

Faculdade de Ciências e Tecnologia  
da Universidade de Coimbra

# Edifícios com necessidades quase nulas de energia em ambiente de rede inteligente

## Análise de cenários com ações de gestão da procura

David José Santos Arnaldo

Dissertação no âmbito do Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, área de especialização em Energia, orientada pelo Professor Doutor Álvaro Filipe Peixoto Cardoso de Oliveira Gomes e pelo Professor Doutor Paulo Filipe de Almeida Ferreira Tavares e apresentada ao Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

setembro de 2019



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA



Este trabalho teve apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) e do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) via COMPETE – Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI), no âmbito dos projetos T4ENERTEC (POCI-01-0145-FEDER-029820) e UID/MULTI/00308/2013.

This work has been supported by the European Regional Development Fund through the COMPETE 2020 Program and FCT, under projects UID/MULTI/00308/2013, and "T4ENERTEC" POCI-01-0145-FEDER-029820.



# Agradecimentos

Em primeiro lugar, quero agradecer ao meu orientador, Professor Doutor Álvaro Filipe Peixoto Cardoso de Oliveira Gomes e ao meu coorientador Professor Doutor Paulo Filipe de Almeida Ferreira Tavares, pela motivação, compreensão e disponibilidade ao longo deste percurso.

Quero agradecer também às duas pessoas mais humildes, honestas e generosas que conheço no mundo. Obrigado Mãe e Pai.

Obrigado também à Carolina Curto, por me acompanhar em todos os momentos. Se consegui alcançar os meus objetivos devo-o a ti.

Obrigado Tiago Gonçalves, Catarina Coelho e Luís Henriques, por me mostrarem que se a vida fosse um jogo de tabuleiro eu não estaria aqui.

Obrigado ao Manuel Carneiro, Matias Correia e Tiago Custódio, por nunca me deixarem ir contra a direção errada sozinho.

Obrigado ao Rafael Pereira e ao Vasco Ferreira, pelo companheirismo e por nunca falharem nenhuma das inúmeras noites de trabalho.

Obrigado à casa que é a Quantunna, e em especial aos meus afilhados. Quem disse que a família não se escolhe nunca vos conheceu.

Por fim, resta-me agradecer ao Grupo de Cordas, à Secção de Fado e a todos aqueles com quem tive o privilégio de pisar um palco.



# Resumo

Atualmente, os edifícios constituem 40% do consumo total de energia na União Europeia (UE), o que torna a imposição de normas que impulsionem a eficiência energética neste setor, especialmente importante. Tendo isso em mente, em 2010 foi publicada uma reformulação à diretiva referente à eficiência energética nos edifícios, onde é introduzido o conceito de edifício com necessidades de energia quase nulas (nZEB- *Nearly Zero Energy Building*).

Com a evolução progressiva das redes de energia em direção às chamadas redes inteligentes, um dos objetivos é uma participação mais ativa dos recursos do lado da procura recorrendo a estímulos diversos. Essa participação leva habitualmente a regimes de funcionamento alternativos aos que as cargas de utilização final teriam se não existissem esses estímulos. É pois necessário tentar perceber até que ponto essas alterações poderão afetar o conceito de nZEB.

Sendo o conceito de nZEB um conceito criado de forma a ser exequível para todos os Estados-Membros da UE, é natural que a sua definição seja flexível. Contudo, esta flexibilidade faz com que este conceito não tenha uma solução única, sendo a definição de nZEB dada de formas diferenciadas, dependendo das preferências de cada Estado-Membro.

Neste trabalho, é feita uma análise crítica dos aspetos mais importantes de uma metodologia de avaliação dos nZEB e de quais serão os aspetos mais influenciados quando o edifício se encontra integrado numa rede inteligente.

Após esta análise, é realizado um estudo comparativo de um edifício nZEB integrado numa rede inteligente. Este edifício será abordado sob três perspetivas diferentes de aproveitamento da energia gerada localmente. Dentro de cada uma destas perspetivas, serão aplicadas diferentes ações de gestão do lado da procura de modo a perceber qual a extensão com que estas influenciam o conceito de nZEB.

Através da abordagem considerada, é provado que as ações de DSM (*Demand Side Management*) terão de facto influência no balanço energético do nZEB. Influência essa que será função da metodologia de avaliação considerada no estudo. Prova-se também que a incorporação de armazenamento de energia local terá um fator preponderante no balanço energético, podendo ser uma mais valia para alcançar mais facilmente o conceito de nZEB.

**Palavras-chave:** nZEB, redes inteligentes, gestão do lado da procura, edifícios residenciais.



# *Abstract*

*Nowadays, buildings constitute 40% of the total energy consumption in the European Union (EU), which makes the imposition of standards to boost energy efficiency in this sector particularly important. Taking this fact into account, a 2010 reformulation of the Energy Efficiency in Buildings Directive was published, introducing the concept of near zero energy building (nZEB).*

*With progressive evolution of power grids towards the so-called smart grids, one of the goals is more active participation of demand-side resources using diverse stimuli. This participation usually leads to alternative operating regimes, compared to what end use-loads would have if these stimuli did not exist. Therefore, it is necessary to understand that these changes may affect the concept of nZEB.*

*As the nZEB concept is designed to be workable for all EU Member States, it is natural that its definition should be flexible. However, this flexibility means that this concept has no single solution, being a definition of nZEB given by different forms, depending on the restrictions of each Member State.*

*In this paper, a critical analysis is made of the most important aspects of nZEB evaluation methodology and which aspects will be most influenced when the building is integrated into a smart grid.*

*After this analysis, a comparative study of an nZEB building integrated in a smart grid is performed. This building will be approached from three different perspectives of harnessing locally generated energy. Within each of these perspectives, different demand-side management actions will be applied to understand the extent to which they influence the concept of nZEB.*

*Through this approach, it is proved that DSM (Demand Side Management) actions will, in fact, influence the nZEB energy balance. This influence will be a function of the evaluation methodology considered in this study. It is also proved that the incorporation of local energy storage will have a preponderant factor in the energy balance and may be an added value to reach the nZEB concept more easily.*

**Keywords:** nZEB, smart grids, demand side management, residential buildings.



# Índice

<b>1. Introdução.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Enquadramento Regulatório.....</b>	<b>2</b>
<b>1.2. Interação com uma rede inteligente .....</b>	<b>4</b>
1.2.1. Gestão do lado da procura.....	5
<b>1.3. Estrutura da dissertação.....</b>	<b>6</b>
<b>2. Estado da Arte.....</b>	<b>7</b>
<b>2.1. Terminologias usadas.....</b>	<b>7</b>
<b>2.2. Definições adotadas .....</b>	<b>8</b>
<b>2.3. Definição segundo a EPBD .....</b>	<b>11</b>
<b>2.4. Motivação .....</b>	<b>17</b>
<b>3. Metodologias para avaliação de um nZEB.....</b>	<b>19</b>
<b>3.1. Fronteiras do sistema .....</b>	<b>20</b>
3.1.1. Fronteira de Balanço .....	21
3.1.2. Fronteira Física .....	22
<b>3.2. Métrica .....</b>	<b>23</b>
3.2.1. Emissões de CO <sub>2</sub> .....	24
3.2.2. Energia primária.....	24
<b>3.3. Período de balanço .....</b>	<b>25</b>
<b>3.4. Tipo de balanço.....</b>	<b>26</b>
<b>3.5. Sistema de ponderação.....</b>	<b>26</b>
3.5.1. Sistemas simétricos .....	27
3.5.2. Sistemas assimétricos.....	33
<b>4. Avaliação do impacto das ações de DSM.....</b>	<b>39</b>
<b>4.1. Resultados com o método <i>embodied source</i>.....</b>	<b>42</b>
<b>4.2. Resultados com o método <i>payback</i> .....</b>	<b>44</b>
<b>4.3. Comparação entre métodos.....</b>	<b>45</b>
<b>5. Conclusão .....</b>	<b>47</b>
<b>5.1. Trabalhos futuros.....</b>	<b>49</b>
<b>6. Referências.....</b>	<b>51</b>
<b>7. Anexos .....</b>	<b>53</b>



# Lista de Figuras

Figura 1 – Objetivos dos balanços finais de energia dos edifícios.....	9
Figura 2 – Mapa de zonas climáticas na Europa. ....	12
Figura 3 – Diagrama do sistema rede-nZEB.....	19
Figura 4 – Critérios usados na metodologia de avaliação para um nZEB. ....	20
Figura 5 – Exemplos de trocas de energia dentro de um sistema nZEB.....	20
Figura 6 – Tipos de energia considerados na fronteira de balanço. ....	21
Figura 7 – Exemplo do fator de conversão energia primária. ....	25
Figura 8 – Abordagem de carga evitada.....	28
Figura 9 – Diagrama de carga diário do edifício considerado .....	40
Figura 10 – Diagrama de geração local renovável considerado.....	41
Figura 11 – Diagrama de carga máquina de lavar a roupa .....	41
Anexo B1 – Diagramas de carga para o edifício genérico 1 com ações de DSM.....	57
Anexo B2 – Diagramas de carga para o edifício genérico 2 com ações de DSM.....	59
Anexo B3 – Diagramas de carga para o edifício genérico 3 com ações de DSM.....	61



# Lista de Tabelas

Tabela 1 - Lista de terminologias.....	11
Tabela 2 - Desenvolvimento da definição de nZEB na Europa .....	14
Tabela 3 - Definições Europeias de nZEB.....	17
Tabela 4 – Exemplos para edifícios genéricos com os métodos <i>site</i> e <i>source</i> . .....	31
Tabela 5 – Exemplos para edifícios genéricos com o método embodied source.....	33
Tabela 6 - Exemplos para edifícios genéricos com o método payback. ....	36
Tabela 7 – Exemplos para edifícios genéricos com o método payback alternativo.....	38
Tabela 8 – Resultados obtidos com o método embodied energy .....	42
Tabela 9 – Resultados obtidos com o método payback .....	44
Tabela 10 - Variação percentual entre edifício genérico 1 e 3.....	46
Anexo A – Resultados para edifícios genéricos com ações de DSM.....	55



## Lista de acrónimos

CEN	Comité Europeu de Normalização
DSM	<i>Demand Side Management</i>
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
EP	Energia Primária
EPBD	<i>Energy Performance of Buildings Directive</i>
+ZEB	<i>Energy Plus Buildings</i>
nZEB	<i>Nearly Zero Energy Building</i>
Net-ZEB	<i>Net Zero Energy Building</i>
N <sub>i</sub>	Necessidades de Energia para Aquecimento (inverno)
N <sub>v</sub>	Necessidades de Energia para Arrefecimento (verão)
NZEC	<i>Net Zero Energy Cost Building</i>
NZSiEB	<i>Net Zero Site Energy Building</i>
NZSoEB.	<i>Net Zero Source Energy Building</i>
QTE	Qualidade Térmica Envolvente
RCCTE	Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios
SA	Indicador de Sobreaquecimento
SRI	<i>Smart Readiness Indicator</i>
ST	Desempenho dos Sistemas Técnicos
UE	União Europeia
U.S. DOE	<i>United States Department Of Energy</i>
ZEB	<i>Zero Emission Building</i>
ZEB	<i>Zero Energy Building</i>



# 1. Introdução

---

Nas últimas décadas, tem havido uma crescente preocupação ao nível das mudanças climáticas, tendo a maioria dos países investido quer em estratégias de maior eficiência na utilização de energia quer em estratégias de produção de energia elétrica com recurso a fontes primárias menos poluentes.

A promoção de políticas que estimulem uma maior eficiência energética tem, de facto, crescido ao longo dos últimos anos, com a União Europeia (UE) a ter um papel fundamental na consciencialização e imposição de normas de suporte a essas políticas. Sendo os edifícios responsáveis por 40% do consumo total de energia na UE, a que corresponde 36% das emissões de gases de efeito estufa [1], a imposição de normas torna-se especialmente importante na medida em que existe potencial de melhoria da eficiência energética em cerca de 75% dos edifícios [2] e também devido às muito conhecidas barreiras que existem para uma maior disseminação de medidas de eficiência energética nos edifícios.

Num estágio inicial, a União Europeia tentou articular um objetivo que passaria por implementar edifícios com necessidades de energia nulas, tendo sido introduzido o conceito de ZEB (*Zero Energy Buildings*). O objetivo dos ZEBs passa por apresentar um balanço neutro do seu consumo de energia, balanço esse obtido pela diferença entre importações e exportações de energia do edifício. Todavia, este objetivo mostrou-se demasiado ambicioso, tendo sido, por esse motivo, criada uma definição mais exequível. É nesse sentido que surge o conceito de edifício com necessidades quase nulas de energia (nZEB-*Nearly Zero Energy Building*), em 2010 na reformulação da diretiva relativa ao desempenho energético dos edifícios [3]. Nesta perspetiva, não será necessário que o balanço energético entre importações e exportações seja neutralizado, podendo um edifício ser categorizado como nZEB se, entre outras características, apresentar um balanço próximo de nulo.

Usualmente os nZEB estão interligados com uma rede elétrica com a qual trocam energia, de acordo com as suas necessidades vistas do lado dos edifícios. Contudo, é necessário perceber quais os limites que a definição de nZEB tem quando o edifício está integrado numa rede inteligente, integradora, em que um dos objetivos passa por estimular a participação dos edifícios na gestão da rede. Para que isso seja possível, um sistema de gestão de energia com capacidade de otimização será responsável por adaptar os padrões de consumo do edifício, de acordo com sinais que receba da rede e de acordo com as

necessidades do próprio edifício. Por simplificação, são atribuídas ao edifício ações e características, como por exemplo, que o edifício terá capacidade de resposta, reage a sinais e interage com a rede de forma ativa, porém, esta capacidade de ação é detida pelo sistema de gestão, não pelo edifício em si.

Os estímulos (sinais) dados pela rede terão de ser lidos por cada edifício, que reagirá alterando o normal funcionamento de parte dos seus recursos, o que poderá levar a alterações, pelo menos pontuais, nas trocas de energia entre edifício e rede. Ou seja, as trocas de energia dar-se-ão não só de acordo com as “necessidades dos edifícios”, mas podem também ter em consideração as “necessidades/interesses da rede”. Uma questão que interessará averiguar é se havendo duas partes ou perspetivas em análise se isso pode ou não levar à existência de conflitualidade entre os interesses dessas mesmas partes. Nomeadamente, perante uma postura mais ativa por parte dos edifícios, por exemplo sendo reativos a sinais que introduzam gestão ativa da procura, que impactos é que essa postura poderá ter na classificação enquanto nZEB?

## 1.1. Enquadramento Regulatório

Tal como referido anteriormente, o uso eficiente de energia tem sido uma das preocupações a nível global. Nesse sentido, ao longo dos anos tem sido implementada legislação de modo a normalizar e impulsionar essa mesma eficiência energética. Os edifícios são, de forma geral, uma das maiores preocupações atuais, uma vez que são grandes consumidores de energia.

A primeira diretiva Europeia referente exclusivamente à eficiência energética nos edifícios (EPBD – *Energy Performance of Buildings Directive*), foi publicada em 2002, visando estimular o aumento da eficiência energética nos edifícios dos Estados-Membros [4]. Nesta, é previsto que os edifícios teriam um grande impacto a longo prazo no que diz respeito aos seus consumos energéticos e, por esse motivo, estes teriam de cumprir requisitos mínimos de desempenho energético, tendo em conta as condições climáticas de cada país. Nesta diretiva é apresentado um enquadramento geral para uma metodologia de cálculo do desempenho energético dos edifícios, sendo os requisitos energéticos anteriormente definidos substituídos [5].

Aquando da EPBD, em Portugal, foi efetuada uma revisão do regulamento das características de comportamento térmico dos edifícios (RCCTE), transpondo para a legislação nacional a EPBD, surgindo um novo pacote legislativo em 2006 [6 – 8]. Este

pacote legislativo, para além da reformular alguns parâmetros relativos ao RCCTE de 1990, veio também definir dois pontos importantes [5]: requisitos de produção de energia solar térmica para aquecimento de águas sanitárias e requisitos mínimos para uso de energia primária. Este último é de especial importância na medida em que se deixou de considerar apenas o uso final de energia, para passar a considerar no processo de avaliação também o uso de energia primária necessária para os edifícios (geração, transporte e utilização).

Com a necessidade de reforçar o incentivo à eficiência energética nos edifícios, em 2010 foi publicada uma reformulação da EPBD de 2002, onde é introduzido, entre outros assuntos, o conceito de nZEB [9]. Um nZEB é definido pela diretiva como “um edifício com um desempenho energético muito elevado, onde as necessidades quase nulas ou muito pequenas deverão ser cobertas em grande medida por energia proveniente de fontes renováveis, incluindo energia proveniente de fontes renováveis produzida no local ou nas proximidades” [3]. É importante realçar que a meta apresentada por esta diretiva é de certa forma ambiciosa, na medida em que deve ser alcançada a curto prazo. Na EPBD, é descrita a obrigatoriedade de categorização de nZEB para todos os novos edifícios ocupados ou detidos por autoridades públicas até ao final de 2018, sendo a mesma obrigação dada de forma geral para todos os novos edifícios até ao final de 2020 [3]. É também definido que cada Estado-Membro deve documentar a evolução da sua definição nacional para que a Comissão Europeia tenha capacidade de publicar relatórios dos progressos alcançados de forma periódica.

No que diz respeito à aplicação de limites para as necessidades quase nulas de energia, a reformulação da EPBD incute a responsabilidade a cada Estado-Membro, de forma a tornar os limites mais flexíveis, dependendo da sua conjuntura socioeconómica, bem como dos padrões climáticos [3]. Assim sendo, torna-se responsabilidade dos Estados-Membros a criação de um indicador numérico de utilização de energia primária para edifícios nZEB segundo a métrica conveniente (kWh/m<sup>2</sup>ano, %Energia Primária, classe energética do edifício, entre outras). É também relevante ter em conta fatores como a zona climática ou mesmo a situação económica de cada país que terão uma grande influência nos indicadores numéricos correspondentes.

A EPBD, de forma a acautelar interesses e situações diversas dos vários Estados-Membros, está redigida de forma a ser flexível. Nomeadamente, para a questão da utilização das renováveis nos edifícios é dito “As necessidades de energia quase nulas ou muito pequenas deverão ser cobertas em grande medida por energia proveniente de fontes renováveis, incluindo energia proveniente de fontes renováveis produzida no local ou nas

proximidades;” [3]. Significa que há flexibilidade quer no montante quer na localização do aproveitamento das fontes renováveis.

Em 2012 foi também publicada uma diretiva com o objetivo de reformular alguns aspetos de diretivas anteriores referentes à eficiência energética, estabelecendo um quadro comum de promoção à eficiência energética [10]. Nesta diretiva são referidos alguns pontos relativos à EPBD de 2010, sendo o seu foco principal dirigido ao desempenho energético dos edifícios, bem como à sua renovação. Uma das estipulações feitas passa pela renovação de edifícios detidos e ocupados pelas respetivas administrações centrais. Para tal, é imposto que a partir de 2014, haja uma renovação anual de 3% da área ocupada, de modo a cumprir os requisitos mínimos estabelecidos pelo Estado-Membro.

Em 2016 foi emitido um documento que visa clarificar e concretizar algumas das definições mais amplas do conceito de nZEB [11]. Neste documento constam recomendações de como projetar um edifício nZEB e de certos fatores fulcrais ao seu desenvolvimento. No que diz respeito ao entendimento relativo ao desempenho energético deste tipo de edifícios, o valor do desempenho energético passa pelo cálculo das necessidades de energia final para aquecimento e arrefecimento, terminando com o cálculo da energia primária. Este último cálculo será responsável pela conversão da energia final para o total de energia envolvida no processo, isto é, tendo também em conta todas as perdas envolvidas no processo de geração e transporte de energia. Uma análise mais detalhada acerca do cálculo da energia primária será apresentada no capítulo de Metodologias para avaliação de um nZEB.

## 1.2. Interação com uma rede inteligente

Atualmente, um dos maiores desafios da rede de energia elétrica é ser capaz de lidar de forma eficaz com a crescente disseminação das energias renováveis e também com o continuado aumento do consumo, nomeadamente os valores máximos (pontas). Uma das formas para lidar com esses dois desafios é a integração de recursos que existem no lado da procura, nomeadamente no setor dos edifícios, de forma a terem uma postura mais ativa. Para isso, há necessidade de comunicação e essa capacidade de comunicação é um dos alicerces das redes inteligentes. Assim sendo, os recursos do lado da procura estarão de certa forma integrados na rede inteligente, respondendo a incentivos de forma ativa.

Sendo o objetivo de uma rede inteligente integradora, que o edifício tenha uma participação ativa na gestão da rede, é importante estudar a flexibilidade com que um nZEB

interage com a mesma. Esta flexibilidade depende da facilidade com que um edifício ajusta as suas necessidades em resposta a sinais/incentivos da rede, seja adaptando o funcionamento das suas cargas à sua geração e/ou o seu armazenamento de energia [12]. Esta conjugação de recursos em função das necessidades da rede terá também de ter em conta as necessidades do edifício e do utilizador, isto é, que responda a incentivos da rede, salvaguardando a definição de nZEB e sem prejudicar o conforto do utilizador. Esta interação deve ser usada com uma resolução horária ou inferior devido às variações de preços e incentivos dados pela rede.

Assim sendo, a incorporação de programas de gestão do lado da procura (*Demand Side Management* – DSM) terá um papel fulcral numa rede inteligente eficiente, sendo importante estudar a sua aplicabilidade quando se trata de um nZEB [13].

### 1.2.1. Gestão do lado da procura

Num cenário onde grande parte das vezes se quer minimizar o consumo dos edifícios, seja numa perspetiva de benefício para o utilizador (incluindo a manutenção ou melhoria dos indicadores de desempenho do edifício) e/ou para a rede é importante perceber quais os fatores que influenciam o sistema nZEB-rede inteligente. Devido à natureza estocástica das fontes de energia renovável, é possível adotar medidas que aumentem a coincidência entre a energia disponível e a procura, ao qual se dá o nome de *load matching*. O uso de estratégias de otimização de *load matching* pode ser benéfica, não só para o utilizador, onde é reduzida a fatura de eletricidade, como para a rede, onde poderá haver uma redução de fluxo de potência e das perdas associadas e ainda contribuir para melhoria do nível de tensão e contribuir para uma maior disseminação da geração local com recurso a fontes renováveis.

Tipicamente, o *load matching* é abordado sob três formas [14]: Armazenamento de energia; gestão do lado da procura; ou uma junção das duas anteriores. De modo geral, o objetivo é que o edifício seja capaz de responder a estímulos dados pela rede através de uma adaptação de cargas com auxílio de sistemas de armazenamento de energia. Esta adaptação pode ser feita segundo uma redução de consumo (*load shedding*) ou deslocação temporal (*load shifting*) das cargas. Quando é usado o *load shedding*, o objetivo, por norma, é reduzir o pico de procura, alterando o modo de operação de um determinado equipamento, para que este tenha um consumo inferior[15]. Por outro lado, o *load shifting* procura mover as cargas de períodos onde haja picos de procura na rede para períodos onde seja mais

conveniente o seu consumo, seja devido ao preço da energia, ou mesmo energia local disponível. Tendo em conta que fontes de energia renovável têm tipicamente, picos de produção em períodos de menor consumo, o armazenamento de energia terá um papel fundamental para aproveitamento local dessa energia para uso posterior.

No que diz respeito ao *load shifting*, ao deslocar uma carga para outro período pode existir um benefício para a rede e para o utilizador final, mas não ter em conta a componente ambiental. Usando um caso extremo como exemplo: se um edifício estiver a consumir energia num período onde a energia fornecida pela rede é puramente renovável e alocar o seu consumo para outro período horário onde a energia fornecida pela rede seja puramente fóssil, este passará a ter um grande impacto ambiental, apesar dos benefícios paralelos. É claro que este exemplo é extremo, contudo, sendo a energia fornecida pela rede dada por um *mix* energético de renováveis e fósseis, é possível que este impacto seja real, mesmo que seja numa escala muito menor.

### 1.3. Estrutura da dissertação

O documento está dividido em cinco capítulos. No Capítulo 1, é feito um enquadramento regulatório de toda a legislação respeitante à eficiência energética nos edifícios, seguida de uma apresentação dos aspetos mais importantes a ter em conta numa interação entre nZEB e rede inteligente.

No Capítulo 2, é feita uma análise de diferentes definições de edifícios com objetivos similares aos nZEB, sendo posteriormente detalhado o caso Europeu. Posto isto, é apresentada a motivação do trabalho.

No Capítulo 3, é feita uma análise crítica relativa a todas as metodologias de avaliação dos nZEB e de possíveis aspetos a ter em conta perante a inclusão dos nZEB numa rede inteligente.

No Capítulo 4, é feita a discussão dos resultados relativos à incorporação de um nZEB numa rede inteligente, onde são aplicados métodos de gestão do lado da procura perante determinados cenários de exportação e importação.

Por fim, no Capítulo 5, é feita uma conclusão relativa aos aspetos que mais influenciam o balanço energético dos nZEB, acompanhado de sugestões para trabalhos futuros.

## 2. Estado da Arte

---

### 2.1. Terminologias usadas

Para melhor entendimento de todos os conceitos abordados no documento, é apresentada uma lista de terminologias usadas:

**Balanço energético** – Diferença entre duas grandezas ponderadas. O balanço pode ser definido de várias formas como importações/exportações ou cargas/geração, sendo o primeiro o mais comum;

**Carga** [12]- “Necessidades de consumo de um edifício em (*kWh*) . A carga pode não coincidir com a energia importada devido ao autoconsumo de energia gerada localmente”;

**Desempenho energético de um edifício** [3]- “A energia calculada ou medida necessária para satisfazer a procura de energia associada à utilização típica do edifício, que inclui, nomeadamente, a energia utilizada para o aquecimento, o arrefecimento, a ventilação, a preparação de água quente e a iluminação”;

**Edifício com necessidades quase nulas de energia** [3]- “Um edifício com um desempenho energético muito elevado. As necessidades de energia quase nulas ou muito pequenas deverão ser cobertas em grande medida por energia proveniente de fontes renováveis, incluindo energia proveniente de fontes renováveis produzida no local ou nas proximidades”;

**Energia exportada** [12]- “Fluxo de energia do edifício para a rede, respetivo a cada vetor energético de energia, dada em (*kWh/ano*) ou (*kWh/m<sup>2</sup>ano*)”;

**Energia importada** [12]- “Fluxo de energia da rede para o edifício, respetivo a cada vetor energético de energia e dada em (*kWh/ano*) ou (*kWh/m<sup>2</sup>ano*). Esta será a energia importada pelo edifício”;

**Energia incorporada (edifício)** [16]- “Total de energia necessária para extrair, processar e produzir os materiais necessários para construir o edifício”;

**Energia na fonte (*source energy*)** [17]- “Energia consumida no edifício mais a energia primária necessária para a extração, processamento e transporte de combustíveis como carvão, petróleo e gás natural. Contempla perdas térmicas na geração e perdas no transporte e distribuição da energia”;

**Energia primária** [3]- “A energia proveniente de fontes renováveis e não renováveis que não passou por um processo de conversão ou de transformação”;

**Energia proveniente de fontes renováveis** [3]- “A energia proveniente de fontes não fósseis renováveis, nomeadamente eólica, solar, aerotérmica, geotérmica, hidrotérmica e dos oceanos, hídrica, de biomassa, de gases dos aterros, de gases das instalações de tratamento de águas residuais e de biogases”;

**Fator de conversão** [11]- “Fator segundo o qual é feita a conversão para a métrica pretendida. Estes fatores podem basear-se em valores anuais médios a nível nacional, regional, e podem ter em conta as normas europeias pertinentes”;

**Geração** [12]- “Produção de energia do edifício em (*kWh/ano*) ou (*kWh/m<sup>2</sup>ano*). A geração pode não coincidir com a energia exportada devido ao autoconsumo de energia gerada localmente”;

**Métrica** – Grandeza física utilizada no o balanço energético do edifício (necessidades energéticas do edifício, energia primária, energia na fonte, energia entregue ao edifício, emissões de dióxido de carbono, entre outras);

**Sistema de ponderação** [12]- Um sistema de ponderação é responsável pela conversão de unidades físicas entre diferentes métricas, por exemplo, contabilizando a energia usada (ou emissões emitidas) para extrair, gerar, e transportar a energia. Os fatores de conversão podem refletir preferências políticas, por exemplo, promovendo o autoconsumo de energia gerada localmente.

## 2.2. Definições adotadas

A procura pelo aumento de eficiência energética não é um objetivo exclusivo na União Europeia; também outros países têm vindo a desenvolver esforços nesse sentido, existindo inclusive, no caso dos edifícios, diversas definições similares à de nZEB. Apesar de, em alguns casos, a definição diferir em pequenos aspetos, não existe um consenso na metodologia de avaliação a seguir. O número de divergências nas definições pode-se identificar em três núcleos de operação (Figura 1). Estes são constituídos por edifícios onde o balanço final tem de ser pelo menos: próximo de nulo, mas inferior a zero (nZEB); nulo (Net-ZEB); ou superior a zero (+ZEB) [18].

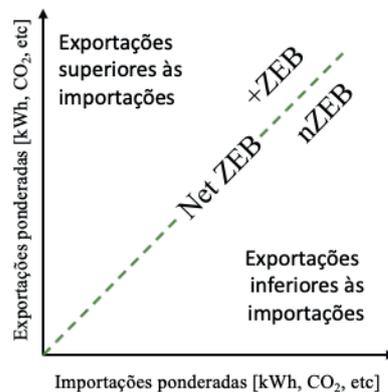


Figura 1 – Objetivos dos balanços finais de energia dos edifícios [19].

À semelhança do caso Europeu, os Estados Unidos da América adotaram também medidas no sentido de racionalizar o consumo energético dos edifícios. Apesar do âmbito ser idêntico, a definição Americana define outra nomenclatura dada por *Net Zero Energy Building* (Net-ZEB). Nesta definição, o edifício de elevada eficiência energética deve exportar a mesma energia que importa da rede num ano, ou seja, ter um balanço energético igual a 0 kWh/m<sup>2</sup> ano. Esta definição, sem a incorporação de uma metodologia mais clara pode ser inconsistente com o objetivo deste tipo de edifícios, podendo em alguns casos não reduzir as emissões de gases poluentes referentes ao uso de energia pelo edifício. É necessário também ter em conta que os Net-ZEB são considerados com um balanço energético anual, o que pode levantar algumas dúvidas relativamente aos valores considerados no seu balanço.

Uma primeira tentativa de integração de métricas e fronteiras no conceito de Net-ZEB foram criadas por [1], em 2006, com o intuito de as tornar mais concretas. Nesse sentido, são elaboradas quatro definições distintas. Duas destas definições passam por diferenciar o balanço feito entre o edifício e a rede, podendo adotar um balanço feito a partir da perspetiva do edifício (NZSiEB- *Net Zero Site Energy Building*) ou segundo a perspetiva da rede (NZSoEB- *Net Zero Source Energy Building*). Nas restantes definições, toma-se como prioritária a neutralização de custos referentes a energia consumida no edifício (NZEC- *Net Zero Energy Cost Building*) e a incorporação de uma métrica respetiva a uma perspetiva ambiental, onde o objetivo é que haja uma minimização de emissões de gases de efeito estufa (*Net Zero Energy Emissions Building*). A introdução destas definições revela um novo desafio para a definição de nZEB. Tendo incorporadas na definição questões como a métrica ou fronteiras passa a existir um novo leque de possibilidades. Esse facto torna a definição de Net-ZEB ou mesmo nZEB de certa forma apenas um ponto de

partida, pois esta carece de uma implementação mais concreta que pode não estimular uma redução de consumos ou uso eficiente de energia.

O próprio Departamento de Energia dos Estados Unidos da América (U.S. DOE- *United States Department of Energy*), criou uma distinção no que diz respeito à aglomeração dos edifícios [20]. Esta diferenciação é feita através de quatro categorias, onde o edifício funciona: individualmente; num *campus*; portefólio; ou comunidade. Estas três definições têm como base a definição de Net-ZEB, diferindo apenas no aglomerado de edifícios constituintes do espaço e na área correspondente. É necessário também ter em conta que nesta definição é considerada a energia primária necessária para alimentar o(s) edifício(s), uma vez que é usada a métrica de conversão para energia primária em todas as definições.

Na União Europeia, a definição de nZEB foi criada como uma meta a curto prazo, de modo a que fosse possível e exequível, de modo geral, para todos os Estados-Membros. Sendo esta uma meta que impõe um balanço final próximo de zero, também podemos considerar outra definição a longo prazo, cujo objetivo passa por ter um balanço superior a zero. Neste tipo de edifícios, designados como *Energy Plus Buildings* (+ZEB), o somatório da produção local de energia renovável é superior ao somatório das importações feitas pelo edifício num período anual. Ter um balanço positivo neste tipo de edifícios pode ser desafiante, pois este tem uma grande influência dependendo da métrica usada, podendo tomar valores negativos no seu balanço segundo certas métricas. Se o critério passa apenas pela geração de renováveis locais ser superior às importações, podem existir cenários problemáticos na ponderação do sistema. Um balanço feito neste sentido pode não estimular o autoconsumo e a eficiência energética na medida em que um aumento de produção renovável local pode ser suficiente para este se caracterizar como +ZEB. Na Tabela 1 é feito um resumo das terminologias mais comuns, acompanhadas das suas características mais relevantes.

Tabela 1 - Lista de terminologias [18].

Acrónimo	Significado	Características	Referência
<b>NZSoEB</b>	<i>Net Zero Source Energy Building</i>	Edifício que produz localmente tanta energia quanto consome numa base de operação anual, quando contabilizada a energia da fonte	[1]
<b>NZSiEB</b>	<i>Net Zero Site Energy Building</i>	Edifício que produz localmente tanta energia quanto consome numa base de operação anual, quando contabilizada a energia do edifício	[1]
<b>NZEC</b>	<i>Net Zero Energy Cost</i>	Edifício onde a quantia monetária que o utilizador final obtém através de exportações é igual ao custo associado às importações do edifício numa base de operação anual	[1]
<b>NZEB</b>	<i>Nearly Zero Energy Building</i>	Edifício com um desempenho energético muito elevado, onde as necessidades de energia quase nulas ou muito pequenas deverão ser cobertas em grande medida por energia proveniente de fontes renováveis	[3]
<b>Net-ZEB</b>	<i>Net Zero Energy Building</i>	Edifício com balanço anual nulo, onde o volume de exportações de energia é igual ao de importações da rede	[21]
<b>ZEB</b>	<i>Zero Energy Building</i>	Edifício com consumo nulo de energia numa base diária de operação	[22]
<b>ZEB</b>	<i>Zero Emissions Building</i>	Edifício com emissões de gases poluentes nulas	[22]
<b>+ZEB</b>	<i>Energy Plus Building</i>	Edifício que produz um volume de energia renovável superior ao volume de importações numa base de operação anual	[23]

### 2.3. Definição segundo a EPBD

Tal como referido anteriormente, a EPBD responsabiliza cada Estado-Membro pela elaboração da sua definição nacional. Isto deve-se ao facto de cada Estado-Membro não ter uma situação única no que diz respeito à conjugação das suas condições económicas, tecnológicas e climáticas/geográficas [5]. Em termos de condições económicas é de esperar que num país menos desenvolvido ou em condições económicas mais frágeis haja uma menor flexibilidade na implementação de edifícios de grande eficiência energética, uma

vez que a implementação dos mesmos pode ter custos elevados. No que diz respeito às condições climáticas/geográficas, é importante reter que países em regiões distintas têm consumos de energia completamente distintos. Se forem consideradas todas as zonas climáticas dentro da UE, é perceptível que a normalização de limites energéticos para os edifícios é desafiante. A Figura 2 ilustra essa mesma dispersão de climas, o que se traduz numa diferenciação de metas nas definições nacionais de nZEB.

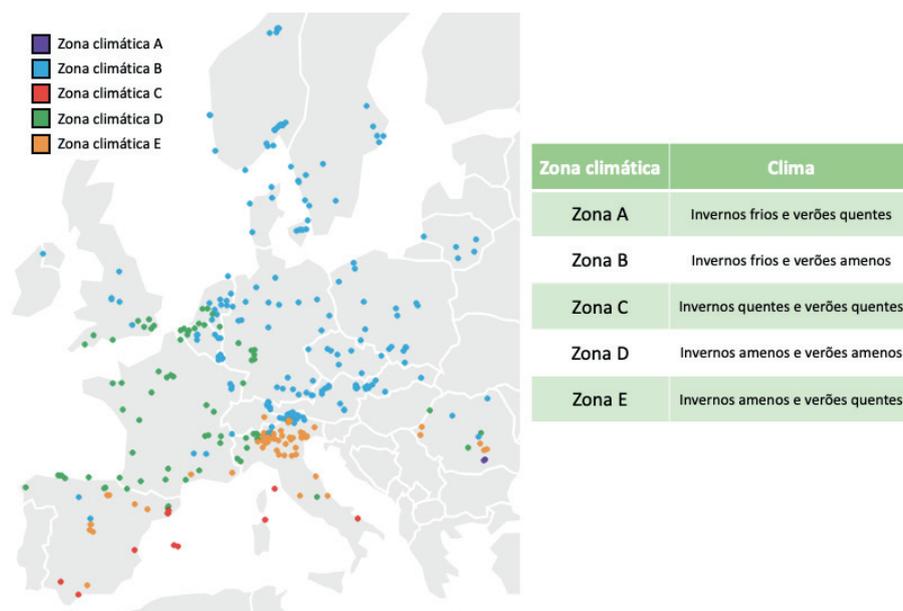


Figura 2 - Mapa de zonas climáticas na Europa [24].

Sendo que a partir de 2021 todos os novos edifícios terão de ser categorizados como nZEB, é imperativo que haja uma definição concreta para cada Estado-Membro. De notar que o nível de desempenho de um nZEB dependerá intrinsecamente das decisões tomadas a nível nacional para cada definição. Entre elas as mais importantes serão [25]:

- Adoção de níveis exequíveis de energia primária como limite para o balanço do nZEB;
- A percentagem de energia primária que deve ser coberta por fontes de energia renovável;
- Os incentivos financeiros disponíveis para a energia renovável ou medidas de eficiência energética;
- Os custos de implementação e o nível de ambição para a definição.

Em geral, existe um entendimento de que as tecnologias existentes relacionadas com poupança de energia e eficiência energética em conjunto com as fontes de energia renovável sejam suficientes para atingir de forma satisfatória a definição de nZEB [11]. Com a aproximação da data limite para a implementação dos nZEBs, a elaboração das

definições nacionais está próxima de ser completa, sendo que, até à data, já 18 dos 28 Estados-Membros têm uma definição nacional completa (Tabela 2).

Um dos papéis dos nZEB quando incorporados na legislação Europeia e nacional, é a promoção da eficiência energética nos edifícios de modo a reduzir as emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Nesse prisma, seria importante que nesta definição estivessem incluídos fatores que exprimam requisitos de energia renovável e energia primária, de modo a ter uma maior visão sobre o uso da energia por parte do consumidor final. De modo geral, a inclusão das fontes de energia renovável na definição nacional de nZEB ainda terá de ser desenvolvida, sendo que dos 30 países (incluindo a Bélgica, que está dividida em três zonas por razões climáticas), 15 não incluem de forma satisfatória as energias renováveis na definição de nZEB (Tabela 2).

Tendo em conta todas as definições dadas até à data, verifica-se que de facto não existe uma definição ou metodologia harmonizada, sendo as definições estipuladas consoante os objetivos de cada Estado-Membro. De forma geral, os limites estipulados a nível nacional são dados de formas diferentes, independentemente das suas situações económicas ou geográficas. Tal como referido por [12], é possível identificar países como, por exemplo, a Áustria, Itália e Lituânia, onde os limites são dados por consumos anuais (em kWh/m<sup>2</sup>ano), classe energética do edifício e percentis de energia primária, respetivamente (Tabela 2). Esta dispersão, em conjunto com metodologias díspares, torna a comparação de definições entre Estados-Membros impraticável. Para que se pudessem comparar limiares, seria necessária uma uniformização da definição, no que diz respeito à grandeza usada para o indicador de consumo, bem como uma metodologia única.

#### **Legenda Tabela 2:**

- ✓ Desenvolvimento satisfatório.
- ~ Desenvolvimento parcial.
- ✗ Desenvolvimento insuficiente / não definido.

**N.D.** Não Definido

## Lista de indicadores:

**QTE**- Qualidade Térmica Envolvente.

**N<sub>i</sub>**- Necessidades de energia para aquecimento (inverno).

**N<sub>v</sub>**- Necessidades de energia para arrefecimento (verão).

**CO<sub>2</sub>**- Emissões de dióxido de carbono (e outros gases de efeito estufa).

**ST**- Desempenho dos sistemas técnicos.

**SA**- Indicador de sobreaquecimento.

**EP**- Energia Primária.

Tabela 2 - Desenvolvimento da definição de nZEB na Europa [13]

Estado- Membro	Estado da definição	Residenciais		Não residenciais		Outros indicadores
		Máximo de energia primária [kWh/(m <sup>2</sup> ano)]		Máximo de energia primária [kWh/(m <sup>2</sup> ano)]		
		Novo	Sujeito a Renovação	Novo	Sujeito a Renovação	
Alemanha (DE)	~	40% EP	55% EP	N.D.	N.D.	QTE
Áustria (AT)	✓	160	200	170	250	CO <sub>2</sub> , QTE, N <sub>i</sub>
Bélgica (BE) Bruxelas	✓	45	54	~95	~108	QTE, SA
Bélgica (BE) Flandres	✓	30	54	40	~108	QTE, SA
Bélgica (BE) Valónia	✓	60	54	60	~108	QTE
Bulgária (BG)	~	~30-50	~40-60	~30-50	~40-60	QTE
Chipre (CY)	✓	100	100	125	125	QTE
Croácia (HR)	✓	33-41	N.D.	N.D.	N.D.	QTE, N <sub>i</sub>
Dinamarca (DK)	✓	20	20	25	25	QTE, SA, ST
Eslováquia (SK)	✓	32-54	N.D.	34-96	N.D.	QTE, N <sub>i</sub>
Eslovénia (SI)	✓	45-50	70-90	70	100	QTE
Espanha (ES)	✗	Classe A	N.D.	Classe A	N.D.	CO <sub>2</sub>
Estónia (EE)	✓	50-100	N.D.	90-270	N.D.	
Finlândia (FI)	~	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
França (FR)	✓	40-65	80	70-110	60% EP	QTE, SA, ST
Grécia (EL)	✗	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
Holanda (NL)	✓	0	N.D.	0	N.D.	QTE
Hungria (HU)	~	50-72	N.D.	60-115	N.D.	QTE
Irlanda (IE)	✓	45	75-150	~60% EP	N.D.	CO <sub>2</sub>
Itália (IT)	✓	Classe A1	Classe A1	Classe A1	Classe A1	QTE, ST
Letónia (LV)	✓	95	95	95	95	QTE, N <sub>i</sub>
Lituânia (LT)	✓	Classe A++	Classe A++	Classe A++	Classe A++	QTE
Luxemburgo (LU)	✓	Classe AAA	N.D.	Classe AAA	N.D.	QTE, CO <sub>2</sub> , N <sub>i</sub>
Malta (MT)	~	40	N.D.	60	N.D.	QTE
Polónia (PL)	✓	60-75	N.D.	40-70-190	N.D.	
Portugal (PT)	~	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	QTE, N <sub>i</sub> , N <sub>v</sub> , ST
Reino Unido (UK)	~	~44	N.D.	N.D.	N.D.	CO <sub>2</sub> , QTE, ST
República Checa (CZ)	✓	75%-80% EP	75%-80% EP	90% EP	90% EP	QTE, ST
Roménia (RO)	✓	93-217	N.D.	50-192	N.D.	CO <sub>2</sub>
Suécia (SE)	~	30-75	N.D.	30-105	N.D.	

A incorporação de uma quota mínima de fontes de energia renovável é também outro aspeto que está definido de forma não determinística. Alguns dos Estados-Membros optam por definir um indicador numérico para a quota mínima de renováveis. Contudo, existem outros que o incorporam através de requisitos indiretos, tal como baixo teor de energia primária, que só pode ser cumprido através de fontes de energia renováveis locais. É também importante salientar que, de modo geral, para edifícios não residenciais, as metas apresentadas são mais abrangentes, tendo valores superiores ou iguais às de edifícios residenciais.

A relevância de indicadores adicionais é clara, uma vez que estes podem conter informação relevante no que diz respeito às condições de isolamento do edifício, necessidades de energia sazonais (aquecimento e arrefecimento), bem como emissões de CO<sub>2</sub> e desempenho dos sistemas técnicos. Por esse motivo, na EPBD é imposto o uso de um indicador de energia primária [9]. Apesar desta imposição, é salvaguardada a possibilidade da inclusão de outros fatores considerados relevantes a cada Estado-Membro.

Outro ponto relevante é a maneira como são quantificados os fatores de conversão para energia primária do balanço energético. Estes fatores serão responsáveis por fazer a ponderação das exportações e importações, podendo em alguns casos ser associados outros fatores como a energia incorporada. No documento emitido em 2016, onde são feitas recomendações relativas à implementação de nZEBs, é aconselhado o uso de um sistema simétrico na ponderação do sistema, isto é, o uso do mesmo fator de conversão para importações e exportações de energia do edifício [11]. Contudo, esta abordagem não é unânime, podendo ser ou não benéfica quando incorporados em programas de DSM. Tendo em conta que a escolha destes aspetos vai ditar em larga escala o incentivo ao uso racional de energia, a resposta dos edifícios a estímulos da rede e mesmo a adoção de equipamentos de armazenamento de energia, é necessário ter em especial atenção todos estes aspetos, de modo a usufruir dos incentivos em conjunto com a salvaguarda da definição de nZEB.

Apesar de a maioria dos Estados-Membros ter já definido o conceito de nZEB a nível nacional, há outras considerações que devem ser tidas em conta. Estas passam pela inclusão de fontes de energia renovável (RES- Renewable Energy Sources) no conceito de nZEB, a declaração de objetivos intermédios para a eficiência energética dos novos edifícios, bem como criar medidas de promoção à renovação de edifícios para nZEB (Tabela 3).

No que diz respeito à inclusão de fontes de energia renovável, tal como referido anteriormente, certos Estados-Membros optam por incluir as mesmas de forma indireta,

como é o caso da Bélgica [26]. Nesta definição de nZEB, é adotada uma quota mínima de energia primária, onde o cálculo inclui a energia renovável produzida localmente. É de facto importante definir uma quota de energia renovável, pois na EPBD de 2010 este limiar não é definido, sendo apenas mencionado que as pequenas carências de energia do edifício terão de ser cobertas por fontes de energia renovável [3].

Quanto aos objetivos intermédios, na EPBD é referido que os Estados-Membros deveriam incluir até 2015 objetivos intermédios para a preparação da implementação de nZEB [3]. Apesar disso, a maioria dos Estados-Membros aplica apenas objetivos qualitativos, não sendo, de modo geral, atribuídos valores quantitativos para os mesmos objetivos.

Alcançar a definição de nZEB para novos edifícios é dada como exequível de acordo com diversos estudos; por outro lado, a renovação de edifícios será desafiante [18]. A renovação de edifícios está a ser feita de forma progressiva, porém lenta [18]. Por esse motivo, em 2011 foi declarado que a renovação de edifícios seria de 0,5% a 2,5% por ano. Apesar disso, a maioria dos Estados-Membros já emitiu medidas de promoção à renovação para nZEBs, sendo que os restantes, excluindo Portugal, detêm medidas desenvolvidas de forma parcial (Tabela 3).

### **Legenda Tabela 3:**

- ✓ Desenvolvimento satisfatório.
- ~ Desenvolvimento parcial.
- ✗ Desenvolvimento insuficiente / não definido.

Tabela 3 - Definições Europeias de nZEB [5], [18].

	RES incluído no conceito de NZEB	Objetivos intermédios (qualitativos e quantitativos)	Medidas de promoção à renovação para nZEB
Alemanha (DE)	~	~	✓
Áustria (AT)	✓	~	~
Bélgica (BE) Bruxelas	~	~	✓
Bélgica (BE) Flanders	~	~	✓
Bélgica (BE) Wallonia	~	~	✓
Bulgária (BG)	~	~	~
Chipre (CY)	✓	✗	~
Croácia (HR)	~	~	~
Dinamarca (DK)	✓	~	✓
Eslováquia (SK)	✓	~	~
Eslovénia (SI)	✓	✓	~
Espanha (ES)	✗	✗	~
Estónia (EE)	✓	✗	~
Finlândia (FI)	✗	✗	✓
França (FR)	✓	✓	✓
Grécia (EL)	✗	✗	~
Holanda (NL)	✓	✓	✓
Hungria (HU)	✓	✗	~
Irlanda (IE)	✓	~	✓
Itália (IT)	✗	~	~
Letónia (LV)	✓	✗	~
Lituânia (LT)	✓	~	~
Luxemburgo (LU)	✓	~	✓
Malta (MT)	~	~	✓
Polónia (PL)	~	~	✓
Portugal (PT)	✗	~	✗
Reino Unido (UK)	✗	~	✓
República Checa (CZ)	✓	~	✓
Roménia (RO)	✓	~	✓
Suécia (SE)	✗	✗	✓

## 2.4. Motivação

Em 2010 a EPBD veio impulsionar a eficiência energética nos edifícios ao impor legalmente o conceito de nZEB na União Europeia. Com esta imposição legislativa passou a existir um plano a curto prazo para o aumento de edifícios mais eficientes, o que introduz novos desafios na maneira como as trocas com a rede convencional são feitas.

Tendo em conta o modo de operação das redes inteligentes e os seus objetivos principais, é essencial que os edifícios tenham capacidade de comunicação com a mesma. Se o objetivo é ter num futuro próximo uma rede inteligente, integradora, onde existe uma participação ativa do lado da procura na gestão da rede, é também necessário estudar os limites sob os quais os edifícios o fazem. Admitindo que existem programas de DSM, o edifício pode

escolher ou não reagir aos estímulos. Numa situação ideal (do ponto de vista da rede), este tem uma participação total na gestão da rede, respondendo aos incentivos de forma imediata. Tendo em conta que um nZEB procura obter um balanço energético nulo anual, uma maior troca de recursos locais com a rede pode influenciar o balanço final do mesmo. Esta influência que a rede tem sob um edifício, através de controlo direto ou indireto, pode tornar os objetivos do sistema nZEB-rede inteligente conflituosos. Este potencial conflito leva ao surgimento da questão:

**Até que ponto é que a participação de um nZEB em programas de DSM em contexto de rede inteligente pode pôr em causa a sua própria definição por via da alteração do valor dos indicadores?**

Na definição de nZEB é implícito que o objetivo é o aumento da eficiência energética e a redução do consumo de energia. Numa definição mais estrita, esta procura promover a autossustentabilidade, possível através do uso de fontes renováveis. Dependendo da forma como é abordado o conceito de nZEB, podem-se retirar diferentes conclusões em relação à influência que a resposta a incentivos tem no sistema. De facto, este tipo de edifícios tem um grande leque de possibilidades dentro da sua metodologia de avaliação. Mesmo dentro da União Europeia, é possível encontrar diversas abordagens diferentes. Por esse motivo, é necessário estudar quais os aspetos mais suscetíveis de cada metodologia quando o edifício interligado com uma rede integradora. Esta problemática levanta ainda a questão: Que metodologia de avaliação impulsiona o desenvolvimento tecnológico e a redução de consumos no setor residencial?

Na secção seguinte será feita uma análise detalhada acerca dos aspetos mais importantes relativos à metodologia para análise de um nZEB, acompanhada de uma análise crítica dos fatores que podem influenciar o sistema nZEB-rede inteligente.

### 3. Metodologias para avaliação de um nZEB

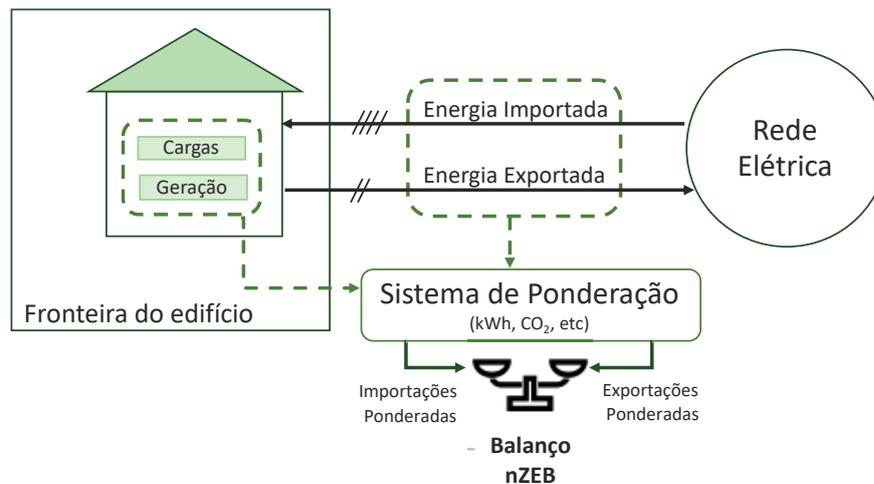


Figura 3 – Diagrama do sistema rede-nZEB [19].

Apesar de os nZEBs serem vastamente abordados na literatura atual, não existe uma implementação única de uma metodologia de avaliação. É certo que a EPBD define o conceito de nZEB com grande flexibilidade de modo a ser versátil e aplicável a diferentes Estados-Membros, porém, é necessário aprofundar certos aspetos de modo a criar um conceito mais concreto.

Tendo em conta um edifício ligado a uma rede inteligente, é necessário que este seja capaz de comunicar com a mesma de modo a tirar partido de possíveis estímulos ou incentivos, salvaguardando a sua definição de nZEB.

De modo simples, o balanço energético do nZEB é dado pela diferença entre exportações e importações. Contudo, na realidade é necessário ter em conta outros aspetos, inseridos na metodologia de avaliação (Figura 3). Estes aspetos podem ser divididos sob sete critérios representadas na Figura 4. Inicialmente, o edifício deve cumprir determinados requisitos impostos pela legislação nacional, de modo a que possa ser considerado um nZEB. Esta imposição é referente ao valor limiar estipulado por cada Estado-Membro para a categorização de nZEB, podendo também incluir a componente térmica. Posto isto, é necessário ter em conta outros seis critérios diretamente ligados à metodologia do edifício, que influenciarão o seu balanço. Estes seis fatores serão de extrema relevância, pois serão eles que farão cumprir os requisitos impostos por cada Estado-Membro. Após a adoção de subcritérios, a definição de nZEB torna-se sistemática, detalhada e consistente [12]. Ao longo desta secção serão apresentados e discutidos os critérios e subcritérios mais

relevantes para o estudo de interação dos nZEB com as redes inteligentes, de acordo com as características apresentadas na Figura 4.

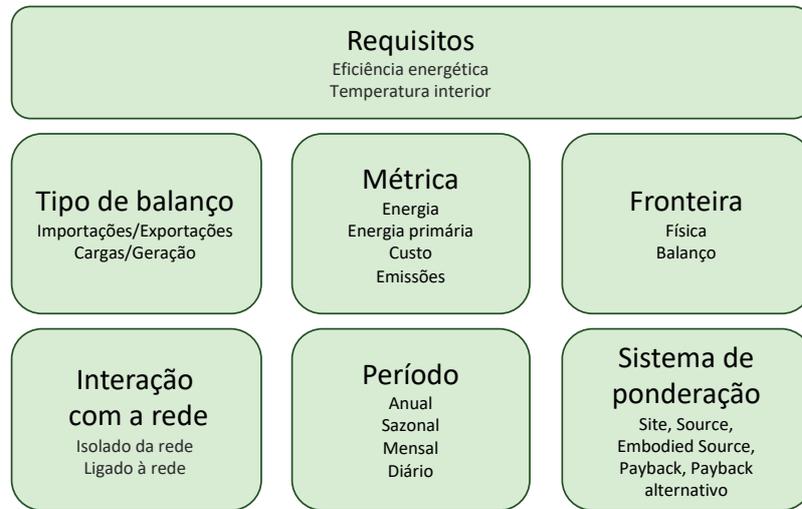


Figura 4- Critérios usados na metodologia de avaliação para um nZEB [27].

### 3.1. Fronteiras do sistema

Um dos critérios apresentados na Figura 4 é a fronteira do sistema. Estas podem ser diferenciadas entre fronteiras físicas, constituídas pelos espaços pertencentes às proximidades (fronteira de proximidade) e ao local (fronteira local) do edifício e as fronteiras de balanço, onde é definido que tipos de energia são tidos em conta. A Figura 5 representa alguns exemplos de trocas de energia que poderão ser feitas dentro do sistema nZEB, sendo a fronteira física constituída pela fronteira de proximidade e local.

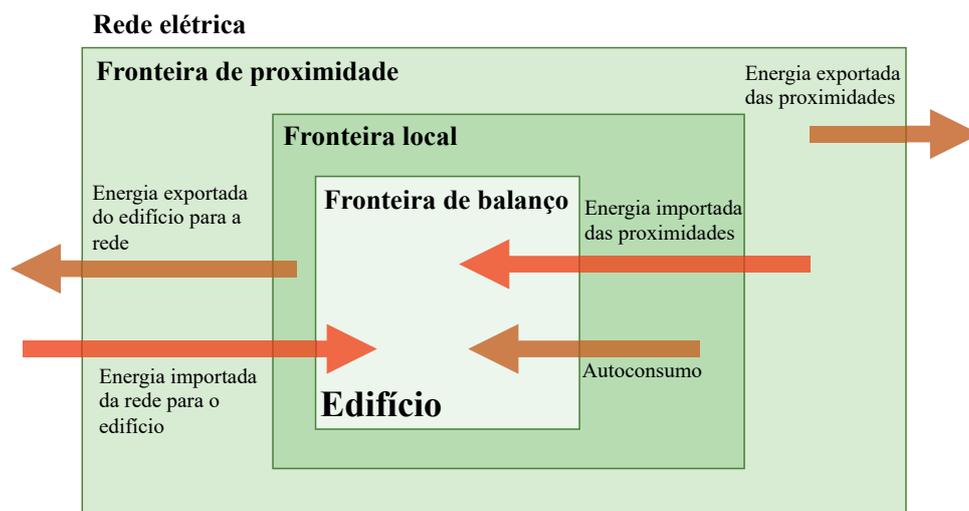


Figura 5 – Exemplos de trocas de energia dentro de um sistema nZEB [5].

### 3.1.1. Fronteira de Balanço

Na fronteira de balanço, é definida que utilização de energia é considerada para o balanço energético do nZEB [12]. São incluídas todas as utilizações finais de energia num edifício nesta fronteira. Tipicamente, aparelhos de aquecimento, arrefecimento, ventilação, preparação de água quente e iluminação fixa são considerados para o balanço energético dos nZEB, podendo ser adicionados outros que sejam de interesse [12].

A escolha da energia a ter em conta no balanço pode englobar apenas a fase de operação do edifício ou ser mais abrangente e englobar o seu ciclo de vida. Neste último caso, considera-se a energia necessária na fase de operação e a energia incorporada do edifício, isto é, a energia usada para extrair, processar e produzir os materiais necessários para construir o edifício[12], [27]. Pode ainda considerar-se a energia usada para o desmantelamento/reciclagem do edifício. Com este tipo de abordagem tem-se uma visão mais realista sobre o impacto ambiental do edifício.

O balanço de energia de um edifício típico contempla tanto a parte térmica como a parte elétrica. Contudo, para simplicidade de análise de resultados, será considerada apenas a parte elétrica do edifício.

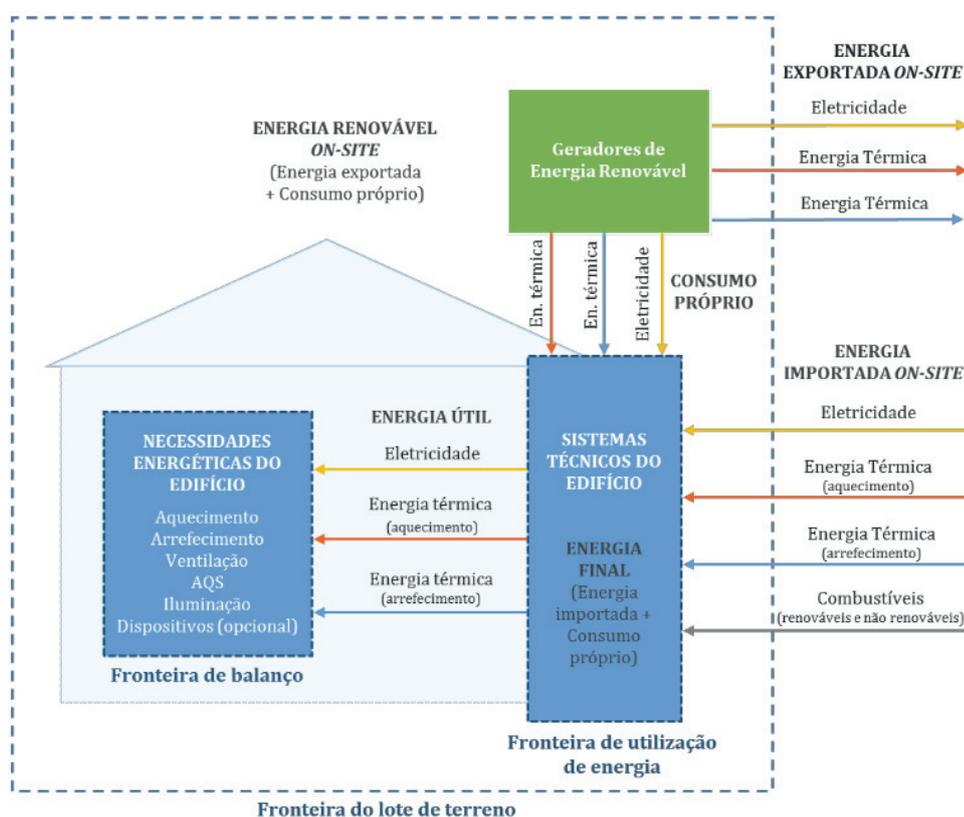


Figura 6 – Tipos de energia considerados na fronteira de balanço [5].

### 3.1.2. Fronteira Física

Na fronteira física de um edifício é necessário identificar dois pontos essenciais: o nível de agregação dos edifícios; e as fronteiras de fluxos de energia correspondentes a energia produzida localmente e nas proximidades do edifício. Esta será a base física para todo o sistema.

Em relação à agregação, um edifício pode operar individualmente ou sob um conjunto de edifícios. Este conjunto pode ter vários níveis, dependendo da dimensão do agregado. Na própria definição americana existe a distinção entre ZEBs com diferentes níveis de agregação tendo em conta quem detém propriedade das fontes renováveis, sendo distinguidos entre edifício singular, *campus*, portefólio e comunidade [18], [20]. Na definição europeia é apenas contemplado um edifício singular ligado à rede, sem definir agregação de edifícios, pelo que o estudo apresentado será sempre referente a um edifício a funcionar individualmente, ligado à rede elétrica de energia.

Na EPBD é referido que um nZEB deve produzir energia renovável localmente ou nas suas proximidades, porém, a definição não apresenta um indicador numérico relativo a esta fronteira física de proximidade nem de local. Quanto à fronteira local, pode ser considerado como referência a planta do edifício ou da propriedade associada ao mesmo. Porém, a definição de proximidade é mais exigente, tendo sido definida pela Comité Europeu de Normalização (CEN) como a produção de energia que apenas pode ser usada a nível local ou distrital [28]. O racional por detrás desta definição é o uso de fatores de conversão próprios, substituindo o fator de energia primária associada a maiores distâncias, como é o caso da energia proveniente da rede (fora da fronteira de proximidade).

A incorporação desta fronteira é de facto útil para uma categorização mais compreensiva e concreta de nZEB. Apesar disso, a ausência de um indicador numérico para a área correspondente a esta fronteira cria alguma ambiguidade na definição de energia produzida nas proximidades do edifício, sendo necessária uma definição de espaços menos ampla. Em suma, a fronteira física deve ser clarificada através da incorporação de indicadores numéricos que estipulem qual a área admissível para a fronteira de proximidade do edifício [19].

## 3.2. Métrica

Tal como descrito anteriormente, a métrica é a grandeza física utilizada para estabelecer o balanço do edifício. De modo geral, as métricas mais usuais passam por considerar o consumo de energia primária, a energia na fonte, as emissões de dióxido de carbono ou mesmo custo de energia para o consumidor final [1].

Tal como anteriormente descrito, os nZEB podem ter em conta diferentes métricas, sendo estas dependentes do objetivo proposto para o estudo do edifício. Para além disso, podem ser usados mecanismos diversos que podem ter impacto no balanço sob as diversas métricas. Desde logo, a ponderação das trocas de energia entre o edifício e a rede ou fatores que estejam relacionados, por exemplo, com a política energética. Também a forma de realizar o balanço pode levar a resultados diferentes, por exemplo, considerando ou não a energia incorporada nas tecnologias. O balanço produzirá também resultados diferentes se se recorrer a valores de fatores de conversão diferentes para energia importada e exportada, ou diferentes formas de quantificação. Sendo o objetivo deste trabalho a análise da interação de nZEBs com uma rede inteligente, a métrica que será o alvo principal neste estudo é a energia primária e serão analisados impactos da utilização de diversos fatores de conversão.

A realização do balanço de um nZEB com recurso a uma dada métrica é feita através do uso de fatores de conversão, que serão responsáveis pela transformação do consumo do edifício, tipicamente em kWh, passando para a métrica em vigor, por exemplo, energia primária correspondente a esse consumo de energia em kWh. Esses fatores deverão ser dependentes da região em causa, bem como do tipo de energia usada, estando interligados com o *mix* energético do país. Tendo um edifício, onde é fornecida uma unidade de energia, essa unidade será multiplicada por um fator que faça corresponder à energia necessária para que esta unidade seja entregue ao edifício. Dependendo da abordagem, este fator pode ter em conta as perdas na extração, geração e no transporte da energia.

Estes fatores de conversão podem inclusive variar num determinado período. Tendo em conta que o *mix* energético da rede pode variar de forma anual, sazonal, mensal, diária ou mesmo horária, podem ser considerados diferentes fatores de conversão dentro do período de balanço de um nZEB. Porém, tipicamente são usados valores tabelados por região, sendo inclusive sugerido na recomendação relativa à promoção de edifícios com necessidades de consumo quase nulas de energia, que seja adotado um valor anual [11].

### 3.2.1. Emissões de CO<sub>2</sub>

Ao adotar a métrica de CO<sub>2</sub>, passa a existir um entendimento mais alargado da pegada ecológica do edifício. Tendo em conta este fator, é possível obter o total de emissões correspondentes ao consumo de um edifício. De notar que este fator está interligado à energia primária utilizada pelo edifício, sendo equivalente ao consumo de energia primária e ao *mix* de geração usada. Apesar da nomenclatura ser definida como CO<sub>2</sub>, este fator pode ter em conta outros gases de efeito estufa, não sendo limitado a dióxido de carbono [5].

Tendo em atenção quais as fontes com menores emissões de gases de efeito estufa, o fator de CO<sub>2</sub> dará prioridade a fontes com menores emissões, potenciando uma menor pegada ecológica do edifício, mesmo quando mantem os seus níveis de consumo habituais.

Contudo, este não representa de forma direta a energia do sistema, sendo dificultada a análise de interação entre o nZEB e a rede, mostrando-se assim desinteressante para este estudo em concreto.

### 3.2.2. Energia primária

A energia primária é um dos fatores mais importantes na ponderação do sistema, uma vez que esta tem em conta não só a energia consumida pelo edifício como também a energia necessária para produzir e transportar as fontes de energia usadas até ao edifício. Assim sendo, é feito o balanço total de energia usada pelo edifício. O fator de energia primária depende do tipo de matéria prima usada, sendo o seu valor dado pelo *mix* energético num dado período, tipicamente anual. É natural que assim seja, pois a eficiência energética de cada processo é diferente.

Para que seja mais claro o papel do fator de conversão de energia primária, é necessário ter em conta um exemplo (Figura 7). Sabendo que a energia primária tem em conta a energia total que é necessária para fornecer um edifício, se o fator de energia primária for igual a 3, por exemplo, significa que para entregar 1 unidade de energia ao edifício, é necessário gerar 3. De igual modo, se o fator for de 2, é necessário gerar 2 unidades de energia para fornecer 1. Considerando outro tipo de conversão, como por exemplo a de energia final, os consumos em ambos os casos são iguais, sendo 1 unidade de energia entregue correspondente a 1 unidade de energia gerada. Assim sendo, quando considerada a energia primária, existe uma visão mais abrangente do consumo real do edifício.

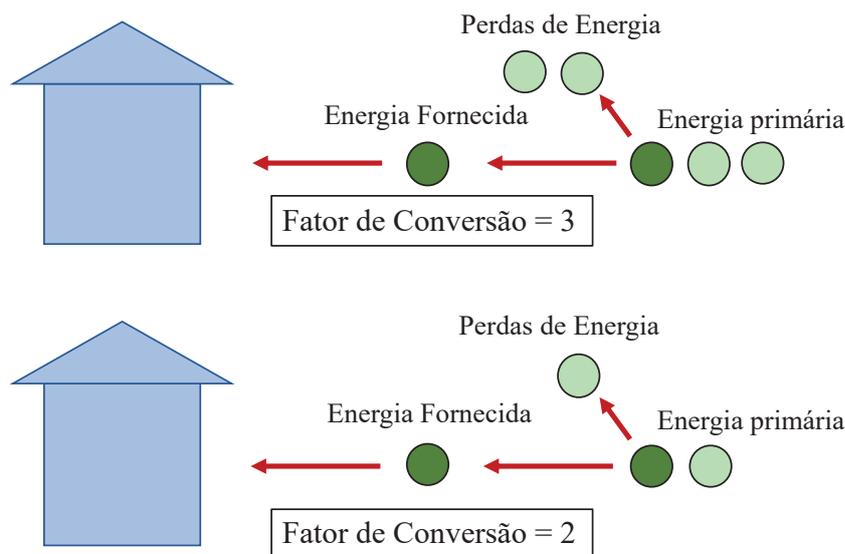


Figura 7 – Exemplo do fator de conversão energia primária [5].

O fator de conversão para energia primária pode ser baseado numa média anual do *mix* energético nacional ou regional [9]. No que diz respeito ao vetor energético respeitante à eletricidade, de modo a obter uma uniformização na implementação dos nZEB, é sugerido pela Comissão Europeia, a adoção de um fator de conversão para energia primária igual a 2,5 para importações e exportações de eletricidade [11].

### 3.3. Período de balanço

Na União Europeia, segundo o quadro geral comum para a metodologia de cálculo do desempenho energético dos edifícios, este balanço deve ser anual. Este é de facto o balanço mais utilizado por incorporar de forma mais completa as variações sazonais. Tipicamente um edifício terá maior volume de importações no inverno, devido ao baixo nível de produção de energia renovável local, compensada pelas exportações no verão, onde tipicamente existe um excesso de energia produzida. Assim sendo, este balanço é usualmente assumido como preferencial, sendo mais fácil de ser atingido um balanço próximo de zero [12].

A adoção de períodos mais curtos, como períodos sazonais, mensais ou mesmo diários, torna-se de facto desafiante devido ao facto de os edifícios terem uma maior dependência da rede. Por outro lado, a adoção de períodos mais alargados, consideração como décadas, pode ser um panorama mais real, adquirindo uma componente de ciclo de vida que terá de ser compensada ao longo de vários anos. Contudo, prova-se que através de um balanço

anual podem ser tidos em conta componentes como a energia incorporada, que poderá ser distribuída segundo um balanço anual [12].

### 3.4. Tipo de balanço

Usualmente, a definição de nZEB passa pelo balanço das importações e exportações. Este tipo de balanço de importação/exportação permite monitorizar o edifício através de medições diretas. Porém, numa fase de planeamento pode ser difícil estimar certos fatores como o autoconsumo do edifício [19]. Este valor é difícil de estimar por existir uma grande variação no que diz respeito a cada edifício, fonte de energia, clima e padrões de uso final de energia.

A EPBD abrange em grande parte os requisitos de desempenho energético necessários na fase de planeamento do edifício, focando-se na ponderação de energia gerada em função das cargas, isto é, um balanço carga/geração [19]. O facto de considerar este tipo de balanço possibilita o cálculo antecipado do seu balanço, tornando-se independente de informações detalhadas como cargas variáveis no tempo ou mesmo padrões de geração. Porém, nesta abordagem os fluxos de energia não saem da fronteira do sistema, não considerando a interação com a rede. Nesse sentido, será pouco relevante estudar este tipo de abordagem num sistema rede-edifício.

### 3.5. Sistema de ponderação

O objetivo do sistema de ponderação é a conversão de valores numa dada grandeza para corresponderem à métrica em vigor. Desse modo, o balanço do sistema é uniformizado numa só grandeza de referência. Se a métrica adotada for energia primária, por exemplo, todos os vetores energéticos relativos a consumo de energia no edifício terão de ser convertidos de modo a refletir a energia primária necessária para produzir e transportar esse mesmo consumo de energia.

Sendo considerado cada vetor energético associado a um edifício, é necessário escolher a simetria usada no seu balanço. O sistema de ponderação pode ser simétrico, caso o fator de conversão para a energia exportada seja igual ao fator de conversão de energia importada. Caso seja adotado um sistema assimétrico, os fatores de importação e exportação serão distintos. A escolha da simetria usada é estabelecida por cada Estado-Membro, sendo que a maioria adotou sistemas simétricos para o sistema de ponderação, concordante com a recomendação dada pela Comissão Europeia [11].

A simetria tem especial importância na medida em que dará créditos às transações com a rede. Dependendo do tipo de simetria e do método em causa, pode-se influenciar incentivos para autoconsumo, aumento da eficiência a nível do edifício, a participação em estímulos dados pela rede, entre outros. Por esse motivo, é necessária uma análise crítica no que toca a cada tipo de simetria e método de cálculo no balanço final do nZEB.

### 3.5.1. Sistemas simétricos

O fundamento de um sistema simétrico é que a geração local, produzida através de fontes renováveis, evitará uma produção equivalente de energia renovável noutra parte da rede [27]. Esta redução de necessidade de produção por parte da rede evita que seja sobrecarregada em determinados períodos de tempo. Este racional, denominado carga evitada (*avoided burden*), considera que a energia exportada tem o mesmo peso no balanço energético que as importações feitas da rede, podendo ser abordado de diferentes formas, dependendo da fronteira usada [27].

De forma genérica, o balanço de um nZEB é dado pela diferença das exportações e importações. Por ser demasiado abrangente, a tendência é que sejam incorporados outros fatores no seu balanço. Assim surgem, dentro dos sistemas simétricos, duas definições, *site energy balance* e *source energy balance*, correspondentes às perspetivas do edifício e da rede, respetivamente [27]. Estes conceitos surgiram, tal como descrito anteriormente, com o intuito de criar uma metodologia mais concreta.

Neste método, a rede pode tirar partido da energia produzida em excesso num edifício para alimentar um ou mais edifícios com escassez de energia naquele momento. Usando o exemplo da Figura 8, onde o fator de energia primária é de 3:1, se o edifício exportar 1 unidade de energia, evita que a rede use 3 unidades de energia primária. Assim sendo, o edifício terá de ser beneficiado através do fator de energia primária, sendo a energia exportada creditada como 3 unidades de energia.

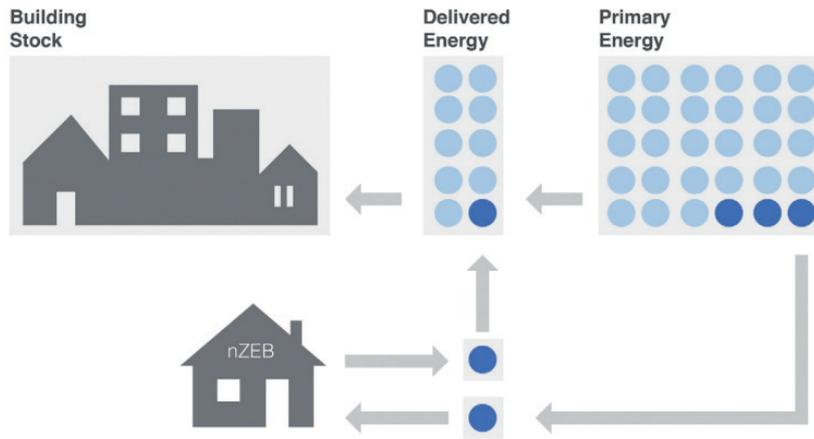


Figura 8 – Abordagem de carga evitada [27].

Uma das abordagens possíveis, passa por considerar um balanço energético na perspetiva do edifício (*site energy balance*). Neste caso, a energia exportada para a rede deve ser usada para compensar as necessidades de energia do edifício sem o uso de fatores de conversão (equação 1). Este conceito é incorporado nos *Site ZEBs* e é tomado como uma abordagem simples, repetível e consistente baseada em medidas concretas e acessíveis no próprio edifício [27]. Apesar disso, este método toma como base a troca equitativa de energia importada e exportada. Este facto levanta a questão relativa à qualidade da energia importada e exportada. Tomando um edifício que detém exclusivamente fontes de energia renovável, este irá exportar energia obtida através de fontes não poluentes, importando energia da rede que, dependendo do *mix* atual será mais poluente. Para além do fator ecológico, será também preciso ter em linha de conta que a rede de transporte acarreta perdas e o processo de transformação de energia primária não tem rendimento unitário.

$$\Delta E_{site} = \sum E_{exp,i} - \sum E_{imp,i} \quad (1)$$

Na equação 1,  $E_{exp,i}$  e  $E_{imp,i}$  correspondem à energia exportada e importada através do vetor energético  $i$ , respetivamente. Quanto aos fatores de conversão de exportação e importação respetivos ao vetor energético  $i$ , são dados por  $f_{exp,i}^p$  e  $f_{imp,i}^p$ , respetivamente.

É no sentido de criar uma definição que incorpore todo o processo necessário para fazer chegar a energia ao edifício que surge o *source energy balance*. Nesta abordagem, é tida em conta todo o processo necessário para fornecer energia a um dado edifício, isto é, quanta energia primária é necessária para produzir e transportar energia até ao edifício (equação 2) [1]. Segundo a definição de *source energy* do U.S. DOE, esta tem também em conta a energia necessária para a extração da energia primária, sendo esta uma abordagem mais

ligada ao *ciclo de vida* do que a Europeia, onde os indicadores se referem apenas ao transporte e produção de energia elétrica [17], [18].

$$\Delta E_{source} = \sum_i (E_{exp,i} \cdot f_{exp,i}) - \sum_i (E_{imp,i} \cdot f_{imp,i}) \quad (2)$$

$$f_{exp,i} = f_{imp,i}$$

Na equação 2,  $E_{exp,i}$  e  $E_{imp,i}$  correspondem à energia exportada e importada pelo vetor energético  $i$ , respetivamente. Os fatores de conversão são dados por  $f_{exp,i}$  e  $f_{imp,i}$ , correspondendo, respetivamente, ao fator de conversão de exportações e de importações segundo o vetor energético  $i$ .

Tendo em conta que os nZEBs serão, à partida, detentores de fontes de energia renovável, estes exportarão energia obtida através de fontes não poluentes (elétrica renovável). Sendo prática comum a aplicação de fatores de conversão de energia primária do *mix* energético da rede, um edifício será beneficiado na medida em que é creditado com um fator superior ao que teria se fosse usado o fator correspondente à energia elétrica exportada [29]. Na Europa, segundo a norma Europeia EN 15603, os Estados-Membros têm a liberdade de usar um fator de conversão para energia exportada diferente da energia primária da rede. Porém, segundo a perspetiva da EPBD e na prática não é isso que acontece.

### 3.5.1.1. Problemas levantados devido ao uso de sistemas simétricos

A abordagem de carga evitada baseia-se no facto de um edifício evitar, através de exportações, que a rede gaste uma quantidade superior de energia primária para alimentar outro edifício. Porém, esta premissa pode estar dissociada do objetivo de um nZEB, pois por evitar a produção de uma certa quantidade de energia primária não quer dizer que este tenha necessidades quase nulas de energia primária. Apenas por exportar energia não diminui a sua dependência da rede e consequentemente energia primária.

Tendo em conta que o edifício é creditado através do fator de energia primária, é natural que este obtenha uma creditação maior quando a rede necessita de produzir mais energia para alimentar um dado edifício. Assim sendo, a creditação atribuída à energia exportada pelos edifícios é inversamente proporcional à eficiência da rede. Este facto parece paradoxal ao desenvolvimento da rede elétrica, onde o objetivo é que esta seja cada vez mais eficiente e inteligente e assim normalizar o conceito de rede inteligente. Por esse

motivo, poderia ser mais vantajoso de um ponto de vista tecnológico se a energia exportada fosse creditada de outra forma onde os fatores de conversão não sejam iguais [27].

De facto, o uso de fatores de conversão idênticos nas exportações e importações de um edifício não estimula a eficiência energética quer do lado da oferta, quer do lado da procura. Tomando os edifícios genéricos 4 e 5 apresentados na Tabela 4 como exemplo, retira-se que, independentemente da eficiência energética dos edifícios, se estes tiverem um diferencial entre exportações e importações igual, o seu balanço final será idêntico. Admitindo que o custo não é um obstáculo, a incorporação de um maior número de fontes renováveis poderá criar uma ilusão de que o edifício é tão ou mais eficiente do que outros edifícios que são de facto de elevado desempenho [18]. Se um dos objetivos dos nZEB é o uso eficiente de energia e a disseminação de edifícios mais eficientes, este pode ser um entrave às abordagens simétricas.

Outro aspeto a ser analisado será a influência de programas de DSM quando usado um sistema simétrico. Se a premissa dos sistemas simétricos é o uso de fatores de conversão iguais para importações e exportações, ações de DSM podem não influenciar a definição de nZEB. Se considerarmos que não existe diminuição de consumos através de medidas de DSM, mas sim deslocação de cargas para outros períodos horários, independentemente da quantidade de energia exportada, importada ou mesmo armazenada este terá o mesmo balanço energético segundo o *source energy balance*. Tome-se o exemplo dos edifícios genéricos 1, 2 e 3 da Tabela 4. Alterando os valores de importações entre dois extremos, correspondentes a uma maximização de exportações e a uma maximização de autoconsumo, percebemos que os valores do seu balanço final não se alteram. Este aspeto pode ser benéfico para a definição de nZEB na medida em que pode participar livremente no mercado de energia, responder a estímulos ou incentivos, tirando partido da componente financeira para o utilizador final e mantendo a sua definição de nZEB.

Apesar disso, esta abordagem simples e concisa não tem em conta certos fatores que serão relevantes na análise do nZEB, tal como a energia incorporada pelas fontes de energia renovável presentes no edifício ou mesmo a energia incorporada do próprio edifício.

Tabela 4 – Exemplos para edifícios genéricos com os métodos *site* e *source*.

[kWh]	Máx. Exportações		Máx. Autoconsumo		
	Genérico 1 Exportações = Geração	Genérico 2 Exportações = 1/2 Geração	Genérico 3 Exportações = minimizadas	Genérico 4 Consumo Alto	Genérico 5 Consumo Baixo
Importações	5000	2500	0	7000	1000
Exportações	10000	7500	5000	7800	1800
Carga	5000	5000	5000	8000	2000
Geração	10000	10000	10000	8800	2800
<b>Método 1 - Site</b>	5000	5000	5000	800	800
<b>Método 2 - Source</b>	15000	15000	15000	2400	2400

Fatores de conversão
exportação = importação
3,0

Para compensar a não inclusão da energia incorporada, tanto pelas fontes de energia renovável locais como pela energia entregue ao edifício pela rede, surgem duas novas abordagens dentro do método *source*, onde são adicionados fatores que permitem considerar a energia incorporada [27]. Para simplicidade de análise e posterior comparação com outros métodos, estas duas abordagens serão condensadas num único método denominado por *embodied source* e apresentado na equação 3:

$$\Delta E_{source} = \sum_i (E_{exp,i} \cdot f_{exp,i}) - \sum_i (E_{imp,i} \cdot f_{imp,i}) - \sum_i (E_{emb,building}) \quad (3)$$

$$- \sum_i (E_{exp,i} \cdot f_{NR,i})$$

$$f_{exp,i} = f_{imp,i}$$

Onde  $E_{exp,i}$  e  $E_{imp,i}$  correspondem à energia exportada e importada pelo vetor energético  $i$ , respetivamente. Os fatores de conversão para energia primária são dados por  $f_{exp,i}$  e  $f_{imp,i}$ , correspondendo, respetivamente, ao fator de conversão de exportações e de importações segundo o vetor energético  $i$ . Quanto à energia incorporada pelo edifício, esta é dada por  $E_{emb,building}$ . No que diz respeito ao fator de conversão para energia primária da componente não renovável das fontes renováveis (eólica, fotovoltaica, entre outras), o valor é dado por  $f_{NR}$ .

Neste método, é mantido o mesmo fator de conversão para importações e exportações, sendo apenas adicionados dois componentes correspondentes à energia incorporada do sistema. Estas componentes farão uma penalização no balanço do edifício, o que fará com que o seu balanço final seja inferior ao método *source* anteriormente descrito. No que diz respeito à energia incorporada do edifício, a conversão para energia primária é feita através do produto das cargas que o edifício apresenta com um fator de conversão para energia

primária. Segundo [27], o valor típico será dado por 40% das necessidades energéticas do edifício. Quanto à energia incorporada das fontes de energia renovável, o cálculo é feito de forma análoga, sendo dado pelo produto das exportações com o fator de conversão para energia primária correspondente. Contudo, o fator para conversão para energia primária será altamente variável, não podendo ser estipulado um valor médio genérico. Este facto pode ser justificado mesmo num cenário onde é conhecida a energia incorporada para o fabrico da fonte de energia renovável. Tomando como exemplo um painel fotovoltaico, o seu aproveitamento vai diferir em larga escala, dependendo da localização do edifício ou mesmo da inclinação do painel, não podendo ser estipulado um valor global médio. Para efeitos de análise do sistema foi adotado um fator de conversão de energia primária não renovável de 10%, concordante com o usado por [27].

Outro aspeto que é necessário ter em atenção é que, neste método, a energia incorporada das fontes de energia renovável é dada pelo produto das exportações com um fator, e não do volume de produção local. Assim sendo, passa a existir, mesmo que em pequena escala, um estímulo ao autoconsumo, pois por cada unidade de energia exportada será decrementada a parte não renovável da mesma. Esta componente pode ser usada para alterar o incentivo aplicado a um determinado edifício. Numa perspetiva onde se queira aplicar um incentivo à exportação, este fator pode ser decrementado, de modo a ter uma penalização inferior nas exportações. Por outro lado, com um fator de conversão de energia não renovável superior, é dado um estímulo ao autoconsumo. Esta variação pode ser muito benéfica na flexibilidade da resposta a incentivos por parte dos edifícios, bem como a liberdade de integração de outros fatores, como por exemplo fatores políticos.

Adicionando a componente de energia renovável, o seu comportamento deixa de ser tão linear, passando a haver alterações consoante o nível de importações e exportações do edifício. Tomando os edifícios genéricos 1, 2 e 3, dados pela Tabela 5, é notório que quanto maior for o nível de autoconsumo, melhor será o balanço do edifício. De igual forma, nos edifícios genéricos 4 e 5, passa a existir uma valorização direta do uso de aparelhos eficientes. Posto isto, através da inclusão da energia incorporada neste método, passa não só a existir uma visão mais ampla e real do sistema num total, como também a estimular a eficiência energética e o autoconsumo. Por todos esses motivos, este método mostra-se muito mais relevante do que os métodos *source* e *site*.

Tabela 5 – Exemplos para edifícios genéricos com o método embodied source.

[kWh]	Máx. Exportações		Máx. Autoconsumo		
	Genérico 1 Exportações = Geração	Genérico 2 Exportações = 1/2 Geração	Genérico 3 Exportações = minimizadas	Genérico 4 Alto Consumo	Genérico 5 Baixo Consumo
Importações	5000	2500	0	7000	1000
Exportações	10000	7500	5000	7800	1800
Carga	5000	5000	5000	8000	2000
Geração	10000	10000	10000	8800	2800
Energia incorporada edifício	2000	2000	2000	3200	800
Energia incorporada fontes renováveis (exportações)	1000	750	500	780	180
<b>Método 3 - Embodied Source</b>	<b>2000</b>	<b>2250</b>	<b>2500</b>	<b>-3180</b>	<b>-180</b>

Fatores de conversão		
exportação = importação	parte não renovável	energia incorporada edifício
3,0	0,1	0,4

### 3.5.2. Sistemas assimétricos

Num sistema assimétrico, onde os fatores de conversão de energia exportada e importada são diferentes, podem existir dois casos [5]: valorização das exportações e valorização das importações. Caso seja adotada uma perspetiva de valorização das exportações, é usado um fator de conversão de energia primária maior para as exportações no balanço do nZEB, sendo estas valorizadas, comparativamente às importações. Caso seja adotada uma valorização das importações, será feito o inverso, ou seja, será usado um fator de conversão das importações superior ao das exportações. Dependendo da abordagem escolhida, diferentes estímulos serão aplicados aos edifícios. Por um lado, se forem valorizadas as exportações, será dado um estímulo a disseminação de fontes de energia renovável, pois através destas é possível obter um maior volume de exportações, o que se traduz num melhor balanço final. Através desta abordagem, o edifício pode caracterizar-se como nZEB sem o uso eficiente de energia, não cumprindo um dos principais objetivos dos nZEB, que é a eficiência energética nos edifícios [5]. Por outro lado, se houver uma valorização das importações, passa a existir um estímulo ao autoconsumo e ao uso eficiente de energia, o que vai de encontro ao objetivo da implementação dos nZEB [5].

Numa perspetiva de valorização das importações, surge o método *payback*, onde o objetivo é ter em conta todo o ciclo de vida do sistema edifício-rede, valorizando mais as importações. O método *payback* é caracterizado por ter em linha de conta todo o ciclo de vida do sistema; este tem em conta a energia incorporada (*embodied energy*) do edifício, fontes de energia renovável locais, bem como da energia primária importada, incluindo a extração, transporte e produção de energia separadamente da energia exportada [27]. Assim

sendo, é tido em conta o total de energia do sistema e não apenas a energia primária necessária para alimentar o edifício, como nos métodos *source* e *site*.

Atendendo ao facto de as importações passarem a ser mais valorizadas do que as exportações, o balanço final do nZEB passa a ser menos linear, comparativamente aos sistemas simétricos. Neste caso, não se pode garantir que os programas de DSM não afetarão o seu balanço. Tomando como exemplo um edifício que, devido a uma resposta a um estímulo desloca uma carga de um período horário para outro mais conveniente para a rede/utilizador final, esta deslocação, devido aos fatores de conversão serem diferentes, fará crescer o diferencial entre importações e exportações. Neste caso, devido ao facto das exportações não terem um fator de conversão associado, um edifício terá de usar um maior número de fontes de energia renovável para cobrir as importações feitas, comparativamente aos sistemas simétricos [27].

Através da premissa deste método, passa a existir outro estímulo contrário ao conceito de carga evitada. Se as importações são valorizadas de forma superior, uma rede mais eficiente fará com que o edifício cumpra de forma mais fácil a definição de nZEB, uma vez que a componente de importações será menos relevante [5]. Se considerarmos uma rede cujo *mix* energético é puramente não renovável, o fator de conversão usado na importação será superior e esta componente será muito superior a outro cenário onde a rede fornece apenas energia renovável, onde o fator de conversão é inferior. Tendo estes dois exemplos extremos, pode-se concluir que a rede terá um grande impacto no sistema edifício-rede, sendo necessário o desenvolvimento de ambas as partes para um cumprimento mais fácil da definição de nZEB.

A equação 4 representa o balanço dado pelo método *payback*, onde  $E_{exp,i}$  e  $E_{imp,i}$  correspondem à energia exportada e importada pelo vetor energético  $i$ , respetivamente, sendo  $f_{imp,i}$  o fator de conversão para energia importada sob o vetor energético  $i$ . Quanto a  $E_{emb,building}$  e  $E_{emb,RES}$ , estas correspondem às componentes de energia incorporada do edifício e das fontes renováveis locais. A equação 5 corresponde ao cálculo da energia incorporada do edifício, onde  $f_{emb,building}$  corresponde ao fator de conversão para energia primária da energia incorporada pelo edifício. Já na equação 6, é apresentado o cálculo da energia incorporada das fontes de energia renovável, sendo  $f_{NR}$  o fator de energia primária da parte não renovável das fontes de energia renovável. Neste caso, tanto as cargas como a geração são dadas em kWh para serem posteriormente convertidas em energia primária pelos respetivos fatores de conversão.

$$\Delta E_{source} = \sum E_{exp,i} - \sum (E_{imp,i} \cdot f_{imp,i}) - \sum E_{emb,building} - \sum E_{emb,RES} \quad (4)$$

$$E_{emb,building} = \sum (Cargas) * f_{emb,building} \quad (5)$$

$$E_{emb,RES} = \sum (Geração) * f_{NR} \quad (6)$$

Neste método é também incluída a energia incorporada do sistema. Porém, o cálculo da energia incorporada das fontes de energia renovável é feito de forma diferente. Neste método é usado o mesmo fator de energia primária não renovável, comparativamente ao método *embodied source*, porém, a penalização é feita de forma diferente. Neste caso, o edifício não é penalizado pela componente de energia que exporta, mas sim pelo total de energia gerada localmente. Esta penalização é dada de forma mais severa, comparativamente com o *embodied source*, transmitindo outros estímulos.

Tendo em conta que não existe fator de conversão associado às exportações, este método, será sempre melhorado através do autoconsumo. Por outro lado, se for implementado um grande número de fontes de energia renovável para aumentar o autoconsumo, este será igualmente penalizado, pois é o volume total de geração que entra no balanço. Em adição a essa penalização, se forem usados aparelhos de baixa eficiência, o balanço será de igual modo penalizado na componente de energia incorporada do edifício. Por esse motivo, para além do estímulo ao autoconsumo, existe também um incentivo ao uso eficiente de energia e à inclusão de aparelhos de elevada eficiência. À semelhança do método *embodied energy*, pode ser variado o fator de energia primária não renovável de modo a ter diferentes estímulos, incluindo estímulos ao autoconsumo e às exportações, por exemplo.

Utilizando edifícios genéricos como referência, podemos verificar a influência que este método terá em vários modos de operação. Tomando como base as equações 4, 5 e 6, foram obtidos os exemplos apresentados na Tabela 6. No que diz respeito à eficiência energética da rede ter impacto no balanço do edifício, podemos considerar os edifícios genéricos 2 e 4, com padrões de consumo iguais, diferindo apenas no fator de conversão de importações. É notório o diferencial no balanço segundo o método *payback* ao reduzir o fator de conversão de 3 para 2. Com estes exemplos, é comprovado que um aumento de eficiência do lado da oferta melhorará o balanço do nZEB, diferindo do balanço simétrico onde uma diminuição do fator de conversão prejudicará o seu balanço final.

Outro ponto importante de analisar é também os exemplos dos edifícios genéricos 5 e 6, onde é considerado um edifício com elevados consumos e outro de baixos consumos de energia, onde o diferencial entre importações e exportações é igual. Mais uma vez, ao contrário dos métodos simétricos, a redução de consumos, que se pode traduzir numa elevada eficiência do edifício, passa a ser beneficiada através de um balanço mais próximo de zero. Tal como referido anteriormente, neste método, para além do estímulo ao aumento da eficiência energética, é também estimulado o autoconsumo, pois ao ter apenas um fator de conversão nas importações, o balanço será mais penalizado tendo um maior volume de importações. Este facto pode ser observado nos edifícios genéricos 1, 2 e 3 (Tabela 6), que correspondem a dois cenários extremos e um intermédio de volume de exportações. Atendendo ao facto de que os resultados melhoraram quanto maior for o nível de autoconsumo, quando é usado este método, toda a energia gerada num dado instante deve ser usada para autoconsumo, exportando (ou armazenando) apenas em momentos em que tenha excesso de produção de energia [27].

Tabela 6 - Exemplos para edifícios genéricos com o método payback.

Fator importações	3			2	3	
[kWh]	Genérico 1 Exportações = Geração	Genérico 2 Exportações = 1/2 Geração	Genérico 3 Exportações = minimizadas	Genérico 4 Exportações = 1/2 Carga	Genérico 5 Alto Consumo	Genérico 6 Baixo Consumo
Importações	5000	2500	0	2500	7000	1000
Exportações	10000	7500	5000	7500	7800	1800
Carga	5000	5000	5000	5000	8000	2000
Geração	10000	10000	10000	10000	8800	2800
Energia incorporada edifício	2000	2000	2000	2000	3200	800
Energia incorporada fontes renováveis (cargas)	1000	1000	1000	1000	880	280
<b>Método 4 - Payback</b>	-8000	-3000	2000	-500	-17280	-2280
	Máx. Exportações		Máx. Autoconsumo			

Fatores de conversão	
parte não renovável	energia incorporada edifício
0,1	0,4

O maior desafio no cálculo do método *payback* passa pela estimativa da energia incorporada numa fase de planeamento do edifício. Para ultrapassar este obstáculo, é proposta uma abordagem alternativa onde o cálculo é feito de forma alternativa, deixando de ser considerada uma abordagem de importação/exportação para carga/geração [27]. Este método é denominado *payback* alternativo.

Na equação 7, é apresentado o cálculo para este método, onde  $G_i$  e  $L_i$  correspondem a geração e cargas, respetivamente. Esta abordagem considera três fatores de conversão para o auxílio do cálculo [27]. Neste caso, como consideramos carga e geração, não é aplicado o fator de conversão na geração, sendo unicamente usado no uso direto de energia, isto é, nas cargas. No que diz respeito à energia incorporada do edifício, existem várias formas de

a calcular. O método usado para o cálculo desta componente energética é dado pelo produto do somatório de todas as cargas sob um fator de conversão  $f_{building}$ . Tal fator é calculado pela equação 8. Por fim, a energia incorporada das fontes de energia renováveis pode ser expressa como parte da geração (equação 9), sendo subtraída ao total sob um fator de conversão de energia não renovável  $f_{NR}$ . A energia incorporada expectável, bem como a geração expectável advém do cálculo das fontes de energia renovável a implementar no edifício. Como se trata de um cálculo na fase de design do edifício, será feita uma estimativa de ambos os parâmetros.

$$\Delta E_{source} = \sum G_i - \sum (L_i \cdot f_{load,i}) - \sum (L_i \cdot f_{building,i}) - \sum (G_i \cdot f_{NR,i}) \quad (7)$$

$$f_{building,i} = \frac{\text{Energia incorporada edifício}}{\text{Ciclo de vida total do lado da procura}} \quad (8)$$

$$f_{NR,i} = \frac{\text{Total de energia incorporada expectável}}{\text{Total de geração expectável}} \quad (9)$$

À semelhança do método *payback*, este é também beneficiado por um fator de importações menor, sendo uma mais valia se a rede for mais eficiente. Neste método, sendo o balanço feito através dos vetores geração/cargas, é benéfico para o seu balanço alimentar as cargas através da rede, ou seja, importando, e exportando a totalidade de energia gerada [27]. Tendo em conta que as cargas são estáticas, não fará diferença o balanço de importações e exportações, podendo exportar a totalidade da energia gerada sem prejudicar o balanço final do nZEB.

Apesar disso, considerando os edifícios genéricos 2 e 4, verifica-se que o fator de conversão usado nas cargas tem uma grande influência no balanço deste método. De facto, a proporção de energia renovável local em função das cargas será o grande influenciador do balanço final. Se variarmos a quantidade de energia gerada localmente mantendo estáticas as cargas do edifício, é notória a variação do balanço final, sendo que o balanço final é maximizado quanto maior for a produção local. De igual modo ao método *payback*, este incentiva a eficiência energética, obtendo melhores resultados para consumos mais baixos de energia (edifícios genéricos 5 e 6).

Tabela 7 – Exemplos para edifícios genéricos com o método payback alternativo.

Fator importações	3			2	3	
[kWh]	Genérico 1 Geração = 4x Carga	Genérico 2 Geração = 2x Carga	Genérico 3 Geração = Carga	Genérico 4 Geração = 2x Carga	Genérico 5 Alto Consumo	Genérico 6 Baixo Consumo
Importações	0	0	0	0	7000	1000
Exportações	15000	5000	0	5000	7800	1800
Carga	5000	5000	5000	5000	8000	2000
Geração	20000	10000	5000	10000	8800	2800
<b>Método 5 - Payback Alternativo</b>	<b>1000</b>	<b>-8000</b>	<b>-12500</b>	<b>-3000</b>	<b>-19280</b>	<b>-4280</b>
	Máx. Exportações		Máx. Autoconsumo			

Fatores de conversão	
parte não renovável	energia incorporada edifício
0,1	0,4

Este método alternativo é tipicamente mais difícil de ser cumprido, quando comparado com o método *payback*. Porém, este pode ser tido em conta como o pior cenário possível, sendo um bom ponto de partida numa fase de planeamento para a adoção de outro método após a implementação do edifício [27].

Tendo em conta que este método considera o balanço entre cargas e geração, não tendo em conta os fluxos de energia correspondentes a importações e exportações, não será fulcral ao estudo pretendido. Contudo, continua a ser um método viável, onde se incorporam componentes de ciclo de vida em conjunto com a definição de nZEB.

## 4. Avaliação do impacto das ações de DSM

---

Neste capítulo, é feita uma análise comparativa entre alguns dos pontos mais importantes da metodologia de avaliação de um nZEB. Nesta análise, serão considerados três edifícios genéricos diferentes, a funcionar individualmente, onde serão feitas variações nos seus padrões de consumo de modo a perceber quais os métodos mais suscetíveis a programas de DSM. Para maior clareza, a metodologia de avaliação adotada corresponde a um edifício singular, com produção de energia renovável local. A métrica aplicada será de energia primária, com um balanço dado por importações e exportações com energia puramente elétrica. Habitualmente, o período de balanço de um nZEB é dado numa base anual, porém, para melhor compreensão dos impactos de ações de DSM no balanço do nZEB, é usado, neste caso, um período de balanço diário. Os métodos dos sistemas de ponderação usados para comparação de resultados serão os métodos *embodied source* e *payback* por terem em conta toda a energia do sistema, incluindo a energia incorporada do sistema, bem como o estímulo ao autoconsumo e ao uso eficiente de energia. Assim sendo, será feita uma análise comparativa entre um método simétrico e um método assimétrico.

Tendo em atenção o facto de o *mix* energético da rede variar de forma periódica, podendo inclusive variar de forma sazonal, ou mesmo mensal, os fatores de conversão para energia primária podem variar, apesar de ser habitual a utilização de um valor médio anual. Nesta análise, o fator de conversão para energia primária relativo às importações e/ou exportações de eletricidade, é 2,5, de acordo com a recomendação da Comissão Europeia feita em 2016 [11].

Assim, é necessário perceber até que ponto as ações de DSM, ou mesmo armazenamento de energia, influenciam o balanço final do nZEB. Para tal, é proposta uma abordagem onde são aplicadas quatro ações: sem gestão do lado da procura (funcionamento normal); com uma carga alocada noutra período horário (*load shifting*); com a redução de uma carga num espaço horário onde estaria a funcionar (*load shedding*); e com armazenamento de energia. Nos três primeiros modos não é considerado que o edifício detenha capacidade de armazenamento, sendo toda a energia produzida excedente exportada. Tendo em conta as possíveis vantagens do armazenamento de energia num edifício, é adicionado um último cenário, onde toda a energia excedente é armazenada para compensar o consumo do edifício em períodos onde estaria a importar energia. É também assumido que o edifício terá capacidade de armazenar energia em qualquer período que seja necessário para que seja usada posteriormente.

Para perceber qual o impacto que as ações de gestão da procura terão no balanço energético do nZEB, são considerados três modos de operação, onde os valores de importações e exportações são sujeitos a variações. No primeiro modo de operação, é adotada uma maximização das exportações, ou seja, toda a produção renovável local é exportada, sendo o consumo total do edifício compensado através de importações da rede (Edifício Genérico 1). No segundo, é considerado um cenário intermédio, onde metade da energia gerada é exportada, sendo a restante usada para autoconsumo (Edifício Genérico 2). Por fim, o terceiro modo de operação será o extremo oposto do primeiro, ou seja, maximização de autoconsumo (Edifício Genérico 3). Nesta abordagem, toda a energia gerada localmente será usada para compensar as cargas. De notar que, para todas as perspetivas, excetuando a de armazenamento de energia, a energia excedente será usada para exportações, sendo o balanço de exportações dado pelo valor estipulado (100%, 50% e 0% de exportações) mais o excedente de energia.

O edifício considerado, tem um consumo diário de 11,49 kWh, com um pico de 1212 W (Figura 9). O diagrama diário de carga usado, foi recolhido num consumidor residencial real (dados fornecidos pelos orientadores).

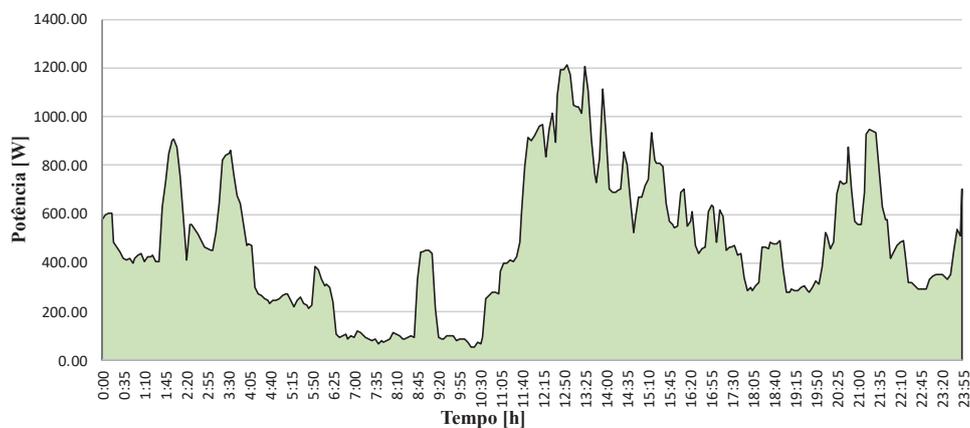


Figura 9 - Diagrama de carga diário do edifício considerado

No que diz respeito à geração local de energia renovável, foi considerado um conjunto de painéis fotovoltaicos com uma produção diária de 7,62 kWh, com um pico de 1045 W (Figura 10).

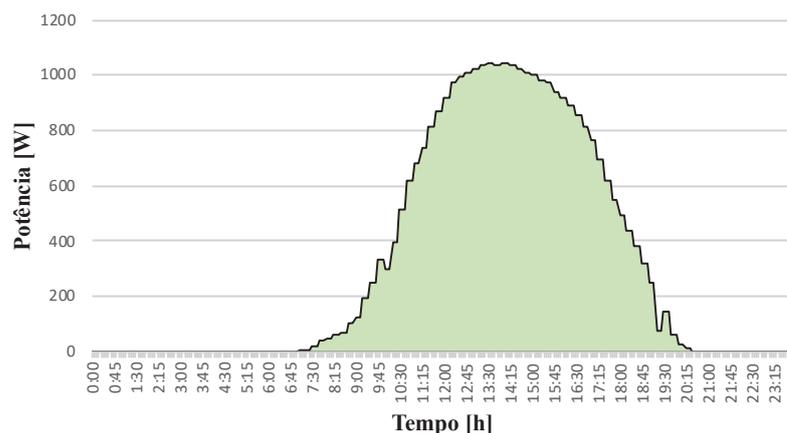


Figura 10 - Diagrama de geração local renovável considerado

Para que seja possível aplicar ações de DSM, é necessário considerar uma carga que possa ser alocada para outro período horário (*shifting*) ou mesmo parametrizada para operar com um consumo inferior ao usual (*shedding*). O aparelho usado para tal efeito foi uma máquina de lavar a roupa, com um ciclo de funcionamento de 2 horas. Consideram-se duas situações distintas: operação a 60 °C, com um consumo de 320 Wh e com um pico de 785 W; operação a 30 °C, apresentando um consumo de 211 Wh, com um pico de 641 W (Figura 11). Para a ação de *shifting*, a carga é apenas deslocada para outro período horário, porém, com a ação de *shedding*, o seu modo de operação passa de 60 °C para 30 °C, reduzindo assim o seu consumo naquele período horário.

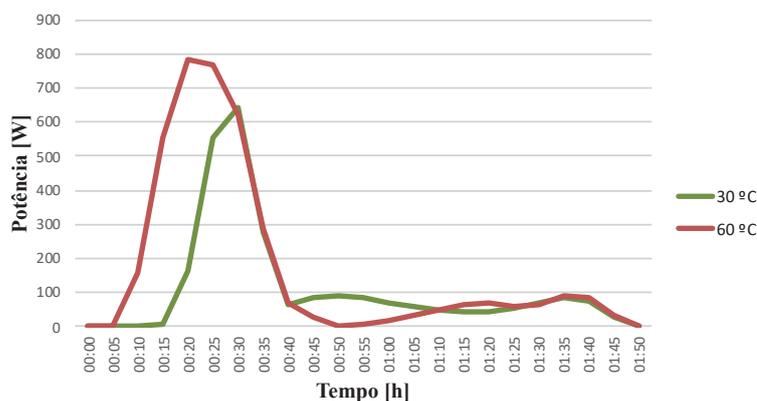


Figura 11 - Diagrama de carga máquina de lavar a roupa [1]

Tal como no capítulo anterior, são usados dois fatores de conversão correspondentes à energia incorporada das fontes de energia renovável e do edifício. Quanto ao fator de conversão respectivo às fontes de energia renovável, onde é aplicado o fator de conversão de energia primária não renovável, foi considerado ser de 10% da energia total gerada ou exportada (consoante o método de análise) [27]. No que diz respeito ao fator de conversão

de energia incorporada pelo edifício, foi considerado que o 40% do consumo total das cargas corresponde à energia incorporada do edifício [27].

No decorrer da análise, serão usados os valores finais para o balanço de ambos os métodos aplicados, em conjunto com o volume de importações e exportações. Contudo, a tabela completa, com todos os valores relevantes é apresentada no Anexo A. Os gráficos correspondentes a cada edifício genérico, sob uma determinada ação de DSM são apresentados nos Anexos B1, B2 e B3.

Sendo o balanço energético dos nZEB dado, no caso dos métodos considerados, pela diferença entre as exportações e importações, todos os valores apresentados serão tipicamente negativos. Quanto mais negativo, pior será o resultado do balanço, pois mais longe estará da neutralização de consumos. Estes valores são expectáveis num caso real, pois, tal como o nome indica, os edifícios têm necessidades quase nulas de energia, não sendo necessário ter valores positivos no seu balanço final.

No decorrer da análise são apresentadas duas tabelas (Tabela 8 e Tabela 9). Estas são constituídas pelos valores finais do balanço energético correspondente ao método em causa. Estas tabelas são acompanhadas dos valores correspondentes para importações e exportações, sendo os valores apresentados em conjunto (importações/exportações).

#### 4.1. Resultados com o método *embodied source*

Tabela 8 – Resultados obtidos com o método embodied energy

[kWh]	Embodied Source			Importações / Exportações		
	Genérico 1 Exp = Ger	Genérico 2 Exp = 1/2 Ger	Genérico 3 Exp = min	Genérico 1 Exp = Ger	Genérico 2 Exp = 1/2 Ger	Genérico 3 Exp = min
Sem DSM	-15,03	-14,66	-14,46	11,49 / 7,62	7,80 / 3,93	5,78 / 1,91
Shifting	-15,03	-14,67	-14,49	11,49 / 7,62	7,88 / 4,01	6,07 / 2,20
Shedding	-14,42	-14,05	-13,86	11,28 / 7,62	7,61 / 3,95	5,73 / 2,07
Armazenamento	-15,03	-14,65	-14,27	11,49 / 7,62	7,68 / 3,81	3,87 / 0,00
	Máx. Exportações		Máx. Autoconsumo	Máx. Exportações		Máx. Autoconsumo

Numa primeira análise aos valores obtidos, é notório que este método, ao penalizar as exportações, através da energia incorporada, terá sempre melhores resultados quanto maior o nível de autoconsumo (Tabela 8).

Começando pelo método *embodied source*, ao comparar diferentes ações de DSM para o edifício genérico 1 (Anexo B1), onde é feita uma maximização das exportações, os resultados são iguais para todas as ações de DSM, sendo este facto apenas contrariado pelo

*shedding*, que apresenta um melhor balanço final. Isto deve-se ao facto de, nessa ação de DSM haver uma redução direta de cargas do edifício, o que leva a uma menor penalização na componente de energia incorporada do edifício e menor necessidade de importações.

No edifício genérico 2 (Anexo B2), onde metade da geração será exportada, existe de facto uma grande variação de resultados, comparativamente ao edifício genérico 1, porém pouco significativas. Atendendo a que o diferencial entre exportações e importações é sempre o mesmo, com o mesmo fator de conversão para energia primária, a única diferença estará na energia incorporada das exportações. Assim sendo, quanto maior o volume de exportações, pior o resultado, pois estas são penalizadas através da energia incorporada ligada às exportações. Neste caso específico, ao fazer a ação de *shedding* ou *shifting* o edifício passa forçosamente a exportar parte da energia produzida (Anexo B2 - Edifício genérico 2 *shifting* e *shedding*). Esta diferença entre ações na componente que será exportada é a razão pela qual estas têm valores diferentes. Por esse motivo, a ação de *shifting*, piora, embora numa pequena escala, o balanço, relativamente ao mesmo edifício genérico sem ações de DSM. Independentemente das ações de DSM aplicadas, todas reduzem o valor do balanço final, comparativamente ao edifício genérico 1.

No que diz respeito ao edifício genérico 3 (Anexo B3), onde é feita uma maximização de autoconsumo, o comportamento será idêntico ao anterior. Neste caso, os resultados serão mais positivos, pois existe um menor volume de energia a ser exportada, o que se traduz numa menor penalização na energia incorporada do sistema.

Excluindo a ação de *shedding*, a ação que terá maior impacto no balanço final será o armazenamento de energia. Atendendo ao facto de que este método é penalizado nas exportações, através da energia incorporada, será sempre benéfico aumentar o seu nível de autoconsumo. Assim sendo, armazenar energia será uma alternativa com grande influência no balanço final.

O caso específico da ação de *shedding* será dependente da carga que é alterada e qual a diferença de consumos que esta terá. Neste caso, sendo uma carga com grande impacto, comparativamente ao pico do diagrama de carga, é natural que esta altere o balanço final do edifício significativamente. Tendo isso em conta, esta é a ação que apresenta os melhores resultados.

De modo geral, com a aplicação deste método não existe grande variação nos resultados, pois a energia incorporada pelo edifício é constante, bem como a diferença entre exportações e importações. Assim sendo, este método será apenas penalizado pelas

exportações feitas. Prova-se também, através da diferença entre os resultados obtidos para os edifícios genéricos 1, 2 e 3, que quanto maior o aproveitamento da energia gerada localmente para autoconsumo, melhor será o balanço final do nZEB, independentemente da ação aplicada.

## 4.2. Resultados com o método *payback*

Tabela 9 – Resultados obtidos com o método *payback*

[kWh]	Payback			Importações / Exportações		
	Genérico 1 Exp = Ger	Genérico 2 Exp = 1/2 Ger	Genérico 3 Exp = min	Genérico 1 Exp = Ger	Genérico 2 Exp = 1/2 Ger	Genérico 3 Exp = min
Sem DSM	-26,46	-20,93	-17,89	11,49 / 7,62	7,80 / 3,93	5,78 / 1,91
Shifting	-26,46	-21,04	-18,33	11,49 / 7,62	7,88 / 4,01	6,07 / 2,20
Shedding	-25,85	-20,34	-17,52	11,28 / 7,62	7,61 / 3,95	5,73 / 2,07
Armazenamento	-26,46	-20,75	-15,02	11,49 / 7,62	7,68 / 3,81	3,87 / 0,00
	Máx. Exportações		Máx. Autoconsumo	Máx. Exportações		Máx. Autoconsumo

Neste método, as exportações são penalizadas através da não inclusão de fator de conversão para energia primária nas exportações. Desse modo, será ainda mais importante diminuir as importações, pois o balanço entre exportações e importações é radicalmente alterado. Sendo o fator de conversão de importações dado por 2,5 e não usando fator de conversão nas exportações, são necessárias 2,5 unidades de exportação para compensar 1 unidade de importação. Em adição a este facto, neste método é considerada a energia incorporada do volume total de geração e não das exportações, como no método anterior. Assim sendo, no que diz respeito à energia incorporada relacionada com as fontes renováveis, não interessa qual o volume de exportações, pois este valor será constante. Tendo em conta todos estes fatores, é natural que este método apresente valores piores que o anterior, isto é, valores mais afastados da neutralidade de consumos.

Considerando os resultados apresentados na Tabela 9, é possível extrair algumas conclusões. Considerando o edifício genérico 1 (Anexo B1), à exceção do *shedding*, para todos os outros valores são iguais. Esta igualdade deve-se ao facto de em todos os casos existir a mesma energia gerada, volume de importações e volume de exportações. A ação de *shedding*, por outro lado, tal como no método anterior, apresenta valores melhores, pois uma redução direta de cargas traduz-se numa redução de importações, o que tem um grande impacto positivo neste método.

No edifício genérico 2 (Anexo B2) essa igualdade já não se verifica, pois os níveis de exportação variam consoante o excedente de energia produzida localmente de forma diferente. De facto, com 50% da produção diretamente ligada ao autoconsumo, os valores vão melhorar, pois há uma redução de importações. Tal como no método anterior, a ação de *shedding* apresenta os melhores resultados, uma vez que é feita uma redução direta de importações. Tal como no método anterior, a ação de *shifting* piora o resultado, comparativamente ao mesmo edifício genérico sem DSM. Este resultado, é justificado, mais uma vez, pelo aumento de exportações, que são forçadas ao retirar a carga de funcionamento naquele período específico.

Já no edifício genérico 3 (Anexo B3), devido à grande redução de consumos, obtêm-se resultados muito próximos do método *embodied source*. Este facto deve-se ao uso da totalidade da energia gerada para compensar as cargas ativas. Quanto maior for a coincidência entre cargas e a geração, melhor será o desempenho deste método, pois, não existindo armazenamento, existindo períodos onde o edifício será obrigado a exportar energia. Quando há incorporação de armazenamento no edifício, passam a não existir exportações, o que leva a um valor ótimo para este método. É por esse motivo que o melhor valor obtido, no método *payback*, corresponde ao edifício genérico 3 com armazenamento. Mesmo que existindo uma variação reduzida entre ações, é notória a variação entre o edifício genérico 1 e 3 para o método *payback*.

### 4.3. Comparação entre métodos

Tal como descrito anteriormente, o balanço energético do nZEB é altamente dependente da conjugação entre importações e exportações. Sendo ambos os métodos estimuladores do autoconsumo, é natural que estes obtenham piores resultados para os edifícios genéricos 1 e 2, comparativamente ao edifício genérico 3.

No que diz respeito a este estímulo do autoconsumo, é necessário ter em atenção que, quanto maior for a variação entre o edifício genérico 1 e o edifício genérico 3, maior será o estímulo ao autoconsumo. Nesse sentido, o método *payback* terá um papel muito superior ao *embodied source*. Comparando os resultados obtidos para o balanço final para os edifícios genéricos 1 e 3 sem ação de DSM, existe uma variação de 3,80% para o método *embodied source*, sendo que no método *payback* passa a existir uma variação de 32,39% (Figura 10). Mesmo obtendo valores mais afastados da neutralização de consumos, no

método *payback* existe uma maior variação percentual nos seus resultados, o que se traduz num maior incentivo ao autoconsumo e ao uso eficiente de energia.

De modo geral, a ação que mostra maiores variações com o autoconsumo é o armazenamento de energia, sendo este o que mostra maior influência nos resultados. Para ambos os métodos aplicados, existe de facto um crescimento positivo desta ação de armazenamento muito superior às outras ações.

Tabela 10 - Variação percentual entre edifício genérico 1 e 3

Edifício 1 > Edifício 3 [kWh]		
	Embodied Source	Payback
Sem DSM	-15,03 > -14,45	-26,46 > -17,89
	3,80%	32,39%
Shifting	-15,03 > -14,49	-26,46 > -18,33
	3,61%	30,74%
Shedding	-14,42 > -13,86	-25,85 > -17,52
	3,85%	32,21%
Armazenamento	-15,03 > -14,27	-26,46 > -15,02
	5,07%	43,22%

De modo geral, para os casos considerados, as ações de DSM terão impacto positivo no balanço do nZEB. Assim sendo, a integração de recursos do lado da procura torna-se mais fácil, pois o edifício não terá a sua categorização de nZEB em risco ao ter um papel ativo na gestão da rede.

## 5. Conclusão

---

Com este trabalho pretende-se estudar a interação entre um edifício nZEB em ambiente de rede inteligente, onde será necessário ter em conta que os programas de DSM poderão influenciar o balanço energético do nZEB. Com isso em mente, foi realizada uma análise crítica em relação a quais os aspetos predominantes na metodologia de avaliação, tendo estes sido posteriormente aplicados sob a forma de edifícios genéricos.

No que diz respeito à metodologia de avaliação, o aspeto que mais influencia o balanço energético de um nZEB é claramente o sistema de ponderação. Este sistema é responsável pela conversão de diversas grandezas, entre elas, importações, exportações, cargas, geração, na métrica pretendida. Tendo em conta que o balanço do nZEB se baseia muito no cálculo entre essas grandezas, é fulcral estudar quais os impactos de diferentes métodos de cálculo.

De modo geral, métodos como *site* ou mesmo *source*, mostram-se mais simples e exequíveis de alcançar. Porém, ao não existir uma mudança no seu balanço final com a alteração de nível de autoconsumo, estes métodos não apresentam estímulos ao uso eficiente de energia e ao autoconsumo. Em adição a esse facto, estes métodos não levam em linha de conta a energia incorporada do sistema, o que remete para uma perspetiva limitada sobre o total de energia envolvida no sistema. Por esse motivo, não são concordantes com o objetivo da EPBD, que é promover a eficiência energética.

O método *payback* alternativo, apresenta uma perspetiva global da energia do sistema, sendo um método onde é tido em conta a energia incorporada e estimulado também o autoconsumo. Porém, como descrito anteriormente, este método é usado na fase de projeto do edifício, sendo o seu balanço feito através do balanço entre cargas do edifício e a produção de energia local. Sendo o presente trabalho relacionado com a interação da rede com um edifício nZEB, este método mostra-se pouco interessante.

Para a análise da influência que as medidas de DSM teriam no balanço do nZEB, optou-se pelo uso de dois métodos, escolhidos pela sua relevância e uso do total de energia envolvida no sistema. Estes dois métodos, *embodied source* e *payback*, mostram que as ações aplicadas, seja DSM, vão alterar o balanço do nZEB.

Através dos resultados obtidos na simulação de um dia, com e sem ações de DSM, verifica-se que a maior influência estará no aproveitamento da energia para autoconsumo. No que diz respeito às ações aplicadas, estas terão um impacto inferior, porém positivo, na

generalidade dos casos. Tendo em conta que a ação de *shedding* reduz de forma direta o consumo do edifício, dentro das ações de DSM, será sempre uma solução favorável comparativamente à ação de *shifting*. Por outro lado, o armazenamento de energia, admitindo que terá sempre capacidade de armazenar a energia excedente produzida localmente, será o mais indicado. Esta afirmação deve-se ao facto de esta solução ser mais estável, previsível e não alterar padrões de utilização de equipamentos.

É importante ter em atenção, ao usar ações como *shedding* ou *shifting*, que ao retirar de serviço aparelhos ou mesmo reduzir consumos, o edifício pode ser obrigado a exportar a energia fornecida naquele determinado período. Esta exportação de energia excedente pode ser prejudicial à definição de nZEB, na medida em que o afasta da neutralização de consumos. Esta influência negativa no balanço vai ter um impacto correspondente ao consumo da carga em si. Aplicando estas ações a cargas de menor consumo, será muito inferior o impacto, podendo muitas das vezes não ter essa componente negativa. De facto, este será o único impacto potencialmente negativo no seu balanço, podendo em casos muito extremos prejudicar o balanço do nZEB.

Em suma, é provado através dos resultados obtidos no capítulo anterior, que as ações de DSM terão impacto no balanço final do nZEB, respondendo à questão: “Até que ponto é que a participação de um nZEB em programas de DSM em contexto de rede inteligente pode pôr em causa a sua própria definição por via da alteração do valor dos indicadores”. Na generalidade dos casos, este impacto será positivo, podendo inclusive melhorar o seu balanço. Ambos os métodos (*embodied source* e *payback*) mostraram-se adequados à interação entre nZEB e uma rede inteligente, com estímulos ao autoconsumo e ao uso eficiente de energia, o que responde à questão: “Que metodologia de avaliação impulsiona o desenvolvimento tecnológico e a redução de consumos no setor residencial”.

## 5.1. Trabalhos futuros

O presente trabalho serve como base para o estudo de edifícios nZEB integrados numa rede inteligente. Assim sendo, é sugerido de seguida um conjunto de aspetos que poderão ser explorados de modo a complementar o trabalho apresentado:

- Incorporação de um grupo de nZEB numa *microgrid*, onde estariam ligados por um ponto único à rede. Esta análise pode ser benéfica na medida em que o conjunto de edifícios passa a partilhar recursos dentro da *microgrid*, podendo alterar os padrões de exportações para a rede.
- Uma abordagem com diferentes períodos de balanço de um nZEB. É sugerido em alguns trabalhos que diferentes períodos de balanço poderão ter influência no sistema nZEB. Assim sendo, poderá ser feita uma análise focada numa variação temporal do balanço de modo a perceber até que ponto é ou não benéfico o habitual balanço anual.
- Em adição à componente elétrica, a energia térmica também poderá ser um fator a ter em conta. Nesse sentido, pode ser diferenciador uma abordagem mais ligada a um período sazonal ou mesmo mensal.
- Variação do *mix* energético ao longo do período do balanço do nZEB, através dos fatores de conversão para energia primária.



## 6. Referências

---

- [1] P. Torcellini, S. Pless, and M. Deru, “Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition, National Renewable Energy Laboratory and Department of Energy (2006),” *Contract*, pp. 275–286, 2006.
- [2] European Commission, “Impact Assessment: Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings,” *SWD(2016) 414 Final*, vol. 0381, no. 2013, pp. 1–8, 2016.
- [3] Parlamento Europeu, “Directiva 2010/31/UE (reformulação),” *J. Of. da União Eur.*, pp. 13–35, 2010.
- [4] P. E. E. Do Conselho, “Directiva 2002/91/CE,” *J. Of. das Comunidades Eur.*, no. 11, pp. 65–71, 2002.
- [5] A. S. C. Veiga, “Metodologias para a classificação de edifícios de balanço de energia nulo (NZEB) aplicadas a um edifício residencial,” pp. 1–153, 2015.
- [6] Ministério Da Economia E Da Inovação, “Decreto-Lei n.º 78/2006, Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios (SCE),” *Diário da República*, vol. 67, pp. 2–6, 2006.
- [7] T. E. C. Ministério das Obras Públicas, “Decreto-Lei n.º 79/2006,” *Diário da República, 1ª série*, no. 4 de Abril, pp. 2416–2468, 2006.
- [8] D. L. 80/2006 Regulation of the Thermal Performance of Buildings RCCTE, “Regulation of the Thermal Performance of Buildings RCCTE,” p. Série I-A, 2468-2513, 2006.
- [9] European Commission, “Directive 2010/31/EU,” *Off. J. Eur. Union*, pp. 13–35, 2010.
- [10] Parlamento Europeu e do Conselho da União Europeia, “Diretiva 2012/27/UE relativa à eficiência energética,” *J. Of. da União Eur.*, pp. 1–56, 2012.
- [11] Comissão Europeia, “Recomendação (UE) 2016/1318 Da Comissão de 29 de Julho de 2016,” no. 208, pp. 46–57, 2016.
- [12] I. Sartori, A. Napolitano, and K. Voss, “Net zero energy buildings: A consistent definition framework,” *Energy Build.*, vol. 48, pp. 220–232, 2012.
- [13] N. Javaid *et al.*, “Demand side management in nearly zero energy buildings using heuristic optimizations,” *Energies*, vol. 10, no. 8, pp. 1–29, 2017.
- [14] R. A. Lopes, J. Martins, D. Aelenei, and C. P. Lima, “A cooperative net zero energy community to improve load matching,” *Renew. Energy*, vol. 93, pp. 1–13, 2016.
- [15] D. C. Gao and Y. Sun, “A GA-based coordinated demand response control for building group level peak demand limiting with benefits to grid power balance,” *Energy Build.*, vol. 110, pp. 31–40, 2016.

- [16] European Commission, “Embodied energy | Energy.” [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/energy/en/eu-buildings-factsheets-topics-tree/embodied-energy>. [Accessed: 29-Aug-2019].
- [17] K. Peterson, P. Torcellini, and R. Grant, “A common definition for Zero Energy Buildings,” no. September, p. 22, 2015.
- [18] D. D’Agostino and L. Mazzarella, “What is a Nearly zero energy building? Overview, implementation and comparison of definitions,” *J. Build. Eng.*, vol. 21, no. September 2018, pp. 200–212, 2019.
- [19] K. Voss, I. Sartori, and R. Lollini, “Nearly-zero, Net zero and Plus Energy Buildings - How definitions & regulations affect the solutions,” no. December, pp. 23–27, 2012.
- [20] DOE, “US Department of Energy: A Common Definition for Zero Energy Buildings,” no. September, p. 22, 2015.
- [21] M. Panagiotidou and R. J. Fuller, “Progress in ZEBs-A review of definitions, policies and construction activity,” *Energy Policy*, vol. 62, pp. 196–206, 2013.
- [22] H. Lund, A. Marszal, and P. Heiselberg, “Zero energy buildings and mismatch compensation factors,” *Energy Build.*, vol. 43, no. 7, pp. 1646–1654, 2011.
- [23] International Energy Agency, “Energy Efficiency Requirements in Building Codes , Energy Efficiency Policies for New Buildings,” *IEA Inf. Pap.*, no. March, pp. 1–85, 2008.
- [24] Intelligent Energy Europe, “Zebra 2020.” [Online]. Available: <http://www.zebra-monitoring.enerdata.eu/nzeb-activities/panel-distribution.html#nzeb-definitions-by-country.html>.
- [25] J. Kurnitski, “Technical definition for nearly zero energy buildings,” *REHVA*, no. May, pp. 22–28, 2013.
- [26] I. European, E. Performance, and B. D. Brussels, “Belgian National Plan Nearly Zero Energy Buildings,” no. September, 2012.
- [27] J. S. Bourrelle, I. Andresen, and A. Gustavsen, “Energy payback: An attributional and environmentally focused approach to energy balance in net zero energy buildings,” *Energy Build.*, vol. 65, pp. 84–92, 2013.
- [28] J. Zirngibl, “Nearly Zero Energy Buildings ( nZEB ) in the CEN draft standard,” no. May, pp. 10–13, 2014.
- [29] D. D’Agostino and L. Mazzarella, “Data on energy consumption and Nearly zero energy buildings (NZEBs) in Europe,” *Data Br.*, vol. 21, pp. 2470–2474, 2018.

## 7. Anexos

---

### Legenda Anexos I:

**Autocon** – Autoconsumo;

**DSM** – Gestão do lado da procura (*Demand Side Management*);

**Exp** – Exportações;

**Ger** – Geração;

**Imp** – Importações;

**Inc** – Energia incorporada;

**Inc Edifício** – Energia incorporada do edifício;

**Máx** – Maximização;

**Min** – Minimização;

**NR** – Fator de energia primária não renovável;

**RES** – Fontes de energia renovável (*Renewable Energy Sources*).



Anexo A - Resultados para edifícios genéricos com ações de DSM

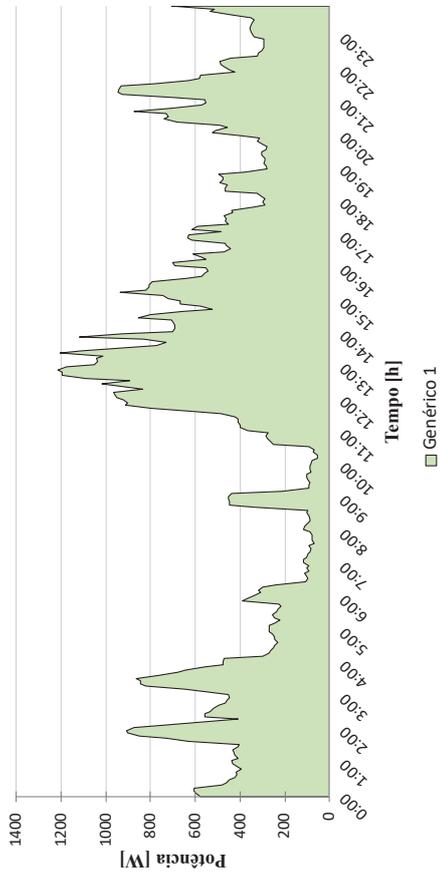
	Sem DSM			Shifting			Shedding			Armazenamento		
	Genérico 1 Exp = Ger	Genérico 2 Exp = 1/2 Ger	Genérico 3 Exp = min	Genérico 1 Exp = Ger	Genérico 2 Exp = 1/2 Ger	Genérico 3 Exp = min	Genérico 1 Exp = Ger	Genérico 2 Exp = 1/2 Ger	Genérico 3 Exp = min	Genérico 1 Exp = Ger	Genérico 2 Exp = 1/2 Ger	Genérico 3 Exp = min
[kWh]												
Importações	11,49	7,80	5,78	11,49	7,88	6,07	11,28	7,61	5,73	11,49	7,68	3,87
Exportações	7,62	3,93	1,91	7,62	4,01	2,20	7,62	3,95	2,07	7,62	3,81	0,00
Cargas	11,49	11,49	11,49	11,49	11,49	11,49	11,28	11,28	11,28	11,49	11,49	11,49
Geração	7,62	7,62	7,62	7,62	7,62	7,62	7,62	7,62	7,62	7,62	7,62	7,62
Inc. Edifício	4,60	4,60	4,60	4,60	4,60	4,60	4,51	4,51	4,51	4,60	4,60	4,60
Inc. RES (exportação)	0,76	0,39	0,19	0,76	0,40	0,22	0,76	0,40	0,21	0,76	0,38	0,00
Inc. RES (geração)	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76
<b>Embodied Source</b>	-15,03	-14,66	-14,46	-15,03	-14,67	-14,49	-14,42	-14,05	-13,86	-15,03	-14,65	-14,27
<b>Payback</b>	-26,46	-20,93	-17,89	-26,46	-21,04	-18,33	-25,85	-20,34	-17,52	-26,46	-20,75	-15,02
	Máx. Exp		Máx. Autocon									

Fatores de conversão		
NR	inc. edifício	exp = imp
0,1	0,4	2,5

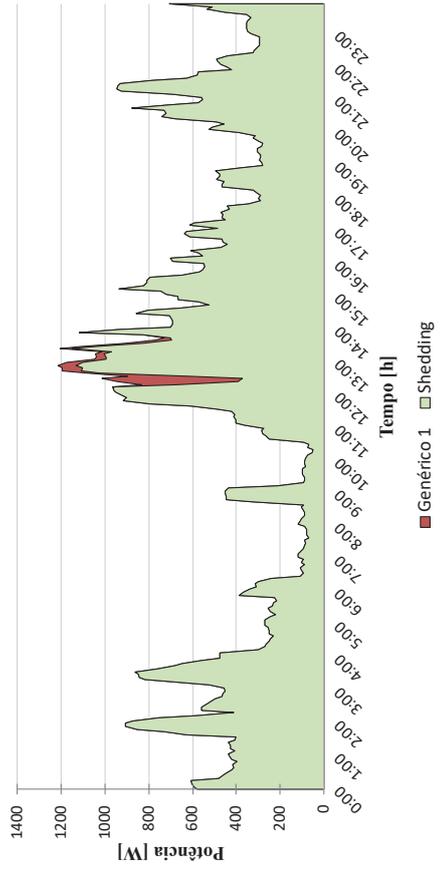


Anexo B1 – Diagramas de carga para o edifício genérico 1 com ações de DSM

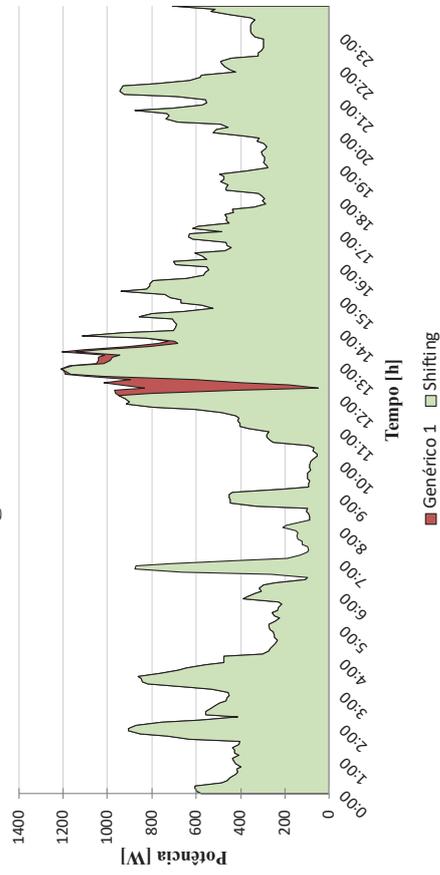
**Diagrama de Carga Edifício Genérico 1**



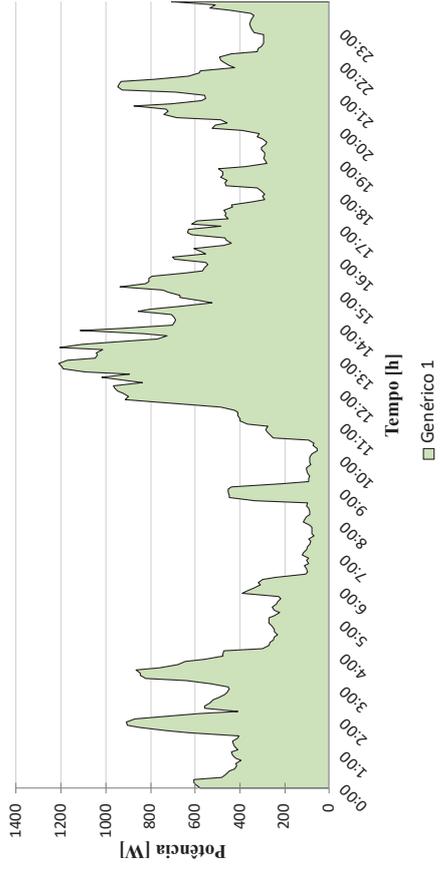
**Shedding Edifício Genérico 1**



**Shifting Edifício Genérico 1**



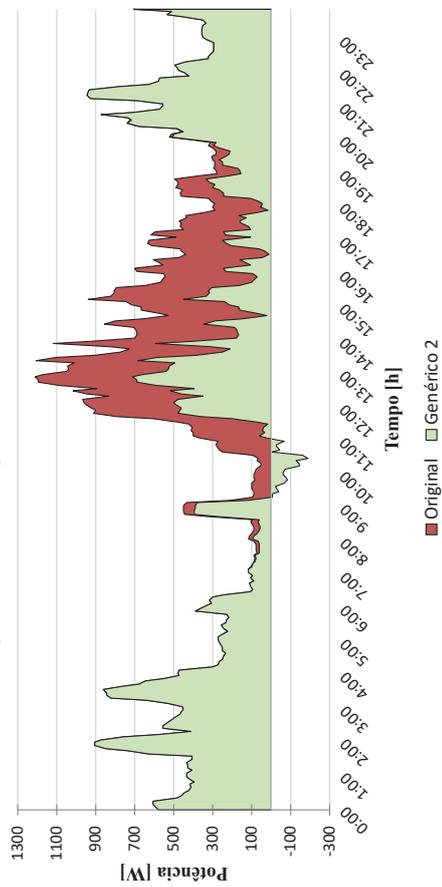
**Armazenamento Edifício Genérico 1**



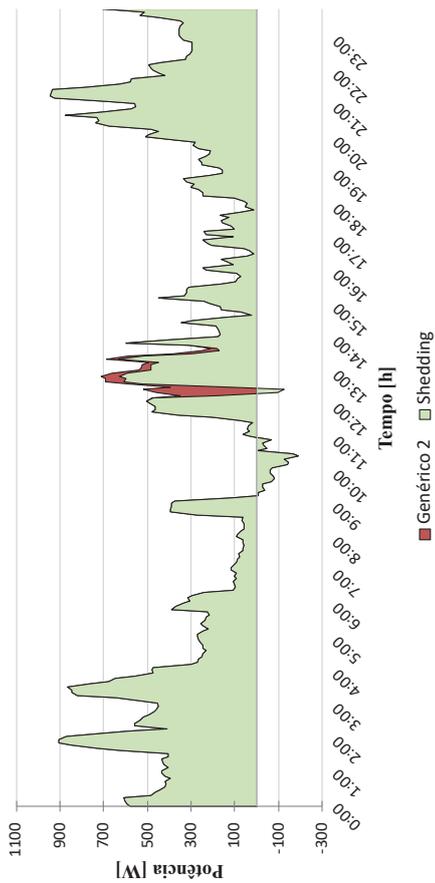


Anexo B2 – Diagramas de carga para o edifício genérico 2 com ações de DSM

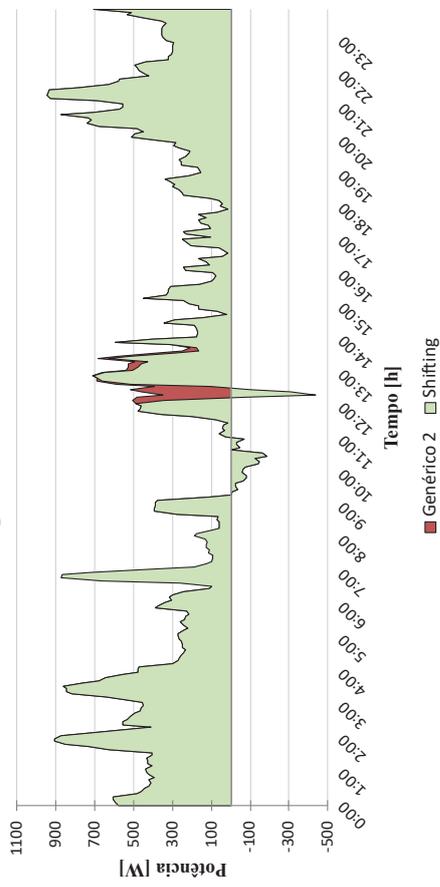
**Diagrama de Carga Edifício Genérico 2**



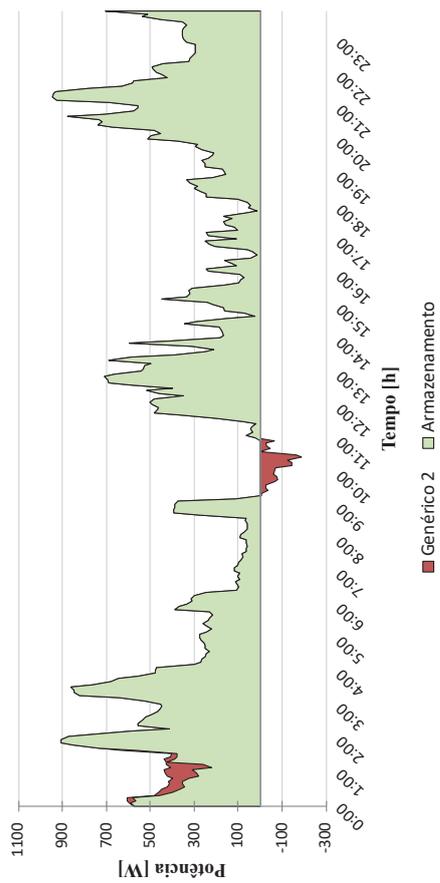
**Shedding Edifício Genérico 2**



**Shifting Edifício Genérico 2**



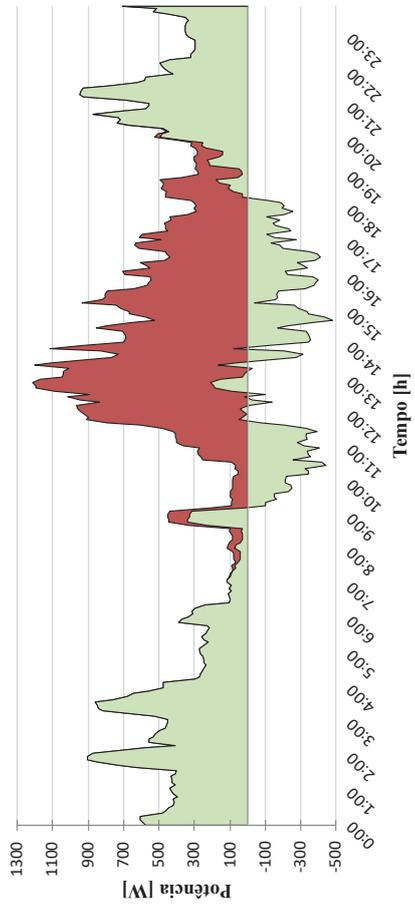
**Armazenamento Edifício Genérico 2**



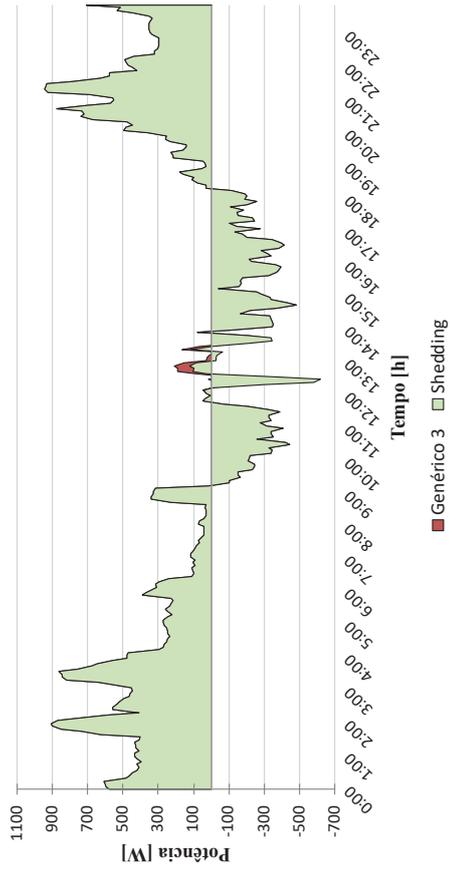


Anexo B3 – Diagramas de carga para o edifício genérico 3 com ações de DSM

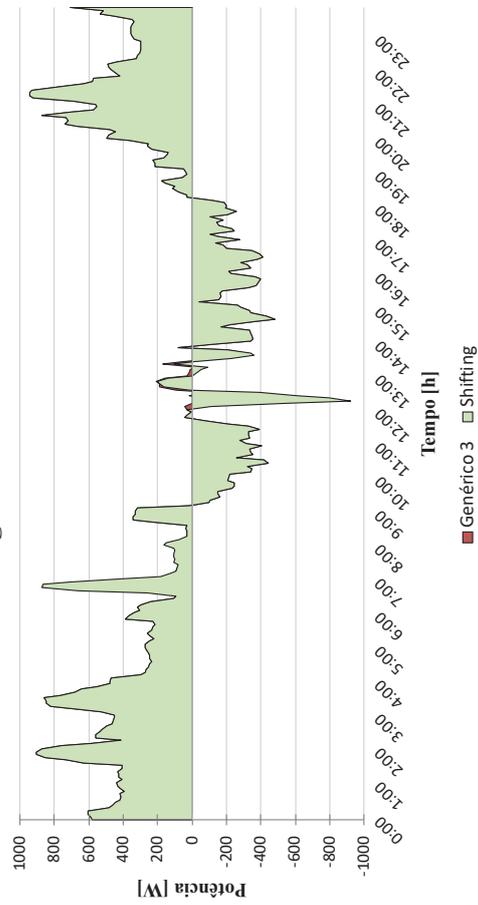
### Diagrama de Carga Edifício Genérico 3



### Shedding Edifício Genérico 3



### Shifting Edifício Genérico 3



### Armazenamento Edifício Genérico 3

