

SOLUÇÕES DE CLIMATIZAÇÃO APLICÁVEIS EM EDIFICAÇÕES
DE BALANÇO ENERGÉTICO NULO: UMA VISÃO GERAL

Amanda Oliveira de Moura – amandaoliveira2827@gmail.com

Michelle Míriam Vargas Vieira – michelle.miriam15@gmail.com

João Manoel Dias Pimenta – pimenta@unb.br

Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica

S1 - Sistemas de Ar-Condicionado, Ventilação e Aquecimento

Resumo. Este artigo apresenta uma análise abrangente das edificações de balanço energético nulo (ZEB) já consolidadas, considerando diversas regiões climáticas, bem como as principais estratégias adotadas para climatização nessas construções. Uma investigação foi conduzida, abrangendo 41 edificações, sendo estas analisadas conforme as zonas climáticas definidas pelo adendo da ANSI/ASHRAE Standard 169-2020. Além disso, foram examinados o tipo de geração de energia, os dados de consumo e geração em kWh/m²-ano e, de maneira crucial, as soluções de climatização ativas mais frequentemente empregadas. Entre as soluções convencionais de climatização ativa, observou-se uma preferência predominante por sistemas de Volume de Refrigerante Variável (VRV) e Central de Água Gelada (CAG). Adicionalmente, constatou-se que soluções complementares, tais como Sistemas de Ar Exterior Dedicados (DOAS), trocadores de calor geotérmicos, sistemas com resfriamento radiante, recuperadores de calor e ventiladores de alta performance, são recorrentemente implementadas. Por fim, uma breve recomendação é apresentada, sugerindo as tecnologias de climatização com maior potencial para edificações ZEB a serem combinadas, de acordo com a região climática, visando maximizar a eficiência energética.

Palavras-chave: ZEB, Balanço de energia nulo, AVAC, Eficiência Energética.

1. INTRODUÇÃO

Desde a Primeira Revolução Industrial no século XVIII, a humanidade testemunhou uma ascensão sem precedentes, impulsionada pelos grandes avanços tecnológicos. Entretanto, esse progresso veio acompanhado de impactos ambientais significativos, como o aumento exponencial da demanda energética e a emissão desenfreada de gases de efeito estufa. Para lidar com esses desafios, foram estabelecidos acordos internacionais, como o Protocolo de Montreal e o Protocolo de Kyoto, com o objetivo de reduzir as emissões e melhorar a eficiência energética (Protocolo de Montreal, 1989; Protocolo de Kyoto, 1997). Em resposta a essas preocupações, a Organização das Nações Unidas (ONU) lançou os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) em 2015, delineando metas ambiciosas, incluindo a construção de infraestruturas resilientes e a promoção da eficiência energética (ONU, 2015).

Nesse sentido, as edificações de balanço energético zero (ZEB) emergem como uma alternativa promissora. Os edifícios concebidos dentro do conceito ZEB são projetados para terem alta eficiência energética, com o objetivo de equilibrar o consumo de energia com a geração de energia renovável. Essas construções são fundamentais para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e promover a sustentabilidade no setor da construção civil (Jaysawal et al., 2022).

No contexto brasileiro, emergem diversos programas de incentivo à construção de ZEBs, como o programa de etiquetagem PBE Edifica, incentivos fiscais, linhas de financiamento promovidos pela Caixa Econômica Federal e o Programa Nacional de Conservação da Energia Elétrica (Procel). O Procel, instituído em 1985 pelo Governo Federal, visa promover a eficiência energética e reduzir os impactos ambientais por meio de ações em diversas áreas (Procel, 2013). Considerando que as edificações representam cerca de metade do consumo total de energia elétrica no Brasil (EPE, 2020), a busca por soluções inovadoras e sustentáveis na construção civil é essencial para alcançar as metas de eficiência energética.

A Eletrobras, por meio do Procel, visa impulsionar a construção de edifícios *Near Zero Energy Buildings* (NZEB) no Brasil, promovendo uma matriz mais sustentável no setor de edificações. Em 2020, foi lançado um edital que premiava quatro projetos de edificações energeticamente eficientes com um milhão de reais cada para sua construção. Dentre vários projetos inscritos, foram selecionados quatro vencedores, incluindo um projeto da Universidade de Brasília, denominado LabZero. Este edifício é um modelo de coworking que se destaca pelo uso de conceitos de arquitetura bioclimática e engenharia, refletindo a preocupação com critérios de sustentabilidade e eficiência energética. A expectativa é que esses projetos sirvam de referência para o setor de construção civil, encorajando a adoção de construções sustentáveis em diferentes regiões e condições climáticas do país (Procel Edifica, 2019). No contexto atual brasileiro há uma defasagem em relação a outras nações no que tange à construção de edifícios ZEB, pois a sua implementação está em fase inicial, o que evidencia um vasto potencial para expansão futura, desenvolvimento de pesquisa e avanços tecnológicos.

Tendo em vista que um dos maiores consumidores de energia em edificações são os sistemas de AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado), ao adotar tecnologias avançadas para climatização e ventilação, os

ZEBs podem maximizar a eficiência energética e reduzir significativamente as demandas de energia (Feng et al., 2019). Essas soluções não apenas contribuem para a redução dos custos operacionais, mas também para a consecução dos objetivos de sustentabilidade e eficiência energética das edificações ZEB. Portanto, a busca por soluções de AVAC de alta eficiência é fundamental para promover edificações mais sustentáveis e eficientes energeticamente, alinhadas com os objetivos de conservação de energia e redução das emissões de carbono (ASHRAE, 2021).

O presente trabalho tem como objetivo realizar uma análise das edificações com balanço energético nulo já consolidadas ao redor do mundo, bem como examinar as soluções de climatização ativa mais amplamente adotadas, visando compreender, estruturar os dados e observar os padrões das construções ZEB.

2. ASPECTOS GERAIS E LEVANTAMENTO DE EDIFICAÇÕES ZEB

A busca por práticas construtivas mais sustentáveis tem gerado um aumento significativo no interesse pela eficiência energética em edifícios. Diferentes categorias, como Edifícios de Energia Zero (ZEB), Edifícios de Quase Energia Zero (NZEB) e Edifícios de Energia Positiva (PEB), foram desenvolvidas para quantificar e orientar os esforços em direção a edificações mais autossuficientes do ponto de vista energético.

Os ZEBs representam um marco ambicioso nessa busca, produzindo a mesma quantidade de energia que consomem ao longo de um ano, exigindo uma cuidadosa integração de tecnologias renováveis para compensar o consumo de energia do edifício (*EUROPEAN PARLIAMENT AND DIRECTORATE GENERAL*, 2021). Já os NZEBs visam a significativa redução do consumo de energia, envolvendo práticas eficientes e a incorporação de fontes renováveis para atender à maior parte das necessidades energéticas, conforme estabelecido pela Diretiva Europeia 2010/31/ISO (*EUROPEAN PARLIAMENT AND DIRECTORATE-GENERAL*, 2021). Por fim, os PEBs representam uma evolução adicional, gerando um excedente líquido de energia e contribuindo para a rede elétrica, conforme definido pela Norma Internacional ISO 52000-1 (ISO 52000-1).

Considerando os inúmeros estudos sobre construções com alta eficiência energética e baixo impacto ambiental, realizou-se um levantamento de 41 edificações consolidadas como ZEBs para averiguar suas semelhanças, diferenças e as soluções de AVAC mais adotadas. Para organizar a análise, foram definidos critérios de classificação: zonas climáticas, geração de energia renovável e ano de inauguração. Além disso, foram detalhadas as diferentes soluções de climatização, conforme mostrado na Tab. 1.

As zonas climáticas das edificações foram especificadas com base na classificação alfanumérica do adendo da ANSI/ASHRAE Standard 169-2020: *Climatic Data for Building Design Standards*. As zonas são definidas pela zona térmica de cada local, usando os conceitos de *heating* (HDD) e *cooling* (CDD) *degree-days*, de acordo com a necessidade de aquecimento ou resfriamento em relação à temperatura média local. Outro fator considera as temperaturas médias e os dados anuais de umidade. O critério de geração de energia renovável abrange hídrica, solar, eólica, geotérmica ou biomassa. A pesquisa também forneceu dados anuais de energia gerada e consumida das edificações escolhidas. As construções foram classificadas pelo ano de inauguração ou reforma.

Tabela 1. Levantamento das edificações de balanço de energia nulo.

| Edificação | Localização | Zona Clim. | Ano de Cons. | Cons. anual (kWh/m ²) | Ger. anual (kWh/m ²) | Tecnologias AVAC |
|-----------------------------------|-------------------------|------------|--------------|-----------------------------------|----------------------------------|--|
| Alpine Branch Library | Alpine, EUA | 6B | 2016 | 13 | 18,83 | VRV e ERV. (ALPINE..., c2022) |
| American Samoa EPA Office | Utulei, Samoa Americana | 0A | 2017 | 100,3 | 103,39 | VRV. (AMERICAN..., c2002) |
| Bullitt Center | Seattle, EUA | 4C | 2013 | 16 | 47,92 | GSHP, RFH e ERV. (BULLITT..., c2013) |
| CasaZeroEnergy House | Udine, Itália | 4A | 2010 | 17 | 111,06 | GSHP e RFH. (FRATTARI, 2013) |
| Childcare Centre Cologno Monzese | Milão, Itália | 4A | 2010 | 19,6 | - | GSHP, ERV e RFH. (ERHORN e ERHORN-KLUTTIG, 2020) |
| Creche Municipal Hassis | Santa Catarina, Brasil | 2A | 2015 | - | 23,96 | Split. |
| Darla Moore School of Business | Columbia, EUA | 3A | 2015 | 67 | - | CAG, DOAS e CB. (SCHOOL..., 2015) |
| DPR Construction Phoenix Regional | Phoenix, EUA | 2B | 2011 | | 93,26 | VAP. (DPR..., c2022) |
| ÉcoTerra Home | Quebec, Canada | 6A | 2008 | 56 | 120 | GSHP e ERV. (NOGUCHI <i>et al</i> , 2008) |
| ENERPOS | Reunion Island, França | 2A | 2008 | 14,4 | 97,48 | VRV e VAP. (FRANCO <i>et al.</i> , 2012) |

| | | | | | | |
|---|------------------------------|----|------|-------|--------|--|
| Frydenhaug Skole | Drammen, Noruega | 6A | 2019 | 37 | - | VRV, GSHP e ERV. (ERHORN e ERHORN- KLUTTIG, 2020) |
| Hadera Kindergartens | Hadera, Israel | 3A | 2016 | 15,9 | 20,82 | Ar-condicionado inverter e DOAS. (HADERA..., c2022) |
| Hawaii Gateway Energy Center | Hawaii, EUA | 1A | 2005 | 43,1 | 47,4 | GSHP e RFH. (ROBERTS, c2009) |
| Indira Paryavaran Bhawan Ministry of Environment and Forest | New Delhi, Índia | 1B | 2013 | 45 | 45,54 | CAG, CB e GSHP. (SINGH <i>et al.</i> , 2019) |
| La Jolla Commons | San Diego, EUA | 3B | 2014 | - | - | CAG. (SHEHADI, 2020) |
| Lakeline Learning Center | Austin, EUA | 2A | | 39,69 | 39,8 | VAV, ERV e VAP. (LAKELINE..., c2022) |
| Lombardo Welcome Center | Pennsylvania, EUA | 4A | 2018 | 79,2 | 150,73 | GSHP, ERV e DOAS. (ZERO..., c2022) |
| Meridian Building | Wellington, Nova Zelândia | 3A | 2007 | 97,8 | 97,8 | CAG, CB e ERV. (MARRIAGE, 2017) |
| Omega Center for Sustainable Living | Rhinebeck, EUA | 4A | 2009 | 64 | 79,81 | GSHP. (THE AMERICAN..., c2024) |
| Pantin Primary School | Pantin, França | 4A | 2010 | 27 | 32,4 | GSHP. (LENOIR <i>et al.</i> , 2011) |
| Pearl River Tower | Guangzhou, China | 2A | 2013 | | - | CAG, DOAS, ERV e CB. (TOMLINSON <i>et al.</i> , 2014) |
| Petinelli Curitiba | Curitiba, Brasil | 3A | 2014 | 25 | 48,18 | VRV. (PETINELLI..., 2018) |
| PNC Net-Zero Branch | Ft. Lauderdale, EUA | 1A | 2013 | - | 191,87 | VRV. (THIBEAU, 2013) |
| Power House Drøbak Montessori school | Drøbak, Noruega | 6A | 2018 | - | 33,89 | CAG e GSHP. (POWERHOUSE..., c2024) |
| Powerhouse Brattørkaia | Trondheim, Noruega | 6A | 2019 | 22,14 | 25,56 | ERV. (USINA..., [s.d.]) |
| Powerhouse Kjørbo | Oslo, Noruega | 6A | 2014 | 20 | 40,66 | CAG e GSHP. (VITO, [s.d.]) |
| Powerhouse Telemark | Porsgrunn, Noruega | 6A | 2020 | 25,9 | 29,76 | VAV, GSHP e ERV. (TAPPER, 2019) |
| Primary School of Laion | Bolzano, Itália | 4A | 2006 | 10 | 24,54 | GSHP e ERV. (TROI <i>et al.</i> , 2009) |
| School of Design and Environment 4 (SDE4) | Singapura | 0A | 2019 | 55,36 | 72,12 | VAP. (NET-ZERO..., [s.d.]) |
| Sede RAC Engenharia | Curitiba, Brasil | 3A | 2017 | 27,4 | 28,01 | GSHP. (SEDE..., 2018) |
| Solar XXI | Lisboa, Portugal | 3A | 2006 | 24 | 25,33 | GSHP |
| Solarsiedlung am Schlierberg | Freiburg, Alemanha | 4A | 2008 | 21 | 54,63 | ERV. (HEINZE e VOSS, 2009) |
| Suncoast Credit Union - Bushnell Service Center | Bushnell, EUA | 2A | 2015 | 21,5 | 47,19 | Split, GSHP. |
| The Edge | Amsterdam, Holanda | 4A | 2015 | 24,5 | 25 | GSHP. (THE EDGE, [s.d.]) |
| The Floating Office Rotterdam | Rotterdam, Holanda | 4A | 2021 | 39,23 | 42,78 | GSHP e ERV. (FLOATING..., [s.d.]) |
| The Joyce Centre for Partnership & Innovation | Hamilton, Canadá | 5A | 2018 | 42 | 74,62 | VRV, GSHP. (MOHAWK..., 2018) |
| The Research Support Facility | Golden, EUA | 5B | 2010 | 104 | 110 | DOAS, ERV, RFH. (USDOE, [s.d.]) |
| The Unisphere | Maryland, EUA | 4A | 2018 | - | - | GSHP. (USGBC, 2020) |
| Tilal Al Ghaf Pavilion | Tilal Al Ghaf, Dubai | 0B | 2020 | 310,4 | 843,27 | VRV, ERV. (TILAL..., c2022) |

| | | | | | | |
|----------------------------------|------------------|----|------|-------|--------|---------------------------|
| West-MEC SW Campus Building X | Buckeye, EUA | 1B | 2018 | 120,9 | 130,15 | ERV. (WEST-MEC..., c2022) |
| Zero Carbon Building | Hong Kong, China | 2A | 2012 | - | 151,32 | VAP. (ARCHDAILY, [s.d.]) |

Legenda:

CAG: Central de Água Gelada

CB: *Chilled Beams*

DOAS: *Dedicated Outdoor Air System*

ERV: *Energy Recovery Ventilator*

GSHP: *Ground Source Heat Pump*

VAV: Variable Air Volume

VAP: Ventilador de Alta Performance

VRV: Volume de Refrigerante Variável

RFH: *Radiant Floor Heating*

Em relação às zonas climáticas, existem edificações construídas em diferentes climas ao redor do mundo, mas a maioria está em zonas de clima temperado ou quente. As zonas com mais edificações são o clima temperado úmido (10 edifícios), seguidas pelo clima quente e úmido e o clima frio e úmido (ambos com 6 edifícios). Embora as características climáticas influenciem as tecnologias adotadas, não há correlação direta com a quantidade de ZEBs em uma região. O número de projetos de ZEBs está mais relacionado ao contexto socioeconômico e aos investimentos em pesquisas. No cenário brasileiro, apesar das diversas iniciativas para reduzir o impacto ambiental, há uma escassez de edificações ZEBs. A maioria dos projetos está em estágios de desenvolvimento preliminares ou ainda não possuem validação como edificações com balanço de energia nulo.

Quanto à geração de energia, mais de 80% das edificações utilizam energia solar, principalmente com painéis fotovoltaicos. Embora algumas também utilizem geotérmica, biocombustível, eólica e células a combustível, poucas as utilizam como fontes principais, e nenhuma utiliza energia hídrica.

Em uma abordagem quantitativa, com os dados energéticos, juntamente com a área ocupada das construções, foi possível construir o gráfico da Fig. 1 com os valores de geração de energia e consumo anuais por metro quadrado para a maioria das edificações.

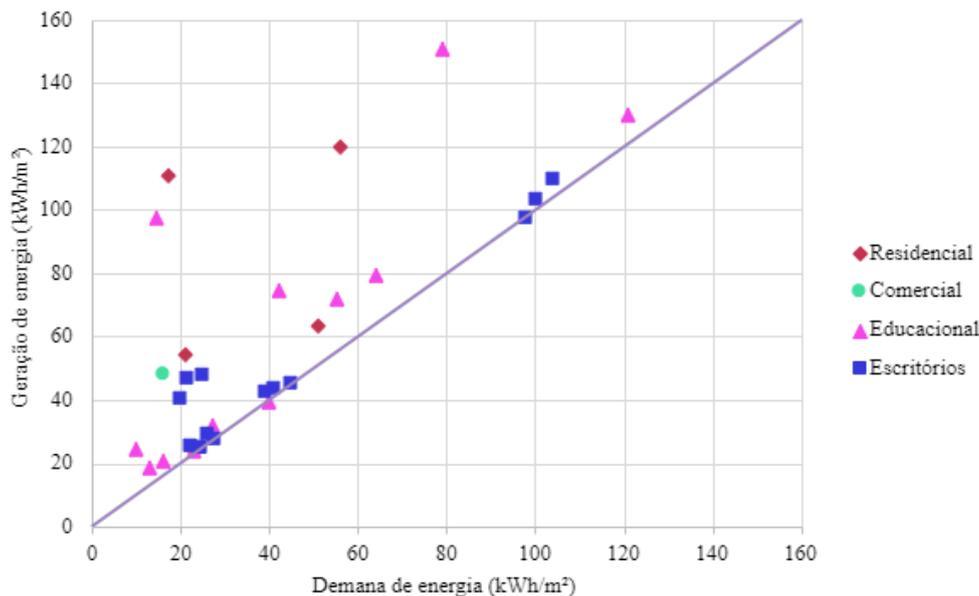


Figura 1. Gráfico de geração de energia x demanda energética.

Referente ao ano de inauguração, verificou-se que os projetos de ZEBs começaram a ser implementados com mais notoriedade a partir da década de 2010, apesar do conceito de balanço de energia nulo ser teorizado nas décadas de 1970 e 1980, com pesquisas desde a virada do século XX.

3. SOLUÇÕES DE AVAC ADEQUADAS PARA EDIFÍCIOS ZEB

Para a construção de um ZEB existem diversas tecnologias e soluções de climatização disponíveis no mercado que visam reduzir ao máximo o seu consumo energético, sem diminuir o conforto dos ocupantes. Dentre as edificações selecionadas para o levantamento, a maioria apresenta projetos que utiliza elementos arquitetônicos para controlar as temperaturas e a qualidade do ar, minimizando assim o uso de soluções de climatização ativa. É comum a aplicação de isolantes térmicos nas paredes e teto dos prédios; instalação de janelas e persianas para ter um maior aproveitamento da ventilação natural cruzada e do efeito chaminé (*Stack effect*); espaços de área verde (telhados verdes); e chaminés solares.

Ademais, os estudos de caso evidenciaram que os edifícios ZEBs são quase sempre equipados com um sistema AVAC avançado e estratégias de ventilação mecânica energeticamente eficientes. Por meio da análise do levantamento realizado, observou-se que as soluções convencionais prevalentes foram o sistema VRV (Volume de Refrigerante Variável) e CAG (Central de Água Gelada), além disso, foram implementadas diversas tecnologias complementares para otimizar a eficiência energética, tais como ERV (*Energy Recovery Ventilator*), resfriamento radiante, DOAS (*Dedicated Outdoor Air System*), ventiladores e trocadores de calor geotérmicos. A distribuição quantitativa dessas tecnologias entre os edifícios pesquisados está detalhada na Tab. 2.

Tabela 2. Distribuição quantitativa das tecnologias de AVAC mais utilizadas.

| Tecnologias mais usadas | Números de prédios |
|------------------------------|--------------------|
| VRV | 8 |
| CAG | 7 |
| Trocador de calor geotérmico | 19 |
| Resfriamento Radiante | 4 |
| DOAS | 5 |
| ERV | 17 |
| Ventiladores | 5 |

3.1. Volume de Refrigerante Variável (VRV)

A utilização de sistemas VRV fornece excelente desempenho e controle de temperatura por zonas, resultando em conforto térmico para os ocupantes (Roth et al., 2002). Segundo um estudo realizado por Interact (2002, apud Roth et al., 2002), a economia de energia obtida em edificações brasileiras equipadas com sistemas VRV é alta em regiões de clima moderado no Brasil, variando de cerca de 30% no verão e mais de 60% no inverno se comparado com um sistema convencional VAV. Essas economias parecem excepcionalmente altas e são atribuídas à alta eficiência em carga parcial do sistema VRV operando em um clima moderado.

Entretanto, a sua eficiência depende de maneira significativa da aplicação específica, dessa forma é difícil fazer afirmações definitivas e gerais sobre o tema. No levantamento foram encontrados diversos casos em que este sistema foi aplicado combinado com recuperadores de calor e com bombas de calor geotérmicas.

3.2. Central de Água Gelada (CAG)

As centrais de água gelada também são implementadas em algumas edificações do levantamento, sendo que os projetos variam entre *chillers* de condensação a ar, *chillers* de condensação à água e, em um dos casos, um *chiller brine-to-water*. Esses sistemas são eficientes, capazes de suprir a necessidade de climatização de espaços amplos com temperaturas uniformes com uma redução de energia considerável ao serem comparados com sistemas Multi Split. Esses são muito utilizados em grandes edifícios comerciais, data centers e instalações industriais. Quando comparados com os sistemas VRV, apresentam um menor custo inicial com equipamento, possuem um maior COP (Coeficiente de Performance) e funcionam melhor em edificações que precisam manter a temperatura interna constante. Entretanto, os sistemas VRV são mais flexíveis e podem ser facilmente integrados aos sistemas de gerenciamento dos edifícios. A escolha entre os sistemas depende dos objetivos do projeto e de suas limitações. (ENTERPRISE, 2020)

Nos projetos de edificações ZEB, as CAG são combinadas com outras soluções para maior eficiência e redução do gasto energético. O *Pearl River Tower* (Tomlinson et al., 2014). apresenta um projeto com um chiller de condensação à água juntamente com um sistema de resfriamento radiante, insuflamento pelo piso, DOAS e ERV. Todas essas tecnologias são voltadas para reduzir ao máximo o consumo energético, sem prejudicar o conforto térmico e ainda garantir a qualidade do ar interior. Outro exemplo da aplicação de uma CAG é o *Meridian Building* que também apresenta um sistema de resfriamento radiante e ERV, porém nesse caso o *chiller* é de condensação a ar.

3.3. Sistemas de Ar Exterior Dedicados

Os sistemas de ar exterior dedicados ou *dedicated outdoor air system* (DOAS) para o tratamento do ar estão presentes em diversas edificações do levantamento realizado e são comumente combinados com rodas de recuperação de energia, com resfriamento radiante ou ambos. De acordo com estudo realizado por Roth et al. (2002), esta abordagem para gerenciar o ar de reposição da ventilação tem sido objeto de significativa atenção nos últimos anos. O ímpeto por essa atenção tem sido o crescente reconhecimento das penalidades e desafios associados ao cumprimento dos requisitos da Norma ASHRAE 62 (Ventilação para Qualidade do Ar Interno Aceitável) em todo o espaço condicionado de edifícios comerciais, com ênfase no controle efetivo da umidade, especialmente no contexto de abordagens energeticamente eficientes, como o volume de ar variável.

Análises da TIAX usando dados de edifícios de escritórios com sistemas VAV mostram que, tipicamente, 50 a 60% da carga de aquecimento do espaço é devido ao aquecimento do ar externo. O DOAS permite que o ar externo seja reduzido em aproximadamente 20%, resultando em economias de energia de aquecimento do espaço na ordem de 10% (Roth et al., 2002).

A integração de Sistemas de Ar Exterior Dedicados (DOAS) e sistemas de resfriamento radiante fornece eficiência energética significativa tanto o aquecimento quanto o resfriamento dos espaços. Para o aquecimento, a economia de

energia varia entre 8 e 12%, já para o resfriamento do espaço, as economias de energia estão na faixa de 15-20%, isso ocorre pois o ar externo corresponde a cerca de 25% da carga de resfriamento do ambiente e a redução de 20% dessa carga ocasiona no aumento de aproximadamente 20% no coeficiente de desempenho (COP), isso ocorre por causa da elevação de 6.11°C na temperatura do evaporador, são fatores críticos para essas economias (Mumma S.A., 2001 apud Roth et al., 2002).

3.4. Trocador de Calor Geotérmico

Os casos estudados evidenciam a ampla adoção de bombas de calor geotérmicas (GSHP) como uma solução de AVAC de alta eficiência, sendo utilizadas em 19 dos edifícios analisados. Os trocadores de calor foram encontrados em diversas configurações e frequentemente combinados com outras soluções de alta eficiência como ERV e resfriamento ou aquecimento radiante. No edifício *Zero Energy House*, a bomba de calor água-ar foi projetada para se conectar ao sistema de aquecimento por piso radiante (radiant floor heating) (Esbensen, 1977). Outro caso de destaque é o Hawaii Gateway Energy Center, que utiliza GSHP para produzir água gelada e emprega água do mar fria a 7°C para resfriar o ar externo a 22°C (Feng et al., 2016), trata-se de uma tecnologia de climatização de grande potencial, principalmente em regiões costeiras de clima quente, além de proporcionar significativa economia de energia em comparação com sistemas convencionais e menores emissões de gases de efeito estufa (Elsafty, 2010).

As bombas de calor geotérmicas (GSHP) são amplamente utilizadas em regiões frias para o aquecimento de edifícios. Análises climáticas realizadas para residências em Atlanta e Chicago destacaram os significativos benefícios proporcionados pela GSHP. Em particular, uma GSHP com um COP aproximadamente igual a 4,4 foi capaz de reduzir o consumo de energia primária em 55% e 39% em Atlanta e Chicago, respectivamente (Kavanaugh, 1995). Entretanto, estudos como o de Kavanaugh (1995) destacam a importância das condições locais do solo na determinação da eficiência e custo do sistema. Essas informações são essenciais para avaliar o potencial das GSHP em diferentes contextos climáticos e geográficos.

Bombas de calor de fonte dupla (DSHP) possuem grande potencial de economia de energia em locais de clima moderado. Simulações demonstraram que um sistema DSHP de 3 toneladas, com um COP de 4,98 aplicado na Geórgia possui eficiência energética significativas. Durante a temporada de aquecimento, a economia foi estimada em cerca de 15%, enquanto na temporada de resfriamento, a economia alcançando foi de aproximadamente 31% (Femp, 2000).

3.5. Resfriamento Radiante

Algumas edificações adotam a estratégia de resfriamento radiante em conjunto com as CAGs, utilizam pisos radiantes e, mais frequentemente, vigas frias como componentes do seu sistema de climatização. Segundo Roth et al. (2002), as vigas frias (*chilled beams*) apresentam considerável potencial de economia de energia. Por operarem em temperaturas elevadas, para evitar a condensação e acúmulo de umidade na superfície do teto, possibilitam um aumento na temperatura de evaporação, resultando em uma melhoria no COP do sistema. Além disso, elas contribuem significativamente para a redução do consumo energético destinado à ventilação, uma vez que constituem o principal meio de resfriamento do ambiente, tornando-se necessário apenas o controle da renovação do ar. As vigas frias também oferecem benefícios não energéticos, melhorando o conforto térmico dos ocupantes, operando com baixo nível de ruído e exigindo pouca manutenção.

Em contrapartida, sua aplicação é limitada, uma vez que as vigas frias, pelas suas dimensões, demanda algum espaço para instalação, nem sempre disponível e ainda requerem a instalação de um circuito hidráulico de água gelada. Outro desafio pode ser o excesso de umidade em edificações localizadas em climas mais úmidos, não sendo recomendado para edifícios com elevada carga latente, como academias, por exemplo. No entanto, conforme destacado por Mumma (2001 apud Roth et al., 2002), essas questões podem ser resolvidas com a utilização de um DOAS. Ao combinar vigas frias com esses sistemas, é possível reduzir o consumo energético de climatização entre 25 e 30%, aproximadamente, em comparação com os sistemas VAV convencionais.

Em casos como a edificação *CasaZeroEnergy* em Udine (Itália), o piso radiante é integrado ao sistema do trocador de calor geotérmico horizontal e é capaz de resfriar ou aquecer o ambiente dependendo das condições climáticas locais. No inverno, a água que circula pelo piso atinge temperaturas de 33°C - 36°C, o que permite níveis de temperatura confortáveis para os ocupantes do ambiente. E, no verão, a temperatura do piso chega a aproximadamente 20°C o que resulta na redução da temperatura do ambiente dentro dos parâmetros de conforto térmico (Frattari, 2013). Já os edifícios *Indira Paryavaran Bhawan*, *Meridian Building* e *Pearl River Tower*, por serem localizados em regiões de climas mais quentes, utilizam dessa estratégia de resfriamento radiante apenas para resfriar os ambientes por meio de vigas frias integradas a um sistema com CAG juntamente com DOAS e/ou ERVs.

3.6. Recuperadores de calor

Os recuperadores de calor foram identificados como uma solução frequentemente utilizada no levantamento realizado, sendo encontrados em 17 edifícios analisados. Eles podem reduzir as cargas máximas de aquecimento e resfriamento em até um terço, porém esses valores dependem muito do clima local e dos requisitos de ar externo. Uma análise bin para um edifício de escritórios na cidade de Nova York mostrou que uma unidade de ar-condicionado de telhado equipada com uma roda de entálpica reduziu o consumo anual de energia de aquecimento e resfriamento da edificação em 35% (ADL, 2000 apud Roth et al., 2002).

Um estudo da TIAX acerca de um escritório no Estados Unidos, com sistema VA e uma roda de entalpia evidenciou que as economias anuais de energia devido ao sistema de condicionamento de ar equivalem a 35%, levando em consideração as perdas de carga. Um sistema de recuperação de calor em uma mesma aplicação (pequeno escritório em Nova York), porém com diferentes implementações, alcançou economia anual de energia variando de 35 a 49%.

3.7. Ventiladores de Alta Performance

Ventiladores de teto de alta performance também fazem parte das alternativas incorporadas nos sistemas de climatização. Edificações como DPR *Construction Phoenix Regional Office*, ENERPOS, *Lakeline Learning Center* e *Zero Carbon Building* contam com ventiladores de alto volume e baixa velocidade (HVLS) responsáveis por aumentar o fluxo de ar e minimizar o uso do ar-condicionado. O projeto do Zero Carbon Building conta com a aplicação dos HVLS em conjunto com outros sistemas de alta eficiência energética como o sistema de resfriamento de altas temperaturas, para reduzir em 25% a sua demanda energética (Ronald, 2012).

4. CONCLUSÃO

Para garantir a máxima eficiência energética em edifícios ZEB, a escolha das tecnologias de climatização depende do clima específico de cada região. Entre as edificações pesquisadas, foi possível observar que em climas moderados (zonas climáticas 2A, 2B, 3A, 3B, 4A e 4B) os sistemas VRV se destacam por proporcionar controle de temperatura por zonas e economias de energia significativas, especialmente quando combinados com recuperadores de calor e bombas de calor geotérmicas. Em regiões quentes (zonas climáticas 0A, 0B, 1A e 1B) foi evidenciado que a combinação de sistemas de resfriamento radiante, CAG, DOAS e ventiladores de alta performance ocasiona uma redução substancial no consumo de energia sem prejuízo algum em relação ao conforto térmico dos ocupantes. Já em climas frios, como nas zonas climáticas 5A, 5B, 6A e 6B as bombas de calor geotérmicas são muito utilizadas, oferecendo uma solução de alta eficiência energética e reduzindo consideravelmente o consumo de energia para aquecimento.

A seleção correta das tecnologias de climatização ativas é importante para atingir a meta de balanço energético nulo, ou até mesmo ultrapassá-la. Além disso, alcançar edifícios ZEB depende significativamente da expertise do engenheiro mecânico responsável pelo projeto, pois cada componente do sistema de AVAC precisa ser selecionado e dimensionado de acordo com as condições climáticas locais e as especificidades do edifício, garantindo que a interação entre as diversas tecnologias resulte em um desempenho energético otimizado. Portanto, o sucesso na implementação de tecnologias de AVAC em edifícios ZEB está diretamente ligado à qualidade do projeto de engenharia e à consideração da zona climática onde o edifício está localizado.

5. REFERÊNCIAS

- 22/7 ENTERPRISE. The Ultimate Difference: VRF System vs Chilled Water System. 2020. Disponível em: <<https://227enterprise.com/blog/difference-vrf-system-and-water-chiller-system/#:~:text=When%20compared%20to%20VRF%20systems,cost%2Defficiency%20for%20better%20facilities.>>
- ALPINE Branch Library. International Living Future Institute, c2022. Disponível em: <<https://living-future.org/case-studies/alpine-branch-library/>>.
- AMERICAN Samoa EPA Office. International Living Future Institute, c2022. Disponível em: <<https://living-future.org/case-studies/american-samoa-epa-office-2/>>.
- ARCHDAILY. ZCB Zero Carbon Building / Ronald Lu and Partners. 2012. Disponível em: <<https://www.archdaily.com/282880/zcb-zero-carbon-building-ronald-lu-and-partners>>.
- BULLITT Foundation. Bullitt Center, c2013. Building Features. Disponível em: <<https://bullittcenter.org/building/building-features/>>
- DPR Construction's Phoenix Regional Office. International Living Future Institute, c2022. Disponível em: <<https://living-future.org/case-studies/dpr-constructions-phoenix-regional-office/>>.
- ELSAFTY, A.; SAEID, L. Sea Water Air Conditioning [SWAC]: A Cost Effective Alternative. *International Journal of Engineering*. v. 3, n. 3, 2009. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/228863503_Sea_Water_Air_Conditioning_SWAC_A_Cost_Effective_Alternative>
- EPE. Balanço energético nacional: ano-base 2019. In: [s.n.], 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020_sp.pdf>.
- ERHORN, H.; ERHORN-KLUTTIG, H. NZEB-like Educational Buildings. *Concerted Action Energy Performance of Buildings*. 2020.
- EUROPEAN PARLIAMENT AND DIRECTORATE-GENERAL. Energy performance of buildings 2010/31/EU Directive – Fit for 55 revision – Implementation in action – In-depth analysis. [S.l.]: European Parliament, 2021.
- FEMP. Energy Savings from Dual-Source Heat Pump Technology, *Technology Installation Review*, DOE/EE-0220. 2000. Disponível em: <<https://p2infohouse.org/ref/43/42888.pdf>>
- FENG, W.; ZHANG, Q.; JI, H.; WANG, R.; ZHOU, N.; YE, Q.; HAO, B.; LI, Y.; LUO, D.; LAU, S. S. Y. A review of net zero energy buildings in hot and humid climates: Experience learned from 34 case study buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 114, p. 109303, 2019. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119305118>>.

- FLOATING Office Rotterdam (FOR): A Vessel for Change. Powerhouse Company. Disponível em: < <https://www.powerhouse-company.com/floating-office-rotterdam>>.
- FRANCO, M., Baird, G., Garde, F., & Lenoir, A. Environmental design and performance of the ENERPOS building, Reunion Island, France. 2011. Disponível em: < <https://anzasca.net/wp-content/uploads/2014/08/41P87.pdf>>.
- FRATTARI, A. 2013. Casazeroenergy: An Italian Prototype of Zero Energy Building. Open House International. 38. 25-30. 10.1108/OHI-03-2013-B0004.
- HADERA Kindergartens. International Living Future Institute, c2022. Disponível em: < <https://living-future.org/case-studies/hadera-alfa/>>.
- HEINZE, M.; VOSS, K. Goal: Zero Energy Building Exemplary Experience Based on the Solar Estate Solarsiedlung Freiburg am Schlierberg, Germany. Journal of Green Building. 4. 2009. Disponível em: < https://www.researchgate.net/publication/250312539_Goal_Zero_Energy_Building_Exemplary_Experience_Base_d_on_the_Solar_Estate_Solarsiedlung_Freiburg_am_Schlierberg_Germany>
- JAYSAWAL, R. K.; CHAKRABORTY, S.; ELANGO VAN, D.; PADMANABAN, S. Concept of net zero energy buildings (NZEB) - a literature review. Cleaner Engineering and Technology, v. 11, p. 100582, 2022. ISSN 2666-7908. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666790822001872>>.
- KAVANAUGH, S.; GILBREATH, C. Cost Containment for Ground-Source Heat Pumps. Final Report Submitted to the Alabama Universities-TVA Research Consortium and the Tennessee Valley Authority. 2009. Disponível em: < <https://www.osti.gov/etdweb/servlets/purl/895130>>
- LAKELINE Learning Center. International Living Future Institute, c2022. Disponível em: < <https://living-future.org/case-studies/lakeline-learning-center/>>.
- LENOIR, A.; GARDE, F.; WURTZ, E. Zero energy buildings in France: Overview and feedback. ASHRAE Transactions. 117. 817-829. 2011. Disponível em: < https://www.researchgate.net/publication/290014001_Zero_energy_buildings_in_France_Overview_and_feedback>.
- MARRIAGE, G. Meridian: New Zealand's first Green Star-rated building. 10.1016/B978-0-08-100707-5.00016-2. 2017. Disponível em: < https://www.researchgate.net/publication/315854518_Meridian_New_Zealand's_first_Green_Star-rated_building>.
- MOHAWK College. The Joyce Centre for Partnership & Innovation: An Inside Look at Mohawk's New Zero-Caborn Building. 2018. Disponível em: < https://web.mohawkcollege.ca/announcements/An_inside_look_at_The_Joyce_Centre_2018.pdf>
- NET-ZERO Energy Building @ SDE. College of Design and Engineering. Disponível em: < <https://cde.nus.edu.sg/arch/facilities/net-zero-energy-building-sde-4/>>
- NOGUCHI, M.; ATHIENITIS, A; DELISLE V.; AYOUB, J.; BRADLEY, B. Net Zero Energy Homes of the Future: A Case Study of the ÉcoTerra™ House in Canada. Renewable Energy Congress. Glasgow, jul. 2008. Disponível em: < https://natural-resources.canada.ca/sites/nrcan/files/canmetenergy/files/pubs/2008-112_OP-J_411-PVTZEH_EcoTerra.pdf>.
- ONU. Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável. In:[s.n.], 2015. Disponível em: < <https://brasil.un.org/pt-br/91863-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustent%C3%A1vel>>.
- PETINELLI Curitiba. World Green Building Council. 2018. Disponível em: < https://worldgbc.org/case_study/petinelli-curitiba/>
- POWERHOUSE Drøbak Montessori School: The first Powerhouse educational building. Snøhetta. c2024. Disponível em: < <https://www.snohetta.com/projects/powerhouse-drobak-montessori-school>>
- ROBERTS, T. Hawaii Gateway Energy Center, c2009. Disponível em: < https://www.solaripedia.com/13/86/695/hawaii_gateway_energy_center.html>
- ROTH, Kurt W.; WESTPHALEN, Detlef; DIECKMANN, John; HAMILTON, Sefir D.; GOETZLER, William. Energy Consumption Characteristics of Commercial Building HVAC Systems. Volume III: Energy Savings Potential. Cambridge, MA: TIAX LLC, 2002.
- SCHOOL to Become Largest Net-Zero Energy Building in Southeastern United States. BE Building Enclosure, 2015. Disponível em: < <https://www.buildingenclosureonline.com/articles/85462-school-to-become-largest-net-zero-energy-building-in-southeastern-united-states>>.
- SEDE RAC Engenharia. World Green Building Council. 2018. Disponível em: < https://worldgbc.org/case_study/sede-rac-engenharia/>
- SHEHADI, M. Net-Zero Energy Buildings: Principles and Applications. 2020. Disponível em: < https://www.researchgate.net/publication/341264745_Net-Zero_Energy_Buildings_Principles_and_Applications>.
- SINGH, B.; SHARMA, S.; SYAL P. NZEB: A Case Study of Indira Paryavaran Bhawan. International Journal For Research in Engineering Application & Management. v. 4, n.10, 2019. Disponível em: < https://www.researchgate.net/publication/341831718_NZEB_A_Case_Study_of_Indira_Paryavaran_Bhawan>.
- TAPPER, C.; DOKKA, T. Powerhouse Telemark: A plus energy building with a low exergy heating and cooling system. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Disponível em: < https://www.researchgate.net/publication/336931716_Powerhouse_Telemark_A_plus_energy_building_with_a_low_exergy_heating_and_cooling_system>
- THE AMERICAN Institute of Architects. c2024. Omega Center for Sustainable Living. Disponível em: < <https://www.aiatopen.org/node/109>>.

- THIBEAU, Erin. PNC Opens Net-Zero-Energy Branch. Architect Magazine. 2013. Disponível em: < https://www.architectmagazine.com/technology/pnc-opens-net-zero-energy-branch_o>
- TILAL Al Ghaf Pavilion. International Living Future Institute, c2022. Disponível em: < <https://living-future.org/case-studies/tilal-al-ghaf-pavilion/>>
- TOMLINSON, R. et al. Case Study: Pearl River Tower, Guangzhou. CTBUH Journal, Issue II, 2014. Disponível em:< <https://global.ctbuh.org/resources/papers/download/1629-case-study-pearl-river-tower-guangzhou.pdf>>.
- TROI, A.; AVESANI, S.; NAPOLITANO, A.; VONMETZ, J.; BERGMEISTER, M. Solar active school in Laion (Italy). Erstes Symposium Aktiv-Solarhaus, Krems.2009. Disponível em:< https://www.researchgate.net/publication/267233386_Solar_active_school_in_Laion_Italy>.
- USGBC. Case Study: United Therapeutics Unisphere.U. S. Green Building Council. 2020. Disponível em: < https://www.usgbc.org/sites/default/files/2020-02/UT%20Unisphere_Case%20Study_Feb2020_0.pdf>
- USINA Brattørkaia / Snøhetta. ArchDaily. Disponível em:< <https://www.archdaily.com.br/br/926936/usina-brattorkaia-snohetta>>.
- VITO. Powerhouse Kjørbo: Taking a Life-Cycle Approach to Positive Energy Buildings. Disponível em:< https://positive-energy-buildings.eu/fileadmin/user_upload/Resources/EXCESS_D1.2_Case_Study_Powerhouse_Kjorbo.pdf>.
- WEST-MEC SW Campus Building X. International Living Future Institute, c2022. Disponível em: < <https://living-future.org/case-studies/west-mec-sw-campus-building-x/>>
- ZERO Energy Lombardo Welcome Center. International Living Future Institute, c2022. Disponível em: <<https://living-future.org/case-studies/zero-energy-lombardo-welcome-cente/>>.
- U.S. DEPARTMENT of Energy's National Renewable Energy Laboratory. Energy and Architecture: The Sustainable Future. The Research Support Facility Project. [s.d.]. Disponível em: < https://www1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/rsf/energy_and_architecture_research_support_facility_project.pdf>

AIR CONDITIONING SOLUTIONS FOR NET ZERO ENERGY BUILDING: AN OVERVIEW

Abstract. *This paper presents an extensive analysis of zero-energy balance buildings (ZEBs) developments, considering various climate zones, as well as the primary strategies adopted for air conditioning in these constructions. An investigation was conducted, encompassing 41 buildings, which were analyzed according to the climatic zones defined by the ANSI/ASHRAE Standard 169-2020 appendix. Additionally, the type of energy generation, consumption and generation data in kWh/m²-year, and most importantly, the most frequently implemented active air conditioning solutions were examined. Among conventional active HVAC solutions, a predominant preference was observed for Variable Refrigerant Flow (VRF) systems and Chilled Water Systems (CWS). Furthermore, it was found that complementary solutions, such as Dedicated Outdoor Air Systems (DOAS), geothermal heat exchangers, radiant cooling systems, heat recovery units, and high-performance fans, are commonly implemented. Finally, a brief recommendation is provided, suggesting the HVAC technologies with the greatest potential for ZEBs to be combined depending on the climate zone, aiming to maximize energy efficiency.*

Keywords: ZEB, Zero energy, HVAC, Energy efficiency