



**Desenvolvimento de ferramentas
automáticas para dimensionamento e
otimização de centrais fotovoltaicas
(simulação de constrangimentos e
sistemas off-grid)**

João Alberto Lopes Lima

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Prof. Dr. José Rui Ferreira

Corientador: Engenheiro Joaquim Guedes

27 de Julho de 2018

Resumo

Este documento incide sobre uma ferramenta desenvolvida em Visual Basic for Applications (VBA) do Excel, para uso empresarial da **Ecoinside**[®].

Esta ferramenta é capaz de determinar o número ótimo de painéis fotovoltaicos a instalar em clientes que tenham ligação à rede - *on-grid*. Esta operação torna-se possível através do processamento dos consumos da instalação e de incrementos sucessivos do número total de painéis. A cada aumento, uma análise técnica e financeira é realizada, no sentido de apurar qual o número de painéis efetivamente mais apropriado.

Embora a ferramenta produza resultados satisfatórios, possui um conjunto de aspetos defeituosos e ineficientes, corrigidos e melhorados ao longo do trabalho desenvolvido.

Além disso, foram feitos esforços no sentido de acrescentar um novo tipo de sistema àqueles que a ferramenta é capaz de simular. Este novo sistema híbrido sem ligação à rede - *off-grid* - é composto por gerador diesel, painéis fotovoltaicos e sistema de armazenamento de energia, pelo que uma revisão das tecnologias existentes capazes de desempenhar essas funções de retenção da energia produzida pode ser encontrada neste documento.

Assim, foi criado um modelo iterativo capaz de obter o número mais rentável de baterias a implementar, em instalações alimentadas por um gerador diesel e pelo número ótimo de painéis que se tenha determinado previamente. Uma justificação para o valor determinado é concretizada sob a forma de tabelas e gráficos relativos ao funcionamento do novo sistema.

Palavras-chave: híbrido, *off-grid*, *on-grid*

Abstract

This document focuses on a tool developed in Visual Basic for Applications (VBA) in Excel for business purposes of **Ecoinside**[®].

This tool is able to determine the optimum number of photovoltaic panels to install on clients that are connected to the electrical grid - *on-grid*. This is achieved by processing the consumption of the installation and successive increments of the total number of panels that can be installed. At each increase, a technical and financial analysis is carried out in order to determine which number of panels is most appropriate.

Although the tool produces satisfactory results, it has a set of defective and inefficient aspects, corrected and improved throughout the work developed.

In addition, efforts have been made to add a new type of system to those that the tool is able to simulate. This new hybrid system without connection to the grid - *off-grid* - is composed of a diesel generator, photovoltaic panels and energy storage system. A review of existing technologies capable of performing these energy retention functions can be found in this document.

Thus, an iterative model capable of obtaining the most profitable number of batteries to be implemented was created, in plants fed by a diesel generator and by the optimum number of panels previously determined. A justification for the determined value is implemented in the form of tables and graphs related to the operation of the new system.

Keywords: hybrid, *off-grid*, *on-grid*

Agradecimentos

Em primeiro lugar, não poderia deixar de agradecer aos meus orientadores. Ao Engenheiro Joaquim Guedes, pela oportunidade concedida e por me demonstrar a importância do pragmatismo na realização de qualquer tarefa. Ao Professor José Rui Ferreira, pela disponibilidade e afabilidade reveladas ao longo de toda a dissertação.

A todos os membros da **Ecoinside**[®] que, sem exceção, me fizeram sentir uma parte integrante da equipa desde o primeiro ao último dia.

Aos meus parceiros de faculdade, pelos momentos partilhados e pelos sofás emprestados. Sem vocês o meu percurso não teria sido o mesmo, mas talvez tivesse sido mais rápido!

À minha namorada e aos nossos amigos, o modo como suportam as minhas peculiaridades é, para mim, incompreensível.

Ao Tiago e à Sílvia, por me acolherem ao longo destes últimos meses.

Aos meus avós maternos, pelas noções de perseverança que inadvertidamente me transmitiram.

Por último, quero especialmente agradecer à minha mãe. Sei que vai ler isto à procura de palavras lisonjeiras, mas há coisas que são indescritíveis. Que tudo o que eu alcancei e venha algum dia a alcançar, seja visto como uma conquista sua.

João A. Lopes Lima

*“Perhaps wisdom...
is realizing how small I am, and unwise, and how far I have yet to go.”*

Anthony Bourdain

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Contextualização e Motivação	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Estrutura da Dissertação	2
2	Tecnologias de Armazenamento de Energia	3
2.1	Introdução	3
2.2	Diferentes Tecnologias de Armazenamento de Energia	4
2.2.1	Baterias Chumbo-ácido (PbA)	4
2.2.2	Baterias de Iões de Lítio (LiI)	5
2.2.3	Bateria Sódio-Enxofre (NaS)	6
2.2.4	Bateria de Níquel Cádmio (NiCd)	7
2.2.5	Bateria de Níquel-hidreto metálico (NiMH)	8
2.2.6	Comparações	8
2.3	Resumo	9
3	Descrição da Ferramenta Existente	11
3.1	Operações Disponíveis	11
3.2	Descrição de Processos	13
3.2.1	Introdução de Valores Iniciais	13
3.2.2	Carregamento dos Diagramas de Carga	14
3.2.3	Carregamento de Irradiâncias	15
3.2.4	Processo Iterativo	15
3.2.5	Tratamento de Dados	19
3.3	Resultados e Performance	19
3.4	Defeitos	20
3.4.1	Investimento Inicial	21
3.4.2	Energia Injetada	21
3.4.3	Orientação sem Painéis	22
3.4.4	<i>InputBoxes</i>	24
3.4.5	Auxiliar Horas	25
3.4.6	Início e Fim do Processo Iterativo	26
3.5	Resumo ou Conclusões	26
4	Otimização da Ferramenta	29
4.1	Mudanças Estéticas	29
4.2	Mudanças na Introdução de Dados - Interfaces Gráficas	31
4.3	Correção da Energia Injetada	34

4.4	Início e Fim do Processo Iterativo	36
4.4.1	Fim do Processo Iterativo	36
4.4.2	Início do Processo Iterativo	37
4.5	Nova Simulação / Número de Painéis	37
4.6	Operação e Manutenção	38
4.7	Otimização do processo iterativo	39
4.7.1	Alterações Estruturais do Algoritmo	39
4.7.2	Alterações na Aplicação do Algoritmo	40
4.8	Outros Defeitos Corrigidos	43
4.8.1	Investimento Inicial	43
4.8.2	Orientação sem Painéis	43
4.8.3	Auxiliar Horas	44
4.9	Resultados e Performance	44
4.10	Resumo ou Conclusões	45
5	Dimensionamento de Baterias	47
5.1	Contextualização	47
5.2	Bateria do Modelo	48
5.3	Formulação do modelo	49
5.4	Resultados	51
5.4.1	Relatório de Auto-Financiamento das Baterias	52
5.4.2	Funcionamento das Baterias	52
5.4.3	Gráficos das Baterias	54
5.5	Resumo ou Conclusões	55
6	Conclusões e Trabalho Futuro	57
6.1	Conclusões	57
6.2	Trabalho Futuro	57
A	Casos Exemplo	59
A.1	Diagramas de cargas em energia do caso exemplo analisado em 3.4.2	59
	Referências	61

Lista de Figuras

2.1	Esquema representativo de uma bateria chumbo-ácido	5
2.2	Esquema representativo de uma bateria de íões de lítio	6
2.3	Ilustração de uma célula Sódio-Enxofre	6
2.4	Esquemas de uma bateria Níquel-Cádmio em modos de descarregamento e carregamento	7
2.5	Esquema representativo de uma bateria NiMh	8
3.1	Vista inicial da ferramenta existente	11
3.2	Exemplo de resultados obtidos com a utilização da ferramenta existente	12
3.3	Exemplo de pergunta realizada ao utilizador	14
3.4	Exemplo de diagrama de carga	14
3.5	Exemplo de ficheiro de texto com as irradiâncias a importar	16
3.6	Diagrama representativo da análise feita para cada registo t	18
3.7	Exemplo de gráfico produzido pela ferramenta existente numa instalação com duas orientações	19
3.8	Tempos de execução da simulação com a ferramenta existente	20
3.9	Exemplo de um falso positivo no teste da percentagem da energia injetada na rede	22
3.10	Evolução da percentagem de energia produzida injetada na rede ao longo do processo iterativo	23
3.11	Relatório gerado quando na simulação é incluída uma orientação sem painéis	23
3.12	Gráfico relativo ao mês de janeiro para o caso com novas áreas	24
3.13	Exemplo de pergunta com resposta errada	25
3.14	Processo de carregamento do Auxiliar Horas	26
4.1	Comparação de tabelas	30
4.2	Processo de carregamento do Auxiliar Horas	30
4.3	Comparação dos gráficos de Produção vs Consumo	31
4.4	Interface gráfica de introdução de dados iniciais	32
4.5	Interface gráfica de introdução das restantes variáveis	33
4.6	Exemplo de introdução de erro	34
4.7	Exemplo de seleção de ficheiro	34
4.8	Interface gráfica de seleção de diagramas de carga	35
4.9	Comparação das curvas de percentagem de energia injetada	35
4.10	Pergunta do número mínimo de painéis para a primeira orientação	37
4.11	Resultados da aplicação de um custo fixo (€/kWp)	39
4.12	Esquema ilustrativo das alterações estruturais	41
4.13	Folha Excel do problema exemplo	42

4.14	Relatório gerado quando na nova ferramenta é incluída uma orientação sem painéis	43
4.15	Tempos de execução da simulação com a nova versão da ferramenta	45
5.1	Diagrama representativo da análise feita para cada registo t no processo iterativo das baterias	49
5.2	Exemplo de uma limitação da energia produzida	50
5.3	Relatório gerado após a simulação das baterias	52
5.4	Tabela de <i>cash-flows</i> gerada	53
5.5	Tabela de trânsitos de potências gerada	53
5.6	Tabela com os resultados das iterações gerada	54
5.7	Exemplo de um gráfico com todas as curvas selecionadas	55
5.8	Mudanças nos gráficos com a introdução de uma curva	55
A.1	Diagramas de cargas em energia do caso exemplo analisado em 3.4.2	60

Lista de Tabelas

2.1	Tabela Comparativa de Características de Baterias	9
3.1	Tipos de variáveis da ferramenta	17

Abreviaturas e Símbolos

ESS	Energy Storage System
FLA	Flooded Lead-Acid
GD	Gerador Diesel
HRES	Hybrid Renewable Energy System
PV	Fotovoltaico
SOC	State of Charge
TAE	Tecnologia de Armazenamento de Energia
TIR	Taxa Interna de Rentabilidade
UPAC	Unidade de Produção para Autoconsumo
VAL	Valor Atual Líquido
VBA	Visual Basic for Applications
VRLA	Valve-Regulated Lead-Acid

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização e Motivação

Ao longo dos últimos anos, a crescente implementação de energias renováveis potenciou o desenvolvimento de estratégias mitigadoras dos efeitos negativos intrínsecos a estas fontes. No caso da energia solar fotovoltaica (PV), os sistemas de armazenamento de energia são, sobretudo no combate à sua variabilidade, uma das estratégias aceites como eficaz. [1]

Dentro destes sistemas de armazenamento de energia, a investigação levada a cabo nas baterias eletroquímicas transportou esta tecnologia para preços e performances que permitem a sua integração em sistemas projetados para autoconsumo da produção PV.

Por sua vez, os sistemas de autoconsumo podem ser categorizados pela sua ligação à rede elétrica de energia: *off-grid*, se essa ligação não existir; *on-grid*, se a rede for parte integrante do sistema. Esta distinção altera necessariamente aquilo que se exige, não só à instalação PV, mas também ao armazenamento de energia.

Do ponto de vista do consumidor, um sistema *on-grid* munido com PV é simples, uma vez que os painéis são maioritariamente utilizados para reduzir a energia comprada à rede e, quando estes produzem mais do que é consumido, o excesso é vendido à rede. Eventualmente, um sistema com estas características poderá usufruir de um sistema de baterias para aumentar a rentabilidade da energia solar produzida ou funcionar como fonte de energia em casos de avaria.

Os sistemas *off-grid* com PV podem ou não contar com um gerador diesel (GD), sendo que neste documento será dado ênfase aos casos em que este se encontra incluído. A estes sistemas é dado o nome de sistemas híbridos *off-grid*.

A **Ecoinside**[®] dispõe de uma ferramenta programada na linguagem VBA do Excel que permite determinar o número ótimo de painéis a instalar nos sistemas *on-grid* aqui descritos. Contudo, atenta às tendências do mercado e às evoluções tecnológicas, pretende aumentar o seu conjunto de soluções, começando pela exploração de hipóteses com baterias eletroquímicas.

1.2 Objetivos

Em primeiro lugar, pretende-se fazer uma revisão das tecnologias de armazenamento de energia que permita indicar quais são as suas principais características e limitações técnicas.

Em segundo lugar, procurar-se-à corrigir e otimizar a ferramenta sobre a qual este trabalho foi desenvolvido.

Por último, deseja-se iniciar o processo de inclusão de sistemas híbridos *off-grid* no leque de funções da ferramenta, através da construção de um modelo baseado em sistemas de armazenamento de energia.

1.3 Estrutura da Dissertação

Este documento é composto por seis capítulos. O primeiro contém uma introdução ao tema e à ferramenta sobre a qual o trabalho foi realizado e os objetivos que se pretendem atingir com esta dissertação.

No segundo capítulo, apresentam-se as diferentes tecnologias de armazenamento de energia, as suas características e aplicabilidade aos sistemas abordados neste documento.

No terceiro capítulo, descreve-se a ferramenta existente e os seus modos de funcionamento, apontando-se ainda imperfeições que possam surgir da sua análise.

No quarto capítulo, indicam-se as alterações feitas à ferramenta e de que modo estas modificam a sua performance.

No quinto capítulo, apresenta-se o modelo construído para sistemas híbridos *off-grid* baseado em sistemas de armazenamento de energia perfeitos e os resultados obtidos.

No último capítulo, encontram-se as conclusões finais deste trabalho e propostas para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Tecnologias de Armazenamento de Energia

2.1 Introdução

A ferramenta existente, sobre a qual este trabalho se debruçou, foi desenvolvida com o objetivo de indicar ao projetista o número ótimo de painéis a instalar. Contudo, as suas aplicações cingem-se ao caso mais comum, isto é, consumidores com acesso à rede de energia que, neste tipo de instalações, tanto pode assumir o papel de fonte como de consumidor de energia, dependendo das necessidades.

Assim, um dos objetivos desta dissertação é alargar o funcionamento da ferramenta a sistemas em que o acesso à rede não é possível e, convencionalmente, o acesso a energia é feito por geradores diesel (GD) - sistemas *off-grid*.

Porém, esta fonte de energia não oferece ao consumidor a mesma flexibilidade que a rede elétrica, especialmente no que ao escoar do excedente da produção fotovoltaica diz respeito. Não sendo o desperdício dessa energia uma opção atraente [2], especialmente para uma empresa com ideais assentes na eficiência energética, a solução passa por recorrer a tecnologias de armazenamento de energia (TAE).

O dimensionamento de sistemas híbridos compostos por gerador diesel, central fotovoltaica (PV) e tecnologias de armazenamento de energia é, então, adicionado ao leque de funcionalidades desta ferramenta. Para tal, é necessário fazer uma revisão das diferentes possibilidades existentes no mercado para o processamento desse armazenamento.

Numa primeira instância, serão expostas as principais tecnologias usadas neste tipo de sistemas, juntamente com o seu modo de funcionamento, características, vantagens e desvantagens. De seguida, uma comparação entre elas é feita baseada nesses mesmo parâmetros.

2.2 Diferentes Tecnologias de Armazenamento de Energia

O objetivo da **Ecoinside**[®] é contar com uma ferramenta capaz de simular uma instalação fotovoltaica com armazenamento de energia de modo a facilitar a formulação de propostas para clientes finais.

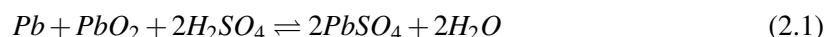
Este aspeto vai ter especial preponderância no processo de escolha da TAE a instalar, já que soluções que acarretem elevados investimentos iniciais ou que não se encontrem estabelecidas no mercado com provas de sucesso dadas não serão consideradas. Além destas, soluções que só possam ser instaladas em casos muito específicos, também não serão objeto de análise.

Assim, estando-se a desenvolver uma ferramenta que se pretende que abranja o maior número de casos possíveis, considerar-se-à tecnologias de armazenamento de energia eletroquímicas secundárias, ou seja, baterias recarregáveis.

2.2.1 Baterias Chumbo-ácido (PbA)

Inventadas em 1859, as baterias Chumbo-ácido são os dispositivos de armazenamento de energia de tecnologia eletroquímica mais antigos e mais difundidos atualmente no mercado. [3] [4] [5]

O seu funcionamento baseia-se em reações de oxidação-redução do chumbo. Quando carregada, a bateria é composta por dois elétrodos - um negativo (*Pb*) e um positivo (*PbO₂*) - imersos num eletrólito aquoso de ácido sulfúrico (*H₂SO₄*). Quando descarregada, ambos os eletrólitos consistem em sulfato de chumbo (*PbSO₄*), ao passo que o eletrólito se converte em água (*H₂O*). Estas transformações são explicadas pela equação geral 2.1 e os estados da bateria, acima enunciados, ilustrados na figura 2.1. [6]



A eficiência deste tipo de baterias varia entre 75 e 85%, dependendo de um conjunto de fatores dos quais se destacam as variações de temperatura e a percentagem de carga. [4]

São suscetíveis a fenómenos de autodescarga, também estes potenciados por aumentos de temperatura.

Existem vários tipos de baterias chumbo-ácido que partilham estes princípios químicos, entre os quais sobressaem, pela sua notoriedade, as Flooded Lead-Acid Batteries (FLA) e as Valve-Regulated Lead-Acid (VRLA).

O tempo de vida típico ronda os 5 anos ou até 1000 ciclos de carga/descarga. [4]

A densidade de energia situa-se entre os 30 e os 50 Wh/kg. Já a densidade de potência encontra-se entre os 75 e os 300 W/kg. [3]

Por último, um fator que não pode ser descurado é o posicionamento deste tipo de baterias no mercado. Estabelecidos canais de distribuição de uma tecnologia maturada fazem com que estas sejam apelativas para os seus instaladores.

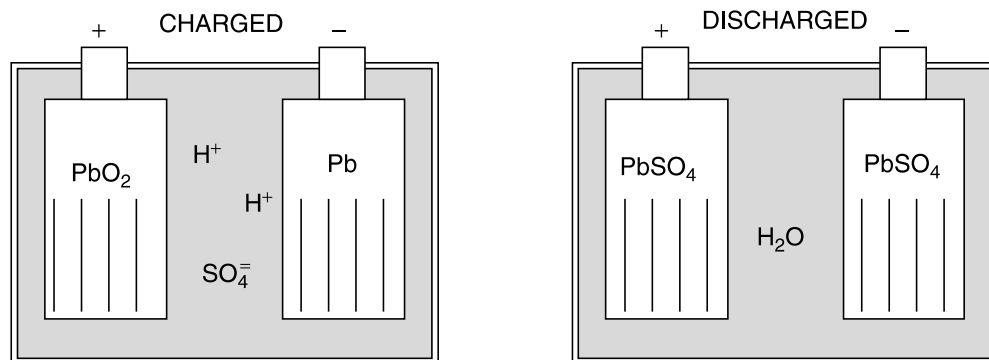


Figura 2.1: Esquema representativo de uma bateria chumbo-ácido [5]

2.2.2 Baterias de Iões de Lítio (LiI)

Remontando a construção da primeira bateria de lítio a 1979, o seu baixo tempo de vida e problemas de segurança eram fortes impedimentos à sua difusão no mercado. A maturação desta tecnologia, em grande parte impulsionada pela adição de metais de transição ao eletrodo positivo de lítio, fez com que o seu tempo de vida e densidade de energia aumentassem para valores bastante superiores aos das baterias chumbo-ácido. [4][7]

No que concerne à sua construção, as diferentes possibilidades de composição dos dois eletrodos e do próprio eletrólito possibilita que existam no mercado baterias de iões de lítio com características bastante distintas. Inclusive, a própria definição daquilo que deve ser considerado uma bateria de iões de lítio não é unânime. Neste documento, tal como foi feito em [8], considerou-se que qualquer bateria que utilize reações de inserção no eletrodo positivo e no negativo com iões de lítio como portadores de carga seja chamada de bateria de iões de lítio (figura 2.2).

As suas aplicações também são vastas. A maioria das baterias de pequenas dimensões utilizadas (por exemplo, em telemóveis e computadores) fazem uso desta tecnologia. Em instalações de potências superiores, o uso dos iões de lítio ainda se encontra em fase de desenvolvimento. [8]

Podem atingir eficiências próximas dos 100%. [3]

A densidade de energia situa-se entre os 75 e os 200 Wh/kg [3], sendo adequada para aplicações com limitações de espaço.

Podem ainda atingir até 10000 ciclos de vida. [3]

Possui uma grande vantagem comparativamente a outras baterias: a sua estabilidade térmica e química. [9]

Por outro lado, o custo destas baterias é elevado, podendo atingir os 1200 €/kWh.

Atualmente, para a instalação em sistemas solares, uma das baterias mais difundidas tem os eletrodos positivos e negativos compostos por lítio ferro-fosfato ($LiFePO_4$) e grafite, respetivamente. Estas são nomeadas baterias LFP.

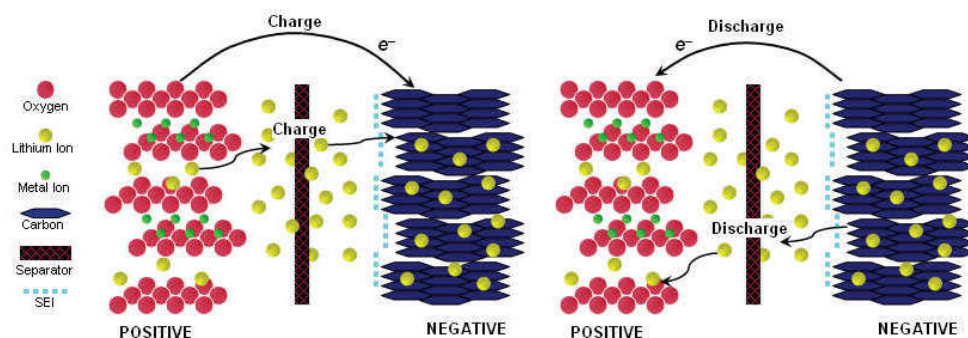


Figura 2.2: Esquema representativo de uma bateria de íons de lítio [7]

2.2.3 Bateria Sódio-Enxofre (NaS)

De entre as restantes baterias eletroquímicas, a Bateria Sódio-Enxofre (figura 2.3) tem a particularidade de possuir um eletrólito sólido a separar os elétrodos líquidos de enxofre (positivo) e sódio (negativo). Tendo em conta a sua única composição, é necessária uma fonte de calor que seja capaz de aumentar a temperatura da célula para o intervalo de 300-350°C. A própria bateria pode desempenhar essa função à custa da sua própria energia armazenada, baixando ligeiramente a sua eficiência para valores entre os 75 e 90%. [4]

A autodescarga é baixa, tornando possível o armazenamento de energia durante longos períodos de tempo. [10]

Tem uma boa relação entre capacidade e densidade de energia podendo ainda, à potência nominal, descarregar continuamente durante todo o período de descarga. [10].

Dependendo do modo como for operada, pode apresentar entre 2500 e 6500 ciclos de vida. [10].

Com as características acima apresentadas, este tipo de baterias é sobretudo comercializado para grandes instalações de armazenamento de energia.

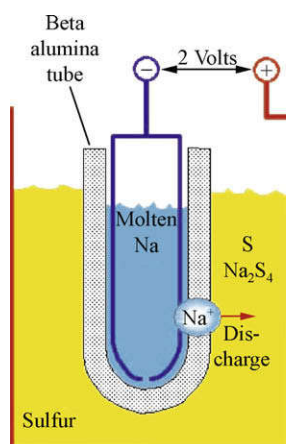
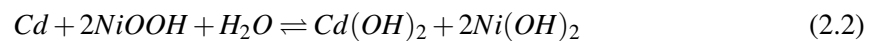


Figura 2.3: Ilustração de uma célula Sódio-Enxofre [3]

2.2.4 Bateria de Níquel Cádmio (NiCd)

Tendo sido inventada em 1899, portanto uma das baterias mais antigas, o seu desenvolvimento viu-se limitado pelo custo dos seus materiais e dificuldade de fabrico ([11], referenciando [3][12][13]). Além disso, tanto o níquel como o cádmio são metais tóxicos, logo acarretam riscos ambientais e para a saúde. [14]

A equação química geral representativa destas baterias é dada por 2.2 e pode mais facilmente ser entendida recorrendo à figura 2.4.



É possível conseguir atingir valores elevados de ciclos de vida exigindo pouca manutenção. Por sua vez, esta resume-se essencialmente à adição de eletrólito, ou seja, de água. [15]

A densidade de energia também é elevada, motivo pelo qual é comum encontrar este tipo de baterias em carros elétricos. [16]

Sofre de "efeito de memória", apenas atinge a plena carga após sucessivas descargas completas. Embora possa ser mitigado através de mecanismos de gestão, este efeito, juntamente com os custos elevados de manufatura, fazem com que a sua implementação, nos sistemas híbridos enunciados, possa ser problemática [3].

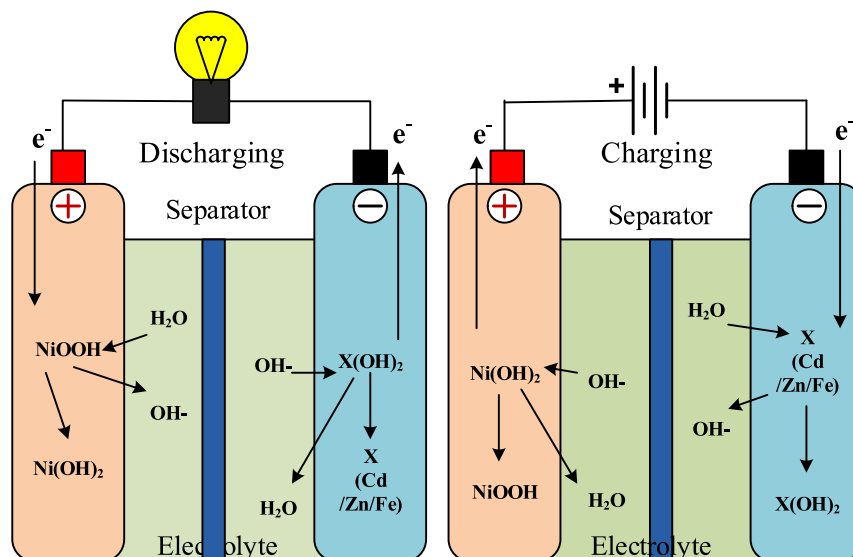


Figura 2.4: Esquemas de uma bateria Níquel-Cádmio em modos de descarregamento e carregamento [16]

2.2.5 Bateria de Níquel-hidreto metálico (NiMH)

Partilha grande parte das suas características com as baterias de níquel cádmio, distinguindo-se sobretudo pela composição do seu elétrodo negativo. Aí, a substituição do cádmio por hidretos metálicos, cuja densidade de energia é superior, permite que o elétrodo negativo ocupe um menor espaço na célula que poderá ser aproveitado para acondicionar maiores quantidades do elétrodo positivo. Isto aumenta a densidade de energia destas baterias mas, também, a sua capacidade e tempo de serviço. Além disso, retira da sua composição um metal tóxico, tornando-se uma solução mais ecológica. [15]

A equação 2.3 descreve o comportamento químico desta célula, tal como a figura 2.5.

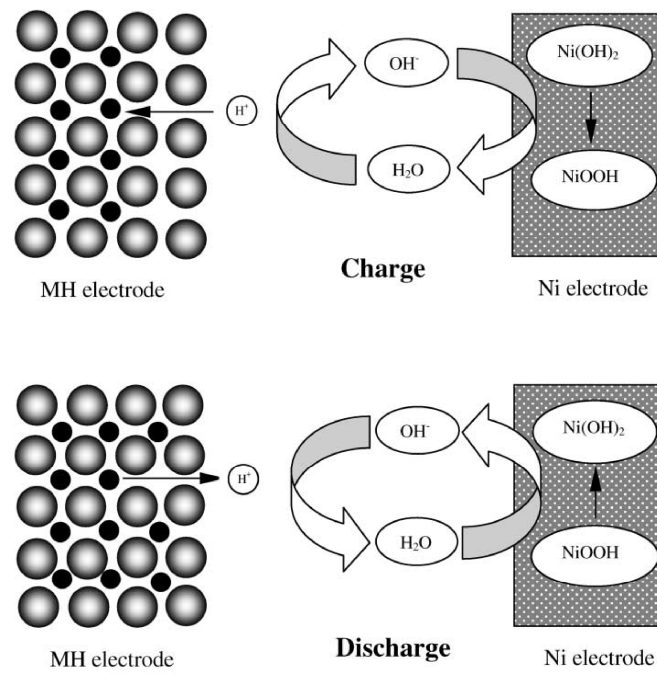
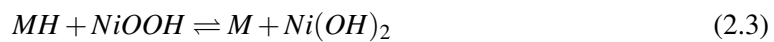


Figura 2.5: Esquema representativo de uma bateria NiMh (adaptado de [17])

2.2.6 Comparações

A comparação destas baterias é feita segundo o conjunto de parâmetros que se segue:

- ciclos de vida
- densidade de potência
- densidade de energia

- eficiência
- custo

Tabela 2.1: Tabela Comparativa de Características de Baterias (adaptada) [18]

Tipo	densidade		ciclos de vida (x100)	tempo típico de descarga	auto-des-carga	custo		efici-ên-cia %
	Wh/kg	W/kg				€/kW	€/kWh	
PbA	20-45	25-100	2-20	1-6h	baixa	>200	<300	70-80
LiI	100-200	360	5-40	1-3h	baixa	>300	<1200	70-95
NaS	120-240	120-220	30-90	6-12h	média	>1000	400-800	85
NiCd	40-70	140-180	5-20	1-6h	baixa	>200	400-600	60-75
NiMH	60-80	220	<30	10min-2h	média	>300	600-1600	50-80

A tabela 2.1 permite tirar as seguintes ilações:

- O tipo de bateria que apresenta o maior número de ciclos de vida é a de Sódio Enxofre, ao passo que a Chumbo-ácido tem o menor.
- No que à densidade de energia diz respeito, a mais favorável é também a bateria Sódio Enxofre e a mais desfavorável a Chumbo-ácido.
- A bateria com a maior densidade de potência é de Iões de Lítio e a menor a PbA.
- As menos eficientes são as de hidreto-metálico e as mais eficientes as de Iões de Lítio
- A mais barata é a PbA e as mais caras são as NiMh e as NaS.

2.3 Resumo

Neste tipo de sistemas constituídos por PV/GD/ESS não há um tipo de bateria evidentemente mais vantajoso que os demais.

Em primeiro lugar, há um conjunto alargado de características técnicas não descuráveis e nenhum dos tipos de baterias revista é superior em todas elas.

Em segundo lugar, os custos das baterias não se refletem diretamente em melhorias de performance, até porque esta depende das características acima referidas.

Em terceiro lugar, as baterias estão enquadradas em sistemas reais e variáveis. Os diagramas de carga, as instalações fotovoltaicas e as eventuais restrições construtivas de cada projeto fazem com que determinadas características das baterias tenham mais valor que outras. Assim, tanto o tipo de bateria como o número de unidades a instalar tornam-se pouco claros.

Apesar do enunciado nos pontos anteriores, o baixo custo e o elevado estado de maturação da tecnologia das baterias chumbo-ácido, na maioria dos casos, compensam as desvantagens técnicas

que tem face a outras baterias. Ressalva-se ainda que, por exemplo, numa instalação com limitações de espaço, uma bateria com valores superiores de densidade de energia e de potência pode ser uma melhor alternativa que as chumbo-ácido.

Capítulo 3

Descrição da Ferramenta Existente

A **Ecoinside®**, no papel de projetista de centrais fotovoltaicas, dispõe de uma ferramenta capaz de determinar o número ótimo de painéis fotovoltaicos a instalar nos locais pretendidos e adaptado às características existentes.

Esta ferramenta, desenvolvida na linguagem VBA incorporada no Excel, permite à empresa a execução de projetos fotovoltaicos de dimensões variáveis, correspondendo assim às díspares exigências de um amplo leque de clientes pertencentes a diferentes setores do mercado.

Neste capítulo é examinado o modo como esta ferramenta opera. São enunciados os seus objetivos e a metodologia usada para os alcançar.

3.1 Operações Disponíveis

Imediatamente após a abertura do ficheiro Excel da simulação, o utilizador depara-se com dois botões: **Começar Simulação** e **Começar Simulação sem Diagramas** (figura 3.1).

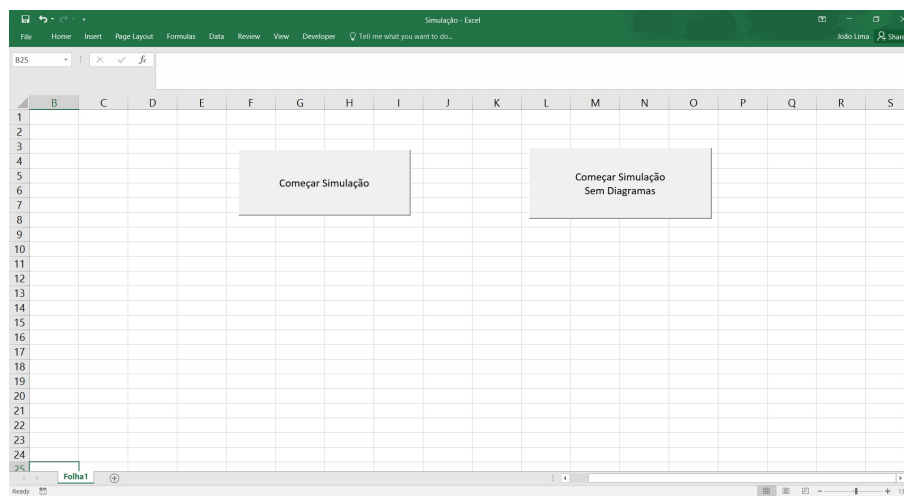


Figura 3.1: Vista inicial da ferramenta existente

Um clique no primeiro dos botões enunciados inicia o processo de determinação do número ótimo de painéis a instalar, tendo em conta os consumos de energia do cliente.

Com o objetivo de obter a melhor remuneração possível para o contratante é processada a informação dos seus consumos energéticos, juntamente com a disponibilidade do local para a implementação do projeto e o seu recurso solar intrínseco.

Uma vez introduzidos esses dados, é iniciado um processo iterativo. Começando com um painel, é calculada a energia produzida por este e avaliado o retorno financeiro resultante da sua instalação. A cada iteração, um painel será adicionado e uma nova avaliação será feita que, revelando-se mais proveitosa que o melhor registo até então encontrado, tomará o seu lugar. Sendo feitas tantas iterações quanto o número de painéis passíveis de serem instalados, o número de painéis mais adequado é determinado.

Encontrado o número mais apropriado de painéis a instalar, a ferramenta desempenha novas funções de tratamento de dados de índole financeira, posteriormente materializadas em folhas de Excel formatadas, de modo a facilitar a realização de propostas formais aos clientes. A figura 3.2 é um exemplo de uma das folhas que se obtêm com a utilização da ferramenta.

Potência de cada painel (kW)	Energia anual produzida (kWh)	Potência Nominal (kW)	Nº de painéis	Energia injetada no cliente (kWh)
0,27	619494,44	200	1929	495179,75
Eficiência painel (%)	Perda de Eficiência por ano (%)	Tarifa Evitada (€/kWh)	Potência total instalada (kW)	Energia injetada na rede (kWh)
16,5%	1%	0,1262 €	520,83	124311,11
Área utilizada (m ²)	Energia Consumida anual (kWh)	Tarifa Mibel (€/kWh)	VAL a 25 anos	Percentagem energia total produzida (%)
3472,2	2225842,50	0,0449 €	564 574,69 €	27,83%
Límite de painéis	Payback (anos)	Inflação (%)	TIR a 25 anos	Percentagem energia consumida (%)
1930	8,30	2,5%	11,89%	79,93%
Garantia máxima (anos)	Poupança anual (€)	Inversores (nº)	WACC (%)	Percentagem energia injetada (%)
25	62 374,78 €	5	4,0%	20,07%
Investimento Inicial (€)	Duração do Contrato (anos)	Perdas do Sistema (%)	Orientação (°)	Inclinação (°)
- 546 871,50 €	25	14,0%	45	15
			Orientação (°)	Inclinação (°)
			0	0
			Orientação (°)	Inclinação (°)
			-135	15

Figura 3.2: Exemplo de resultados obtidos com a utilização da ferramenta existente[19]

Finalizada a simulação, surge ainda um conjunto de opções:

- **Desconto**
- **Nova Simulação / Área**
- **Nova Simulação / Número de Painéis**

O primeiro destes pontos permite ao utilizador a aplicação de um desconto ao investimento inicial previamente determinado. Na realização de uma simulação, o investimento inicial é obtido como função da potência instalada, ou seja, baseando-se em valores estabelecidos de €/kWp e

no número de painéis que se descobriu ser o mais proveitoso. Contudo, é comumente útil a consideração de um preço diferente por unidade de potência instalada com o objetivo de aumentar a competitividade de uma proposta.

Assim, a opção **Desconto** permite fazer essa alteração, reavaliando os cálculos financeiros subsequentes, sem o inconveniente de ter que repetir o eventualmente moroso processo iterativo de painéis.

O segundo ponto - **Nova Simulação / Área** - evita apenas a reintrodução dos diagramas de carga e das diferentes radiâncias, possibilitando a redefinição da área máxima disponível de instalação.

Por último, a **Nova Simulação / Número de Painéis**, além de partilhar as vantagens do ponto anterior, responde a necessidades específicas, ora técnicas, ora financeiras, que possam surgir, ao fazer a simulação para um número específico de painéis, em vez de procurar o ótimo.

O outro botão inicial, **Começar Simulação sem Diagramas**, limita-se a simular a produção solar possível numa determinada área, sem considerar o consumo do cliente. A sua escassa utilização e o facto de poder ser vista como um caso particular da simulação explicada acima fazem com que esta opção não seja objeto de estudo deste documento.

Na secção seguinte, os diferentes processos aqui referidos serão alvo de um maior escrutínio e explanados mais pormenorizadamente, lançando o mote à implementação de alterações e melhoramentos que se vislumbrem.

3.2 Descrição de Processos

Nesta secção, em primeiro lugar, são analisadas em maior detalhe as diferentes etapas da simulação. Para efeitos de clarificação, estas serão apresentadas pela ordem pela qual são executadas, salvo quando dita ordem não exista, ou seja, quando se encontre etapas alternativas ou opcionais.

3.2.1 Introdução de Valores Iniciais

Numa primeira instância, é pedida ao utilizador a introdução de algumas informações gerais do projeto a realizar, a saber:

- Local da realização do projeto
- Unidades dos diagramas de carga
- Número de meses de diagramas de carga disponíveis para análise
- Número de orientações diferentes disponíveis
- Ano dos diagramas de carga

Estas informações são inseridas sequencialmente, recorrendo para tal, a tantas caixas de diálogo com possibilidade de introdução de texto - função *InputBox* do Excel -, quantas perguntas se

pretendam ver respondidas. Aliás, como também se pode verificar mais à frente, este é o método de introdução de dados de eleição, apenas preterido em situações nas quais se demonstre a sua incapacidade de executar determinada tarefa.

Na figura 3.3, apresenta-se a janela onde a primeira pergunta é feita ao utilizador e serve de exemplo para as demais.

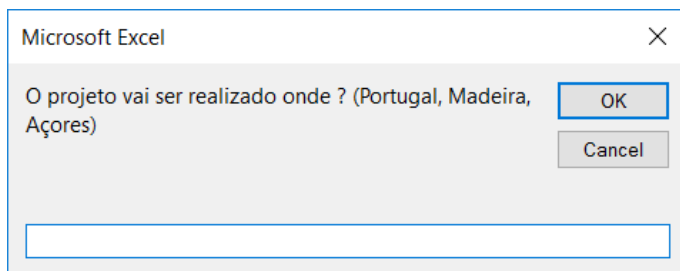


Figura 3.3: Exemplo de pergunta realizada ao utilizador

3.2.2 Carregamento dos Diagramas de Carga

Inseridas estas informações iniciais, segue-se o carregamento dos diagramas de carga.

Ao utilizador é pedido que escreva o nome de um mês, em *InputBoxes*, e selecione o ficheiro excel correspondente. Este processo repete-se para todos os meses que se pretendam considerar.

De modo a obter os resultados desejados, o ficheiro relativo a cada mês deverá ser previamente formatado. Neste deverá constar o consumo em intervalos de 15 minutos, nas unidades previamente escolhidas, preferencialmente com o primeiro valor registado na célula “C28” da folha.

Dia	00:15	00:30	00:45	01:00	01:15	01:30	01:45	02:00	02:15	02:30	02:45	03:00	03:15	03:30	03:45	04:00	04:15	04:30	04:45	
1	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	20,0
2	20,0	30,0	20,0	30,0	20,0	30,0	30,0	20,0	30,0	20,0	40,0	30,0	20,0	30,0	30,0	30,0	30,0	20,0	30,0	30,0
3	30,0	30,0	30,0	20,0	30,0	30,0	30,0	30,0	20,0	30,0	40,0	20,0	30,0	20,0	30,0	30,0	20,0	30,0	30,0	30,0
4	150,0	170,0	200,0	210,0	210,0	220,0	240,0	240,0	270,0	270,0	290,0	290,0	270,0	290,0	290,0	280,0	280,0	270,0	280,0	280,0
5	310,0	270,0	280,0	300,0	300,0	300,0	310,0	320,0	310,0	310,0	300,0	320,0	310,0	310,0	320,0	310,0	310,0	310,0	310,0	310,0
6	330,0	290,0	300,0	310,0	320,0	320,0	310,0	310,0	320,0	330,0	330,0	320,0	320,0	320,0	310,0	320,0	320,0	320,0	330,0	330,0
7	320,0	310,0	300,0	330,0	320,0	320,0	330,0	330,0	320,0	310,0	320,0	320,0	330,0	330,0	340,0	320,0	300,0	300,0	310,0	310,0
8	280,0	260,0	250,0	280,0	290,0	280,0	280,0	290,0	290,0	300,0	290,0	300,0	280,0	290,0	290,0	290,0	290,0	280,0	290,0	290,0
9	200,0	120,0	100,0	110,0	110,0	100,0	100,0	90,0	100,0	100,0	100,0	90,0	80,0	90,0	100,0	90,0	80,0	90,0	90,0	90,0
10	60,0	50,0	50,0	60,0	60,0	50,0	60,0	60,0	60,0	50,0	50,0	60,0	60,0	50,0	50,0	60,0	60,0	60,0	50,0	50,0
11	220,0	260,0	270,0	270,0	290,0	290,0	270,0	250,0	280,0	270,0	280,0	280,0	280,0	270,0	280,0	280,0	280,0	280,0	280,0	280,0
12	300,0	280,0	270,0	290,0	290,0	300,0	300,0	300,0	310,0	310,0	300,0	300,0	290,0	290,0	310,0	290,0	290,0	290,0	300,0	300,0
13	340,0	310,0	320,0	340,0	340,0	330,0	320,0	310,0	300,0	320,0	300,0	300,0	310,0	300,0	300,0	300,0	290,0	300,0	290,0	290,0
14	330,0	290,0	300,0	320,0	320,0	320,0	310,0	320,0	300,0	320,0	300,0	320,0	310,0	320,0	310,0	320,0	300,0	300,0	310,0	310,0
15	320,0	290,0	270,0	300,0	310,0	320,0	310,0	310,0	290,0	310,0	310,0	320,0	300,0	300,0	310,0	310,0	310,0	310,0	310,0	300,0
16	180,0	100,0	100,0	90,0	90,0	80,0	90,0	90,0	90,0	80,0	90,0	80,0	90,0	80,0	80,0	130,0	180,0	180,0	180,0	180,0
17	60,0	70,0	60,0	70,0	70,0	60,0	70,0	60,0	70,0	60,0	70,0	60,0	70,0	70,0	60,0	70,0	70,0	60,0	70,0	70,0
18	240,0	290,0	290,0	290,0	280,0	310,0	300,0	310,0	290,0	290,0	300,0	300,0	300,0	300,0	310,0	320,0	300,0	310,0	310,0	310,0
19	310,0	290,0	290,0	300,0	310,0	300,0	320,0	310,0	310,0	310,0	310,0	320,0	320,0	310,0	310,0	320,0	310,0	310,0	310,0	310,0
20	320,0	290,0	290,0	310,0	290,0	300,0	320,0	310,0	310,0	320,0	330,0	320,0	320,0	290,0	320,0	310,0	300,0	310,0	320,0	320,0
21	340,0	300,0	310,0	320,0	330,0	330,0	330,0	340,0	320,0	330,0	330,0	330,0	320,0	340,0	320,0	330,0	310,0	330,0	330,0	330,0
22	310,0	290,0	300,0	310,0	320,0	310,0	320,0	320,0	310,0	310,0	310,0	310,0	310,0	300,0	320,0	310,0	310,0	300,0	310,0	310,0
23	290,0	110,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	90,0	90,0	90,0	90,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0

Figura 3.4: Exemplo de diagrama de carga [19]

Finalmente, toda esta etapa de seleção dos meses e carregamento dos respetivos ficheiros culmina numa única coluna com todos os dados de consumo.

3.2.3 Carregamento de Irradiâncias

A energia que pode ser produzida em qualquer central fotovoltaica depende sempre da radiação solar. Assim, nenhum estudo prévio de um projeto que se pretenda realizar está completo, sem dados tão exatos, quanto possível, da irradiância do local.

A ferramenta está então preparada para receber esses dados através da importação de ficheiros texto (.txt) provenientes do PVGYS[20], também eles em intervalos de 15 minutos.

Ao contrário do que sucedia com os diagramas de cargas, o ficheiro de texto a importar não carece de formatação prévia. Isto é facilmente compreensível atendendo à proveniência de ambos. Ao passo que para as irradiâncias apenas se prevê o uso de ficheiros de uma só fonte (PVGYS), os diagramas de carga podem ser fornecidos por vários distribuidores de energia, ou mesmo por medições diretamente realizadas no cliente.

Por se ter esse conhecimento da estrutura dos ficheiros com as irradiâncias, a ferramenta é capaz de retirar automaticamente a informação pertinente para o cálculo da energia produzida. Mais concretamente, pretender-se-á retirar a irradiância global juntamente com a hora em que se dá. Estas duas variáveis correspondem às duas primeiras colunas da figura 3.5.

Tal como acontecia com os diagramas de carga, o processo de importação dos ficheiros é feito mês a mês e, no final, condensado em duas colunas anuais (hora e irradiância global).

Isto é ainda repetido para cada orientação de painéis que se pretenda considerar. Por exemplo, considerando-se quatro orientações distintas e doze meses, terá que se selecionar quarenta e oito ficheiros individualmente.

A importação destes dados está completa com a introdução da data do primeiro dia dos diagramas de carga, uma vez que possibilita a correspondência entre as três colunas armazenadas.

3.2.4 Processo Iterativo

O processo iterativo está pronto a ser iniciado após a introdução de variáveis adicionais, pelo mesmo método verificado no ponto 3.2.1. Em [19], estas variáveis são divididas em três tipos e apresentadas numa tabela semelhante à 3.1.

Graças ao modo como os diagramas de carga e as irradiâncias foram organizados previamente, facilmente se consegue fazer um balanço entre a energia estimada de produção dos painéis e o consumo da instalação a cada 15 minutos. A esse balanço deu-se o nome de diferença (equação 3.1).

$$\text{diferença}(t) = E_{\text{produzida}}(t) - E_{\text{consumida}}(t) \quad (\text{kWh/h}) \quad (3.1)$$

Caso a produção seja menor que o consumo, considera-se que toda a energia produzida é consumida pela instalação.

```

Latitude:      40°36'26" North,
Longitude:     7°18'5" West

Results for:   December

Inclination of plane: 4      deg.
Orientation (azimuth) of plane: 0
Time          G             Gd
07:52        39            39
08:07        49            49
08:22        109           62
08:37        134           71
08:52        159           79
09:07        182           86
09:22        203           92
09:37        224           98
09:52        242           102
10:07        259           107
10:22        273           110
10:37        286           113
10:52        297           115
11:07        305           117
11:22        312           119
11:37        316           120
11:52        318           120
12:07        318           120
12:22        316           120
12:37        312           119
12:52        305           117

```

Figura 3.5: Exemplo de ficheiro de texto com as irradiâncias a importar [20]

Caso a produção exceda o consumo, assume-se que todo o consumo da instalação é alimentado pela central, ao passo que o restante é vendido à rede.

A figura 3.6 ilustra o modo como a ferramenta trata esta questão.

Esta distinção do destino da energia produzida, que nada mais é que um exercício de trânsito de potências, é indispensável na realização de um projeto fotovoltaico pelo impacto que tem, quer em aspetos técnicos de funcionamento, quer em aspetos financeiros.

Do ponto de vista técnico, além da relevância que estes valores têm no dimensionamento de equipamentos e cablagem, é particularmente importante saber a energia que se injetará e comprará à rede, de modo a cumprir os limites estabelecidos em Diário da República [21] para a instalação em causa.

Do ponto de vista financeiro, a energia autoconsumida tem o valor correspondente à tarifa de compra à rede do período t em questão. Já a energia vendida à rede tem uma tarifa diferente, geralmente mais baixa. Esta discrepância de tarifas faz com que as receitas provenientes destas energias tenham que ser calculadas separadamente pelas equações 3.2 e 3.3.

$$Receita da Energia Autoconsumida = \sum_t E_{Autoconsumida}(t) \cdot tarifa(t) \quad (\text{€}) \quad (3.2)$$

$$Receita da Energia Injetada = \sum_t E_{Injetada}(t) \cdot tarifa de venda rede \quad (\text{€}) \quad (3.3)$$

A soma das receitas indicadas nas equações acima reflete a receita proveniente da instalação desse número de painéis.

Tabela 3.1: Tipos de variáveis da ferramenta (adaptada) [19]

Variável	Tipo de Variável
Área útil Perdas	Instalação
Eficiência Potência dos Painéis Área dos Painéis Garantia	Painéis Fotovoltaicos
Seguro Operação e Manutenção Taxa de Inflação WACC Tarifas	Financeiro

A última etapa antes da comparação dessa alternativa com i painéis, com a melhor até então encontrada nas iterações anteriores, passa por traduzir as receitas em *cash-flows* anuais para toda a duração do contrato e, com isso, calcular a Taxa Interna de Rentabilidade (TIR).

Logicamente, os *cash-flows* não se podem basear apenas nas receitas geradas pelos painéis; os custos também têm que ser considerados. Assim, o cash-flow para o primeiro ano é dado pela diferença entre ambos, formulada pela equação 3.4.

$$\text{cash-flow}_{ano1} = \text{receita} - \text{custos} \quad (3.4)$$

Por sua vez, os custos provêm dos valores percentuais inseridos na ferramenta através das variáveis “Operação e Manutenção” e “Seguro”. Estas percentagens serão aplicadas às receitas geradas, podendo a equação de cálculo do *cash-flow* para o primeiro ano reescrever-se como na equação 3.5.

$$\text{cash-flow}_{ano1} = \text{receita} \cdot (1 - O\&M - \text{seguro}) \quad (3.5)$$

Então, a adição de mais um painel é registada como a melhor quando a análise do balanço energético supracitado, juntamente com a análise financeira subjacente, cumpra as seguintes condições:

- o valor absoluto da média de todas as diferenças t seja inferior ao valor análogo da melhor iteração até então
- a Taxa de Rentabilidade Interna da instalação na orientação em estudo seja superior a um valor mínimo a escolher pelo utilizador
- a média de todas as diferenças t seja inferior a 10% da média dos consumos
- a percentagem de energia que é injetada (face a toda a que é produzida) seja inferior a um limite escolhido pelo utilizador para essa orientação

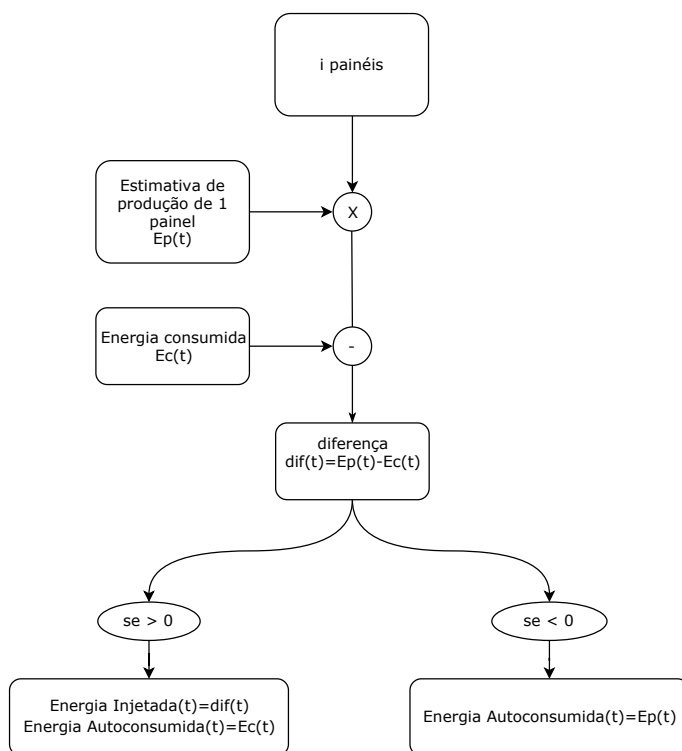


Figura 3.6: Diagrama representativo da análise feita para cada registo t

O processo iterativo é dado como terminado após a hipótese com o número máximo de painéis possíveis a instalar na área indicada ter sido considerada, ou seja, se a área indicada permitir a instalação de i painéis, o processo terá i iterações.

Ainda nesta etapa, convém analisar o comportamento da ferramenta em situações em que mais do que uma orientação é equacionada.

Esta ferramenta está preparada para abordar essa situação analisando as diversas orientações sequencialmente. Após explorada uma primeira, uma nova orientação é vista como uma instalação distinta em que nenhum painel tivesse sido contemplado. Porém, estando no âmbito do funcionamento da ferramenta a correspondência entre a produção e o consumo, ignorar os painéis das orientações anteriores contaminaria o retorno financeiro da adição de novos painéis.

A solução encontrada passa por reconstruir os consumos da instalação, tratando a produção até então registada como consumos colmatados. Ou seja, aos valores de consumo originais são subtraídos os valores de produção das orientações anteriores. Assim, o processo iterativo para uma nova orientação realiza-se tal como se fosse a primeira, *mutatis mutandis*.

Embora seja eficaz, esta abordagem simplesmente analisa as orientações pela ordem pela qual foram inseridos os seus respetivos dados. Consequentemente, a inserção dos dados terá que ser feita de acordo com a prioridade que se atribua a cada orientação, sob o risco de se suprir as necessidades de consumo com painéis cuja orientação não seja a mais profícua.

Por fim, o melhor número de painéis para cada orientação, bem como outros que venham a ser utilizados, são guardados para posterior tratamento.

3.2.5 Tratamento de Dados

O estudo necessário para se fazer uma central de produção fotovoltaica vai muito além da descoberta do número ideal de painéis a instalar em determinado local. A componente técnica é complexa e de extrema importância, mas um projeto também tem que se fazer valer por rigorosos cálculos financeiros. Afinal, esta componente é que determina a viabilidade do projeto e faz com que este seja executado.

Noutra perspectiva, a apresentação dos resultados também deverá ser esteticamente agradável e tão clara quanto possível, facilitando a realização da proposta a apresentar ao cliente.

Assim, após ser determinado o número de painéis a instalar, são efetuados cálculos suplementares indicadores do potencial financeiro do projeto e expostos os resultados em relatórios como o da figura 3.2. Importa notar que, não influenciando a determinação do número de painéis, os cálculos não devem ser incluídos no processo iterativo afim de diminuir o tempo de execução do programa.

Além desses relatórios, são também esboçados gráficos que permitem visualizar a energia consumida e as energias produzidas para cada orientação (figura 3.7). Tendo em consideração a grande quantidade de dados, estes gráficos constituem mais um instrumento ao serviço do projetista.

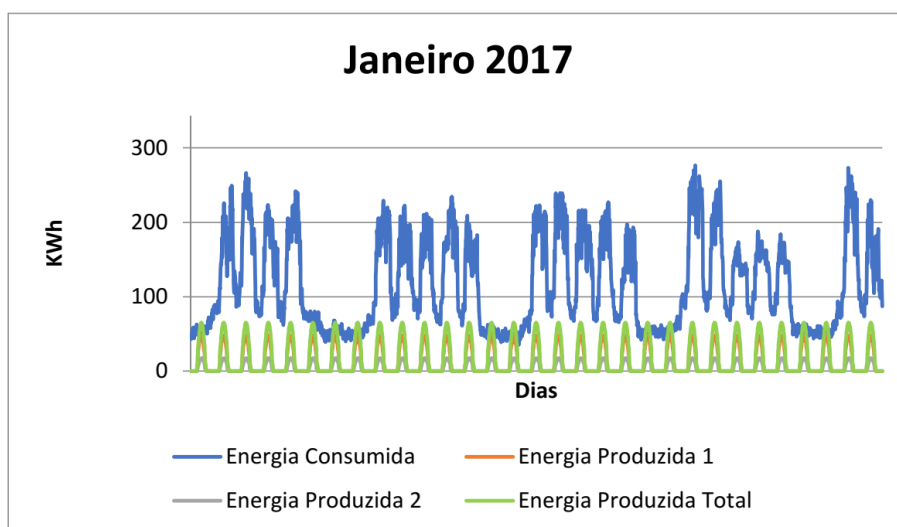


Figura 3.7: Exemplo de gráfico produzido pela ferramenta existente numa instalação com duas orientações

3.3 Resultados e Performance

Além da exatidão dos resultados produzidos pela ferramenta, outro aspeto não poderá ser descurado - o tempo de execução. Afinal, na realização de um projeto há prazos a cumprir e, quanto menos tempo se gaste a descobrir quantos painéis se deve instalar, mais tempo sobra para outras tarefas.

Aliás, dependendo daquilo que se pretenda que uma determinada ferramenta faça, não é incomum no mundo empresarial que se prefira resultados ligeiramente menos exatos e tempos de execução mais reduzidos, em detrimento de resultados com elevadíssimos níveis de exatidão, mas tempos impraticáveis.

Na figura 3.8, encontram-se os tempos de execução da ferramenta desde o momento em que a simulação se inicia até ao seu final. Foi escolhido um caso concreto de uma empresa com consumos elevados e três orientações possíveis, de modo a que as condições de todos os testes fossem as mesmas, permitindo assim observar somente o impacto do aumento da área e, conseqüentemente, do número de painéis no tempo.

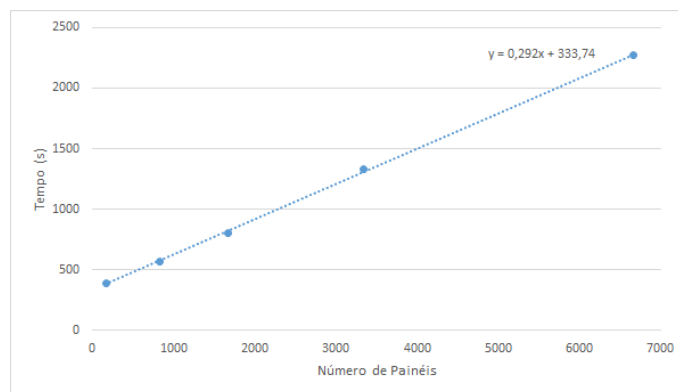


Figura 3.8: Tempos de execução da simulação com a ferramenta existente

O tempo dos testes pode ser analisado através da sua regressão linear. O termo independente diz respeito ao tempo que demora a introdução dos dados, dos diagramas de carga e das diferentes irradiâncias das três orientações (quanto mais orientações se analisarem, maior será o tempo). Já o termo de 1ª ordem indica o tempo de cada iteração.

$$y = 0,292x + 333,74 \quad (3.6)$$

Pela equação 3.6, pode-se concluir que são precisos aproximadamente 5 minutos e 33 segundos para se introduzir os dados relativos a uma instalação com 3 orientações e que cada iteração demora 0,292 segundos, ou seja, um projeto que tenha área disponível para a instalação de 6666 painéis vai demorar 38 minutos a encontrar o ótimo.

3.4 Defeitos

Nesta parte do documento estão presentes aspetos da ferramenta que, de alguma maneira, conduzem a resultados incorretos, inesperados ou ilógicos. Também são apresentados processos que, embora não produzam resultados errados, sejam de algum modo ineficientes.

3.4.1 Investimento Inicial

O investimento inicial que se apresenta ao cliente e do qual derivam grande parte dos cálculos financeiros não pode ser calculado diretamente a partir dos custos da instalação. Cálculos deste género são feitos e transmitem informações valiosas ao projetista, mas este encargo financeiro é também afetado por variáveis externas, por vezes inqualificáveis, que impedem a sua determinação imediata.

Imagine-se dois projetos A e B, idênticos em todos os aspetos técnicos. Estes não têm necessariamente os mesmos investimentos iniciais, podendo estar fortemente afetados pelo aspeto negocial do projeto que se pretenda apresentar ao cliente.

Contudo, o conhecimento de um valor inicial é útil para o projetista e para a própria ferramenta na realização de cálculos financeiros. Neste sentido, a solução encontrada consiste na atribuição de diferentes fatores baseados em intervalos de potência total instalada (equação 3.7), que afetarão o preço fixo definido para cada unidade de potência de pico (€/kWp).

$$k = \begin{cases} k_1 & \text{se } P_{instalada} < P_1 \\ k_2 & \text{se } P_1 < P_{instalada} < P_2 \\ \vdots & \\ k_n & \text{se } P_{n-1} < P_{instalada} \end{cases} \quad \text{em que, } \begin{cases} k_1 > k_2 > \dots > k_n \\ P_1 < P_2 < \dots < P_{n-1} \end{cases} \quad (3.7)$$

Descoberto um novo preço, já adaptado à potência instalada, é possível calcular o investimento inicial recorrendo a 3.8.

$$\text{Investimento Inicial} = k \cdot \text{preco} \cdot P_{instalada} \quad (3.8)$$

Na maioria dos casos, a utilização destes fatores permite aumentar a exatidão do investimento inicial calculado mas, de maneira alguma, substitui a aplicação de um desconto posterior à simulação. Não sendo possível suprir esse passo, a diferenciação de preços dificulta a sua execução, correndo-se o risco de se considerar a dimensão da instalação duas vezes.

3.4.2 Energia Injetada

A energia injetada por uma instalação na rede elétrica é uma das principais limitações da dimensão de uma central fotovoltaica, pelo que incorreções na sua determinação podem alterar significativamente o número ótimo de painéis a instalar.

O cálculo da percentagem da energia injetada na rede para cada orientação, expresso na equação 3.9, é feito em todas as iterações da ferramenta e, o seu resultado, é comparado com o limite que se defina para a energia injetada.

$$E_{produzida,injetada}(\%) = \frac{E_{injetada,orientacaoj}}{E_{produzida,orientacaoj}} \quad (3.9)$$

Contudo, neste estudo de energia injetada, a abordagem escolhida de considerar cada orientação como uma nova instalação com consumos inferiores revela fragilidades.

Em primeiro lugar, a percentagem de energia injetada para cada orientação é um valor praticamente sem significado uma vez que os limites são estabelecidos para a instalação como um todo. Assim, ao verificar-se se o valor máximo de energia injetada para a instalação é atingido em cada orientação, falsos positivos serão frequentes.

A figura 3.9 ilustra um caso em que, ao analisar a segunda orientação, foi atingido o limite definido de 30%, como tal mais nenhum painel foi adicionado, pois estaria a aumentar a percentagem da produção que é injetada (é digno de nota que, a produção de um painel injeta o mesmo, ou mais, na rede que o painel anterior da mesma orientação). Por sua vez, a figura 3.9c demonstra que a instalação ainda não está próxima desse limite, desperdiçando-se assim a oportunidade de instalar um maior número de painéis.

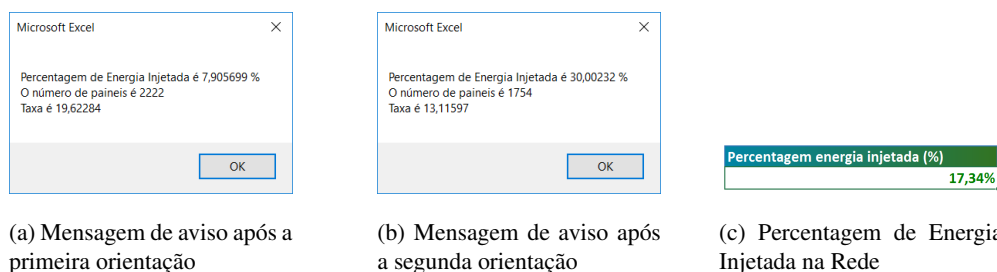


Figura 3.9: Exemplo de um falso positivo no teste da percentagem da energia injetada na rede

Em segundo lugar, a percentagem para cada orientação apenas poderá ter significado, caso seja contrastado com os consumos do cliente. As produções de todas as orientações, exceto a primeira, não são comparadas com esses consumos, mas sim com os consumos já colmatados pelas produções das orientações previamente exploradas, fazendo com que o seu resultado esteja sempre afetado por aquilo que se produz nas outras orientações.

O gráfico da figura 3.10 mostra a evolução da percentagem de energia injetada na rede ao longo do processo iterativo, para o mesmo caso exemplificativo ilustrado pela figura 3.9.

O incremento súbito na iteração do painel 2223, correspondente ao primeiro painel da segunda orientação, permite perceber que esta curva não representa, nem a percentagem de energia injetada por toda a central fotovoltaica, nem a percentagem de energia injetada por cada orientação.

Posto isto, é notório que a utilização desta variável para definir a dimensão da central, sem correções da sua formula de cálculo ou reestruturação do modo de análise de múltiplas orientações, pode traduzir-se na não obtenção do número ótimo de painéis.

3.4.3 Orientação sem Painéis

Na realização de projetos fotovoltaicos é comum que, à partida, seja difícil antever o número de painéis ótimo a instalar, mas é ainda mais frequente, quando se procura satisfazer perfis de consumo cujas forma e grandeza são desconhecidas.

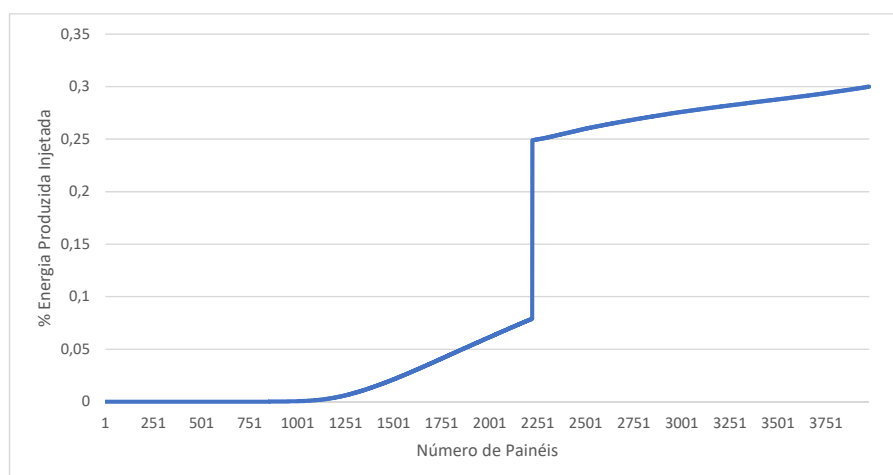


Figura 3.10: Evolução da porcentagem de energia produzida injetada na rede ao longo do processo iterativo

Consequentemente, o projetista pode julgar necessária a utilização de múltiplas orientações que, após a realização da simulação, se verificam ser supérfluas.

Podem ainda acontecer que a análise prioritária das orientações, definida pela sua ordem de introdução na ferramenta, atue como é esperado e considere que nenhum painel seja lucrativo quando orientado nessa direção.

Independentemente dos motivos que originem a inclusão de uma orientação sem painéis na ferramenta, esta não é capaz de gerar relatórios com valores válidos. Recorrendo novamente ao caso exemplo do subcapítulo 3.4.2, mas alterando as áreas escolhidas de ambas orientações, é possível detetar essas incorreções.

Com o objetivo de atingir o número ótimo de painéis, somente usufruindo da área disponível na primeira orientação, foram alteradas as áreas de ambas orientações deste caso. Em 3.4.2, as orientações possuíam $4000m^2$ cada. Neste subcapítulo, a primeira orientação passa a dispor de $11000m^2$, enquanto que a segunda terá apenas $100m^2$ (qualquer área nesta orientação conduziria ao mesmo resultado). Os resultados são visíveis nas figuras 3.11 e 3.12.

Potência de cada painel (W) 270,00	Energia anual produzida (kWh) 2255116,00	Potência Nominal (kW) 1241,730066	Nº de paineis 5110	Energia injetada no cliente (kWh) 3060327,00
Eficiência painel (%) 16,5%	Perda de Eficiência por ano (%) 1%	Tarifa Evitada (€/kWh) 0,1379 €	Potência total instalada (kWp) 1 379,70	Energia injetada na rede (kWh) 948886,31
Área utilizada (m ²) 9198	Energia anual consumida (kWh) 4389547,00	Tarifa Mibel (€/kWh) - €	VAL a 25 anos 5 241 759,06 €	Porcentagem energia total produzida (%) 51,37%
Limite de paineis 6166	Payback (anos) 5,70	Inflação (%) 2,5%	TIR a 25 anos 18,03%	Porcentagem energia consumida (%) 135,71%
Garantia máxima (anos) 25	Poupança anual (€) 444 001,62 €	Inversores (nº) -	WACC (%) 4,0%	Porcentagem energia injetada (%) -35,71%
Investimento Inicial (€) 2 620 917,00 €	Duração do Contrato (anos) 25	Perdas do Sistema (%) 14,0%	Orientação (º) -40	Inclinação (º) 5
			Orientação (º) 140	Inclinação (º) 5

Figura 3.11: Relatório gerado quando na simulação é incluída uma orientação sem painéis

Desde logo, há claros indícios de que há problemas nos cálculos, quando a percentagem de produção que é injetada é negativa. Além disso, os resultados da simulação indicam que todos os painéis da instalação se encontram na primeira orientação, mas a Energia Anual Produzida e o Investimento Inicial correspondem ao dobro dos valores resultantes da análise da primeira orientação.

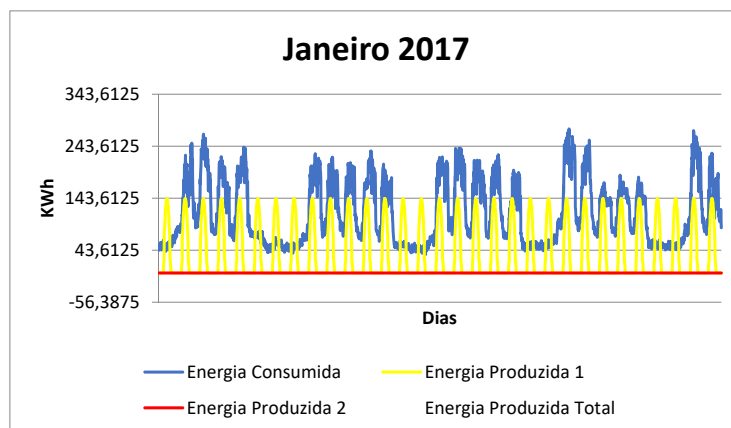


Figura 3.12: Gráfico relativo ao mês de janeiro para o caso com novas áreas

A obtenção de resultados errados é sempre uma preocupação mas, sendo este facilmente identificável, o principal problema reside no tempo perdido a executar esta simulação. Pela equação 3.6, mesmo desprezando o seu termo independente, o tempo de execução é superior a 1800 segundos, ou seja, 30 minutos infrutíferos, em que o Excel fica inacessível para outras tarefas, e que dificilmente podem ser prevenidos.

3.4.4 *InputBoxes*

O uso massivo de *InputBoxes* acarreta desvantagens: umas evitáveis, contudo não solucionadas na ferramenta existente; outras incontornáveis.

Por um lado, o programa espera receber respostas específicas (como as indicadas entre parêntesis na figura 3.3). Quando tal não acontece, nenhum tipo de erro é imediatamente reconhecido mas, no final, não se obtêm resultados ou resultados com incorreções. A título de exemplo (ilustrado pela figura 3.13), a introdução da resposta “Portuga” é aceite, mas os resultados finais não têm em consideração o modelo de tarifação de energia vigente em Portugal.

Ainda analisando os problemas de carácter evitável, destaca-se o facto de apenas o uso do botão “OK” estar previsto. Os botões “Cancel” e “X” permitem prosseguir com a execução do programa, mas conduzem a resultados erróneos.

Por outro lado, o tempo que demora a inserir toda a informação, campo após campo, até ao final da simulação, é inerente à utilização desta função, como tal, enquanto que esta for utilizada, essa desvantagem é qualificada como incontornável.

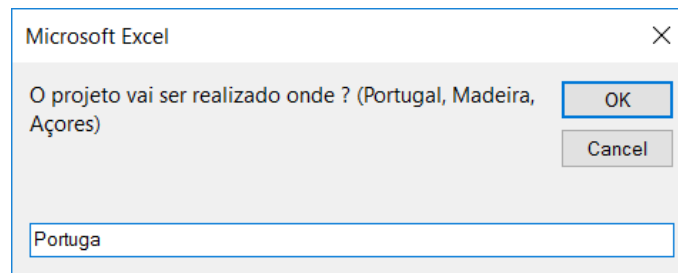


Figura 3.13: Exemplo de pergunta com resposta errada

O número de *InputBoxes* usadas ao longo da simulação varia de acordo com a expressão 3.10.

$$n^{\circ} \text{ de } InputBoxes = 27 + n^{\circ} \text{ de meses} + 2 \cdot n^{\circ} \text{ de orientacoes} \quad (3.10)$$

Numa simulação típica, com 12 meses e uma orientação, a ferramenta recorre a 41 *InputBoxes*, nas quais, qualquer uma das seguintes ações, pode enviesar os resultados ou abortar a simulação.

- troca de maiúscula por minúscula
- troca de “,” (vírgula) por “.”(ponto) em números com casas decimais
- outras gralhas
- carregar acidentalmente no “enter”, ou seja, inserir uma resposta em branco

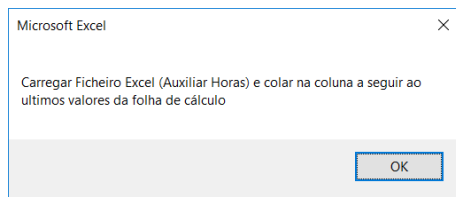
Estes erros têm a particularidade de acontecerem a todo o tipo de utilizadores. Por um lado, alguém que esteja a ter um primeiro contacto com a ferramenta ou um iniciante, terá que ter especial cautela no que insere em todas as *InputBoxes*, verificando amiúde se não está a incorrer em nenhuma das três primeiras ações problemáticas. Por outro lado, alguém habituado a utilizar a ferramenta, poderá cair na tentação de tentar acelerar um processo repetitivo e cometer qualquer uma das infrações acima enumeradas.

3.4.5 Auxiliar Horas

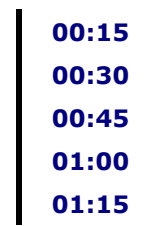
Esta particularidade do funcionamento da ferramenta, embora não provoque grande embaraço, tem uma relação entre inconveniência e pertinência que justifica a sua inclusão neste subcapítulo.

Aquando do tratamento de dados, já após o processo iterativo, para realização dos gráficos de produção vs consumo, é pedido ao utilizador que faça o carregamento de um ficheiro Excel intitulado “Auxiliar Horas” (figura 3.14a). Este apenas contém uma coluna com horas do dia, de 15 em 15 minutos, para um período ligeiramente superior a dois anos. A figura 3.14b mostra uma pequena porção da coluna que será copiada para o ficheiro onde decorre a simulação.

Este processo de obtenção de uma coluna, com as características suprarreferidas, é bastante ineficiente e pode provocar erros, já que um novo ficheiro tem que ser aberto a meio da simulação e o utilizador ainda tem que indicar o local para o qual se quer copiar a coluna. Além disso, esta



(a) Aviso de carregamento do Auxiliar Horas



(b) Pequena porção do ficheiro Auxiliar Horas

Figura 3.14: Processo de carregamento do Auxiliar Horas

solução exige que o ficheiro da simulação tenha a si indexado um ficheiro secundário com uma função mínima.

3.4.6 Início e Fim do Processo Iterativo

No ponto 3.2.4 foi dito que "se a área indicada permitir a instalação de i painéis, o processo terá i iterações", fazendo com que imenso tempo seja gasto explorando alternativas que, logo à partida, se sabe não serem solução para o problema.

Não será necessário, por exemplo, num caso de uma empresa com consumos muito elevados, que a simulação explore uma alternativa com apenas um painel, para se descobrir que esta não é a ótima.

Por outro lado, uma empresa com uma área enorme disponível para instalação de painéis, mas com consumos modestos, certamente não utilizará toda a área. Assim, simular todas essas hipóteses, depois de encontrado o ótimo, torna-se uma perda de tempo.

Um dos testes feitos com esta ferramenta, para uma empresa com estas características, demonstra isto mesmo. O espaço disponível admitia a instalação de 22924 painéis mas, após simuladas as restantes condições, verificou-se que o número ótimo de painéis seriam 6387, ou seja, foram efetuadas 16537 iterações após encontrado esse valor ideal.

A equação 3.8 traduz esses 16537 painéis em aproximadamente 4828 segundos (sem considerar o termo independente), ou seja, mais de 80 minutos volvidos, a partir do momento em que o ótimo é encontrado.

3.5 Resumo ou Conclusões

A ferramenta existente cumpre o seu principal propósito: processa diagramas de carga, irradiancias e dados relativos ao local instalação; estima a produção anual e contrasta-a com os consumos; gera relatórios técnicos e financeiros indicadores da potencialidade do projeto, já formatados para a realização de propostas aos clientes.

Contudo, a utilização da ferramenta é morosa, pouco flexível e propensa a erros humanos, sendo estas características acentuadas, quando mais que uma orientação é analisada. Nestes casos,

os próprios métodos de cálculo também beneficiariam de ajustes, uma vez que a obtenção do número ótimo de painéis não é garantido, para quaisquer condições que se insiram.

Capítulo 4

Otimização da Ferramenta

Neste capítulo podem ser encontradas as principais alterações feitas à ferramenta original, motivadas pelos seguintes objetivos:

- melhoria de processos
- inclusão de novas funções
- correção de erros/incorreções

A nova versão da ferramenta foi desenvolvida e testada utilizando dados reais de empresas cedidos pela **Ecoinside**[®], estando presentes neste capítulo apenas alguns exemplos que, pelas suas características, são os mais indicados para demonstrar as alterações efetuadas.

4.1 Mudanças Estéticas

No ponto 3.2.5, foi referida a importância que a componente estética pode ter na valorização de uma proposta. Este ponto expõe as alterações que foram efetuadas nesta componente, sejam estas orientadas para a simplificação e clarificação dos conteúdos ou, meramente, para o embelezamento do documento a apresentar ao cliente.

Uma das alterações que se enquadra em ambos os critérios é o ajuste das casas decimais. Quando se está a analisar valores na ordem dos milhares, senão milhões, de euros, os cêntimos são irrelevantes e podem ser vistos como ruído. De igual modo, quando se consideram milhares de kW e kWh, alguns *Watt* apenas dificultam a leitura da informação.

Na figura 4.1, são perceptíveis os diferentes números de casa decimais usados em ambas as ferramentas.

Na figura 4.2, tal como também acontecia na 4.1, as cores abandonam os esquemas predefinidos do Excel e passam a adotar as principais cores da **Ecoinside**[®]. Aliás, este jogo de cores está presente em tudo o que é gerado pela ferramenta cujo objetivo vise a apresentação ao cliente.

Finalmente, os gráficos de Produção vs Consumo também sofreram alterações. Na ferramenta original, constavam as produções segundo cada orientação, a produção total e o consumo. Esta

Produção Injetada na Instalação	Produção Injetada na Rede	Tarifa Evitada	Nova Tarifa	Diferença de Tarifa	Acumulado Cliente	Seguro	O&M	Benefício da Venda à Rede	Benefício do Consumo Interno	Cash Flow	Cash Flow Acumulado
1.171.911,1250	181.192,8300	0,1416 €	0,1275 €	0,0142 €	16.996,69 €	1.658,57 €	11.617,00 €	0,00 €	149.361,38 €	136.085 €	-715.765,22 €

(a) Aspetto da tabela usando a ferramenta original

Produção Injetada na Instalação	Produção Injetada na Rede	Tarifa Evitada	Nova Tarifa	Diferença de Tarifa	Acumulado Cliente	Seguro	O&M	Benefício da Venda à Rede	Benefício do Consumo Interno	Cash Flow	Cash Flow Acumulado
1.171.911	181.193	0,1416 €	0,1275 €	0,0142 €	16.996 €	1.660 €	11.617 €	0 €	149.361 €	136.085 €	-715.765 €

(b) Aspetto da tabela usando a ferramenta modificada

Figura 4.1: Comparação de tabelas

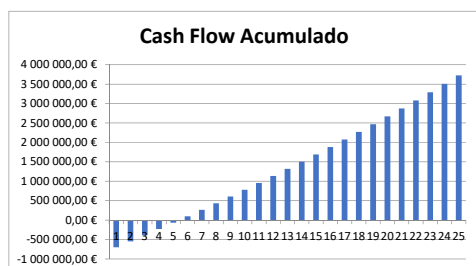
grande quantidade de informação condensada, dificulta a sua leitura e oferece ao cliente dados que, geralmente, não lhe despertam interesse. Assim, essa informação foi dividida em dois gráficos distintos.

No gráfico 4.3a, as séries de produção de cada orientação são praticamente indetetáveis, pelo que apenas dificultam a interpretação da produção total.

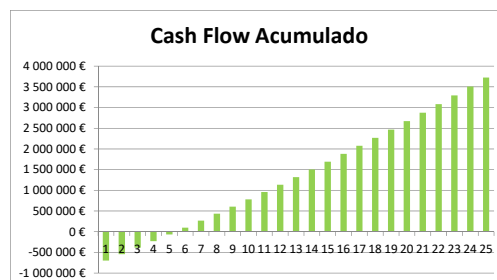
O gráfico 4.3b permite depreender, por exemplo, a energia que se vai injetar e os consumos que vão ser correspondidos pela produção, ou seja, dados úteis para apresentar ao cliente. Assim, este também está estilizado com as cores da **Ecoinside**®.

Por sua vez, o gráfico 4.3c estuda o comportamento individualizado de cada uma das orientações, bem como eventuais complementaridades que possam existir entre elas, constituindo uma ferramenta ao dispor do projetista para alcançar soluções mais adaptadas ao perfil de consumos do cliente.

Tome-se, como exemplo, uma instalação com um diagrama de carga aproximadamente constante ao longo de todo o dia e duas orientações possíveis - este e oeste. Sendo um dos principais objetivos a maximização da energia autoconsumida, poderá acontecer que a exploração da orientação que mais produza ao longo de um ano não seja a mais rentável. Em Portugal, especialmente no inverno, uma instalação orientada para este produzirá mais de manhã, já uma orientada para oeste produzirá mais ao final da tarde. O gráfico 4.3c facilita a exploração desta complementaridade,

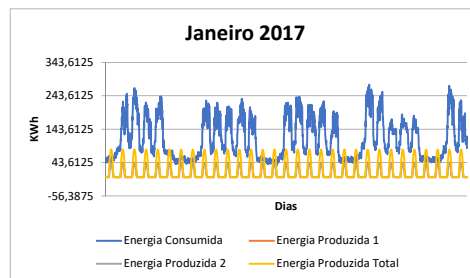


(a) Aspetto do gráfico usando a ferramenta original

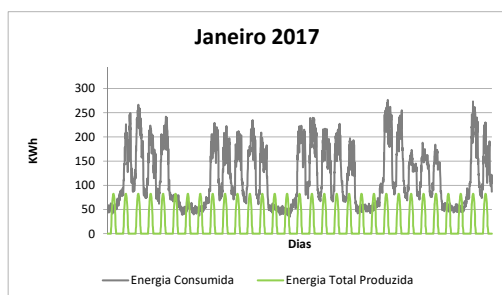


(b) Aspetto do gráfico usando a ferramenta modificada

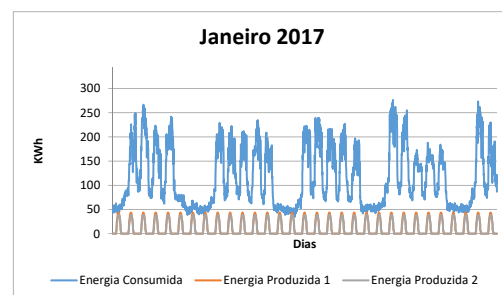
Figura 4.2: Processo de carregamento do Auxiliar Horas



(a) Aspetto do gráfico usando a ferramenta original



(b) Gráfico com a produção total



(c) Gráfico com as produções por orientação

Figura 4.3: Comparação dos gráficos de Produção vs Consumo

rentabilizando o número de painéis a instalar.

Por último, o eixo vertical relativo à energia (kWh) foi corrigido, começando agora sempre em 0. A inexistência de valores negativos, tanto na produção, como nos consumos, justifica esta opção.

4.2 Mudanças na Introdução de Dados - Interfaces Gráficas

Em diversas secções deste documento foram enunciadas desvantagens da utilização de *Input-Boxes*. Seja por prevenção de erros ou por ganhos de tempo, uma quantidade significativa destas foram substituídas por interfaces gráficas, que podem ser divididas em dois tipos: introdução de dados e carregamento de ficheiros.

O primeiro tipo, introdução de dados, substitui o método de introdução dos valores de todas as variáveis referidas nos pontos 3.2.1 e 3.2.4, exceção feita às áreas disponíveis para cada orientação.

A substituição dos valores iniciais é feita recorrendo à interface gráfica visível na figura 4.4, a das restantes variáveis é feita recorrendo ao da figura 4.5.

O uso destas soluções, em detrimento da metodologia baseada em *InputBoxes*, acarreta o seguinte conjunto de vantagens:

- Organização das variáveis

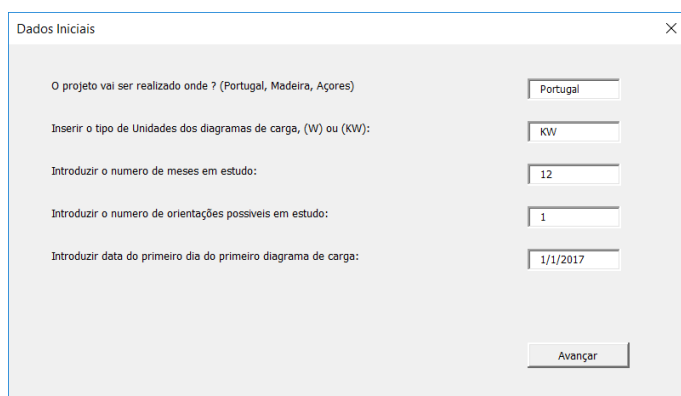


Figura 4.4: Interface gráfica de introdução de dados iniciais

- Sugestão de respostas mais comuns
- Detecção e prevenção de erros
- Possibilidade de inclusão intuitiva de novas funções

A sugestão de valores mais comuns é uma mais-valia, uma vez que o projetista apenas tem que modificar os campos que difiram dos casos mais comuns, poupando tempo e prevenindo todos os erros enunciados em 3.4.4.

Caso o utilizador pretenda responder algo que não seja uma das sugestões, é livre de o fazer, com a confiança de todos os campos terem respostas previstas que, não sendo correspondidas, indicam o erro e possibilitam a reintrodução da resposta. A figura 4.6 demonstra o modo como a ferramenta trata respostas erradas, ao não aceitar a resposta “a” como uma potência válida de cada painel.

A inclusão de novas funções é visível junto ao campo “Operação e Manutenção”. O utilizador poderá optar por ter um custo de operação e manutenção baseado na potência instalada, em vez de dependente da receita gerada pelos painéis. Esta função será escrutinada no ponto 4.6.

O segundo tipo de interfaces gráficas diz respeito ao modo como os diagramas de carga e as irradiâncias são inseridas na ferramenta.

O método original de carregamento dos diagramas de carga exigia que se escrevesse o nome do mês a carregar e que se seleccionasse o respetivo ficheiro excel, processo que se repetiria para todos os meses a considerar. De seguida, as irradiâncias de cada orientação eram pedidas, isoladamente, mês após mês, através da seleção de ficheiros de texto, ou seja, numa instalação com quatro orientações e doze meses, seria preciso, em momentos distintos, seleccionar 48 ficheiros.

Se, ao número de irradiâncias distintas, forem adicionados os diagramas de carga, o processo da figura 4.7 terá que ser repetido 60 vezes. Como consequência, o tempo de carregamento e a probabilidade de se seleccionarem ficheiros errados são elevados.

Nesta nova versão, o carregamento, quer dos diagramas de carga, quer das irradiâncias é feito graças a interfaces gráficas semelhantes à da figura 4.8.

Dados Instalação

Potência de cada painel (kW): 7

Eficiência de cada painel (%): 8

Área de cada painel: 9

Perdas dos painéis ao longo dos anos (%): 10

Garantia do fabricante dos painéis (anos): 11

Perdas a considerar no sistema (%): 12

Margem do cliente (%): 13

Seguro (%): 14

Inflação (%): 15

Custo de Capital: 16

WACC Cliente: 17

Taxa Mínima de TIR (%): 18

Limite da Energia Injetada (%): 19

Operação e Manutenção : 20

Tarifas

Ponta: 1

Cheia: 2

Vazio: 3

Super Vazio: 4

Potência Hora de Ponta: 5

MIBEL: 6

ecoinside
SUSTAINABILITY PARTNERS

Avançar

● €/kWh ● %

Figura 4.5: Interface gráfica de introdução das restantes variáveis

A principal vantagem desta solução reside na capacidade de se seleccionar todos os diagramas de carga de uma só vez, bem como as irradiâncias de cada orientação, reduzindo o número de ficheiros tantas vezes quantos os meses em análise. Simultaneamente, a escolha de ficheiros é menos suscetível a erros, já que estes são automaticamente organizados pelos meses escolhidos. Esta correspondência baseia-se no nome dos ficheiros, pelo que se previu a questão de esta ser errática, oferecendo ao utilizador a possibilidade de voltar a escolher os ficheiros de cada mês na própria ferramenta, de entre os seleccionados à partida. Na figura 4.8, está demonstrado como escolher um novo ficheiro para o mês de abril.

Salienta-se ainda que a interface está preparada para receber qualquer número de meses igual ou inferior a 12, bem como para não ser janeiro o primeiro mês analisado. Por exemplo, num cenário em que apenas se tenham acesso aos diagramas de carga dos meses de outubro a fevereiro, após inserir na interface da figura 4.4: “5”, como número de meses em estudo e “1/10/2017”, como data do primeiro diagrama de cargas, a interface gráfica de carregamento dos diagramas apenas terá 5 linhas com esses meses ordenados por ordem cronológica.

Comparativamente à equação 3.10, com a introdução das interfaces gráficas, o número de *InputBoxes* necessário passa a ser dado pela equação 4.1.

$$n^{\circ} \text{ de } InputBoxes = 2 \cdot n^{\circ} \text{ de } orientacoes \quad (4.1)$$

Em suma, preteriu-se toda a inserção de dados na ferramenta via *InputBoxes*, privilegiando-se o uso das interfaces gráficas. Deste modo, o tempo despendido nestas etapas é inferior e a sua execução menos propensa a erros.

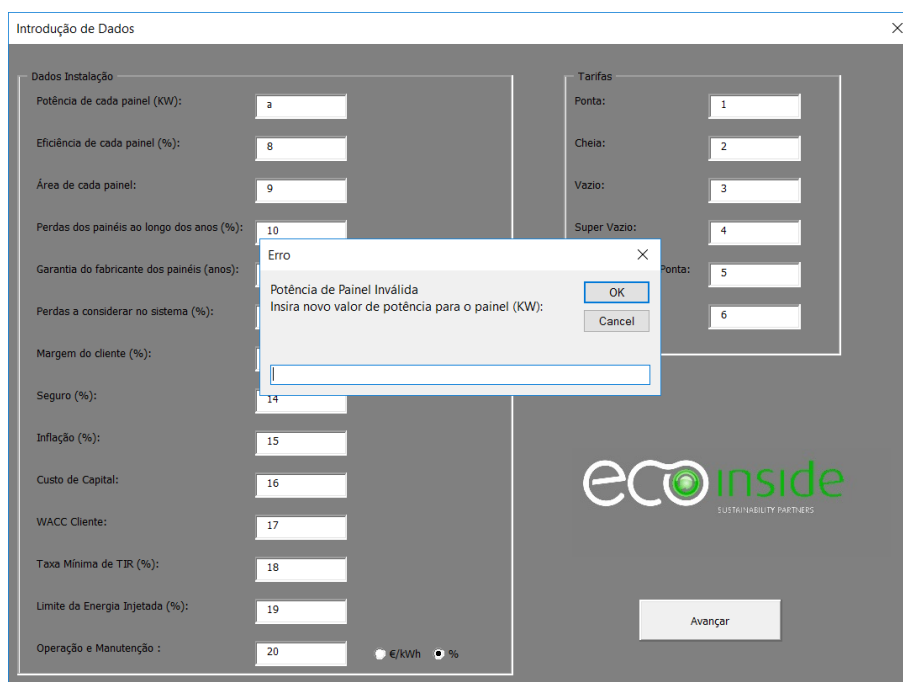


Figura 4.6: Exemplo de introdução de erro

4.3 Correção da Energia Injetada

O ponto 3.4.2 mostrou os defeitos da ferramenta original no cálculo da energia injetada, ao longo do processo iterativo. No presente ponto, são explanadas as correções efetuadas e as consequências na obtenção do número ótimo de painéis

Uma reestruturação do método de análise de cenários com múltiplas orientações foi cogitado, contudo os problemas que o método original origina não se julgaram suficientemente graves ou irresolúveis, ao ponto de justificar uma solução tão radical.

Em primeiro lugar, a equação 3.9 foi corrigida de modo a corresponder, em todas as iterações, e em todas as orientações, à percentagem de energia produzida que é injetada, ou seja, a

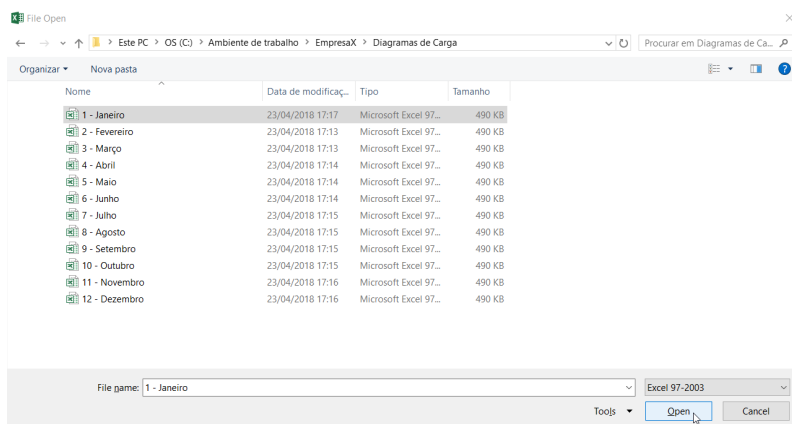


Figura 4.7: Exemplo de seleção de ficheiro

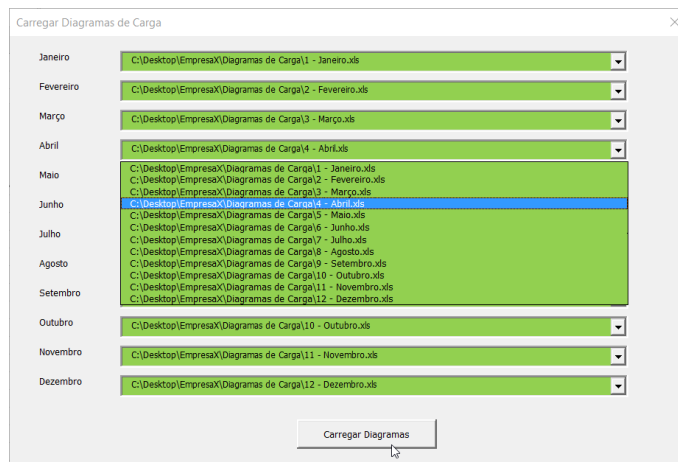
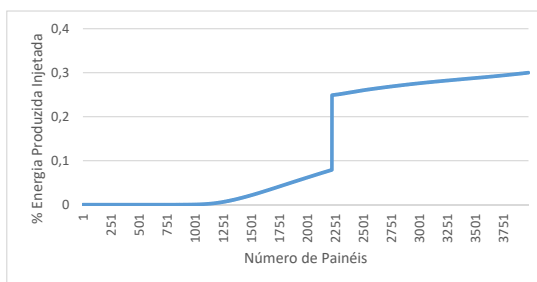


Figura 4.8: Interface gráfica de seleção de diagramas de carga

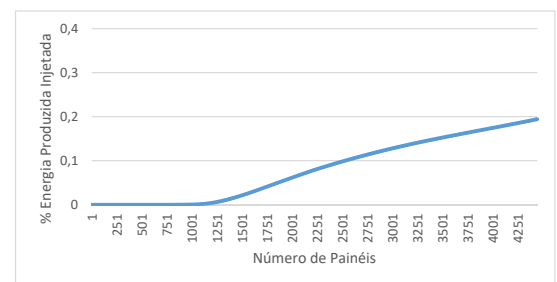
equação 4.2 diz respeito a todos os painéis considerados até à iteração em que esta seja calculada, independentemente da orientação.

$$E_{injetada,total}(\%) = \frac{\sum_{k=1,2,\dots}^{j-1} E_{injetada} + E_{injetada,j}}{\sum_{k=1,2,\dots}^{j-1} E_{produzida} + E_{produzida,j}} \quad (4.2)$$

Assim, uma nova simulação foi efetuada para o mesmo caso de 3.4.2. O comportamento da nova curva de percentagem de energia injetada pode ser observado na figura 4.9b.



(a) Repetição da figura obtida com a versão anterior da ferramenta



(b) Evolução da percentagem de energia injetada com a nova versão da ferramenta

Figura 4.9: Comparação das curvas de percentagem de energia injetada

Quando comparada com a figura análoga (4.9a), são imediatamente perceptíveis algumas diferenças.

Em primeiro lugar, a nova curva não tem nenhum “incremento súbito” na transição entre orientações, indicando que, efetivamente, esta poderá representar a percentagem de energia injetada por toda a instalação.

Em segundo lugar, um maior número de painéis foi considerado ótimo, uma vez que o limite de 30% não foi atingido. Aliás, a restrição que limita o número de painéis passa a ser a área disponível. A área permitia a instalação de 4444 painéis e esse número foi considerado o ótimo.

Quando comparados os números finais, verifica-se que a solução encontrada com esta correção contém mais 468 painéis do que a solução encontrada pela ferramenta original. A percentagem de energia injetada por toda a instalação ficou-se pelos 19,43%, confirmando que este não deve ser um dos fatores limitantes deste caso.

Generalizando, esta correção apenas afetará os resultados em projetos com mais do que uma orientação, uma vez que o erro estava no cálculo da percentagem de energia injetada nas orientações posteriores à primeira a ser considerada. Contudo, este tipo de projetos são comuns e as consequências podem ser severas, como a não instalação de um elevado número de painéis.

4.4 Início e Fim do Processo Iterativo

No ponto 3.4.6, explicou-se a pertinência de se considerar um início e um final para o processo iterativo. Neste ponto, exploram-se de que modo estas balizas podem ser estabelecidas.

4.4.1 Fim do Processo Iterativo

A determinação do número ótimo de painéis está sempre associada aos constrangimentos de cada projeto. Desde que estes sejam cumpridos, a hipótese com mais um painel é aceite como mais proveitosa.

Por outro lado, atendendo ao tipo de variáveis usadas para representar esses constrangimentos, é de esperar que, uma vez ultrapassado o seu limite, um número superior de painéis não fará com que a variável volte a assumir valores válidos.

Um exemplo deste tipo de variáveis é a percentagem de energia injetada, sendo estritamente crescente, com o aumento do número de painéis (como se viu nas figuras 4.2 e 3.10), atingindo o limite máximo que se estabeleça, é desnecessário testar alternativas com mais painéis.

Contudo, a adição de um painel pode provocar alterações mínimas em algumas das variáveis, fazendo com que aproximações da metodologia, número de *bits* de determinadas variáveis e funções iterativas, tenham o condão de afetar a injetividade das variáveis.

O momento em que este fenómeno é mais notório, verifica-se no cálculo da produção de i painéis. A produção de um painel é estimada para cada intervalo de 15 minutos, multiplicando cada um destes valores por i , de modo a obter a produção desse número de painéis em cada registo, o resultado tem uma precisão de aproximadamente sete casas decimais. Embora aceitável, essa imprecisão está presente em cada um dos registos considerados na ferramenta como tal, tendo um ano mais de 17000 registos, o impacto global desta operação é suficiente para não ser garantido que todas as variáveis usadas nas restrições sejam sempre crescentes ou decrescentes.

Assim, de modo a garantir que o processo iterativo não pare por incorreções no cálculo de variáveis, define-se que apenas quando dez iterações consecutivas forem inválidas, se considera que mais nenhuma hipótese voltará a ser válida.

Com a aplicação deste critério, no exemplo apresentado no ponto 3.4.6, a ferramenta apenas faria 6397 iterações (6387 painéis, contemplando mais 10 iterações que não cumprem as restrições), poupando-se assim mais de uma hora.

4.4.2 Início do Processo Iterativo

A solução encontrada, para prevenir que hipóteses com números irrisórios de painéis fossem analisadas, passa por perguntar ao utilizador (figura 4.10), a partir de que número de painéis pretende começar a procurar o ótimo.

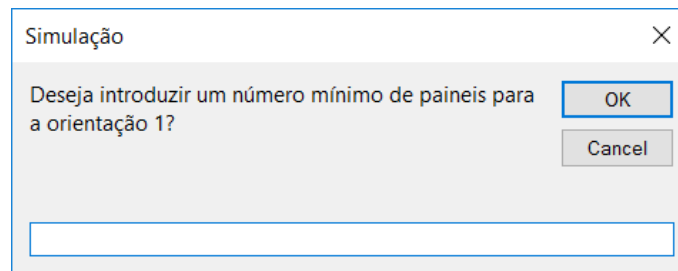


Figura 4.10: Pergunta do número mínimo de painéis para a primeira orientação

Este valor é pedido no início da análise de cada orientação, imediatamente após a indicação da sua área máxima. Estas duas perguntas são feitas recorrendo a *InputBoxes*, pois surgem tantas vezes, quantas orientações se analise e, em termos de eficiência, apenas duas questões não justificam o carregamento e descarregamento de uma interface gráfica dedicada. Isto explica também o porquê do número de *InputBoxes*, nesta nova versão da ferramenta expresso pela equação 4.1, ser calculado dessa forma.

Na eventualidade de o utilizador não ter nenhum palpite em relação ao número ótimo de painéis a instalar, ao introduzir um número mínimo de “1” painel, a ferramenta, como seria de esperar, explora todas as hipóteses possíveis.

Convém salientar que este número mínimo é aceite, desde que cumpra dois requisitos: se for maior ou igual a 1 e menor que o número de painéis máximo que se possam instalar na área, ou seja, é possível introduzir valores compreendidos neste intervalo que não encontrem nenhuma hipótese, mas que cumpram as restrições do projeto.

Assim, esta função pode fazer com que se poupe bastante tempo, mas a sua utilização deverá ser conservadora, garantindo assim que o ótimo é encontrado.

4.5 Nova Simulação / Número de Painéis

Após executada a simulação na ferramenta original, a opção “**Nova Simulação / Número de Painéis**” permitia estabelecer um número máximo de painéis e simular com esse novo teto. Não sendo isto um defeito, a sua utilidade é discutível, uma vez que a área de cada painel é conhecida,

logo é sempre possível fazer uma simulação para um número máximo de painéis, através de uma simples multiplicação.

Este botão adquiriu um novo propósito. Na nova versão da simulação passa a ser possível ignorar todas as restrições e fixar um número de painéis para as diversas orientações.

Em bastantes casos, a área disponível para instalação de painéis pode conter obstáculos ou ter uma forma irregular, não sendo possível fazer uma correspondência entre o espaço e um número de painéis. Noutros casos, os clientes podem simplesmente querer ver instalada uma potência exata nas suas instalações. Nestes dois tipos, apesar de à partida se saber o número exato de painéis que a instalação vai conter, continua a ser necessário ter conhecimento do que se vai produzir, que consumos serão colmatados, bem como muitos outros resultados que a simulação oferece.

Ora, não havendo uma busca do ótimo, os resultados podem ser imediatamente obtidos dispensando qualquer processo iterativo e, conseqüentemente, todo o tempo que este levaria.

4.6 Operação e Manutenção

Os custos de operação e manutenção de um projeto podem ter uma influência considerável no cálculo dos *cash-flows* de um projeto.

Na equação 3.5, mostrou-se que a ferramenta original considera que estes podem ser vistos como uma percentagem da receita gerada pelos painéis. Contudo, concluiu-se que esta abordagem não era aplicável a todo o tipo de projetos, levando à exploração de novas alternativas de cálculo para este encargo financeiro.

As principais alternativas para quantificar o custo de operação e manutenção eram então:

- considerar um custo inicial fixo, completamente ao critério do utilizador
- basear o custo na potência instalada

A primeira hipótese, porventura, seria aquela capaz de caracterizar com mais rigor os custos reais de operação e manutenção de uma instalação de painéis fotovoltaicos, pois este tipo de serviços é em muitos casos subcontratado, sabendo-se o seu custo. Porém, a sua aplicação neste processo iterativo encontra um conjunto de entraves difíceis de ultrapassar.

Indicar o valor exato a pagar, pressupõe um conhecimento razoável das dimensões que a central terá, ou seja, quando se usa esse valor para iterações com um número reduzido de painéis, certos cálculos financeiros não podem ser executados. Analise-se o caso da TIR que apenas pode ser calculada quando houver um retorno do investimento, o que não existe num caso em que todos os *cash-flows* sejam negativos (custos superem as receitas). Assumir custos de uma central com um grande número de painéis e contrastá-los com receitas de um número reduzido de painéis, impossibilita o seu cálculo.

Ora, o cálculo da TIR é fundamental no processo iterativo por isso, ou não se consideravam os custos na determinação do número ótimo de painéis, reconstruindo os *cash-flows* no final da simulação, ou encontrava-se uma solução que adaptasse os custos fixos ao número de painéis de cada iteração.

A segunda hipótese, não se focando diretamente no número de painéis, admite que os custos de operação e manutenção possam ser vistos como função da potência instalada, permitindo assim que todos os cálculos financeiros sejam possíveis independentemente da iteração em análise. Os resultados desta hipótese refletem o pretendido, passando assim a constar na ferramenta as opções de basear os custos numa percentagem (%) das receitas ou num custo por unidade de potência de pico (€/kWp), como se viu na figura 4.5.

Na figura 4.11, encontram-se expostos os resultados de uma simulação em que foi inserido um custo fixo anual de 10€/kWp. A potência instalada de 1199 kWp explica o valor do primeiro ano da coluna “O&M” e, 2,5% de inflação, os restantes valores dessa coluna.

Ano	Produção Injetada na Instalação	Produção Injetada na Rede	Tarifa Evitada	Seguro	O&M	Benefício da Venda à Rede	Benefício do Consumo Interno	Cash Flow	Cash Flow Acumulado
1	1 536 334	370 501	0,1413 €	2 170 €	11 999 €	0 €	217 022 €	202 853 €	-997 027 €
2	1 520 971	366 796	0,1448 €	2 202 €	12 299 €	0 €	220 223 €	205 722 €	-791 305 €
3	1 505 761	363 128	0,1483 €	2 235 €	12 606 €	0 €	223 471 €	208 630 €	-582 675 €
4	1 490 704	359 497	0,1519 €	2 268 €	12 921 €	0 €	226 768 €	211 578 €	-371 096 €
5	1 475 797	355 902	0,1554 €	2 301 €	13 244 €	0 €	230 112 €	214 567 €	-156 529 €
6	1 461 039	352 343	0,1589 €	2 335 €	13 576 €	0 €	233 507 €	217 596 €	61 066 €
7	1 446 428	348 819	0,1624 €	2 370 €	13 915 €	0 €	236 951 €	220 666 €	281 733 €
8	1 431 964	345 331	0,1660 €	2 404 €	14 263 €	0 €	240 446 €	223 778 €	505 511 €
9	1 417 644	341 878	0,1695 €	2 440 €	14 619 €	0 €	243 992 €	226 933 €	732 444 €
10	1 403 468	338 459	0,1730 €	2 476 €	14 985 €	0 €	247 591 €	230 130 €	962 575 €
11	1 389 433	335 075	0,1766 €	2 512 €	15 359 €	0 €	251 243 €	233 371 €	1 195 946 €
12	1 375 539	331 724	0,1801 €	2 549 €	15 743 €	0 €	254 949 €	236 656 €	1 432 602 €
13	1 361 783	328 407	0,1836 €	2 587 €	16 137 €	0 €	258 709 €	239 985 €	1 672 587 €
14	1 348 166	325 123	0,1872 €	2 625 €	16 540 €	0 €	262 525 €	243 360 €	1 915 947 €
15	1 334 684	321 871	0,1907 €	2 664 €	16 954 €	0 €	266 398 €	246 780 €	2 162 727 €
16	1 321 337	318 653	0,1942 €	2 703 €	17 378 €	0 €	270 327 €	250 246 €	2 412 973 €
17	1 308 124	315 466	0,1978 €	2 743 €	17 812 €	0 €	274 314 €	253 759 €	2 666 732 €
18	1 295 042	312 311	0,2013 €	2 784 €	18 258 €	0 €	278 360 €	257 319 €	2 924 051 €
19	1 282 092	309 188	0,2048 €	2 825 €	18 714 €	0 €	282 466 €	260 928 €	3 184 979 €
20	1 269 271	306 096	0,2084 €	2 866 €	19 182 €	0 €	286 633 €	264 585 €	3 449 564 €
21	1 256 578	303 035	0,2119 €	2 909 €	19 661 €	0 €	290 861 €	268 291 €	3 717 854 €
22	1 244 013	300 005	0,2154 €	2 952 €	20 153 €	0 €	295 151 €	272 046 €	3 989 900 €
23	1 231 572	297 005	0,2190 €	2 995 €	20 657 €	0 €	299 504 €	275 852 €	4 265 753 €
24	1 219 257	294 035	0,2225 €	3 039 €	21 173 €	0 €	303 922 €	279 710 €	4 545 463 €
25	1 207 064	291 095	0,2260 €	3 084 €	21 703 €	0 €	308 405 €	283 618 €	4 829 081 €

Figura 4.11: Resultados da aplicação de um custo fixo (€/kWp)

4.7 Otimização do processo iterativo

A ferramenta existente, salvo alguns erros já explicados neste documento, produz resultados satisfatórios. Uma prova disso mesmo são os diversos projetos já realizados pela **Ecoinside**[®] que tiveram o número ótimo de painéis obtido pela ferramenta como referência. Neste sentido, mais importante que obter melhoramentos na qualidade dos resultados obtidos, era diminuir o tempo de execução da ferramenta.

Após um primeiro estudo do código, tornou-se evidente que a otimização poderia focar-se em dois aspetos distintos: alterações estruturais do algoritmo e alteração do modo como este é aplicado. Em termos mais genéricos, havia indícios de que, por um lado, se poderia modificar os passos que eram feitos e, por outro lado, melhorar o modo como estes eram feitos.

4.7.1 Alterações Estruturais do Algoritmo

A determinação do número ótimo de painéis pode ser resumido em dois ciclos: o ciclo de análise de orientações, hierarquicamente superior, faz uma análise completa do comportamento dos painéis com umas determinadas irradiancias; o outro, circunscrito ao anterior, itera os painéis.

Já tendo sido explorada a redução do número de vezes que cada ciclo é executado no ponto 4.4, resta a hipótese de diminuir os seus tempos de execução. Sendo o número de iterações de diferentes números de painéis bastante superior ao número de orientações, uma melhoria na sua performance terá um impacto mais significativo no tempo total, pelo que será vista como prioritária.

Na ferramenta original, o número de execuções de cada ciclo foi descurado, fazendo com que, o executado mais vezes, não faça exclusivamente o necessário nessa etapa. As tarefas mais exemplificativas disso mesmo são o cálculo da estimação de produção de um painel e do *cash-flow* acumulado.

A estimativa de produção de i painéis de cada orientação, é feito apenas multiplicando o estimado para um painel dessa orientação pelo número de painéis (equação 4.3).

$$E_{produzida,i\text{painéis}} = i \cdot E_{produzida,painel} \quad (4.3)$$

Assim, a inclusão da estimação da produção de um painel no ciclo dos painéis, faz com que este seja desnecessariamente feito mais do que uma vez.

O cálculo do *cash-flow* acumulado depende de várias variáveis que são atualizadas em todas as iterações. Contudo, não é um dos fatores usados para determinar o mérito de uma proposta, ou seja, pode simplesmente ser calculado uma vez após determinado o número ótimo de painéis.

A transição deste tipo de etapas do processo iterativo dos painéis de uma orientação para o início, ou para o fim, do ciclo de análise de cada orientação previne que estas sejam calculadas tantas vezes quanto os diferentes números de painéis testados, passando apenas a ser calculadas apenas uma vez para cada orientação. A figura 4.12 ilustra as alterações referidas neste ponto.

4.7.2 Alterações na Aplicação do Algoritmo

Em termo computacionais, há diferentes maneiras de executar a mesma tarefa. Em ferramentas programadas com VBA no Excel, a tentação de incorrer em más práticas é grande, isto é, a resolução mais intuitiva de problemas pode fazer com que o programa seja bastante ineficiente.

De maneira a clarificar esta questão, o ponto 4.7.2.1 contém um problema exemplo resolvido nesta linguagem de programação.

O algoritmo dissecado no ponto 4.7.1 ignora o tempo que a comunicação entre o código em VBA e a Folha de Excel demora, ou seja, não prioriza o uso de variáveis internas, acedendo indiscriminadamente aos valores apresentados na Folha. Embora esta prática aumente a simplicidade do código e a sua facilidade de construção, o tempo de execução é significativamente superior.

Assim, uma das mudanças que se fez na aplicação do algoritmo, foi a criação de uma estrutura de variáveis que consiga evitar desnecessários acessos à folha durante o processo iterativo. Para tal, deverá ser capaz de armazenar os dados das Folhas de Excel, mas também valores resultantes dos cálculos efetuados durante o processo iterativo que, mais tarde, sejam importantes para a realização dos cálculos financeiro e formação dos gráficos. Não indexados a esta estrutura, foram ainda criados outros vetores com o mesmo propósito.

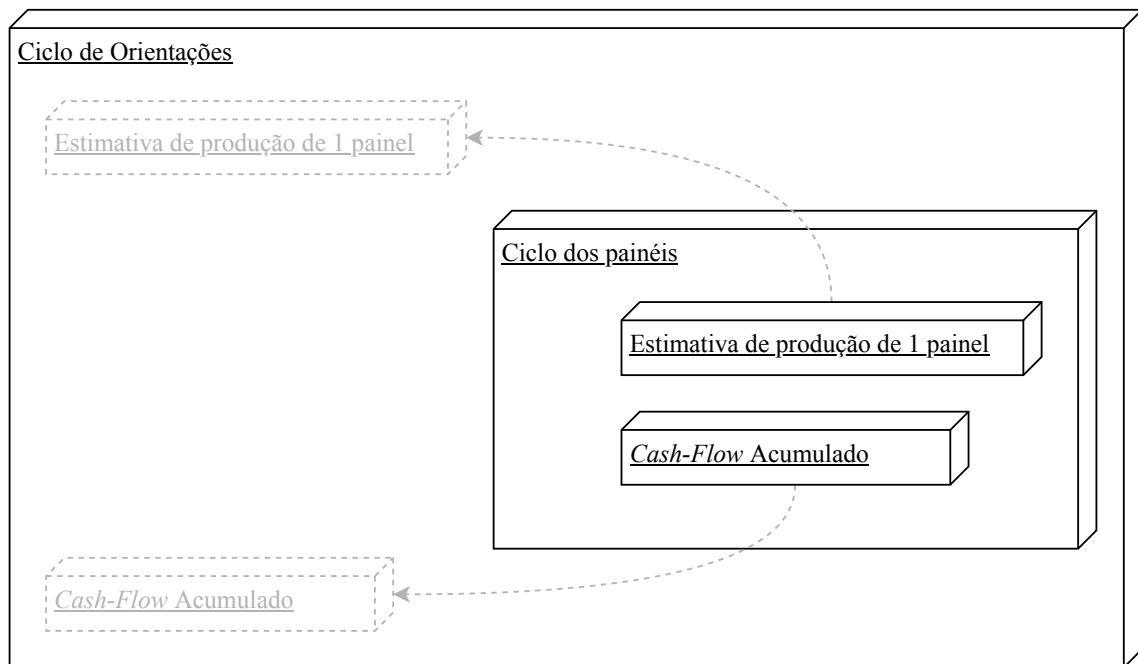


Figura 4.12: Esquema ilustrativo das alterações estruturais

O melhor modo de avaliar as aplicações desta mudança é através da diminuição do tempo de execução da ferramenta, podendo isto ser feito no ponto 4.9.

4.7.2.1 Problema Exemplo Resolvido em VBA

- Numa folha de Excel, as coluna A e B têm nove números cada
- Pretende-se somar os valores de cada linha e colocar o resultado de cada soma na coluna C
- Este processo será repetido 100000 vezes
- De cada vez que se faça a soma, o resultado da soma é multiplicado pelo número da iteração em que se esteja

Na figura 4.13, é possível ver as colunas A e B enunciadas, bem como o resultado esperado, na coluna C, no final das iterações ($10 * 100000 = 1000000$).

A maneira mais intuitiva de abordar este problema, por se tratar de algo tão palpável e de fácil programação, porventura será:

1. somar o conteúdo da célula “A1” com o conteúdo da célula de “B1”
2. multiplicar pelo número da iteração
3. colocar o resultado na célula “C1”
4. repetir os passos 1-3 para todas as outras linhas

	A	B	C
1	1	9	1000000
2	2	8	1000000
3	3	7	1000000
4	4	6	1000000
5	5	5	1000000
6	6	4	1000000
7	7	3	1000000
8	8	2	1000000
9	9	1	1000000

Figura 4.13: Folha Excel do problema exemplo

5. repetir os passos 1-4 até às 100000 iterações

Contudo, de cada vez que se acede a uma célula de Excel, seja para recolher a informação que lá está, seja para lá escrever, é estabelecida uma comunicação entre o VBA e o Livro de Excel que demora um tempo não desprezável.

Assim, o passo 1 envolve duas leituras de células e o passo 3 escreve numa. Multiplicando pelo número de linhas, são 27 acessos a células que ocorrem em todas as 100000 iterações, ou seja, são feitas 2700000 acessos a células, que se traduzem em mais de 30 segundos de execução do problema.

Uma alternativa mais eficiente para resolver este mesmo problema foca-se precisamente na redução do número de comunicações feitas. Sendo os valores das colunas A e B imutáveis, não há necessidade de se fazer a sua leitura em todas as iterações. O mesmo raciocínio pode ser transposto para o preenchimento da coluna C, considerando que apenas o resultado final interessa.

A aplicação desta nova metodologia no VBA envolverá então os seguintes passos:

1. criação de três vetores (A, B e C), um para cada coluna
2. leitura dos valores das colunas A e B da Folha, copiando-os para os vetores respetivos
3. somar os elementos dos vetores A e B, correspondentes à linha 1
4. multiplicar pelo número da iteração
5. colocar o resultado no elemento do vetor C, correspondente à linha 1
6. repetir os passos 3-5 para todas as linhas
7. repetir os passos 3-6 até às 100000 iterações
8. escrever nas células da coluna C da Folha, os valores guardados no vetor C

Em suma, lê-se os valores no início, faz-se todos os cálculos, e, no final, escrevem-se os valores calculados. Deste modo, em vez de se estabelecerem 2700000 comunicações, estabelecem-se apenas 27, demorando todo o processo aproximadamente 0,023 segundos.

4.8 Outros Defeitos Corrigidos

4.8.1 Investimento Inicial

O investimento inicial abandona todo o tipo de intervalos potência referidos no subcapítulo 3.4.1, passando a utilizar um preço único por unidade de potência de pico (€/kWp).

A sua expressão de cálculo passa a ser a enunciada na equação 4.4.

$$\text{Investimento Inicial} = \text{preço} \cdot P_{\text{instalada}} \quad (4.4)$$

O processo de aplicação do “Desconto” fica assim facilitado, não havendo o risco de se avaliar incorretamente um projeto.

4.8.2 Orientação sem Painéis

Os resultados errados da ferramenta original quando se incluíam orientações sem painéis já não acontecem.

Na figura 4.14 é visível o relatório gerado pela nova ferramenta, para o mesmo caso do ponto 3.4.3. Desta feita, todos os valores são coerentes, correspondendo ao número ótimo de painéis indicado no relatório.

Potência de cada painel (W) 270,00	Energia anual produzida (kWh) 2 152 266	Potência Nominal (kW) 1184,868018	Nº de painéis 4876	Energia injetada no cliente (kWh) 1 672 013
Eficiência painel (%) 16,5%	Perda de Eficiência por ano (%) 1%	Tarifa Evitada (€/kWh) 0,1406 €	Potência total instalada (kWp) 1 316,52	Energia injetada na rede (kWh) 480 251
Área utilizada (m ²) 8 777	Energia anual consumida (kWh) 4 389 547	Tarifa Mibel (€/kWh) - €	VAL a 25 anos 2 515 326 €	Percentagem energia total produzida (%) 49,03%
Límite de painéis 6111	Payback (anos) 5,87	Inflação (%) 2,5%	TIR a 25 anos 17,48%	Percentagem energia consumida (%) 77,69%
Garantia máxima (anos) 25	Poupança anual (€) 216 296 €	Inversores (nº) -	WACC (%) 4,0%	Percentagem energia injetada (%) 22,31%
Investimento Inicial (€) 1 316 520 €	Duração do Contrato (anos) 0	Perdas do Sistema (%) 14,0%	Orientação (º) -40	Inclinação (º) 5
			Orientação (º) 140	Inclinação (º) 5

Figura 4.14: Relatório gerado quando na nova ferramenta é incluída uma orientação sem painéis

É ainda digno de reparo que os números não são iguais aos da figura 4.14, uma vez que a mudança de preço por unidade de potência, usado no cálculo do investimento inicial, foi modificado. Consequentemente, os cálculos financeiros geram resultados diferentes, alterando o número ótimo de painéis.

4.8.3 Auxiliar Horas

O ficheiro “Auxiliar Horas” foi incorporado no ficheiro da nova simulação como sendo uma folha oculta. Além disso, não surge qualquer tipo de aviso ou é requisitada qualquer ação ao utilizador relacionadas com esta etapa, fazendo com que apenas quem tenha acesso ao código da ferramenta conheça a sua existência.

A supressão dos passos associados a este ficheiro, juntamente com as alterações feitas aos gráficos (ponto 4.1), promove um tratamento de dados completo sem intervenção do utilizador.

4.9 Resultados e Performance

Ao longo deste capítulo de otimização da ferramenta, explicou-se de que modo foi possível corrigir, ou ultrapassar, alguns dos defeitos que a ferramenta apresentava. Sempre que se julgou pertinente, foram estabelecidas comparações dos valores obtidos em ambas as versões e feita uma análise crítica à qualidade dos resultados obtidos.

Contudo, como foi dito no ponto 3.3, o tempo de execução pode ser tão ou mais valioso que a exatidão dos resultados. Assim, neste ponto será analisada a velocidade de execução da nova versão da ferramenta, tendo como ponto de referência os testes de velocidade feitos com a ferramenta original.

Convém salientar que ambos os casos de estudo usados nos testes são idênticos e os processos iterativos de todas as orientações, feitos com a nova versão, tiveram o seu início analisando um painel.

Na figura 4.15, tal como na figura 3.8, recorreu-se a uma aproximação linear para estudar o tempo de execução da ferramenta.

$$y = 0,0139x + 95,699 \quad (4.5)$$

Desta feita, o tempo de cada iteração, representado pelo termo de 1ª ordem da equação 4.5, é 0,0139 segundos. Por sua vez, o tempo necessário para introduzir os dados e carregar os diagramas de carga e as irradiâncias, refletido no termo independente, é 95,699 segundos. Logo, numa instalação com 6666 painéis, o total de tempo despendido a fazer a simulação será de aproximadamente 3 minutos e 20 segundos.

Estas medições comprovam o referido ao longo deste capítulo. Os novos métodos de carregamento de dados são aproximadamente três vezes mais rápidos que os usados anteriormente. Também o tempo que cada iteração demora na nova versão da ferramenta é 21 vezes inferior ao seu análogo da ferramenta original.

Importa ainda dizer que os tempos apresentados nesta análise comparativa são para exatamente o mesmo número de iterações, ou seja, a introdução de um número mínimo, juntamente com a eventual aplicação do critério de paragem, provocariam uma disparidade de tempos ainda maior.

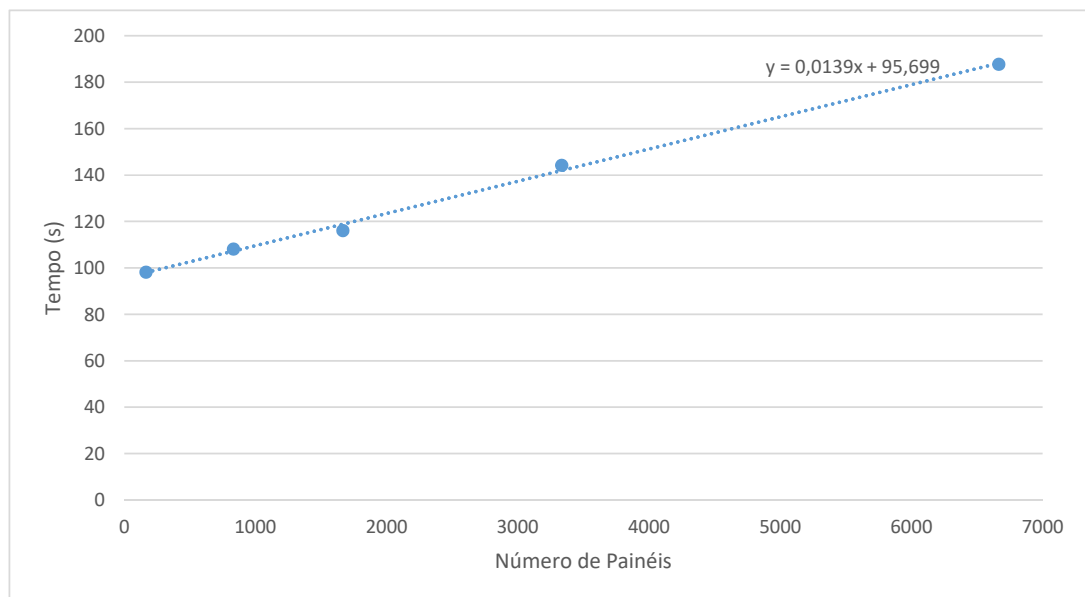


Figura 4.15: Tempos de execução da simulação com a nova versão da ferramenta

4.10 Resumo ou Conclusões

Ao longo deste capítulo, foram explanadas diversas alterações feitas à ferramenta original. Enquanto que umas conseguiram corrigir defeitos ou incorreções, outras melhoraram o funcionamento da ferramenta através da diminuição do tempo das simulações e da propensão para erros.

No geral, as modificações conferiram solidez, velocidade e versatilidade a uma ferramenta com resultados satisfatórios.

Capítulo 5

Dimensionamento de Baterias

5.1 Contextualização

O objetivo deste capítulo é mostrar de que maneira pode ser determinado o número de baterias mais rentável a instalar num sistema híbrido *off-grid* composto por gerador diesel, painéis fotovoltaicos e baterias. Neste sentido, importa distinguir o número mais rentável de baterias, do número ideal de baterias a ser instalado, principalmente pelo caráter subjetivo deste segundo.

O número ideal de baterias depende necessariamente daquilo que se pretende obter com a instalação de um sistema híbrido como o abordado anteriormente neste documento. Quando muito, o número mais rentável de baterias pode ser visto como um caso particular da procura do ótimo, em que se pretenda implementar um sistema, com o único propósito de gerar receita. Assim, o número obtido nesta simulação não valoriza fatores como o aumento da fiabilidade do sistema ou a minimização de emissões de carbono que, em determinados casos, podem ser decisivos na escolha do número de baterias a instalar.

Esta resolução encontra-se incorporada na nova versão da ferramenta explanada no capítulo 4, podendo ser vista como mais uma funcionalidade da mesma, após ser determinado o número ótimo de painéis.

O modelo utilizado assume que as baterias que dimensiona são armazenamentos perfeitos de energia, estando apenas limitada a potência máxima que estas podem receber e fornecer, aspeto que será aprofundado no ponto 5.2 e que afeta a sua aplicabilidade a casos reais.

Tratando-se este modelo de um dimensionamento para sistemas *off-grid*, os resultados provenientes de uma simulação de determinação do número ótimo de painéis são necessariamente requalificados.

Em primeiro lugar, todas as noções tarifárias até então aplicadas são ignoradas, passando a assumir-se que toda a energia tem um custo correspondente ao custo de produção do gerador diesel. Isto inclui a energia produzida e autoconsumida pelos painéis fotovoltaicos que, nos sistemas com ligação à rede analisados pela ferramenta, tinha o valor do período tarifário no qual era gerada.

Em segundo lugar, a energia até este capítulo denominada injetada, toma a designação de excedentária. Enquanto que numa instalação com ligação à rede, a energia produzida não utilizada nos consumos era, na sua totalidade, injetada na rede, nestes sistemas o seu destino é incerto pois depende da capacidade de armazenamento que as baterias tenham nesse momento.

5.2 Bateria do Modelo

O modelo não restringe o seu funcionamento a nenhum tipo específico de bateria. Aliás, adotando uma política de consideração da bateria um dispositivo de armazenamento de energia perfeito, muito dos aspetos diferenciadores das diversas tecnologias existentes não são tidos em conta, a saber:

- número de ciclos de vida
- impactos ambientais
- perda de capacidade da bateria com o tempo e com a utilização
- variações da tensão
- eficiência da bateria e do sistema de armazenamento de energia como um todo
- diferenciação da potência máxima de *input* e *output*
- efeitos de autodescarga
- volume (densidade de energia e de potência)

O impacto deste défice de informação é ligeiramente mitigado, através da inclusão das seguintes variáveis relativas à bateria que se pretenda usar:

- tensão estipulada
- potência máxima de transmissão
- garantia
- capacidade (Ah)

Além destas variáveis que se introduzem no início da simulação, também se limitou as percentagens admissíveis de carga da bateria, em todos os momentos, para um mínimo de 20% e um máximo de 80%.

5.3 Formulação do modelo

O primeiro passo deste modelo consiste na tradução da energia consumida em custos, no cenário hipotético de apenas existir no sistema um gerador diesel. Este “custo base” da produção de energia pode ser calculado pela equação 5.1, sendo a variável “preço gerador” um valor definido pelo utilizador, em €/kWh, para representar o custo de funcionamento da máquina.

$$\text{Custo Base} = E_{\text{consumida total}} \cdot \text{preco}_{\text{gerador}} \quad (5.1)$$

De seguida, como já foi simulado o número ótimo de painéis, é sabida a energia produzida pela central fotovoltaica que pode ser canalizada diretamente para a instalação. Assim, a equação 5.2 resulta no ponto de partida para o método iterativo de determinação do número de baterias mais rentável.

$$\text{Custo Base com PV} = (E_{\text{consumida total}} - E_{\text{PV autoconsumida total}}) \cdot \text{preco}_{\text{gerador}} \quad (5.2)$$

No início do processo iterativo, uma lógica semelhante à utilizada na figura 3.6 é aplicada mas, neste caso, como se pode ver no diagrama da figura 5.1, a diferença entre a energia produzida e a consumida, apenas indica concretamente a energia autoconsumida.

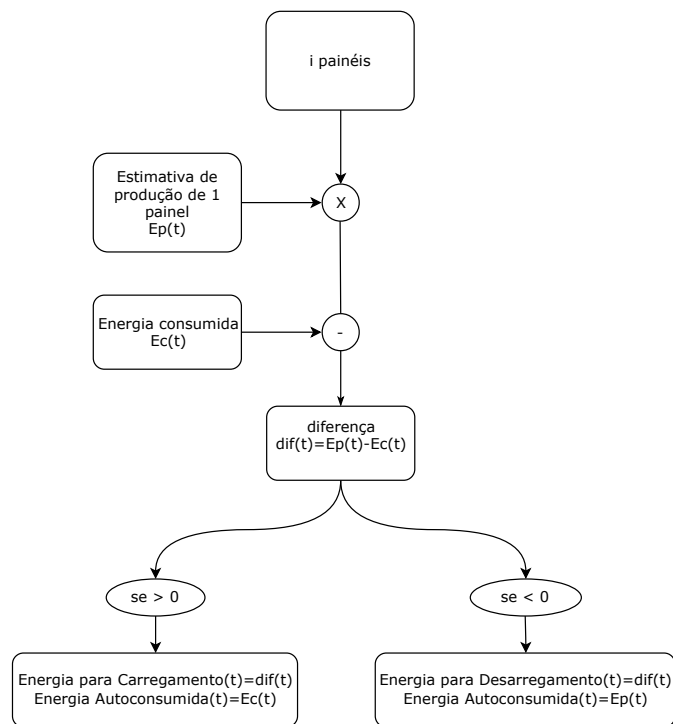


Figura 5.1: Diagrama representativo da análise feita para cada registo t no processo iterativo das baterias

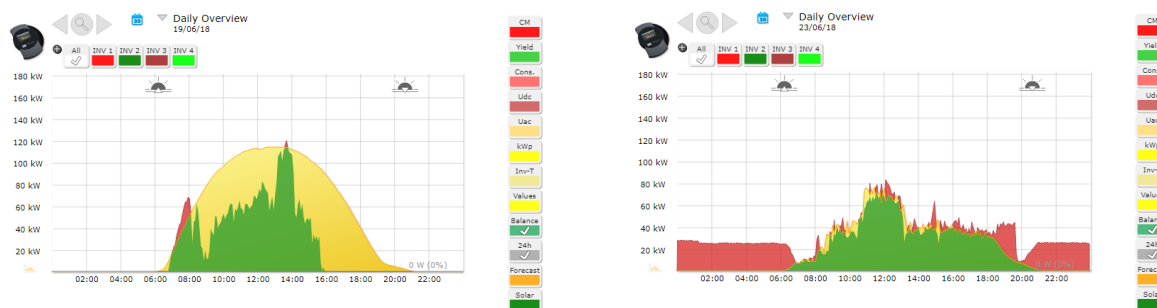
Quando a diferença for positiva, a produção que excede o consumo (Energia para Carregamento) é candidata a ser usada para carregar as baterias. Contudo, o carregamento dessa quantidade de energia obedece a restrições. Por um lado, as baterias apenas podem receber energia até atingirem 80% da sua capacidade de armazenamento. Por outro lado, cada registo t está limitado pela potência máxima de transmissão, entretanto aproximada para energia máxima de transmissão em 15 minutos.

Estes testes são aplicados por esta ordem, podendo a Energia para Carregamento sofrer diminuições tanto na primeira, como na segunda, ou mesmo em ambos os testes. No final, o resultado é somado à energia que a bateria tenha armazenada nesse instante, enquanto que as sucessivas diminuições são registadas como energia desperdiçada.

Ainda neste cenário, convém referir que se assume a existência de mecanismos de monitorização dos consumos e da energia que pode ser armazenada nas baterias. Com base nesses valores, é possível limitar a energia efetivamente produzida, recorrendo a *software* capaz de controlar os inversores.

Na figura 5.2, encontra-se um exemplo real de uma instalação, com ligação à rede, em que a energia que se pode injetar passa a estar limitada. Enquanto que na figura 5.2a a energia produzida (a amarelo nos gráficos) tem a forma de uma curva de produção solar típica, na figura 5.2b a curva de produção encontra-se influenciada pela curva de consumo (a vermelho nos gráficos).

Demonstra-se, assim, que é possível prevenir a produção de energia, quando esta não tem para onde ser escoada.



(a) Instalação sem limitação da energia injetada

(b) Instalação com limitação da energia injetada

Figura 5.2: Exemplo de uma limitação da energia produzida

Quando a diferença for negativa, a produção que faltar para suprir os consumos (Energia para Descarregamento) é procurada nas baterias. Também neste cenário, há restrições a considerar. Se esta energia estiver disponível, sem se comprometer o limite mínimo de 20% e o limite de transmissão, os consumos são preenchidos por esta via. Caso contrário, as baterias fornecem a energia que tiverem armazenada acima dos 20% ou até ao limite de transmissão, sendo o resto colmatado pelo gerador diesel.

No final da avaliação de cada registo, a energia armazenada nas baterias é atualizada e serve como referência para o registo seguinte. Os valores de energia que efetivamente sejam carregados,

descarregados ou desperdiçados vão progressivamente sendo somados.

Após analisados todos os registos, é possível fazer-se uma avaliação dos totais obtidos.

Do ponto de vista do funcionamento da metodologia, a validade está assegurada se a igualdade da equação 5.3 se verificar, ou seja, se a totalidade dos consumos for correspondida pelas fontes de energia do sistema.

$$E_{c, total} = E_{autoconsumida, total} + E_{n baterias, total} + E_{gerador, total} \quad (5.3)$$

Do ponto de vista financeiro, a energia descarregada pelas baterias é a variável que assume maior preponderância. Afinal, é recorrendo a esta que se pode determinar a poupança que a instalação de n baterias pode trazer, através da equação 5.4.

$$Poupanca_{n baterias} = E_{n baterias, total} \cdot preco_{gerador} \quad (5.4)$$

Além da utilidade que o conhecimento desta poupança tem, tirando partido da iteratividade deste método, é ainda possível calcular a poupança que a instalação da bateria n traz pela equação 5.5.

$$Poupanca_{bateria n} = Poupanca_{n baterias} - Poupanca_{n-1 baterias} \quad (5.5)$$

Apesar de apenas com estes valores já ser possível tirar algumas conclusões sobre a viabilidade das hipóteses, reduzir uma instalação de baterias à poupança que trazem apenas no período em análise é demasiadamente simplista. Assim, nesta fase, são construídos os *cash-flows* do sistema com n baterias e de apenas a última bateria que, por sua vez, permitem o cálculo da TIR e do VAL.

O valor atual líquido calculado a partir da poupança da última bateria analisada é então o principal indicador da viabilidade do projeto com n baterias. Se o seu resultado for superior a 0, essa bateria é aceite como rentável e inicia-se a iteração com $n+1$ baterias, caso contrário, o processo iterativo dá-se por encerrado, sendo o número de baterias mais rentável igual a $n-1$.

A utilização do VAL relativo à bateria n como fator determinante, e não o relativo à totalidade do sistema com n baterias, prende-se com o facto de que a instalação de uma bateria não rentável num sistema, não implique a viabilidade desse projeto, ou seja, apesar de esta última não contribuir para aumentar a rentabilidade, o projeto pode continuar a ser rentável.

5.4 Resultados

A obtenção do número mais rentável de baterias a instalar é o principal foco desta simulação mas a justificação desse valor quer do ponto de vista técnico, quer do ponto de vista financeiro é igualmente indispensável.

Assim, no final da simulação das baterias, são produzidas 3 folhas de Excel:

- Relatório de Auto-Financiamento das Baterias
- Funcionamento das Baterias

- Gráficos das Baterias

A interpretação conjunta destas folhas mostra como pode funcionar todo o sistema híbrido e de que modo este pode ser lucrativo, quando comparado com um sistema exclusivamente alimentado pelo gerador diesel. Nos pontos 5.4.1, 5.4.2 e 5.4.3 a contribuição de cada uma das folhas para este propósito é explicada.

5.4.1 Relatório de Auto-Financiamento das Baterias

Nesta folha, além de dados relativos à instalação fotovoltaica, que podem ser consultados nos relatórios a esta dedicados, podem ser encontrados resultados financeiros de todo o sistema híbrido implementado, dados específicos do sistema de armazenamento de energia e informações acerca da operação de cada uma das fontes de energia.

Assim, a valia desta folha reside sobretudo na capacidade de síntese que confere aos resultados. A sua análise isolada apresenta ao leitor as fontes de energia e o modo como estas respondem às necessidades energéticas, enquanto que mostra as suas vantagens financeiras face a um sistema convencional, apenas alimentado pelo gerador diesel.

A figura 5.3 contém um exemplo de um destes relatórios.

Potência de cada painel (W) 270,00	Energia anual produzida (kWh) 1 906 853	Potência Nominal (kW) 1079,892004	Nº de painéis 4444	Energia injetada no cliente (kWh) 1 536 323	Nº de baterias 16
Eficiência painel (%) 16,5%	Perda de eficiência (painéis) 1%	Preço Diesel (€/kWh) 0,2380 €	Potência total instalada (kW) 1 199,88	Energia carregada nas baterias (kWh) 224 287	Capacidade de cada bateria (Ah) 270,00
Área utilizada (m ²) 7 999	Energia anual consumida (kWh) 4 389 547	Perdas Baterias	VAL a 10 anos 106 569 €	Porcentagem do consumo correspondido (%) 40,11%	Energia máxima das baterias (kWh) 132 710,41
Limite de painéis 4444	Payback (anos) 3,46	Inflação (%) 2,5%	TIR a 10 anos 16,06%	Porcentagem energia consumida (%) 92,33%	Investimento inicial baterias 280 000,00
Garantia máxima (anos)	Poupança anual total(€) 419 026 €	Inversores (nº)	WACC (%) 4,0%	Porcentagem energia produzida desperdiçada (%) 7,67%	Energia produzida Gerador Diesel (com PV) 2 853 224,00
Investimento inicial total 1 479 880 €	Duração do Contrato (anos)	Perdas Fotovoltaico 14,0%	Orientação (°) -40	Inclinação (°) 5	Energia produzida Gerador Diesel (com PV+Bat) 2 628 937,80
			Orientação (°) 140	Inclinação (°) 5	

Figura 5.3: Relatório gerado após a simulação das baterias

5.4.2 Funcionamento das Baterias

Nesta folha relativa ao funcionamento das baterias pode-se encontrar todos os valores que justificam os resultados obtidos, organizados em três tabelas:

- *cash-flows*
- trânsitos de potência
- resultados de cada iteração

A primeira, exemplificada na figura 5.4, lista os *cash-flows* alcançados com a instalação do número de baterias determinado.

Os valores desta tabela esclarecem os resultados obtidos no relatório, em particular: a TIR, o VAL e o *payback*.

Ano	Baterias	Última Bateria	Fotovoltaico	CF total	CF total Acumulado
	-280000	-17500	-1199880		-1479880
1	51038,24219	2433,1875	365644,7634	416683,0056	-1063197
2	52314,19824	2494,017188	374785,8825	427100,0808	-636096,9375
3	53622,0532	2556,367617	384155,5296	437777,5828	-198319,3594
4	54962,60453	2620,276808	393759,4178	448722,0223	250402,6563
5	56336,66964	2685,783728	403603,4033	459940,0729	710342,75
6	57745,08638	2752,928321	413693,4883	471438,5747	1181781,375
7	59188,71354	2821,751529	424035,8255	483224,5391	1665005,875
8	60668,43138	2892,295317	434636,7212	495305,1526	2160311
9	62185,14217	2964,6027	445502,6392	507687,7814	2667998,75
10	63739,77072	3038,717768	456640,2052	520379,9759	3188378,75

Figura 5.4: Tabela de *cash-flows* gerada

A segunda, representada pela figura 5.5, apresenta, para cada período de 15 minutos, os fluxos de energia do sistema e o estado do sistema de armazenamento de energia. Embora, a leitura de aproximadamente 35000 registos (número de intervalos de 15 minutos num ano) seja impraticável, a execução dos gráficos depende dos valores aqui expostos e, a sua organização tabular, facilita a identificação de pontos críticos, nos quais o correto funcionamento do sistema é verificado.

Produção	Consumo	Diferença	Energia	SOC	Prod.Baterias	Baterias+PV
0	48,5	-48,5	47001,60156	20	0	0
0	46	-46	47001,60156	20	0	0
0	45,5	-45,5	47001,60156	20	0	0
0	49,5	-49,5	47001,60156	20	0	0
0	43,5	-43,5	47001,60156	20	0	0
0	49,25	-49,25	47001,60156	20	0	0
0	52,25	-52,25	47001,60156	20	0	0
0	53	-53	47001,60156	20	0	0
0	55,75	-55,75	47001,60156	20	0	0
0	55,25	-55,25	47001,60156	20	0	0
0	53,5	-53,5	47001,60156	20	0	0
0	58,75	-58,75	47001,60156	20	0	0
0	53,5	-53,5	47001,60156	20	0	0

Figura 5.5: Tabela de trânsitos de potências gerada

A terceira mostra os principais resultados de cada iteração. Deste modo, é possível conjecturar o modo como o processo iterativo decorreu e avaliar a evolução das variáveis visíveis na figura 5.6.

nº bateria	Custo Gerador Diesel	Custo Global Evitado	Custo Evitado pela bateria n	Ecarregada	Edescarregada	taxa baterias	taxa ultima bateria	val baterias	val ultima bateria
	679067,3125	0							
1	675001,5625	4065,776855	4065,776855	17082,92773	17083,0957	0,21486023	0,21486023	11659,40586	11659,40586
2	671074,5	7992,84082	3927,063965	33582,97266	33583,36328	0,209865843	0,204840977	22368,20066	10708,79479
3	667287,125	11780,1582	3787,317383	49493,75391	49496,46094	0,204815935	0,194618948	32119,30041	9751,099754
4	663618,375	15448,94531	3668,787109	64910,64844	64911,53516	0,200115627	0,185840374	41058,10226	8938,801855
5	660074,4375	18992,89844	3543,953125	79801,99219	79802,09375	0,195447753	0,176479203	49141,40636	8083,304096
6	656643,9375	22423,39258	3430,494141	94210,42188	94215,92969	0,190922119	0,167860631	56447,16653	7305,760166
7	653327,75	25739,57617	3316,183594	108151,5547	108149,4766	0,186458127	0,159063304	62969,54693	6522,380406
8	650116,6875	28950,64844	3211,072266	121639,2031	121641,375	0,182108936	0,150865771	68771,5906	5802,043664
9	647017,9375	32049,39258	3098,744141	134666,7656	134661,3125	0,177768127	0,14198256	73803,8402	5032,249608
10	644013,6875	35053,59766	3004,205078	147284,1406	147284,0156	0,173559755	0,134400929	78188,20569	4384,365488
11	641117,5625	37949,74219	2896,144531	159447,8438	159452,6875	0,16934836	0,125608599	81832,0232	3643,817503
12	638323,3125	40744,02734	2794,285156	171182,3125	171193,3906	0,165167396	0,117188534	84777,78986	2945,766668
13	635616,5625	43450,73438	2706,707031	182577,2344	182566,1094	0,161088688	0,10983893	87123,3763	2345,586436
14	632992,875	46074,41797	2623,683594	193594,6875	193589,9844	0,157111296	0,102771179	88899,99616	1776,61986
15	630462,3125	48604,99219	2530,574219	204223,3906	204222,6563	0,153158602	0,094720695	90038,52967	1138,533508
16	628029,0625	51038,26563	2433,273438	214445,2344	214446,4844	0,14920072	0,086157384	90510,25276	471,7230983
17	625685,75	53381,56641	2343,300781	224286,7031	224292,2969	0,145267796	0,078091661	90365,38571	-144,8670567

Figura 5.6: Tabela com os resultados das iterações gerada

Neste caso, observando a coluna “val ultima bateria”, seria possível dizer que o número de baterias determinado tinha sido 16, já que o valor correspondente a 17 baterias é inferior a zero, o que invalida a hipótese.

5.4.3 Gráficos das Baterias

Baseados nos dados presentes na figura 5.5, são formados gráficos mensais com informação relativa ao funcionamento das baterias, nos quais o utilizador pode escolher as curvas que deseja visualizar e atualizar os eixos verticais para melhorar a sua legibilidade.

As curvas disponíveis são:

- energia produzida pelo painéis
- energia consumida
- diferença entre produção e consumo
- energia armazenada nas baterias
- percentagem de carga ocupada das baterias
- energia carregada ou descarregada pelas baterias
- energia injetada na instalação proveniente da central fotovoltaica ou das baterias

O gráfico da figura 5.7 mostra o menu que permite selecionar as curvas que se pretendam estudar, o botão que atualiza o eixo vertical e o aspeto de um gráfico com todas as curvas selecionadas.

Na figura 5.8 pode-se verificar não só as alterações provocadas pela introdução de uma curva no aspeto geral de um gráfico, como a pertinência de o fazer.

No gráfico da figura 5.8a, imediatamente no primeiro período de produção, é visível que esta excede o consumo. Podendo-se acrescentar a curva “Bateria”, como acontece na figura 5.8b,

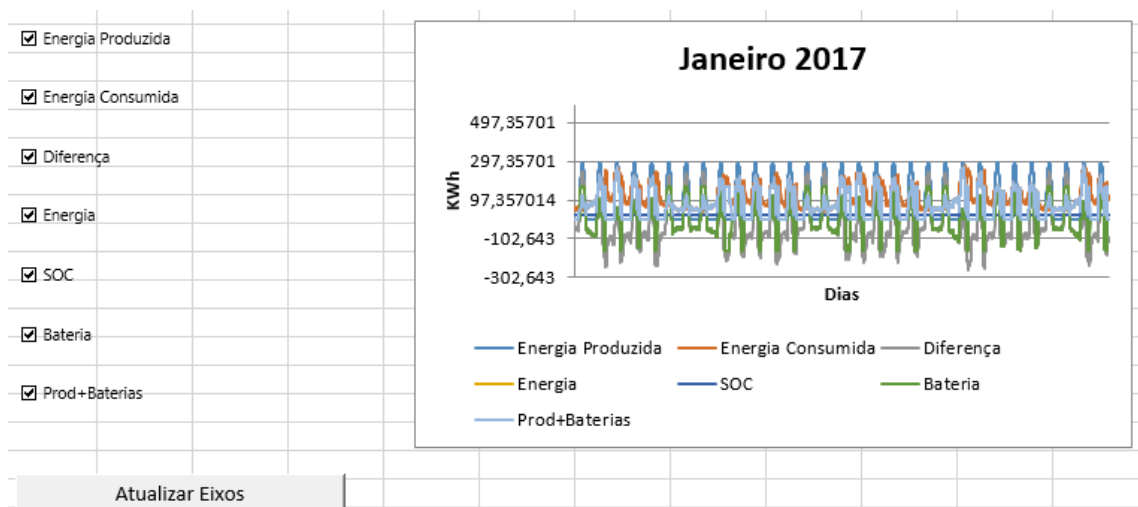
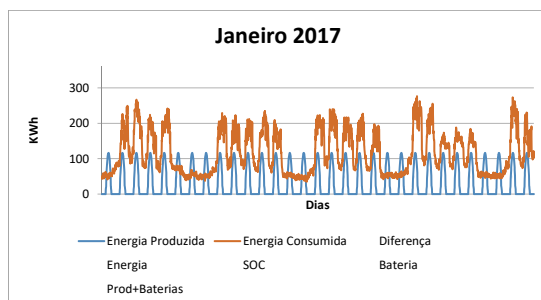
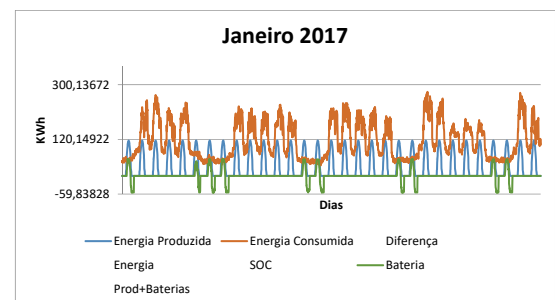


Figura 5.7: Exemplo de um gráfico com todas as curvas selecionadas

percebe-se que, durante esse período, esta toma valores positivos, ou seja, as baterias estão a carregar. Quando a produção volta a ser inferior ao consumo, já havendo energia armazenada na bateria, esta descarrega até atingir o seu limite inferior.



(a) Aspeto de um gráfico com as curvas de produção e consumo



(b) Aspeto de um gráfico com as curvas de produção, consumo e do fluxo de energia da bateria

Figura 5.8: Mudanças nos gráficos com a introdução de uma curva

Esta análise realizada a um dos dias de janeiro demonstra a interdependência e a complementaridade das curvas e, conseqüentemente, justifica a implementação deste menu de seleção.

5.5 Resumo ou Conclusões

Ao longo deste capítulo, foi construído um modelo capaz de determinar o número mais rentável de baterias a implementar num sistema híbrido *off-grid* composto por gerador diesel, painéis fotovoltaicos e baterias. De igual modo, apresentam-se resultados financeiros e técnicos que atestam o funcionamento do sistema descrito.

Contudo, independentemente da exatidão deste modelo e dos seus resultados, a sua aplicabilidade a casos reais estará restringida por aquilo que foi assumido e não considerado. Neste aspeto, destaca-se a bateria usada neste modelo, apontando para as suas diferenças relativamente a uma bateria real.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalho Futuro

6.1 Conclusões

O trabalho realizado e reproduzido neste documento centrou-se na análise, otimização e desenvolvimento de uma ferramenta capaz de dimensionar e otimizar uma central fotovoltaica.

Após ser submetida a uma análise rigorosa e a uma utilização continuada em diferentes tipos de projetos, a ferramenta demonstrou possuir um conjunto de incorreções e limitações que afetavam o seu desempenho.

Identificadas as lacunas, foram feitas alterações no sentido de as ultrapassar. O tempo de execução da simulação foi diminuído. Os processos erróneos foram corrigidos. No geral, a simulação e a otimização de uma instalação fotovoltaica ficou facilitada.

Contudo, o objetivo de expandir os sistemas que esta ferramenta é capaz de simular existe, tendo-se definido os sistemas híbridos *off-grid* como prioritários. Assim, uma revisão às alternativas de armazenamento de energia deste tipo de sistemas impunha-se, antes de se modelar o seu dimensionamento.

O modelo de dimensionamento de baterias criado, não incluindo características técnicas que a revisão das TAE indicou como fulcrais, constitui um sólido ponto de partida para uma posterior inclusão dessas particularidades, ao criar uma infraestrutura de análise de contingências baseada numa bateria modelo.

6.2 Trabalho Futuro

No concernente à simulação do número ótimo de painéis, os resultados são satisfatórios mas não têm em consideração nenhum tipo de sombras que o local de instalação possa ter. A introdução desta contingência, seja através da redução automática da área disponível ou por alterações da estimativa de produção dos painéis, é de elevado interesse.

No que ao dimensionamento de baterias diz respeito, atendendo ao estado embrionário deste modelo de sistemas híbridos *off-grid*, o futuro reserva um número considerável de melhorias que

poderá ser ainda superior se se pretender abranger outro tipo de sistemas, mais especificamente, sistemas *on-grid*.

Dando ênfase aos sistemas sem ligação à rede, uma modelização do gerador diesel e da sua operação, não só permitiria um cálculo mais refinado do seu custo de funcionamento, como daria azo à criação de novas estratégias de gestão da energia produzida. Um exemplo destas estratégias é a priorização de fatores de carga mais eficientes, através da gestão da energia armazenada nas baterias.

As baterias usadas no modelo precisam de uma maior aproximação relativamente àquilo que é uma bateria real. Para tal, atende-se sobretudo aos fenómenos de autodescarga, perda de capacidade e variações de tensão, uma vez que estes são fundamentais para que este modelo possa auxiliar a realização de projetos concretos.

Finalmente, a presença de um sistema de armazenamento de energia valoriza a energia produzida pelos painéis, ou seja, o número ótimo de painéis obtidos possivelmente não será o mesmo, após a implementação de baterias. O contrário também acontece; existindo um sistema de baterias implementado, este terá mais valor se houver mais produção fotovoltaica. Assim, um dimensionamento conjunto do número ótimo de painéis e de baterias é uma solução interessante que pode ser introduzida na ferramenta.

Anexo A

Casos Exemplo

A.1 Diagramas de cargas em energia do caso exemplo analisado em [3.4.2](#)

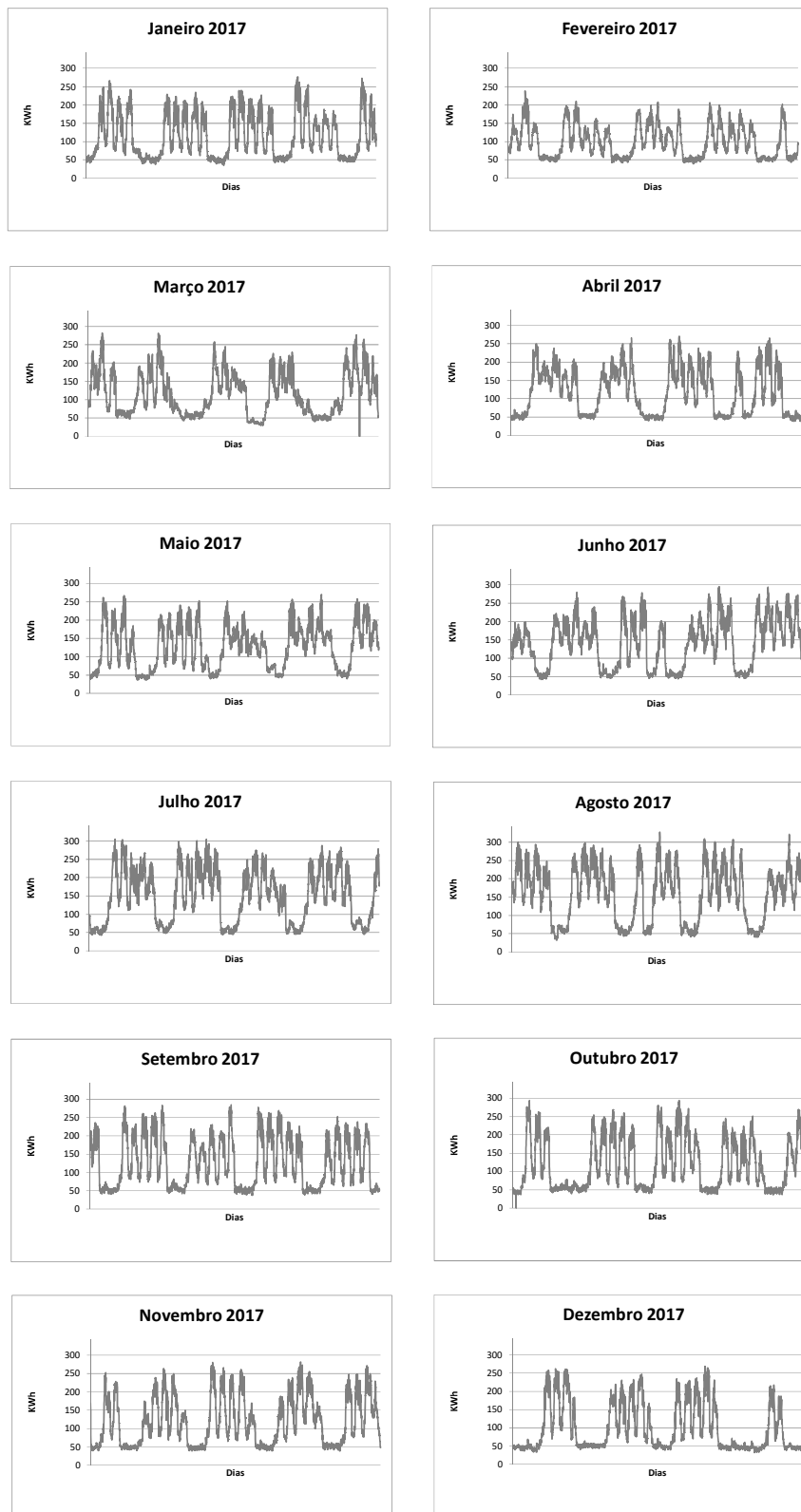


Figura A.1: Diagramas de cargas em energia do caso exemplo analisado em 3.4.2

Referências

- [1] Aitor Etxeberria, Ionel Vechiu, Haritza Camblong, e Jean-Michel Vinassa. Hybrid energy storage systems for renewable energy sources integration in microgrids: A review. Em *IPEC, 2010 Conference Proceedings*, páginas 532–537. IEEE, 2010.
- [2] Chaouki Ghenai, Tareq Salameh, Adel Merabet, e Abdul Kadir Hamid. Modeling and optimization of hybrid solar-diesel-battery power system. Em *Modeling, Simulation, and Applied Optimization (ICMSAO), 2017 7th International Conference on*, páginas 1–5. IEEE, 2017.
- [3] Haisheng Chen, Thang Ngoc Cong, Wei Yang, Chunqing Tan, Yongliang Li, e Yulong Ding. Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Progress in Natural Science*, 19(3):291–312, 2009.
- [4] Bent Sørensen. *Solar energy storage*. Academic Press, 2015.
- [5] Gilbert M Masters. *Renewable and efficient electric power systems*. John Wiley & Sons, 2013.
- [6] Detchko Pavlov. *Lead-Acid Batteries - Science and Technology - A Handbook of Lead-Acid Battery Technology and its Influence on the Product*.
- [7] Jim McDowall. Understanding lithium-ion technology. *Proceedings of Battcon*, 2008.
- [8] Tatsuo Horiba. Lithium-ion battery systems. *Proceedings of the IEEE*, 102(6):939–950, 2014.
- [9] Xingchi Wang, Peter Adelman, e Thomas Reindl. Use of lifepo4 batteries in stand-alone solar system. *Energy Procedia*, 25:135–140, 2012.
- [10] EMG Rodrigues, CAS Fernandes, R Godina, AW Bizuayehu, e JPS Catalão. Nas battery storage system modeling and sizing for extending wind farms performance in crete. páginas 1–6, 2014.
- [11] Daniel Akinyele, Juri Belikov, e Yoash Levron. Battery storage technologies for electrical applications: Impact in stand-alone photovoltaic systems. *Energies*, 10(11):1760, 2017.
- [12] Behnam Zakeri e Sanna Syri. Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42:569–596, 2015.
- [13] ERRI EPRI-DOE. Handbook of energy storage for transmission and distribution applications. Relatório técnico, Europe: Intech, 2003: 516, 2003.
- [14] Xing Luo, Jihong Wang, Mark Dooner, e Jonathan Clarke. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Applied Energy*, 137:511–536, 2015.

- [15] Thomas B. Reddy David Linden. *Handbook Of Batteries*.
- [16] MA Hannan, MM Hoque, A Mohamed, e A Ayob. Review of energy storage systems for electric vehicle applications: Issues and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69:771–789, 2017.
- [17] F Feng, M Geng, e DO Northwood. Electrochemical behaviour of intermetallic-based metal hydrides used in ni/metal hydride (mh) batteries: a review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 26(7):725–734, 2001.
- [18] Faruk A Bhuiyan e Amirnaser Yazdani. Energy storage technologies for grid-connected and off-grid power system applications. Em *Electrical Power and Energy Conference (EPEC), 2012 IEEE*, páginas 303–310. IEEE, 2012.
- [19] Ricardo André Pinheiro Regufe. Ferramenta para projetos de centrais fotovoltaicas em modelo esco. Tese de mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2017.
- [20] European Union. Photovoltaic geographical information system, 2018. URL: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php#> [último acesso em 2018-05-23].
- [21] Decreto-lei n.º 153/2014 de 20 de outubro. ministério do ambiente, ordenamento do território e energia. lisboa.