t [€]	$C_{comb\ anual}$ [€]	$C_{o.m.\ anual}$ [€]	$\%_{linha/carga}$	E_a [kWh]	Secção [mm2]	C_F [€]	C_V [€]	$C_{L\ anual}$ [€]	$C_{ve\ anual}$ [€]		
100	453	2821619	144960	197513	16930	**0**	0	25	0	0	0	0	0,08085	-
75	340	2533426	108800	177340	15201	**25**	288193	240	3027	4680	314	28819	0,08245	não
50	227	1861457	72640	130302	11169	**50**	960162	N. A.	-	-	-	-	-	não se aplica
25	114	998640	36480	69905	5992	**75**	1822979	N. A.	-	-	-	-	-	não se aplica
0	0	0	0	0	0	**100**	2821619	N. A.	-	-	-	-	-	não se aplica

Tabela 24 – Caso de estudo 1.8. - Linha aérea MT

MR	Gerador	$LCOE_{referência}$ [€/kWh]	Linha	Tensão	Comprimento [km]
1000	GN	0,08085	Aérea	MT	5

Gerador						Linha							LCOE	A linha compensa?
$\%_{gerador/carga}$	P_n [kW]	E_a [kWh]	I_t [€]	$C_{comb\ anual}$ [€]	$C_{o.m.\ anual}$ [€]	$\%_{linha/carga}$	E_a [kWh]	Secção [mm2]	C_F [€]	C_V [€]	$C_{L\ anual}$ [€]	$C_{ve\ anual}$ [€]		
100	453	2821619	144960	197513	16930	**0**	0	25	0	0	0	0	0,08085	-
75	340	2533426	108800	177340	15201	**25**	288193	25	137020	4875	48	28819	0,08685	não
50	227	1861457	72640	130302	11169	**50**	960162	25	137020	4875	384	96016	0,09146	não
25	114	998640	36480	69905	5992	**75**	1822979	50	137020	9750	606	182298	0,09783	não
0	0	0	0	0	0	**100**	2821619	120	137020	23400	561	282162	0,10554	não

O LCOE da solução com um gerador a GN é tão competitivo, que, mesmo no caso da MR grande, continua a não se justificar a instalação de uma linha MT.

Caso de estudo 1.9. – MR grande – Gerador FV + Bateria

Tabela 25 – Caso de estudo 1.9. - Linha aérea BT

MR	Gerador	$LCOE_{referência}$ [€/kWh]	Linha	Tensão	Comprimento [km]
1000	FV+bateria	0,14538	Aérea	BT	0,5

Gerador						Linha							LCOE	A linha compensa?
$\%_{gerador/carga}$	P_n [kW]	E_a [kWh]	I_t [€]	C_{comb} anual [€]	$C_{o.m.}$ anual [€]	$\%_{linha/carga}$	E_a [kWh]	Secção [mm2]	C_F [€]	C_V [€]	C_L anual [€]	C_{ve} anual [€]		
100	1075	2972241	4188164,5	0	14861	**0**	0	0	0	0	0	0	0,14538	-
75	807	2231254	2702066	0	11156	**25**	669794	N. A.	-	-	-	-	-	não se aplica
50	538	1487503	1343069	0	7438	**50**	1353612	N. A.	-	-	-	-	-	não se aplica
25	269	743751	538000	0	3719	**75**	2077868	N. A.	-	-	-	-	-	não se aplica
0	0	0	0	0	0	**100**	2821619	N. A.	-	-	-	-	-	não se aplica

Tabela 26 – Caso de estudo 1.9. - Linha aérea MT

MR	Gerador	$LCOE_{referência}$ [€/kWh]	Linha	Tensão	Comprimento [km]
1000	FV+bateria	0,14538	Aérea	MT	5

Gerador						Linha							LCOE	A linha compensa?
$\%_{gerador/carga}$	P_n [kW]	E_a [kWh]	I_t [€]	C_{comb} anual [€]	$C_{o.m.}$ anual [€]	$\%_{linha/carga}$	E_a [kWh]	Secção [mm2]	C_F [€]	C_V [€]	C_L anual [€]	C_{ve} anual [€]		
100	1075	2972241	4188165	0	14861	**0**	0	0	0	0	0	0	0,14538	-
75	807	2231254	2702066	0	11156	**25**	669794	25	137020	4875	331	66979	0,12294	sim
50	538	1487503	1343069	0	7438	**50**	1353612	50	137020	9750	461	135361	0,10059	sim
25	269	743751	538000	0	3719	**75**	2077868	50	137020	9750	860	207787	0,09814	sim
0	0	0	0	0	0	**100**	2821619	120	137020	23400	561	282162	0,10554	sim

Para o caso da MR grande, a solução de alimentação FV + bateria não é competitiva, sendo mais económico construir uma linha MT.

O LCOE mínimo é atingido na situação em que a potência de ponta do gerador é 25% da potência de ponta da MR e o restante é fornecido pela linha MT.

Nos gráficos correspondentes às Figuras 25 e 26 condensa-se alguma da informação presente nas Tabelas 9, 11, 13, 15, 17 e 19. Para as MR pequena e média, para a linha BT, e para cada um dos geradores locais considerados, apresenta-se a evolução do LCOE à medida que a percentagem da carga alimentada pelo gerador vai diminuindo e que, por conseguinte, vai aumentando a percentagem alimentada pela linha. Não é apresentado o gráfico correspondente à MR grande, uma vez que, para a maior parte dos casos, a construção da linha BT não é aplicável, pois uma linha neste nível de tensão, com as secções consideradas, não consegue suportar uma quantidade de energia tão elevada com perdas aceitáveis.

Nos gráficos correspondentes às Figuras 27 e 28, apresenta-se um resumo da informação das Tabelas 16, 18, 20, 22, 24 e 26, ou seja, apresentam-se os gráficos de evolução do LCOE, referentes às MR média e grande, mas com a opção de linha MT. No caso da MR pequena, a linha MT é demasiado dispendiosa (Tabelas 10, 12 e 14), tendo-se optado por não apresentar o respetivo gráfico de evolução de LCOE.

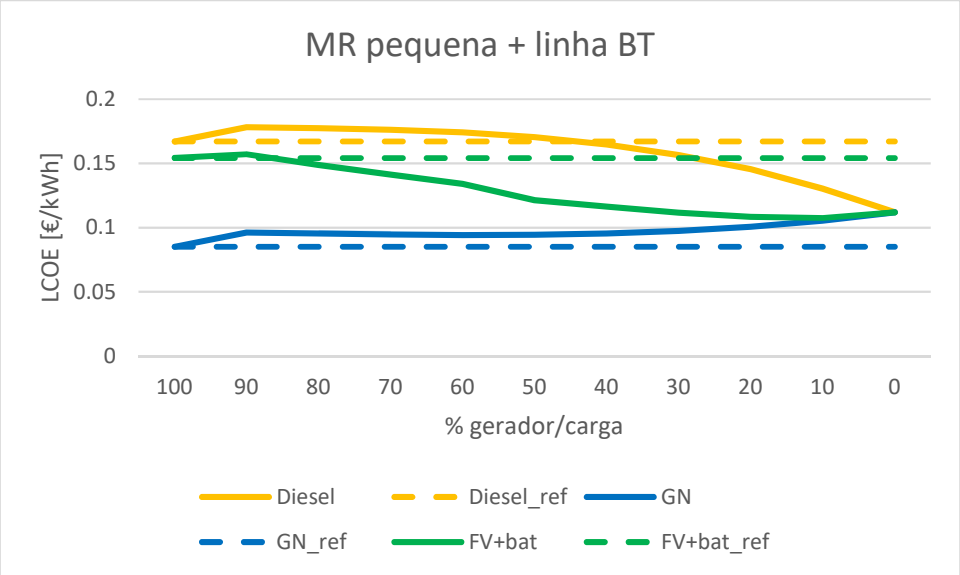

Figura 25 – Evolução do LCOE; MR pequena + Linha BT (secção normalizada) para diferentes tipos de geração

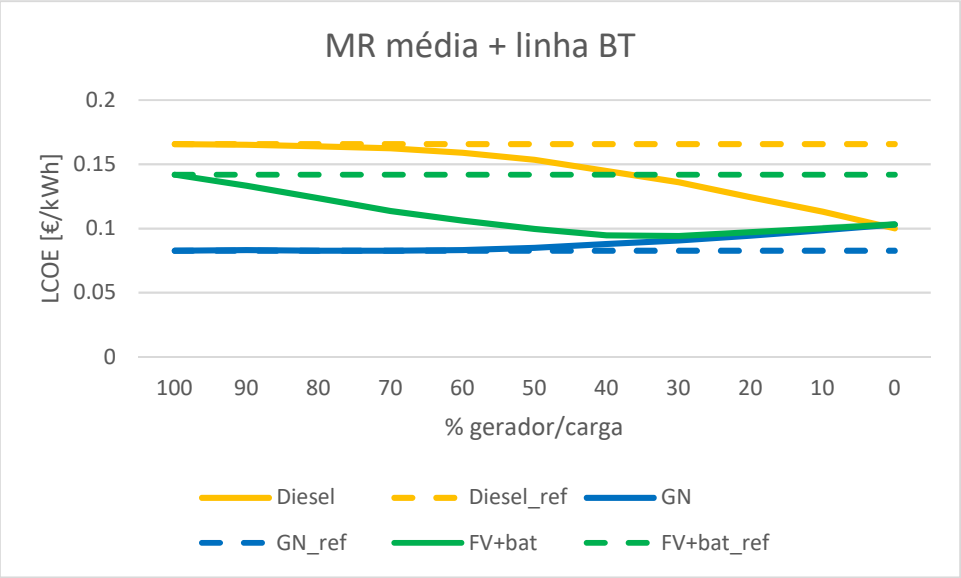

Figura 26 – Evolução do LCOE; MR média+ Linha BT (secção normalizada) para diferentes tipos de geração

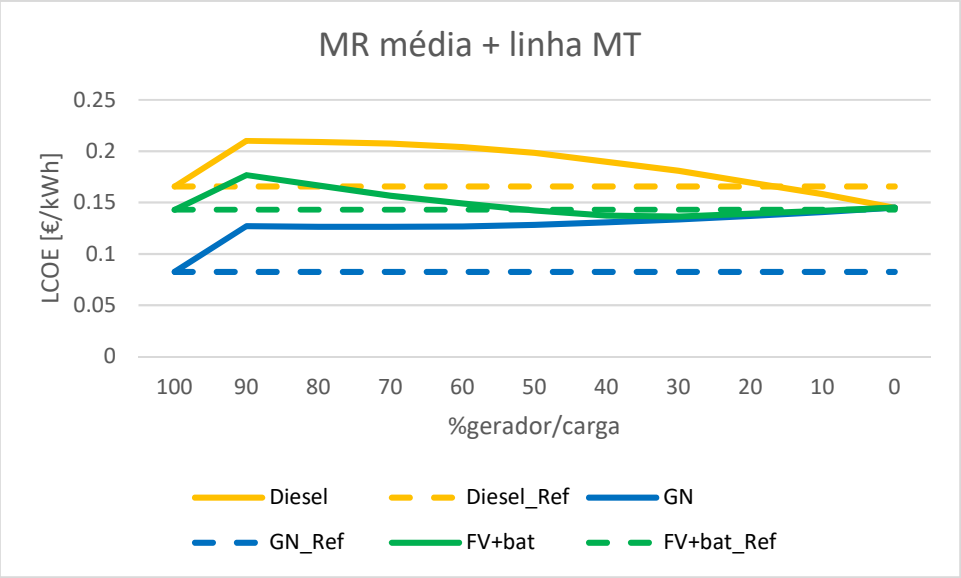

Figura 27 – Evolução do LCOE; MR média + Linha MT (secção normalizada) para diferentes tipos de geração

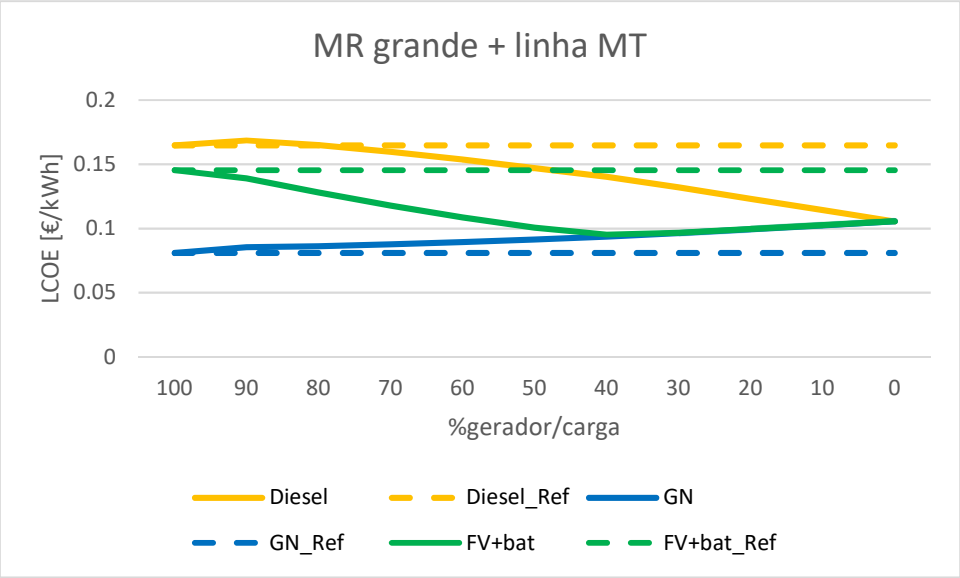

Figura 28 – Evolução do LCOE; MR grande + Linha MT (secção normalizada) para diferentes tipos de geração

A Tabela 27 apresenta um resumo dos resultados em forma compacta.

Tabela 27 – Resultados dos casos de estudo em forma compacta; Sim = a construção da linha é economicamente vantajosa; Não = a construção da linha não é economicamente vantajosa; NA – Não se aplica; Sim 50% - a construção da linha é economicamente vantajosa para repartições de carga superiores a 50% da potência de ponta.

	Diesel	**GN**	**FV + Bateria**
MR pequena	BT – Sim 50%	BT – Não	BT – Sim
Ea = 30 MWh	MT – Não	MT – Não	MT – Não
MR média	BT – Sim	BT – Não	BT – Sim
Ea = 300 MWh	MT – Não	MT – Não	MT – Não
MR grande	BT – NA	BT – NA	BT – NA
Ea = 3000 MWh	MT – Sim	MT – Não	MT – Sim

A partir dos resultados apresentados, é possível retirar as seguintes conclusões, a nível geral:

- O Diesel é uma solução cara, pelo que a instalação de uma linha começa logo a ser vantajosa para repartições de carga superiores a 50% da potência de ponta, no caso da MR pequena; no caso da MR média, a melhor opção é contruir uma linha aérea BT e no caso da MR grande, justifica-se uma linha MT.
- O GN é uma solução muito barata. Para as condições de simulação testadas, a instalação de uma linha aérea nunca se justifica, mesmo no caso da MR grande.
- A solução FV + Bateria tem um LCOE semelhante ao Diesel, pelo a instalação de uma linha BT é a melhor opção para as MR pequena e média e uma linha MT para a MR grande.

4.3.2. Caso de estudo 2 – Uso da secção ótima

Caso de estudo 2.1. – MR pequena – Gerador Diesel

Tabela 28 – Caso de estudo 2.1.- Linha aérea BT

MR	Gerador	$LCOE_{referência}$ [€/kWh]	Linha	Tensão	Comprimento [km]
10	diesel	0,16714	Aérea	BT	0,5

Gerador						Linha							LCOE	A linha compensa?
$\%_{gerador/carga}$	P_n [kW]	E_a [kWh]	I_t [€]	$C_{comb\ anual}$ [€]	$C_{o.m.\ anual}$ [€]	$\%_{linha/carga}$	E_a [kWh]	Secção [mm2]	C_F [€]	C_V [€]	$C_{L\ anual}$ [€]	$C_{ve\ anual}$ [€]		
100	9	29733	1620	4460	357	**0**	0	0	0	0	0	0	0.16714	-
75	7	29306	1260	4396	352	**25**	427	0.837	101	16	2	43	0.16554	sim
50	5	27089	900	4063	325	**50**	2644	3.047	369	59	6	264	0.16089	sim
25	3	20894	540	3134	251	**75**	8839	7.216	874	141	15	884	0.14895	sim
0	0	0	0	0	0	**100**	29733	18.04	2184	352	37	2973	0.10917	sim

Tabela 29 – Caso de estudo 2.1. - Linha aérea MT

MR	Gerador	$LCOE_{referência}$ [€/kWh]	Linha	Tensão	Comprimento [km]
10	diesel	0,16714	Aérea	MT	5

Gerador						Linha							LCOE	A linha compensa?
$\%_{gerador/carga}$	P_n [kW]	E_a [kWh]	I_t [€]	$C_{comb\ anual}$ [€]	$C_{o.m.\ anual}$ [€]	$\%_{linha/carga}$	E_a [kWh]	Secção [mm2]	C_F [€]	C_V [€]	$C_{L\ anual}$ [€]	$C_{ve\ anual}$ [€]		
100	9	29733	1620	4460	357	**0**	0	0	0	0	0	0	0.16714	-
75	7	29306	1260	4396	352	**25**	427	0.033	184	7	1	43	0.16573	sim
50	5	27089	900	4063	325	**50**	2644	0.122	668	24	3	264	0.16162	sim
25	3	20894	540	3134	251	**75**	8839	0.289	1582	56	6	884	0.15066	sim
0	0	0	0	0	0	**100**	29733	0.722	3955	141	15	2973	0.11345	sim

Caso de estudo 2.2. – MR pequena – Gerador GN

Tabela 30 – Caso de estudo 2.2. - Linha aérea BT

MR	Gerador	$LCOE_{referência}$ [€/kWh]	Linha	Tensão	Comprimento [km]
10	GN	0,08514	Aérea	BT	0,5

Gerador						Linha							LCOE	A linha compensa?
$\%_{gerador/carga}$	P_n [kW]	E_a [kWh]	I_t [€]	$C_{comb\ anual}$ [€]	$C_{o.m.\ anual}$ [€]	$\%_{linha/carga}$	E_a [kWh]	Secção [mm2]	C_F [€]	C_V [€]	$C_{L\ anual}$ [€]	$C_{ve\ anual}$ [€]		
100	9	29733	2880	2081	178	**0**	0	0	0	0	0	0	0.08514	-
75	7	29306	2240	2051	176	**25**	427	0.837	101	16	2	43	0.08388	sim
50	5	27089	1600	1896	163	**50**	2644	3.047	369	59	6	264	0.08476	sim
25	3	20894	960	1463	125	**75**	8839	7.216	874	141	15	884	0.08985	não
0	0	0	0	0	0	**100**	29733	18.04	2184	352	37	2973	0.10917	não

Tabela 31 – Caso de estudo 2.2. - Linha aérea MT

MR	Gerador	$LCOE_{referência}$ [€/kWh]	Linha	Tensão	Comprimento [km]
10	GN	0,08514	Aérea	MT	5

Gerador						Linha							LCOE	A linha compensa?
$\%_{gerador/carga}$	P_n [kW]	E_a [kWh]	I_t [€]	$C_{comb\ anual}$ [€]	$C_{o.m.\ anual}$ [€]	$\%_{linha/carga}$	E_a [kWh]	Secção [mm2]	C_F [€]	C_V [€]	$C_{L\ anual}$ [€]	$C_{ve\ anual}$ [€]		
100	9	29733	2880	2081	178	**0**	0	0	0	0	0	0	0.08514	-
75	7	29306	2240	2051	176	**25**	427	0.033	184	7	1	43	0.08408	sim
50	5	27089	1600	1896	163	**50**	2644	0.122	668	24	3	264	0.08548	não
25	3	20894	960	1463	125	**75**	8839	0.289	1582	56	6	884	0.09156	não
0	0	0	0	0	0	**100**	29733	0.722	3955	141	15	2973	0.11345	não

Caso de estudo 2.3. – MR pequena – Gerador FV + Bateria

Tabela 32 – Caso de estudo 2.3. - Linha aérea BT

MR	Gerador	$LCOE_{referência}$ [€/kWh]	Linha	Tensão	Comprimento [km]
10	FV+bateria	0,16059	Aérea	BT	0,5

Gerador						Linha							LCOE	A linha compensa?
$\%_{gerador/carga}$	P_n [kW]	E_a [kWh]	I_t [€]	$C_{comb\ anual}$ [€]	$C_{o.m.\ anual}$ [€]	$\%_{linha/carga}$	E_a [kWh]	Secção [mm2]	C_F [€]	C_V [€]	$C_{L\ anual}$ [€]	$C_{ve\ anual}$ [€]		
100	12	33179	48828	0	166	**0**	0	0	0	0	0	0	0.16059	-
75	9	24884	33321.5	0	124	**25**	5967	6.139	743	120	13	597	0.13316	sim
50	6	16589	19305	0	83	**50**	13677	9.994	1210	195	21	1368	0.11516	sim
25	3	8295	7215.5	0	41	**75**	21527	13.997	1695	273	29	2153	0.10382	sim
0	0	0	0	0	0	**100**	29733	18.04	2184	352	37	2973	0.10917	sim

Tabela 33 – Caso de estudo 2.3. - Linha aérea MT

MR	Gerador	$LCOE_{referência}$ [€/kWh]	Linha	Tensão	Comprimento [km]
10	FV+bateria	0,16059	Aérea	MT	5

Gerador						Linha							LCOE	A linha compensa?
$\%_{gerador/carga}$	P_n [kW]	E_a [kWh]	I_t [€]	$C_{comb\ anual}$ [€]	$C_{o.m.\ anual}$ [€]	$\%_{linha/carga}$	E_a [kWh]	Secção [mm2]	C_F [€]	C_V [€]	$C_{L\ anual}$ [€]	$C_{ve\ anual}$ [€]		
100	12	33179	48828	0	166	**0**	0	0	0	0	0	0	0.16059	-
75	9	24884	33321.5	0	124	**25**	5967	0.246	1346	48	5	597	0.13462	sim
50	6	16589	19305	0	83	**50**	13677	0.4	2191	78	8	1368	0.11753	sim
25	3	8295	7215.5	0	41	**75**	21527	0.56	3069	109	12	2153	0.10714	sim
0	0	0	0	0	0	**100**	29733	0.722	3955	141	15	2973	0.11345	sim

Como se pode observar nas Tabelas 28 a 33, o investimento na linha baixa bastante, pelo que a construção de uma linha partilhada passa a ser economicamente viável em situações que a instalação de uma linha exclusiva não compensava. É interessante notar o aumento do custo das perdas, devido à redução da secção considerada nos cálculos. No entanto, o aumento do custo das perdas é bastante inferior à redução no investimento, pelo que se regista uma apreciável redução do custo total imputado à linha. Por exemplo, analisando o caso de a linha BT abastecer integralmente a MR pequena, verifica-se que a secção normalizada é 25 mm2 e a secção ótima é 18,04 mm2. O custo de investimento diminui nesta proporção e o custo das perdas (que tem um peso muito menor) aumenta na mesma proporção. Nas figuras 29 e 30, temos, sob a forma de gráfico, uma síntese dos resultados das Tabelas 28 a 33.

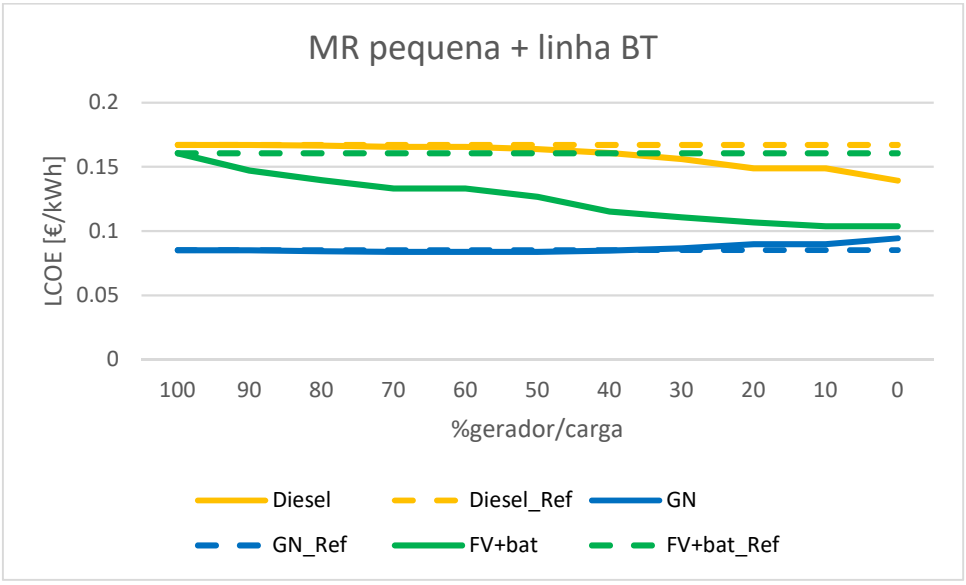

Figura 29 – Evolução do LCOE; MR pequena + Linha BT (secção ótima) para diferentes tipos de geração

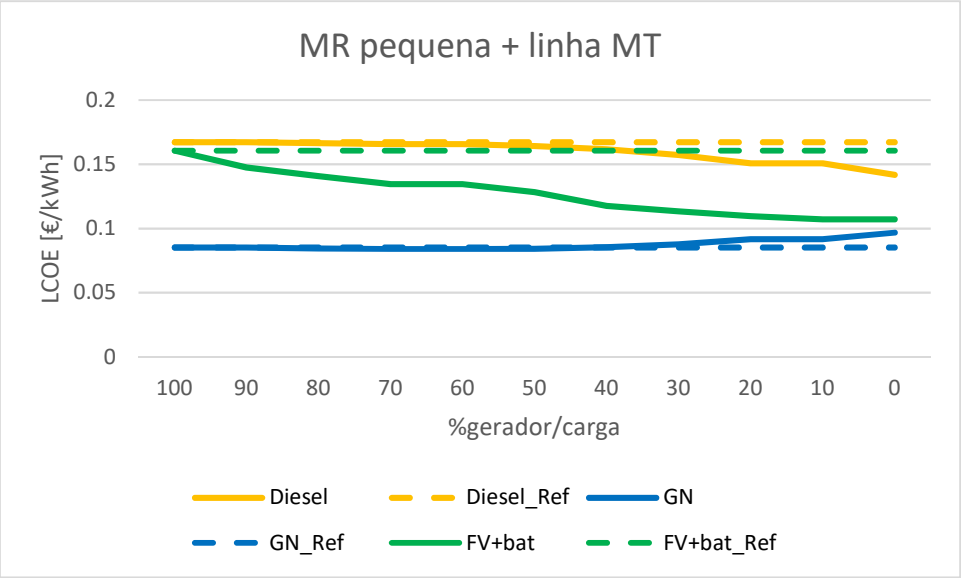

Figura 30 – Evolução do LCOE; MR pequena + Linha MT (secção ótima) para diferentes tipos de geração

4.4. Análise de Sensibilidade

No sentido de estudar a influência de alguns dos parâmetros associados aos custos, tanto dos geradores como da linha, no cálculo do LCOE procederam-se a uma análise de sensibilidade.

Primeiramente, considerou-se uma variação no investimento dos geradores, ou seja, reduziu-se e aumentou-se separadamente o respetivo investimento em cerca de um terço e calculou-se o LCOE resultante. No caso da solução FV + Bateria, seguindo a tendência atual, só se considerou a redução no investimento, tendo-se analisado uma situação de redução moderada e uma situação de redução forte no investimento, tanto no gerador como na bateria. Os resultados são apresentados nas Tabelas 40 a 45.

Para além da variação no investimento dos geradores, procedeu-se também a um estudo de sensibilidade, desta feita, ao investimento na linha, nas suas duas componentes, custo fixo, C_F (€/km) e custo variável, C_V (€/km.mm^2). Este estudo foi feito de forma idêntica ao anterior, ou seja, analisou-se uma situação em que o investimento era reduzido em 50% e uma situação correspondente a um aumento de 50% (Tabelas 46 a 51).

Depois de analisada a influência da variação do investimento tanto no gerador, como na linha, procedeu-se à análise de sensibilidade da variação do custo do combustível referentes aos casos com geradores a diesel e GN. Este estudo de sensibilidade pretende ter em consideração os custos de transporte, distribuição e armazenamento do combustível. Desta forma, analisou-se a situação em que o custo de combustível era aumentado em 50%, tanto no diesel como no GN, resultados que se apresentam nas Tabelas 52 a 55.

Tendo em conta a análise feita na secção 4.3, não foram analisadas as situações na MR grande com a linha BT e MR pequena com linha MT, uma vez que estes níveis de tensão não são adequados à dimensão da MR.

Para facilitar a comparação e não tornar as Tabelas demasiado extensas, nas Tabelas 40 a 55, mostra-se o LCOE apenas para 3 situações (100%, 50% e 0% referente à percentagem da potência de ponta do gerador que alimenta a carga, sendo que na situação 0%, a linha é responsável pela totalidade do abastecimento da carga). Nas Tabelas mencionadas, ilustra-se o LCOE para a situação de referência (analisada na secção 4.3) e para as situações de aumento e redução no investimento de cada gerador/linha ou para a situação de aumento nos custos de combustível.

4.4.1. Análise de sensibilidade 1 – Variação no Investimento dos geradores

Tabela 34 – Análise de sensibilidade 1 - Gerador Diesel e linha aérea BT; MR pequena e média

Gerador	**Diesel**								
Linha	**BT, linha aérea, comprimento = 0,5 km**								
Investimento gerador [€/kW]	**180 – Referência**			**120**			**250**		
MR	**Pequena**								
LCOE [€/kWh]	**$\%_{gerador/carga}$**	**LCOE**	**A linha compensa?**	**$\%_{gerador/carga}$**	**LCOE**	**A linha compensa?**	**$\%_{gerador/carga}$**	**LCOE**	**A linha compensa?**
	100	0,16714	-	**100**	0,16543	-	**100**	0,16914	-
	50	0,17052	não	**50**	0,16957	não	**50**	0,17164	não
	0	0,11196	sim	**0**	0,11196	sim	**0**	0,11196	sim
MR	**Média**								
LCOE [€/kWh]	**$\%_{gerador/carga}$**	**LCOE**	**A linha compensa?**	**$\%_{gerador/carga}$**	**LCOE**	**A linha compensa?**	**$\%_{gerador/carga}$**	**LCOE**	**A linha compensa?**
	100	0,16571	-	**100**	0,16447	-	**100**	0,16715	-
	50	0,15498	sim	**50**	0,15436	sim	**50**	0,15571	sim
	0	0,10313	sim	**0**	0,10313	sim	**0**	0,10313	sim

Tabela 35 – Análise de sensibilidade 1 - Gerador Diesel e linha aérea MT; MR média e grande

Gerador	Diesel								
Linha	MT, linha aérea, comprimento = 5 km								
Investimento gerador [€/kW]	180 – Referência			120			250		
MR	Média								
LCOE [€/kWh]	$\%_{gerador/carga}$	LCOE	A linha compensa?	$\%_{gerador/carga}$	LCOE	A linha compensa?	$\%_{gerador/carga}$	LCOE	A linha compensa?
	100	0,16571	-	100	0,16447	-	100	0,16715	-
	50	0,19849	não	50	0,19786	não	50	0,19922	não
	0	0,14507	sim	0	0,14507	sim	0	0,14507	sim
MR	Grande								
LCOE [€/kWh]	$\%_{gerador/carga}$	LCOE	A linha compensa?	$\%_{gerador/carga}$	LCOE	A linha compensa?	$\%_{gerador/carga}$	LCOE	A linha compensa?
	100	0,16473	-	100	0,16382	-	100	0,16579	-
	50	0,14714	sim	50	0,14668	sim	50	0,14767	sim
	0	0,10554	sim	0	0,10554	sim	0	0,10554	sim

Tabela 36 – Análise de sensibilidade 1 - Gerador GN e linha aérea BT; MR pequena e média

Gerador	**GN**								
Linha	**BT, linha aérea, comprimento = 0,5 km**								
Investimento gerador [€/kW]	**320 – Referência**			**210**			**430**		
MR	**Pequena**								
LCOE [€/kWh]	**$\%_{gerador/carga}$**	**LCOE**	**A linha compensa?**	**$\%_{gerador/carga}$**	**LCOE**	**A linha compensa?**	**$\%_{gerador/carga}$**	**LCOE**	**A linha compensa?**
	100	0,08514	-	**100**	0,082	-	**100**	0,08829	-
	50	0,09439	não	**50**	0,09265	não	**50**	0,09614	não
	0	0,11196	não	**0**	0,11196	não	**0**	0,11196	não
MR	**Média**								
LCOE [€/kWh]	**$\%_{gerador/carga}$**	**LCOE**	**A linha compensa?**	**$\%_{gerador/carga}$**	**LCOE**	**A linha compensa?**	**$\%_{gerador/carga}$**	**LCOE**	**A linha compensa?**
	100	0,08259	-	**100**	0,08033	-	**100**	0,08486	-
	50	0,08482	não	**50**	0,08367	não	**50**	0,08597	não
	0	0,10313	não	**0**	0,10313	não	**0**	0,10313	não

Tabela 37 – Análise de sensibilidade 1 - Gerador GN e linha aérea MT; MR média e grande

Gerador	**GN**								
Linha	**MT, linha aérea, comprimento = 5 km**								
Investimento gerador [€/kW]	**320 – Referência**			**210**			**430**		
MR	**Média**								
LCOE [€/kWh]	**$\%_{gerador/carga}$**	**LCOE**	**A linha compensa?**	**$\%_{gerador/carga}$**	**LCOE**	**A linha compensa?**	**$\%_{gerador/carga}$**	**LCOE**	**A linha compensa?**
	100	0,08259	-	**100**	0,08033	-	**100**	0,08486	-
	50	0,12833	não	**50**	0,12717	não	**50**	0,12948	não
	0	0,14507	não	**0**	0,14507	não	**0**	0,14507	não
MR	**Grande**								
LCOE [€/kWh]	**$\%_{gerador/carga}$**	**LCOE**	**A linha compensa?**	**$\%_{gerador/carga}$**	**LCOE**	**A linha compensa?**	**$\%_{gerador/carga}$**	**LCOE**	**A linha compensa?**
	100	0,08085	-	**100**	0,07918	-	**100**	0,08252	-
	50	0,09146	não	**50**	0,09063	não	**50**	0,0923	não
	0	0,10554	não	**0**	0,10554	não	**0**	0,10554	não

Tabela 38 – Análise de sensibilidade 1 - Gerador FV + Bateria e linha aérea BT; MR pequena e média

Gerador	**FV + Bateria**								
Linha	**BT, linha aérea, comprimento = 0,5 km**								
Investimento gerador [€/kW]	**2000 – Referência**			**1500**			**750**		
Investimento bateria [€/kWh]	**500 – Referência**			**400**			**200**		
MR	**Pequena**								
LCOE [€/kWh]	**$\%_{gerador/carga}$**	**LCOE**	**A linha compensa?**	**$\%_{gerador/carga}$**	**LCOE**	**A linha compensa?**	**$\%_{gerador/carga}$**	**LCOE**	**A linha compensa?**
	100	0,16059	-	**100**	0,12578	-	**100**	0,06568	-
	50	0,12148	sim	**50**	0,10732	sim	**50**	0,08376	não
	0	0,11196	sim	**0**	0,11196	sim	**0**	0,11196	não
MR	**Média**								
LCOE [€/kWh]	**$\%_{gerador/carga}$**	**LCOE**	**A linha compensa?**	**$\%_{gerador/carga}$**	**LCOE**	**A linha compensa?**	**$\%_{gerador/carga}$**	**LCOE**	**A linha compensa?**
	100	0,14188	-	**100**	0,11194	-	**100**	0,05861	-
	50	0,09957	sim	**50**	0,0884	sim	**50**	0,07058	não
	0	0,10313	sim	**0**	0,10313	sim	**0**	0,10313	não

Tabela 39 – Análise de sensibilidade 1 - Gerador FV + Bateria e linha aérea MT; MR média e grande

Gerador	**FV + Bateria**		
Linha	**MT, aérea, 5 m**		
Investimento gerador [€/kW]	**2000 – Referência**	**1500**	**750**
Investimento bateria [€/kWh]	**500 – Referência**	**400**	**200**
MR	**Média**		
LCOE [€/kWh]			

$\%_{gerador/carga}$	LCOE	A linha compensa?
100	0,14312	-
50	0,14238	não
0	0,14507	não

$\%_{gerador/carga}$	LCOE	A linha compensa?
100	0,11194	-
50	0,13121	não
0	0,14507	não

$\%_{gerador/carga}$	LCOE	A linha compensa?
100	0,05861	-
50	0,11339	não
0	0,14507	não

MR	**Grande**		
LCOE [€/kWh]			

$\%_{gerador/carga}$	LCOE	A linha compensa?
100	0,14538	-
50	0,10059	sim
0	0,10554	sim

$\%_{gerador/carga}$	LCOE	A linha compensa?
100	0,11376	-
50	0,08981	sim
0	0,10554	sim

$\%_{gerador/carga}$	LCOE	A linha compensa?
100	0,05951	-
50	0,07274	não
0	0,10554	não

As variações aplicadas ao valor do investimento no gerador diesel (Tabelas 28 e 29) não revelaram alterações substanciais. O LCOE de referência aumenta quando o investimento aumenta e diminui quando o investimento se reduz, como seria de esperar. Contudo, estas diferenças não são suficientes para alterar as condições de rentabilidade da construção da linha BT e de MT. Em geral, observa-se que, a construção da linha (BT ou MT, conforme os casos) é a solução mais económica à medida que se vai considerando que a linha abastece uma percentagem maior da carga. A redução no investimento no gerador não torna esta opção a mais acertada do ponto de vista económico.

Verifica-se que as situações de alimentação exclusiva com o gerador a GN (Tabelas 30 e 31) continuam a ser as que apresentam um LCOE mais baixo; mesmo considerando um aumento no investimento do gerador, a instalação de linhas BT ou MT não é rentável. Por outro lado, a diminuição do investimento do gerador acentuou ainda mais a viabilidade da solução de uma MR alimentada exclusivamente por um gerador a GN.

Em geral, observa-se que uma redução forte no investimento da solução FV + bateria (Tabelas 32 e 33) conduz a uma situação em que o abastecimento exclusivo através desta solução tecnológica se justifica plenamente. Numa situação de redução moderada no investimento, a solução economicamente mais viável continua a ser a instalação de uma linha para abastecimento da carga.

4.4.2. Análise de sensibilidade 2 – Variação no Investimento da linha

Tabela 40 – Análise de sensibilidade 2 - Gerador Diesel e linha aérea BT; MR pequena e média

Gerador	**Diesel**		
Linha	**BT, linha aérea, comprimento = 0,5 km**		
Investimento linha (CF) [€/km]	**6054 – Referência**	**3027**	**9081**
Investimento linha (CV) [€/(km.mm²)]	**39 – Referência**	**20**	**59**
MR	**Pequena**		
LCOE [€/kWh]	**%gerador/carga** / **LCOE** / **A linha compensa?** **100** / 0,16714 / - **50** / 0,17052 / não **0** / 0,11196 / sim	**%gerador/carga** / **LCOE** / **A linha compensa?** **100** / 0,16714 / - **50** / 0,16495 / sim **0** / 0,10638 / sim	**%gerador/carga** / **LCOE** / **A linha compensa?** **100** / 0,16714 / - **50** / 0,1761 / não **0** / 0,11754 / sim
MR	**Média**		
LCOE [€/kWh]	**%gerador/carga** / **LCOE** / **A linha compensa?** **100** / 0,16571 / - **50** / 0,15498 / sim **0** / 0,10313 / sim	**%gerador/carga** / **LCOE** / **A linha compensa?** **100** / 0,16571 / - **50** / 0,15435 / sim **0** / 0,10191 / sim	**%gerador/carga** / **LCOE** / **A linha compensa?** **100** / 0,16571 / - **50** / 0,15562 / sim **0** / 0,10435 / sim

Tabela 41 – Análise de sensibilidade 2 - Gerador Diesel e linha aérea MT; MR pequena, média e grande

Gerador	Diesel		
Linha	MT, linha aérea, comprimento = 5 km		
Investimento linha (CF) [€/km]	27 404 – Referência	13 702	41 106
Investimento linha (CV) [€/(km.mm^2)]	39 – Referência	20	59
MR	Pequena		
LCOE [€/kWh]			

$\%_{gerador/carga}$	LCOE	A linha compensa?
100	0,16714	-
50	0,60982	não
0	0,55049	não

$\%_{gerador/carga}$	LCOE	A linha compensa?
100	0,16714	-
50	0,38458	não
0	0,32525	não

$\%_{gerador/carga}$	LCOE	A linha compensa?
100	0,16714	-
50	0,83506	não
0	0,77572	não

MR	Média		
LCOE [€/kWh]			

$\%_{gerador/carga}$	LCOE	A linha compensa?
100	0,16571	-
50	0,19849	não
0	0,14507	sim

$\%_{gerador/carga}$	LCOE	A linha compensa?
100	0,16571	-
50	0,17601	não
0	0,12259	sim

$\%_{gerador/carga}$	LCOE	A linha compensa?
100	0,16571	-
50	0,22097	não
0	0,16755	não

MR	Grande		
LCOE [€/kWh]			

$\%_{gerador/carga}$	LCOE	A linha compensa?
100	0,16473	-
50	0,14714	sim
0	0,10554	sim

$\%_{gerador/carga}$	LCOE	A linha compensa?
100	0,16473	-
50	0,14476	sim
0	0,10286	sim

$\%_{gerador/carga}$	LCOE	A linha compensa?
100	0,16473	-
50	0,14951	sim
0	0,10823	sim

Tabela 42 – Análise de sensibilidade 2 - Gerador GN e linha aérea BT; MR pequena e média

Gerador	**GN**								
Linha	**BT, linha aérea, comprimento = 0,5 km**								
Investimento linha (CF) [€/km]	**6054 – Referência**			**3027**			**9081**		
Investimento linha (CV) [€/(km.mm²)]	**39 – Referência**			**20**			**59**		
MR	**Pequena**								
LCOE [€/kWh]	**%gerador/carga**	**LCOE**	**A linha compensa?**	**%gerador/carga**	**LCOE**	**A linha compensa?**	**%gerador/carga**	**LCOE**	**A linha compensa?**
	100	0,08514	-	**100**	0,08514	-	**100**	0,08514	-
	50	0,09439	não	**50**	0,08882	não	**50**	0,09997	não
	0	0,11196	não	**0**	0,10638	não	**0**	0,11754	não
MR	**Média**								
LCOE [€/kWh]	**%gerador/carga**	**LCOE**	**A linha compensa?**	**%gerador/carga**	**LCOE**	**A linha compensa?**	**%gerador/carga**	**LCOE**	**A linha compensa?**
	100	0,08259	-	**100**	0,08259	-	**100**	0,08259	-
	50	0,08482	não	**50**	0,08419	não	**50**	0,08546	não
	0	0,10313	não	**0**	0,10191	não	**0**	0,10435	não

Tabela 43 – Análise de sensibilidade 2 - Gerador GN e linha aérea MT; MR pequena, média e grande

Gerador	**GN**		
Linha	**MT, aérea, 5 km**		
Investimento linha (CF) [€/km]	**27 404 – Referência**	**13 702**	**41 106**
Investimento linha (CV) [€/(km.mm²)]	**39 – Referência**	**20**	**59**
MR	**Pequena**		
LCOE [€/kWh]			

$\%_{gerador/carga}$	LCOE	A linha compensa?
100	0,08514	-
50	0,53369	não
0	0,55049	não

$\%_{gerador/carga}$	LCOE	A linha compensa?
100	0,08514	-
50	0,30845	não
0	0,32525	não

$\%_{gerador/carga}$	LCOE	A linha compensa?
100	0,08514	-
50	0,75892	não
0	0,77572	não

MR	**Média**
LCOE [€/kWh]	

$\%_{gerador/carga}$	LCOE	A linha compensa?
100	0,08259	-
50	0,12833	não
0	0,14507	não

$\%_{gerador/carga}$	LCOE	A linha compensa?
100	0,08259	-
50	0,10584	não
0	0,12259	não

$\%_{gerador/carga}$	LCOE	A linha compensa?
100	0,08259	-
50	0,15081	não
0	0,16755	não

MR	**Grande**
Tabela de resultados	

$\%_{gerador/carga}$	LCOE	A linha compensa?
100	0,08085	-
50	0,09146	não
0	0,10554	não

$\%_{gerador/carga}$	LCOE	A linha compensa?
100	0,08085	-
50	0,08909	não
0	0,10286	não

$\%_{gerador/carga}$	LCOE	A linha compensa?
100	0,08085	-
50	0,09384	não
0	0,10823	não

Tabela 44 – Análise de sensibilidade 2 - Gerador FV + Bateria e linha aérea BT; MR pequena e média

Gerador	**FV + Bateria**								
Linha	**BT, linha aérea, comprimento = 0,5 km**								
Investimento linha (CF) [€/km]	**6054**			**3027**			**9081**		
Investimento linha (CV) [€/(km.mm²)]	**39**			**20**			**59**		
MR	**Pequena**								
LCOE [€/kWh]	**%gerador/carga**	**LCOE**	**A linha compensa?**	**%gerador/carga**	**LCOE**	**A linha compensa?**	**%gerador/carga**	**LCOE**	**A linha compensa?**
	100	0,16059	-	**100**	0,16059	-	**100**	0,16059	-
	50	0,12148	sim	**50**	0,1159	sim	**50**	0,12706	sim
	0	0,11196	sim	**0**	0,10638	sim	**0**	0,11754	sim
MR	**Média**								
LCOE [€/kWh]	**%gerador/carga**	**LCOE**	**A linha compensa?**	**%gerador/carga**	**LCOE**	**A linha compensa?**	**%gerador/carga**	**LCOE**	**A linha compensa?**
	100	0,14312	-	**100**	0,14312	-	**100**	0,14312	-
	50	0,09957	sim	**50**	0,09872	sim	**50**	0,10042	sim
	0	0,10313	sim	**0**	0,10191	sim	**0**	0,10435	sim

Tabela 45 – Análise de sensibilidade 2 - Gerador FV + Bateria e linha aérea MT; MR pequena, média e grande

Gerador	**FV + bateria**								
Linha	**MT, linha aérea, comprimento = 5 km**								
Investimento linha (CF) [€/km]	**27 404 – Referência**			**13 702**			**41 106**		
Investimento linha (CV) [€/(km.mm²)]	**39 – Referência**			**20**			**59**		
MR	**Pequena**								
LCOE [€/kWh]	**%gerador/carga**	**LCOE**	**A linha compensa?**	**%gerador/carga**	**LCOE**	**A linha compensa?**	**%gerador/carga**	**LCOE**	**A linha compensa?**
	100	0,16059	-	**100**	0,16059	-	**100**	0,16059	-
	50	0,56055	não	**50**	0,33532	não	**50**	0,78579	não
	0	0,55049	não	**0**	0,32525	não	**0**	0,77572	não
MR	**Média**								
LCOE [€/kWh]	**%gerador/carga**	**LCOE**	**A linha compensa?**	**%gerador/carga**	**LCOE**	**A linha compensa?**	**%gerador/carga**	**LCOE**	**A linha compensa?**
	100	0,14312	-	**100**	0,14312	-	**100**	0,14312	-
	50	0,14238	não	**50**	0,1199	sim	**50**	0,16486	não
	0	0,14507	não	**0**	0,12259	sim	**0**	0,16755	não
MR	**Grande**								
LCOE [€/kWh]	**%gerador/carga**	**LCOE**	**A linha compensa?**	**%gerador/carga**	**LCOE**	**A linha compensa?**	**%gerador/carga**	**LCOE**	**A linha compensa?**
	100	0,14538	-	**100**	0,14538	-	**100**	0,14538	-
	50	0,10059	sim	**50**	0,09814	sim	**50**	0,10305	sim
	0	0,10554	sim	**0**	0,10286	sim	**0**	0,10823	sim

Em primeiro lugar, referir que nesta análise de sensibilidade o investimento considerado para o gerador foi o da situação de referência.

Nas situações de uso do gerador a diesel (Tabelas 34 e 35), a redução no investimento da linha tem forte impacto no LCOE: por exemplo, no caso da MR pequena, justifica-se a construção da linha, ao contrário do que acontecia na situação de referência.

O aumento do investimento na linha faz aumentar o LCOE, como seria de esperar, mas não influencia o critério para a construção da linha, em relação ao que já se observava na situação de referência.

Na MR pequena, é visível que a construção de uma linha MT nunca se revela viável (para as condições de simulação testadas), mesmo quando o investimento na mesma é substancialmente reduzido. Já na MR grande, a situação é inversa: a instalação de uma linha MT é a melhor solução, qualquer que seja o nível de investimento considerado. Quanto à MR média, a construção da linha só se manifesta interessante para a situação de referência e para a situação de diminuição do investimento na linha.

Para as situações em que se utiliza o gerador a GN (Tabelas 36 e 37), para qualquer MR e para os 2 tipos de linha, observa-se que a construção da linha nunca se revela compensatória devido ao reduzido valor do LCOE nestas situações (nas condições de teste). A redução do investimento da linha em 50% não tem impacto suficiente para que a instalação da linha seja viável.

No caso da utilização do gerador FV + Bateria (Tabelas 38 e 39), a instalação de uma linha BT é sempre a melhor solução, mesmo considerando variações importantes no investimento da linha.

A partir da Tabela 39 podemos concluir que a construção de uma linha MT nunca é viável numa MR pequena (para estas condições de simulação), mesmo considerando uma redução apreciável no investimento. A situação é precisamente a oposta no caso da MR grande: a instalação de uma linha MT é sempre a solução mais económica, mesmo quando se considera um aumento significativo no investimento da linha. Uma situação intermédia observa-se no caso da MR média: na situação de referência, a construção da linha não é uma boa opção, conclusão que sai reforçada quando se considera um aumento no investimento da linha; no entanto, se este investimento diminuir, o uso de uma linha MT passa a ser a melhor opção.

4.4.3. Análise de sensibilidade 3 – Variação no custo de combustível do gerador (Diesel e GN)

Tabela 46 – Análise de sensibilidade 3 - Gerador Diesel e linha aérea BT; MR pequena e média

Gerador	**Diesel**							
Linha	**BT, linha aérea, comprimento = 0,5 km**							
Custos de combustível [€/kWh]	**0,15 – Referência**				**0,225**			
MR	**Pequena**							
LCOE [€/kWh]	**$\%_{gerador/carga}$**	**LCOE**	**A linha compensa?**		**$\%_{gerador/carga}$**	**LCOE**	**A linha compensa?**	
	100	0,16714	-		**100**	0.24214	-	
	50	0,17052	não		**50**	0.23886	sim	
	0	0,11196	sim		**0**	0.11196	sim	
MR	**Média**							
LCOE [€/kWh]	**$\%_{gerador/carga}$**	**LCOE**	**A linha compensa?**		**$\%_{gerador/carga}$**	**LCOE**	**A linha compensa?**	
	100	0,16571	-		**100**	0.24071	-	
	50	0,15498	sim		**50**	0.21745	sim	
	0	0,10313	sim		**0**	0.10313	sim	

Tabela 47 – Análise de sensibilidade 3 - Gerador Diesel e linha aérea MT; MR média e grande

Gerador	**Diesel**							
Linha	**MT, linha aérea, comprimento = 5 km**							
Custos de combustível [€/kWh]	**0,15 – Referência**				**0,225**			
MR	**Média**							
LCOE [€/kWh]	**$\%_{gerador/carga}$**	**LCOE**	**A linha compensa?**		**$\%_{gerador/carga}$**	**LCOE**	**A linha compensa?**	
	100	0,16571	-		**100**	0.24214	-	
	50	0,19849	não		**50**	0.26095	não	
	0	0,14507	sim		**0**	0.14507	sim	
MR	**Grande**							
LCOE [€/kWh]	**$\%_{gerador/carga}$**	**LCOE**	**A linha compensa?**		**$\%_{gerador/carga}$**	**LCOE**	**A linha compensa?**	
	100	0,16473	-		**100**	0.23973	-	
	50	0,14714	sim		**50**	0.19662	sim	
	0	0,10554	sim		**0**	0.10554	sim	

Tabela 48 – Análise de sensibilidade 3 - Gerador GN e linha aérea BT; MR pequena e média

Gerador	GN					
Linha	BT, linha aérea, comprimento = 0,5 km					
Custos de combustível [€/kWh]	0,07 – Referência			0,105		
MR	Pequena					
LCOE [€/kWh]	$\%_{gerador/carga}$	LCOE	A linha compensa?	$\%_{gerador/carga}$	LCOE	A linha compensa?
	100	0,08514	-	100	0.12014	-
	50	0,09439	não	50	0.12628	não
	0	0,11196	não	0	0.11196	sim
MR	Média					
LCOE [€/kWh]	$\%_{gerador/carga}$	LCOE	A linha compensa?	$\%_{gerador/carga}$	LCOE	A linha compensa?
	100	0,08259	-	100	0.11759	-
	50	0,08482	não	50	0.11397	sim
	0	0,10313	não	0	0.10313	sim

Tabela 49 – Análise de sensibilidade 3 - Gerador GN e linha aérea MT; MR média e grande

Gerador	GN					
Linha	MT, linha aérea, comprimento = 5 km					
Custos de combustível [€/kWh]	0,07 – Referência			0,105		
MR	Média					
LCOE [€/kWh]	$\%_{gerador/carga}$	LCOE	A linha compensa?	$\%_{gerador/carga}$	LCOE	A linha compensa?
	100	0,08259	-	100	0.11759	-
	50	0,12833	não	50	0.15748	não
	0	0,14507	não	0	0.14507	não
MR	Grande					
LCOE [€/kWh]	$\%_{gerador/carga}$	LCOE	A linha compensa?	$\%_{gerador/carga}$	LCOE	A linha compensa?
	100	0,08085	-	100	0.11585	-
	50	0,09146	não	50	0.11455	sim
	0	0,10554	não	0	0.10554	sim

É possível concluir que esta variação no custo de combustível tem uma influência significativa no aumento do LCOE, quando comparado, por exemplo com a variação imposta no investimento do gerador (secção 4.4.1.).

Em relação ao caso do gerador a diesel, esta variação no custo de combustível não tem grande impacto a nível da conclusão geral, pois na situação de referência, a alimentação a partir da linha já era uma boa solução. Esta conclusão é reforçada agora, em que o custo do combustível aumenta.

Para o caso do gerador a GN a situação é diferente. Na situação de referência, os casos que tinham este tipo de gerador tinham um LCOE muito baixo e a construção da linha raramente compensava. Com este aumento nos custos do combustível, o LCOE vai aumentar e a linha passa a ser uma solução economicamente mais viável, principalmente em MR maiores.

5. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

O Sistema de Energia Elétrica (SEE) atual foi desenhado nos anos 60 do século passado muito antes da era do microprocessador e da disponibilidade de meios computacionais muito poderosos que se observa hoje em dia. Como a substituição integral do SEE não é uma opção a ponderar, a ideia passa por atualizar o atual sistema de uma forma inteligente. É por isso que os SEE estão a passar por uma fase de alterações profundas no modo como são explorados, dando corpo ao conceito conhecido como Redes Inteligentes (ou Smart Grids, na terminologia anglo-saxónica).

Os principais objetivos das Redes Inteligentes são:

- Melhorar a produção de energia elétrica e o sistema de transporte e distribuição, para o que se pretende integrar as tecnologias de informação e comunicação e contadores de energia inteligentes na infraestrutura elétrica existente, de modo a gerir esta última de maneira mais eficiente.
- Integrar quantidades crescentes de fontes de energia renovável no SEE, para o que se torna imprescindível desenvolver sistemas de armazenamento adequados, capazes de compensar o caráter volátil das renováveis.
- Otimizar o uso da energia elétrica, promovendo a gestão de energia por parte de consumidores, cada vez mais interessados em tornarem-se atores com papel importante na gestão do SEE e integrando os veículos elétricos de forma harmoniosa no SEE, aproveitando as suas capacidades de armazenamento de energia.

Nesta perspetiva de desenvolvimento das Redes Inteligentes, surge naturalmente o conceito de microrrede (MR), como uma pequena rede que abastece um conjunto de consumidores e que possui meios de produção própria, renováveis e/ou não-renováveis. Uma questão relevante que se coloca é saber qual a forma mais económica de explorar a MR, se de forma isolada, se interligada com a rede local de distribuição. O trabalho que está por trás desta dissertação de mestrado pretende dar uma contribuição para responder a esta questão.

Para o efeito, consideraram-se MR de várias dimensões (pequena, média e grande), alimentadas por geradores de diversos tipos (diesel, gás natural, solar fotovoltaico associado a bateria), e diferentes tipos de interligação à rede de distribuição (linhas aéreas e cabos subterrâneos, de BT e MT).

Neste trabalho desenvolveu-se um modelo económico de análise da operação de MR, que permite avaliar qual o modo de exploração mais económico. O modelo desenvolvido usa o LCOE – Levelized Cost Of Energy (custo médio atualizado de energia, em português) como indicador de avaliação. Neste âmbito, propôs-se uma expressão geral de cálculo do LCOE que inclui não só o custo de produção, como também o custo do transporte da unidade de energia através da linha e o custo de compra de energia ao fornecedor externo. O custo atualizado de produção inclui o investimento, os custos de operação e manutenção e os custos de combustível quando

aplicável. O custo atualizado associado à interligação com a rede local inclui o custo da linha, nomeadamente, os custos fixos com abertura de valas ou instalação de postes, os custos variáveis, relacionados com a instalação da linha ou cabo, o custo das perdas e o custo de aquisição de energia ao fornecedor externo.

A combinação de todas estas variáveis assume proporções gigantescas, pelo que se construíram e analisaram cenários com as combinações mais equilibradas e com a melhor estimativa que foi possível arranjar para os diversos custos envolvidos. De todas as simulações efetuadas, usando uma ferramenta especialmente concebida para o efeito, foi possível retirar as seguintes conclusões:

- A solução de produção composta exclusivamente por geradores Diesel é uma solução globalmente cara, pelo que a instalação de uma linha aérea de interligação em BT é vantajosa para repartições de carga entre a linha e o gerador superiores a 50% da potência de ponta, no caso da MR pequena; no caso da MR média, a melhor opção é contruir uma linha aérea BT e no caso da MR grande, justifica-se uma linha aérea MT.
- Se a MR possuir geradores a gás natural, observa-se que aos preços atuais de referência esta constitui uma solução muito barata. A instalação de uma linha aérea nunca se justifica (nas condições de teste), mesmo no caso da MR grande. De destacar, que neste ponto não foram considerados quaisquer custos de distribuição e que o preço atual do petróleo reflete os baixos custos associados ao GN.
- A opção de geração constituída por uma associação de um gerador solar fotovoltaico e bateria tem um LCOE semelhante ao Diesel, pelo a instalação de uma linha BT é a melhor opção para as MR pequena e média e uma linha MT é a solução acertada para a MR grande.
- Os custos associados à instalação de cabos subterrâneos são muito mais elevados do que os correspondentes às linhas aéreas, pelo que a sua construção não é justificada economicamente. No entanto, a fiabilidade é acrescida e o impacto ambiental diminuto, pelo que uma análise considerando estes parâmetros poderia conduzir a resultados diferentes.

Efetuou-se também uma simulação em que se considerou que os custos de instalação da linha eram repartidos por várias MR. Neste caso, usou-se o valor da secção ótima calculado em vez da secção normalizada mais próxima. Esta opção teve como consequência uma diminuição acentuada no custo de investimento da linha e um aumento moderado do custo associado às perdas, o qual não compensa a diminuição do investimento. A conclusão é uma diminuição dos custos totais da linha, o que vai aumentar o número de situações em que a instalação de uma linha para abastecer a MR é a solução mais económica.

Como as estimativas de custo não são inteiramente fiáveis e se espera uma descida de custos da solução solar fotovoltaico mais bateria num futuro próximo, procedeu-se a uma análise de sensibilidade aos diversos custos envolvidos. Para o efeito, variaram-se os custos de

investimento nas tecnologias de produção e os custos fixos e variáveis da linha de interligação em mais ou menos 50%.

Os custos de distribuição de combustível não foram considerados inicialmente, sendo que é um fator importante, principalmente se estivermos a estudar MR em locais de difícil acesso, o que pode fazer aumentar drasticamente o custo de combustível. Dessa forma, realizou-se uma análise de sensibilidade, desta feita sob a forma de um aumento de 50% nos custos de combustível do diesel e GN.

As principais conclusões retiradas da análise de sensibilidade podem ser resumidas no seguinte:

- O aumento ou redução de custos na solução composta por geradores Diesel não tem uma influência marcante na rentabilidade desta opção. A instalação de uma linha aérea BT, no caso da MR pequena e média, ou MT, no caso da MR grande continua a ser a escolha acertada.
- A variação de custos de investimento no gerador a gás natural não altera as conclusões relativas à situação de referência. Esta solução é globalmente barata, nunca se justificando a instalação de uma linha de interligação (para as condições testadas).
- Para a solução de gerador solar fotovoltaico associado a uma bateria só se consideram reduções de custos, de acordo com o que atualmente se espera que ocorra no futuro. Verificou-se que uma redução forte nos custos de investimento torna esta opção muito atraente do ponto de vista económico, dispensando a construção de linhas de interligação. Já se a redução de custos de investimento for apenas moderada, a instalação de uma linha de interligação continua a fazer sentido.
- A variação dos custos fixos e variáveis da linha tem implicações ao nível das situações em que se justifica a sua instalação. Quando se aumentam os custos de investimento, a construção da linha é mais difícil de recomendar, embora se continue a justificar no caso do gerador diesel e no caso do gerador solar fotovoltaico + bateria. Quando se diminuem os custos de investimento na linha, é mais fácil justificar a sua construção. Nota-se que no caso do gerador a gás natural, a redução de custos da linha não é suficiente para recomendar a instalação da linha de interligação.
- O aumento dos custos de combustível teve uma grande influência nos resultados e a construção da linha passou a ser uma opção mais viável. Estes resultados foram especialmente interessantes para os casos com um gerador a GN que, enquanto na situação de referência, constituía uma solução muito barata, após este aumento a linha passou, em muitos casos, a ser a melhor opção para alimentação da carga.

Ao longo desta dissertação, de forma a não a tornar extensa em demasia, algumas variáveis e parâmetros não foram devidamente explorados e estudados. Desta forma, dentro do mesmo conceito de análise económica utilizado neste trabalho, seria interessante investigar outras tecnologias de geração local, como por exemplo, geração eólica ou cogeração.

No que diz respeito às MR, foram utilizados apenas 3 diagramas de carga, onde, de uma forma geral, variava essencialmente o número de consumidores, ou seja, o nível de potência. Seria interessante fazer o mesmo tipo de estudo com mais e diferentes diagramas de carga e perceber a sua influência económica nas opções recomendadas. Teria sido também interessante usar diferentes diagramas de geração solar fotovoltaica, correspondentes, nomeadamente, a dias de verão e inverno, e a dias de céu limpo e céu nublado.

A temática das MR é, ainda, um assunto relativamente recente, sendo que existem problemas relativos ao funcionamento de uma MR que não foram abordados nesta dissertação e que seria interessante explorar, nomeadamente temas técnicos, como o controlo de frequência, cavas de tensão ou distorção harmónica, os quais devem ser estudados para comprovar a possibilidade de implementar este conceito na prática.

Referências

[1] P. B. Thapar, «Opening New Possibilities for the Electricity Grid», *Microgrid from Indian Perspect.*, n. April, 2016.

[2] B. Williams, M. Gahagan, e K. Costin, «Using microgrids to integrate distributed renewables into the grid», *IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Conf. Eur. ISGT Eur.*, pp. 1–5, 2010.

[3] N. Hatziargyriou, *Microgrid : architectures and control*. IEEE Press, 2014.

[4] L. Che, X. Zhang, M. Shahidehpour, A. Alabdulwahab, e A. Abusorrah, «Optimal interconnection planning of community microgrids with renewable energy sources», *IEEE Trans. Smart Grid*, 2015.

[5] Rui Castro, *Uma Introdução às Energias Renováveis: Eólica, Fotovoltaica e Mini-Hídrica*. IST Press, 2011.

[6] N. Jenkins, J. B. Ekanayake, e G. Strbac, *Distributed generation*. IET Renewable Energy Series 1, 2010.

[7] J. P. Lopes, «Redes Eléctricas Inteligentes e a Mudança de Paradigma dos Sistemas Eléctricas», *Texto Apoio, FEUP*, pp. 1–2, 2013.

[8] V. M. M. Preto, «Redes de distribuição e qualidade», *Tese Mestrado, FEUP*, 2012.

[9] E. Hayden, «Introduction To Microgrids», *Tec. Rep.*, pp. 1–13, 2013.

[10] M. Matos, «Diagramas de carga», *Texto Apoio, FEUP*, vol. 1, pp. 1–12, 2005.

[11] N. Hatziargyriou, «Overview of Microgrids, Problems and Solutions», *Distribted Gener. Grid Micro Grid Probl. Bilbao*, n. October, 2004.

[12] D. Zhao, N. Zhang, e Y. Liu, «Micro-grid connected/islanding operation based on wind and PV hybrid power system», *2012 IEEE Innov. Smart Grid Technol. - Asia*, pp. 1–6, 2012.

[13] D. Geraldi, M. V. P. Alcântara, e L. C. P. da Silva, «Estudo de impactos da microgeração em redes secundárias de distribuição no contexto de redes inteligentes», *Induscon*, 2012.

[14] J. Kurtz, G. Saur, S. Sprik, e C. Ainscough, «Backup Power Cost of Ownership Analysis and Incumbent Technology Comparison», *Natl. Renew. Energy Lab.*, n. September, p. 31, 2014.

[15] D. Toub, «A Review of Photovoltaic Cells», *Am. J. Phys.*, 2007.

[16] L. Wei e P. Geng, «A review on natural gas/diesel dual fuel combustion, emissions and performance», *Fuel Processing Technology*, vol. 142. pp. 264–278, 2016.

[17] D. G. Vutetakis, «Batteries», em *The Handbook of Batteries and Fuel Cells*, CRC Press, 2001, pp. 217–234.

[18] J. N. dos Santos, «Condutores E Cabos De Energia», *Texto Apoio, FEUP*, 2005.

[19] S. Curcic, G. Strbac, e X.-P. Zhang, «Effect of losses in design of distribution circuits», *Gener. Transm. Distrib. IEE Proceedings-*, vol. 148, n. 4, pp. 343–349, 2001.

[20] EDP Distribuição, «Guia Técnico de Planeamento de Redes de Distribuição», 2010.

[21] A. M. F. Dias, «Regulacão das Perdas na Rede Electrica de Distribuicão», *Tese Mestrado,*

IST, 2012.

[22] «Gerar energia elétrica com óleo Diesel ou gás natural». Disponível em: http://www.joseclaudio.eng.br/geradores/Diesel_versus_gas. [Acedido: 30-Mar-2018].

[23] «Comparativo Geradores a diesel e geradores a gás natural - Grupel S.A.». Disponível em: https://grupel.eu/grupel/geradores-diesel-geradores-gas-natural/. [Acedido: 30-Mar-2018].

[24] José Pedro Sucena Paiva, «Redes de Energia Eléctrica: uma análise sistémica», *IST Press*, 2005.

Anexos

Anexo A – Casos de estudo com cabo subterrâneo

Tabela 50 – Parâmetros do cabo subterrâneo de BT

Cabo							
Tipo	Tensão	Comprimento [km]	CF [€/km]	CV [€/(km.mm2)]	Cp [€/kWh]	Cnp [€/kWh]	Cve [€/kWh]
Subterrâneo	BT	0,5	29894	69	0,1	0,03	0,1

Tabela 51 – Parâmetros do cabo subterrâneo de MT

Cabo							
Tipo	Tensão	Comprimento [km]	C_F [€/km]	C_V [€/(km.mm2)]	C_p [€/kWh]	C_{np} [€/kWh]	C_{ve} [€/kWh]
Subterrâneo	MT	5	67000	69	0,1	0,03	0,1

Caso de estudo 1 – MR pequena – Gerador Diesel

Tabela 52 – Caso de estudo 1 - Cabo subterrâneo BT

MR	Gerador	$LCOE_{referência}$ [€/kWh]	Linha	Tensão	Comprimento [km]
10	diesel	0,16714	Subterrâneo	BT	0,5

Gerador						Linha							LCOE	A linha compensa?
$\%_{gerador/carga}$	P_n [kW]	E_a [kWh]	I_t [€]	C_{comb} anual [€]	$C_{o.m.}$ anual [€]	$\%_{linha/carga}$	E_a [kWh]	Secção [mm2]	C_F [€]	C_V [€]	C_L anual [€]	C_{ve} anual [€]		
100	9	29733	1620	4460	357	**0**	0	0	0	0	0	0	0,16714	-
50	5	27089	900	4063	325	**50**	2644	25	14947	863	1	264	0,20956	não
0	0	0	0	0	0	**100**	29733	25	14947	863	27	2973	0,151	sim

Tabela 53 – Caso de estudo 1 - Cabo subterrâneo MT

MR	Gerador	$LCOE_{referência}$ [€/kWh]	Linha	Tensão	Comprimento [km]
10	diesel	0,16714	Subterrâneo	MT	5

Gerador						Linha							LCOE	A linha compensa?
$\%_{gerador/carga}$	P_n [kW]	E_a [kWh]	I_t [€]	C_{comb} anual [€]	$C_{o.m.}$ anual [€]	$\%_{linha/carga}$	E_a [kWh]	Secção [mm2]	C_F [€]	C_V [€]	C_L anual [€]	C_{ve} anual [€]		
100	9	29733	1620	4460	357	**0**	0	0	0	0	0	0	0,16714	-
50	5	27089	900	4063	325	**50**	2644	25	335000	8625	0	264	1,25025	não
0	0	0	0	0	0	**100**	29733	25	335000	8625	0	2973	1,19092	não

Caso de estudo 2 – MR pequena – Gerador GN

Tabela 54 – Caso de estudo 2 - Cabo subterrâneo BT

MR	Gerador	$LCOE_{referência}$ [€/kWh]	Linha	Tensão	Comprimento [km]
10	GN	0,08514	Subterrâneo	BT	0,5

Gerador						Linha							LCOE	A linha compensa?
$\%_{gerador/carga}$	P_n [kW]	E_a [kWh]	I_t [€]	$C_{comb\ anual}$ [€]	$C_{o.m.\ anual}$ [€]	$\%_{linha/carga}$	E_a [kWh]	Secção [mm2]	C_F [€]	C_V [€]	$C_{L\ anual}$ [€]	$C_{ve\ anual}$ [€]		
100	9	29733	2880	2081	178	**0**	0	0	0	0	0	0	0,08514	-
50	5	27089	1600	1896	163	**50**	2644	25	14947	863	1	264	0,13343	não
0	0	0	0	0	0	**100**	29733	25	14947	863	27	2973	0,151	não

Tabela 55 – Caso de estudo 2 - Cabo subterrâneo MT

MR	Gerador	$LCOE_{referência}$ [€/kWh]	Linha	Tensão	Comprimento [km]
10	GN	0,08514	Subterrâneo	MT	5

Gerador						Linha							LCOE	A linha compensa?
$\%_{gerador/carga}$	P_n [kW]	E_a [kWh]	I_t [€]	$C_{comb\ anual}$ [€]	$C_{o.m.\ anual}$ [€]	$\%_{linha/carga}$	E_a [kWh]	Secção [mm2]	C_F [€]	C_V [€]	$C_{L\ anual}$ [€]	$C_{ve\ anual}$ [€]		
100	9	29733	2880	2081	178	**0**	0	0	0	0	0	0	0,08514	-
50	5	27089	1600	1896	163	**50**	2644	25	335000	8625	0	264	1,17412	não
0	0	0	0	0	0	**100**	29733	25	335000	8625	0	2973	1,19092	não

Caso de estudo 3 – MR pequena – Gerador FV + Bateria

Tabela 56 – Caso de estudo 3 - Cabo subterrâneo BT

MR	Gerador	$LCOE_{referência}$ [€/kWh]	Linha	Tensão	Comprimento [km]
10	FV+bateria	0,16059	Subterrâneo	BT	0,5

Gerador						Linha							LCOE	A linha compensa?
$\%_{gerador/carga}$	P_n [kW]	E_a [kWh]	I_t [€]	$C_{comb\ anual}$ [€]	$C_{o.m.\ anual}$ [€]	$\%_{linha/carga}$	E_a [kWh]	Secção [mm2]	C_F [€]	C_V [€]	$C_{L\ anual}$ [€]	$C_{ve\ anual}$ [€]		
100	12	33179	48828	0	166	**0**	0	0	0	0	0	0	0,16059	-
50	6	16589	19305	0	83	**50**	13677	25	14947	863	8	1368	0,16051	não
0	0	0	0	0	0	**100**	29733	25	14947	863	27	2973	0,151	sim

Tabela 57 – Caso de estudo 3 - Cabo subterrâneo MT

MR	Gerador	$LCOE_{referência}$ [€/kWh]	Linha	Tensão	Comprimento [km]
10	FV+bateria	0,16059	Subterrâneo	MT	5

Gerador						Linha							LCOE	A linha compensa?
$\%_{gerador/carga}$	P_n [kW]	E_a [kWh]	I_t [€]	$C_{comb\ anual}$ [€]	$C_{o.m.\ anual}$ [€]	$\%_{linha/carga}$	E_a [kWh]	Secção [mm2]	C_F [€]	C_V [€]	$C_{L\ anual}$ [€]	$C_{ve\ anual}$ [€]		
100	12	33179	48828	0	166	**0**	0	0	0	0	0	0	0,16059	-
50	6	16589	19305	0	83	**50**	13677	25	335000	8625	0	1368	1,20099	não
0	0	0	0	0	0	**100**	29733	25	335000	8625	0	2973	1,19092	não

Caso de estudo 4 – MR média – Gerador Diesel

Tabela 58 – Caso de estudo 4 - Cabo subterrâneo BT

MR	Gerador	$LCOE_{referência}$ [€/kWh]	Linha	Tensão	Comprimento [km]
100	diesel	0,16571	Subterrâneo	BT	0,5

Gerador						Linha							LCOE	A linha compensa?
$\%_{gerador/carga}$	P_n [kW]	E_a [kWh]	I_t [€]	C_{comb} anual [€]	$C_{o.m.}$ anual [€]	$\%_{linha/carga}$	E_a [kWh]	Secção [mm2]	C_F [€]	C_V [€]	C_L anual [€]	C_{ve} anual [€]		
100	65	297898	11700	44685	3575	**0**	0	0	0	0	0	0	0,16571	-
50	33	248105	5940	37216	2977	**50**	49793	50	14947	1725	65	4979	0,159	sim
0	0	0	0	0	0	**100**	297898	240	14947	8280	230	29790	0,10805	sim

Tabela 59 – Caso de estudo 4 - Cabo subterrâneo MT

MR	Gerador	$LCOE_{referência}$ [€/kWh]	Linha	Tensão	Comprimento [km]
100	diesel	0,16571	Subterrâneo	MT	5

Gerador						Linha							LCOE	A linha compensa?
$\%_{gerador/carga}$	P_n [kW]	E_a [kWh]	I_t [€]	C_{comb} anual [€]	$C_{o.m.}$ anual [€]	$\%_{linha/carga}$	E_a [kWh]	Secção [mm2]	C_F [€]	C_V [€]	C_L anual [€]	C_{ve} anual [€]		
100	65	297898	11700	44685	3575	**0**	0	0	0	0	0	0	0,16571	-
50	33	248105	5940	37216	2977	**50**	49793	25	335000	8625	2	4979	0,26241	não
0	0	0	0	0	0	**100**	297898	25	335000	8625	35	29790	0,20899	não

Caso de estudo 5 – MR média – Gerador GN

Tabela 60 – Caso de estudo 5 Cabo subterrâneo BT

MR	Gerador	$LCOE_{referência}$ [€/kWh]	Linha	Tensão	Comprimento [km]
100	GN	0,08259	Subterrâneo	BT	0,5

Gerador						Linha							LCOE	A linha compensa?
$\%_{gerador/carga}$	P_n [kW]	E_a [kWh]	I_t [€]	C_{comb} anual [€]	$C_{o.m.}$ anual [€]	$\%_{linha/carga}$	E_a [kWh]	Secção [mm2]	C_F [€]	C_V [€]	C_L anual [€]	C_{ve} anual [€]		
100	65	297898	20800	20853	1787	**0**	0	0	0	0	0	0	0,08259	-
50	33	248105	10560	17367	1489	**50**	49793	50	14947	1725	65	4979	0,08884	não
0	0	0	0	0	0	**100**	297898	240	14947	8280	230	29790	0,10805	não

Tabela 61 – Caso de estudo 5 - Cabo subterrâneo MT

MR	Gerador	$LCOE_{referência}$ [€/kWh]	Linha	Tensão	Comprimento [km]
100	GN	0,08259	Subterrâneo	MT	5

Gerador						Linha							LCOE	A linha compensa?
$\%_{gerador/carga}$	P_n [kW]	E_a [kWh]	I_t [€]	C_{comb} anual [€]	$C_{o.m.}$ anual [€]	$\%_{linha/carga}$	E_a [kWh]	Secção [mm2]	C_F [€]	C_V [€]	C_L anual [€]	C_{ve} anual [€]		
100	65	297898	20800	20853	1787	**0**	0	0	0	0	0	0	0,08259	-
50	33	248105	10560	17367	1489	**50**	49793	25	335000	8625	2	4979	0,19225	não
0	0	0	0	0	0	**100**	297898	25	335000	8625	35	29790	0,20899	não

Caso de estudo 6 – MR média – Gerador FV + Bateria

Tabela 62 – Caso de estudo 6 - Cabo subterrâneo BT

MR	Gerador	$LCOE_{referência}$ [€/kWh]	Linha	Tensão	Comprimento [km]
100	FV+bateria	0,14312	Subterrâneo	BT	0,5

Gerador						Linha							LCOE	A linha compensa?
$\%_{gerador/carga}$	P_n [kW]	E_a [kWh]	I_t [€]	$C_{comb\ anual}$ [€]	$C_{o.m.\ anual}$ [€]	$\%_{linha/carga}$	E_a [kWh]	Secção [mm2]	C_F [€]	C_V [€]	$C_{L\ anual}$ [€]	$C_{ve\ anual}$ [€]		
100	114	315196	434970	0	1576	**0**	0	0	0	0	0	0	0,14312	-
50	57	157598	147741,8	0	788	**50**	142763	120	14947	4140	162	14276	0,10391	sim
0	0	0	0	0	0	**100**	297898	240	14947	8280	230	29790	0,10805	sim

Tabela 63 – Caso de estudo 6 - Cabo subterrâneo MT

MR	Gerador	$LCOE_{referência}$ [€/kWh]	Linha	Tensão	Comprimento [km]
100	FV+bateria	0,14312	Subterrâneo	MT	5

Gerador						Linha							LCOE	A linha compensa?
$\%_{gerador/carga}$	P_n [kW]	E_a [kWh]	I_t [€]	$C_{comb\ anual}$ [€]	$C_{o.m.\ anual}$ [€]	$\%_{linha/carga}$	E_a [kWh]	Secção [mm2]	C_F [€]	C_V [€]	$C_{L\ anual}$ [€]	$C_{ve\ anual}$ [€]		
100	114	315196	434970	0	1576	**0**	0	0	0	0	0	0	0,14312	-
50	57	157598	147741,8	0	788	**50**	142763	25	335000	8625	12	14276	0,2063	não
0	0	0	0	0	0	**100**	297898	25	335000	8625	35	29790	0,20899	não

Caso de estudo 7 – MR grande – Gerador Diesel

Tabela 64 – Caso de estudo 7 - Cabo subterrâneo BT

MR	Gerador	$LCOE_{referência}$ [€/kWh]	Linha	Tensão	Comprimento [km]
1000	diesel	0,16473	Subterrâneo	BT	0,5

Gerador						Linha							LCOE	A linha compensa?
$\%_{gerador/carga}$	P_n [kW]	E_a [kWh]	I_t [€]	$C_{comb\ anual}$ [€]	$C_{o.m.\ anual}$ [€]	$\%_{linha/carga}$	E_a [kWh]	Secção [mm2]	C_F [€]	C_V [€]	$C_{L\ anual}$ [€]	$C_{ve\ anual}$ [€]		
100	453	2821619	81540	423243	33859	**0**	0	0	0	0	0	0	0,16473	-
50	227	1861457	40860	279219	22337	**50**	960162	N. A.	-	-	-	-	-	Não se aplica
0	0	0	0	0	0	**100**	2821619	N. A.	-	-	-	-	-	Não se aplica

Tabela 65 – Caso de estudo 7 - Cabo subterrâneo MT

MR	Gerador	$LCOE_{referência}$ [€/kWh]	Linha	Tensão	Comprimento [km]
1000	diesel	0,16473	Subterrâneo	MT	5

Gerador						Linha							LCOE	A linha compensa?
$\%_{gerador/carga}$	P_n [kW]	E_a [kWh]	I_t [€]	$C_{comb\ anual}$ [€]	$C_{o.m.\ anual}$ [€]	$\%_{linha/carga}$	E_a [kWh]	Secção [mm2]	C_F [€]	C_V [€]	$C_{L\ anual}$ [€]	$C_{ve\ anual}$ [€]		
100	453	2821619	81540	423243	33859	**0**	0	0	0	0	0	0	0,16473	-
50	227	1861457	40860	279219	22337	**50**	960162	25	335000	8625	384	96016	0,15389	sim
0	0	0	0	0	0	**100**	2821619	50	335000	17250	1346	282162	0,11221	sim

Caso de estudo 8 – MR grande – Gerador GN

Tabela 66 – Caso de estudo 8 - Cabo subterrâneo BT

MR	Gerador	$LCOE_{referência}$ [€/kWh]	Linha	Tensão	Comprimento [km]
1000	GN	0,08085	Subterrâneo	BT	0,5

Gerador						Linha							LCOE	A linha compensa?
$\%_{gerador/carga}$	P_n [kW]	E_a [kWh]	I_t [€]	$C_{comb\ anual}$ [€]	$C_{o.m.\ anual}$ [€]	$\%_{linha/carga}$	E_a [kWh]	Secção [mm2]	C_F [€]	C_V [€]	$C_{L\ anual}$ [€]	$C_{ve\ anual}$ [€]		
100	453	2821619	144960	197513	16930	0	0	0	0	0	0	0	0,08085	-
50	227	1861457	72640	130302	11169	50	960162	N. A.	-	-	-	-	-	Não se aplica
0	0	0	0	0	0	100	2821619	N. A.	-	-	-	-	-	Não se aplica

Tabela 67 – Caso de estudo 8 - Cabo subterrâneo MT

MR	Gerador	$LCOE_{referência}$ [€/kWh]	Linha	Tensão	Comprimento [km]
1000	GN	0,08085	Subterrâneo	MT	5

Gerador						Linha							LCOE	A linha compensa?
$\%_{gerador/carga}$	P_n [kW]	E_a [kWh]	I_t [€]	$C_{comb\ anual}$ [€]	$C_{o.m.\ anual}$ [€]	$\%_{linha/carga}$	E_a [kWh]	Secção [mm2]	C_F [€]	C_V [€]	$C_{L\ anual}$ [€]	$C_{ve\ anual}$ [€]		
100	453	2821619	144960	197513	16930	**0**	0	0	0	0	0	0	0,08085	-
50	227	1861457	72640	130302	11169	**50**	960162	25	335000	8625	384	96016	0,09821	não
0	0	0	0	0	0	**100**	2821619	50	335000	17250	1346	282162	0,11221	não

Caso de estudo 9 – MR grande – Gerador FV + Bateria

Tabela 68 – Caso de estudo 9 - Cabo subterrâneo BT

MR	Gerador	$LCOE_{referência}$ [€/kWh]	Linha	Tensão	Comprimento [km]
1000	FV+bateria	0,14538	Subterrâneo	BT	0,5

Gerador						Linha							LCOE	A linha compensa?
$\%_{gerador/carga}$	P_n [kW]	E_a [kWh]	I_t [€]	C_{comb} anual [€]	$C_{o.m.}$ anual [€]	$\%_{linha/carga}$	E_a [kWh]	Secção [mm2]	C_F [€]	C_V [€]	C_L anual [€]	C_{ve} anual [€]		
100	1075	2972241	4188165	0	14861	**0**	0	0	0	0	0	0	0,14538	-
50	538	1487503	1343069	0	7438	**50**	1353612	N. A.	-	-	-	-	-	Não se aplica
0	0	0	0	0	0	**100**	2821619	N. A.	-	-	-	-	-	Não se aplica

Tabela 69 – Caso de estudo 9 - Cabo subterrâneo MT

MR	Gerador	$LCOE_{referência}$ [€/kWh]	Linha	Tensão	Comprimento [km]
1000	FV+bateria	0,14538	Subterrâneo	MT	5

Gerador						Linha							LCOE	A linha compensa?
$\%_{gerador/carga}$	P_n [kW]	E_a [kWh]	I_t [€]	C_{comb} anual [€]	$C_{o.m.}$ anual [€]	$\%_{linha/carga}$	E_a [kWh]	Secção [mm2]	C_F [€]	C_V [€]	C_L anual [€]	C_{ve} anual [€]		
100	1075	2972241	4188165	0	14861	**0**	0	0	0	0	0	0	0,14538	-
50	538	1487503	1343069	0	7438	**50**	1353612	50	335000	17250	461	135361	0,10747	sim
0	0	0	0	0	0	**100**	2821619	50	335000	17250	1346	282162	0,11221	sim

Anexo B – Casos de estudo, com o uso da secção ótima na MR média

Caso de estudo 1 – MR média – Gerador Diesel

Tabela 70 – Caso de estudo 1 - Linha aérea BT

MR	Gerador	$LCOE_{referência}$ [€/kWh]	Linha	Tensão	Comprimento [km]
100	diesel	0,16571	Aérea	BT	0,5

Gerador						Linha							LCOE	A linha compensa?
$\%_{gerador/carga}$	P_n [kW]	E_a [kWh]	I_t [€]	$C_{comb\ anual}$ [€]	$C_{o.m.\ anual}$ [€]	$\%_{linha/carga}$	E_a [kWh]	Secção [mm2]	C_F [€]	C_V [€]	$C_{L\ anual}$ [€]	$C_{ve\ anual}$ [€]		
100	65	297898	11700	44685	3575	**0**	0	0	0	0	0	0	0.16571	-
75	49	290684	8820	43603	3488	**25**	7214	9.91	1200	193	20	721	0.1638	sim
50	33	248105	5940	37216	2977	**50**	49793	39.765	2407	775	82	4979	0.15477	sim
25	17	146552	3060	21983	1759	**75**	151346	93.246	2352	1818	193	15135	0.13337	sim
0	0	0	0	0	0	**100**	297898	163.466	2062	3188	338	29790	0.10267	sim

Tabela 71 – Caso de estudo 1 - Linha aérea MT

MR	Gerador	$LCOE_{referência}$ [€/kWh]	Linha	Tensão	Comprimento [km]
100	diesel	0,16571	Aérea	MT	5

Gerador						Linha							LCOE	A linha compensa?
$\%_{gerador/carga}$	P_n [kW]	E_a [kWh]	I_t [€]	$C_{comb\ anual}$ [€]	$C_{o.m.\ anual}$ [€]	$\%_{linha/carga}$	E_a [kWh]	Secção [mm2]	C_F [€]	C_V [€]	$C_{L\ anual}$ [€]	$C_{ve\ anual}$ [€]		
100	65	297898	11700	44685	3575	**0**	0	0	0	0	0	0	0.16571	-
75	49	290684	8820	43603	3488	**25**	7214	0.396	2173	77	8	721	0.16403	sim
50	33	248105	5940	37216	2977	**50**	49793	1.591	8718	310	33	4979	0.15648	sim
25	17	146552	3060	21983	1759	**75**	151346	3.73	20443	727	77	15135	0.13841	sim
0	0	0	0	0	0	**100**	297898	6.539	35837	1275	135	29790	0.11216	sim

Caso de estudo 2 – MR média – Gerador GN

Tabela 72 – Caso de estudo 2 - Linha aérea BT

MR	Gerador	$LCOE_{referência}$ [€/kWh]	Linha	Tensão	Comprimento [km]
100	GN	0,08259	Aérea	BT	0,5

Gerador						Linha							LCOE	A linha compensa?
$\%_{gerador/carga}$	P_n [kW]	E_a [kWh]	I_t [€]	$C_{comb\ anual}$ [€]	$C_{o.m.\ anual}$ [€]	$\%_{linha/carga}$	E_a [kWh]	Secção [mm2]	C_F [€]	C_V [€]	$C_{L\ anual}$ [€]	$C_{ve\ anual}$ [€]		
100	65	297898	20800	20853	1787	**0**	0	0	0	0	0	0	0.08259	-
75	49	290684	15680	20348	1744	**25**	7214	9.91	1200	193	20	721	0.08205	sim
50	33	248105	10560	17367	1489	**50**	49793	39.765	2407	775	82	4979	0.08461	não
25	17	146552	5440	10259	879	**75**	151346	93.246	2352	1818	193	15135	0.09181	não
0	0	0	0	0	0	**100**	297898	163.466	2062	3188	338	29790	0.10267	não

Tabela 73 – Caso de estudo 2 - Linha aérea MT

MR	Gerador	$LCOE_{referência}$ [€/kWh]	Linha	Tensão	Comprimento [km]
100	GN	0,08259	Aérea	MT	5

•

Gerador						Linha							LCOE	A linha compensa?
$\%_{gerador/carga}$	P_n [kW]	E_a [kWh]	I_t [€]	$C_{comb\ anual}$ [€]	$C_{o.m.\ anual}$ [€]	$\%_{linha/carga}$	E_a [kWh]	Secção [mm2]	C_F [€]	C_V [€]	$C_{L\ anual}$ [€]	$C_{ve\ anual}$ [€]		
100	65	297898	20800	20853	1787	**0**	0	0	0	0	0	0	0.08259	-
75	49	290684	15680	20348	1744	**25**	7214	0.396	2173	77	8	721	0.08229	sim
50	33	248105	10560	17367	1489	**50**	49793	1.591	8718	310	33	4979	0.08632	não
25	17	146552	5440	10259	879	**75**	151346	3.73	20443	727	77	15135	0.09686	não
0	0	0	0	0	0	**100**	297898	6.539	35837	1275	135	29790	0.11216	não

Caso de estudo 3 – MR média – Gerador FV + Bateria

Tabela 74 – Caso de estudo 3 - Linha aérea BT

MR	Gerador	$LCOE_{referência}$ [€/kWh]	Linha	Tensão	Comprimento [km]
100	FV+bateria	0,14312	Aérea	BT	0,5

Gerador						Linha							LCOE	A linha compensa?
$\%_{gerador/carga}$	P_n [kW]	E_a [kWh]	I_t [€]	C_{comb} anual [€]	$C_{o.m.}$ anual [€]	$\%_{linha/carga}$	E_a [kWh]	Secção [mm2]	C_F [€]	C_V [€]	C_L anual [€]	C_{ve} anual [€]		
100	114	315196	434970	0	1576	**0**	0	0	0	0	0	0	0.14312	-
75	86	237779	283115.5	0	1189	**25**	68230	58.858	1485	1148	122	6823	0.1178	sim
50	57	157598	147741.8	0	788	**50**	142763	96.972	2446	1891	201	14276	0.09936	sim
25	29	80181	58000	0	401	**75**	217717	129.521	1634	2526	268	21772	0.09493	sim
0	0	0	0	0	0	**100**	297898	163.466	2062	3188	338	29790	0.10267	sim

Tabela 75 – Caso de estudo 3 - Linha aérea MT

MR	Gerador	$LCOE_{referência}$ [€/kWh]	Linha	Tensão	Comprimento [km]
100	FV+bateria	0,14312	Aérea	MT	5

Gerador						Linha							LCOE	A linha compensa?
$\%_{gerador/carga}$	P_n [kW]	E_a [kWh]	I_t [€]	C_{comb} anual [€]	$C_{o.m.}$ anual [€]	$\%_{linha/carga}$	E_a [kWh]	Secção [mm2]	C_F [€]	C_V [€]	C_L anual [€]	C_{ve} anual [€]		
100	114	315196	434970	0	1576	**0**	0	0	0	0	0	0	0.14312	-
75	86	237779	283115.5	0	1189	**25**	68230	2.354	12903	459	49	6823	0.12098	sim
50	57	157598	147741.8	0	788	**50**	142763	3.879	21259	756	80	14276	0.1046	sim
25	29	80181	58000	0	401	**75**	217717	5.181	28395	1010	107	21772	0.10245	sim
0	0	0	0	0	0	**100**	297898	6.539	35837	1275	135	29790	0.11216	sim