



ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE SISTEMAS DOAS COM VIGAS FRIAS E CONVENCIONAL POR MEIO DE SIMULAÇÃO

PAPER 15

RESUMO

O crescimento da utilização de sistemas de climatização tem aumentado a demanda energética no mundo e exigido sistemas de ar condicionado cada vez mais eficientes. O objetivo deste trabalho foi avaliar de forma comparativa por meio de simulações computacionais com o software Hourly Analysis Program (HAP), os consumos energéticos de um sistema com conceito de desacoplamento de cargas térmicas e outro do tipo todo ar com vazão volumétrica de ar constante. Para comparação foram selecionados dois sistemas com resfriamento por água gelada, sendo um composto por DOAS e vigas frias ativas e o outro projeto composto por equipamentos do tipo *fan & coil* com volume de ar constante, sem tratamento prévio do ar externo. O edifício idealizado para o estudo é destinado a atividades típicas de um centro de exposições com ocupação máxima de 12.000 pessoas, área de 30.000 m², localizado na cidade de Recife – PE. Foi considerado o controle de ar externo por nível de CO₂ para os dois projetos. Os resultados obtidos indicaram que a capacidade total no sistema DOAS e vigas frias foi de 19% menor que no projeto com *fan & coils* e em termos de consumo energético o projeto com DOAS e vigas frias apresentou redução total de 21%. Concluiu-se que o sistema com conceito de desacoplamento de cargas térmicas proporciona reduções importantes de consumo de energia, com destaque para a diferença nos sistemas de ventilação.

Palavras-chave: Vigas frias. DOAS. Recuperadores de energia. Eficiência energética.

ABSTRACT

The growth in the use of HVAC systems has increased the energy demand in the world and has demanded increasingly efficient air conditioning systems. The objective of this study was to evaluate comparatively through computer simulations with the Hourly Analysis Program (HAP) software, the energy consumptions of a system with the concept of decoupling thermal loads against another of the all air type with constant air volume. For comparison, two systems with chilled water cooling were selected, one consisting of DOAS and active cold beams and the other project consisting of fan & coil equipment with constant air volume, without previous treatment of external air. The building idealized for the study is intended for typical activities of an exhibition center with a maximum occupancy of 12.000 people, an area of 30,000 m², located in the city of Recife - PE. The control of external air by CO₂ level was considered for both projects. The results obtained indicated that the total capacity in the DOAS system and cold beams was 19% lower than in the project with fan & coils and in terms of energy consumption the project with DOAS and cold beams showed a total reduction of 21%. It was concluded that the system with the concept of decoupling thermal loads provides important reductions in energy consumption, with emphasis on the difference in ventilation systems.

Key-words: Chilled beams. DOAS. Energy recovery.

1 INTRODUÇÃO

O consumo de energia para climatização dos ambientes teve crescimento rápido no mundo nos últimos anos. A *International Energy Agency* (IEA) estima que em 2016, 10% da demanda elétrica global foi destinada para atender sistemas de resfriamento. Na concepção de um edifício, a eficiência energética muitas vezes não tem peso nas tomadas de decisões de projeto e construção, sendo o investimento inicial o fator preponderante (IEA, 2018). A escolha por sistemas que permitam o controle adequado das condições de conforto interno dos ambientes com racionamento de energia deve ser avaliada.

Nall (2017) mostrou um projeto que foi aprovado para instalação em uma torre comercial na cidade de Nova York, onde o conceito de ter dois fluxos de água com temperaturas diferentes foi aplicado, proporcionando com isto uma redução de 28,3% do consumo de energia do sistema de ar condicionado em relação a um sistema tradicional de temperatura única. Pinheiro (2018) comenta que a adoção de sistemas com o conceito de dupla temperatura de água gelada em conjunto com o processo de desacoplamento entre cargas sensível e latente promove benefícios de redução de consumo energético nas instalações. Estes sistemas são compostos por unidades de ar externo denominadas de *Dedicated Outdoor Air System* (DOAS) com sistemas para tratamento das cargas sensíveis internas do ambiente. Quando o tratamento das cargas internas é feito por processos ar-água, utilizando-se de sistemas radiantes do tipo vigas frias, piso frio ou teto frio, há uma potencialização dos ganhos de economia energética, estimando-se uma economia média de 36% em comparação a um sistema todo-ar com temperatura única.

Sastry e Rumsey (2014) realizaram uma comparação real em um edifício, onde metade da edificação possui um sistema Volume de Ar Variável (VAV) e a outra metade foi concebida com um sistema radiante com DOAS. Foi identificado que após 2 anos de operação, o sistema radiante economizou 34% de energia em relação ao sistema VAV. Um caminho rápido para a comparação entre sistemas que podem ser utilizados em um projeto é a simulação energética por meio de softwares, como o *Carrier Hourly Analysis Program* (HAP), que é uma ferramenta computacional que permite estimar as cargas térmicas e simular o uso de energia no edifício.

A partir do exposto acima, o objetivo deste trabalho é fazer uma análise comparativa de consumo energético, por meio de simulações utilizando o software HAP, entre um sistema DOAS com vigas frias ativas e um sistema com unidades de tratamento de ar do tipo *fan & coil* com Volume de Ar Constante (VAC) e ar externo sem tratamento prévio.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Os sistemas de ar condicionado têm a finalidade de proporcionar ambientes internos confortáveis e saudáveis, contribuindo com o desempenho dos seus ocupantes. Para isto, é necessário controlar parâmetros como temperatura do ar interno, temperatura média radiante, umidade,

velocidade e qualidade do ar; tudo isso conciliado a um reduzido consumo energético (BABIÁK; OLESEN; PETRAS, 2007). Para a retirada de calor do ambiente, podem ser utilizados sistemas todo-ar com volume de ar constante ou variável conectados a uma rede de dutos para distribuição de ar nos ambientes (ASHRAE, 2012). Alternativamente, sistemas que fazem uso de água ao invés de ar para o intercâmbio de calor, podem ser usados para remoção de cargas sensíveis dos ambientes, por exemplo utilizando-se vigas frias.

A utilização de água para o transporte de calor favorece ganhos energéticos em relação ao uso do ar, conforme tabela 1 (ALEXANDRE, 2009). Sistemas de vigas frias são associados com DOAS, que é responsável pela injeção do ar de renovação, assegurando a qualidade do ar interno, remoção das cargas latentes e controle de umidade (BABIÁK; OLESEN; PETRAS, 2007).

Tabela 1 – Comparativo de capacidade de transporte de energia entre o ar e a água

DADOS		AR	ÁGUA	AR/ÁGUA
Capacidade de resfriamento	[W]	1000	1000	1
Diferença de temperatura	[K]	11,0	2,0	5,5
Calor específico	[kJ/kgK]	1,0	4,18	0,24
Vazão	[m³/h]	265	0,43	616
Seção transversal do tubo/duto	[cm²]	105	1,19	88
Potência necessária	[W]	52,6	8,5	6,18

Fonte: Alexandre (2009)

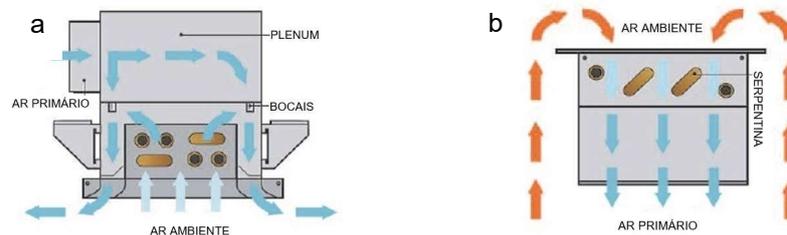
2.1 Vigas frias

As vigas frias podem ser ativas ou passivas. Nas ativas, ocorre um processo de transferência de calor por convecção forçada, originada pela indução entre o ar ambiente e a serpentina, que ocorre a partir da descarga de ar externo tratado em alta velocidade por meio de bocais, induzindo o ar ambiente a passar pela serpentina, sendo resfriado ou aquecido e na sequência misturado ao ar primário (ar externo, condicionado e desumidificado oriundo de uma unidade de tratamento de ar), conforme Figura 1 (a). Nas vigas passivas ocorre um processo de transferência de calor por convecção natural entre o ar ambiente e a serpentina, onde o ar ambiente quente, ao entrar em contato com a superfície mais fria do trocador de calor, baixa a sua temperatura e aumenta a sua densidade, movendo-se para baixo. O volume e o teor de umidade do ar primário injetado nas vigas é responsável pelo controle dos requisitos de renovação de ar e cargas latentes internas, conforme Figura 1 (b). (WOOLLETT; RIMMER, 2015).

A aplicação de sistemas com vigas frias em relação a sistemas todo-ar, deve levar em consideração alguns fatores, como o percentual de suprimento de ar externo em relação ao volume de ar total para remoção das cargas térmicas. As aplicações mais viáveis serão aquelas que tiverem um menor percentual de vazão de ar externo. A carga de calor sensível interna também

deve ser observada, caso seja muito superior às cargas latentes, um sistema de vigas frias se torna uma boa opção (WOOLLETT; RIMMER, 2015).

Figura 1 – Viga fria ativa (a) e viga fria passiva (b)



Fonte: Adaptado de Woollett e Rimmer (2015)

Ambientes em que altas taxas de renovação de ar são necessárias, como salas de reunião, é recomendável a utilização de sistemas com capacidade de desumidificação localizada, (VIRTA et al., 2004). Locais com condições externas de umidade mais elevadas, com maiores riscos de infiltrações, como proximidades de portas, um sistema complementar deve ser utilizado para controle dos níveis de umidade interna, (WOOLLETT; RIMMER, 2015).

2.2 DOAS

A utilização do sistema dedicado de tratamento de ar externo (DOAS), possibilita o desacoplamento das cargas térmicas internas e externas. Ele fornece 100% de ar externo ao ambiente, sendo este resfriado ou aquecido, desumidificado ou umidificado. Quando utilizado em conjunto com sistemas de vigas frias e pisos frios radiantes, que são projetados para tratar apenas cargas térmicas sensíveis, toda a desumidificação é feita pela DOAS, que deve ser projetado e dimensionado para fornecer ar o mais seco possível, de forma a absorver as cargas de umidades internas e oriundas de infiltrações da envoltória (TRANE, 2020).

O volume de ar a ser fornecido pela DOAS, denominado de ar primário, é calculado em função dos requisitos de renovação de ar e das cargas latentes internas. A carga latente total em um sistema de ar condicionado é a soma das cargas de infiltração pela envoltória e frestas, internas (oriundas principalmente dos ocupantes) e de umidade presente no ar externo, utilizado no processo de renovação (HOLDER et al., 2015).

A vazão de ar primário necessário para desumidificação do ambiente interno pode ser calculada pela equação 1.

$$Q_V = H_{LAT} / [\rho * L * (HR_{AI} - HR_{SUP})] \quad (1)$$

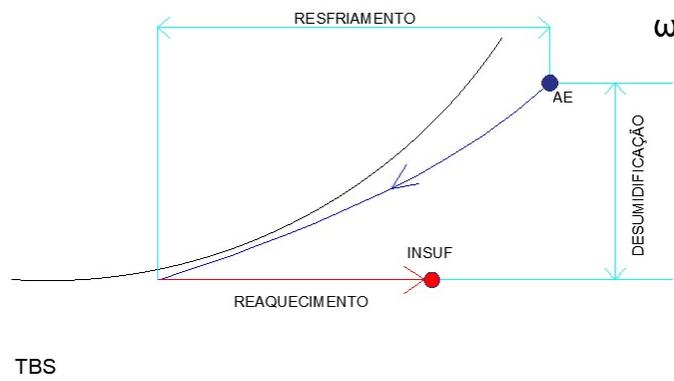
Após o cálculo do volume de ar necessário para atender os requisitos de desumidificação, deve ser verificada a vazão necessária para atendimento as necessidades de renovação, calculada pela equação 2, (ABNT, 2008).

$$V_{ef} = P_z * F_p + A_z * F_a \quad (2)$$

Os valores de F_p e F_a são tabelados para cada tipo de recinto e nível de ventilação desejada, (ABNT, 2008). Comparando os dois resultados, deve prevalecer o de maior valor, sendo o ideal que o valor máximo se aproxime do fluxo de ar necessário para atender os requisitos de renovação.

Situações em que ocorre alta desumidificação, é necessário um processo de reaquecimento em seguida, para evitar a entrega de ar excessivamente frio ao ambiente. A DOAS pode ser configurada com uma ou mais serpentinas de resfriamento e desumidificação com uma serpentina de reaquecimento em série (TRANE, 2020). Em série pode haver também a presença de um dispositivo de recuperação de energia, por exemplo, do tipo roda entálpica que pré-condiciona o ar externo, transferindo energia do ar com temperatura e umidade mais alta para o ar de exaustão mais frio e seco oriundo do ambiente interno, (BABIÁK; OLESEN; PETRAS, 2007). A utilização de DOAS em conjunto com sistemas radiantes e recuperadores de energia possui elevado potencial de ganhos energéticos em comparação com outras tecnologias, (DOE, 2002). A utilização de DOAS favorece a coleta de condensado proveniente do processo de desumidificação do ar, este resíduo pode ser utilizado por exemplo como parte do volume de água de reposição para torres de resfriamento, (DANTAS, 2018). Na figura 2 é possível visualizar os processos psicrométricos pelos quais o ar passa em uma unidade DOAS.

Figura 2 – Processo psicrométrico que o ar externo é submetido em uma DOAS

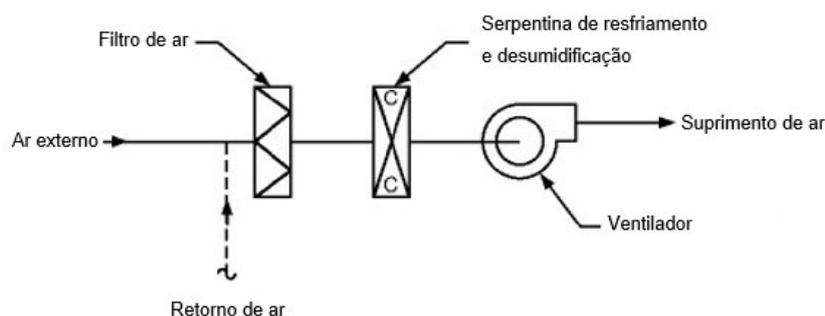


AE: Ar externo. INSUF: Insuflamento
Fonte: Autor

2.3 Sistema todo-ar VAV ou VAC

Um sistema convencional de tratamento de ar é constituído de unidade composta por uma serpentina de água gelada, um ventilador e uma rede de dutos para distribuição do ar, conforme pode ser observado no esquema da figura 3.

Figura 3 – Configuração de uma unidade de tratamento de ar VAC ou VAV



Fonte: Adaptado de ASHRAE (2012)

O volume de ar fornecido ao sistema de distribuição pode ser constante ou variável e comumente o equipamento fica fora da região climatizada, localizado em uma casa de máquinas ou em áreas de serviços e coberturas. O ar que passa pelas serpentinas de água para troca de calor é uma mistura de ar que recircula no ambiente (ar de retorno) com ar externo, adicionado ao sistema para atender aos requisitos de renovação. Uma característica deste sistema é de trabalhar com serpentina molhada, devido ao processo de condensação do vapor de água presente no ar de mistura ao entrar em contato com a serpentina de água gelada (ASHRAE, 2012).

3 METODOLOGIA

Com o objetivo de avaliar de forma comparativa o consumo de energia entre sistemas ar-água e todo ar, foi idealizado um edifício de piso único destinado a atividades típicas de centros de eventos, as características detalhadas da edificação e das condições climáticas consideradas para dimensionamento e simulação energética são demonstrados na tabela 2.

Tabela 2 – Dados da edificação para cálculo de carga térmica

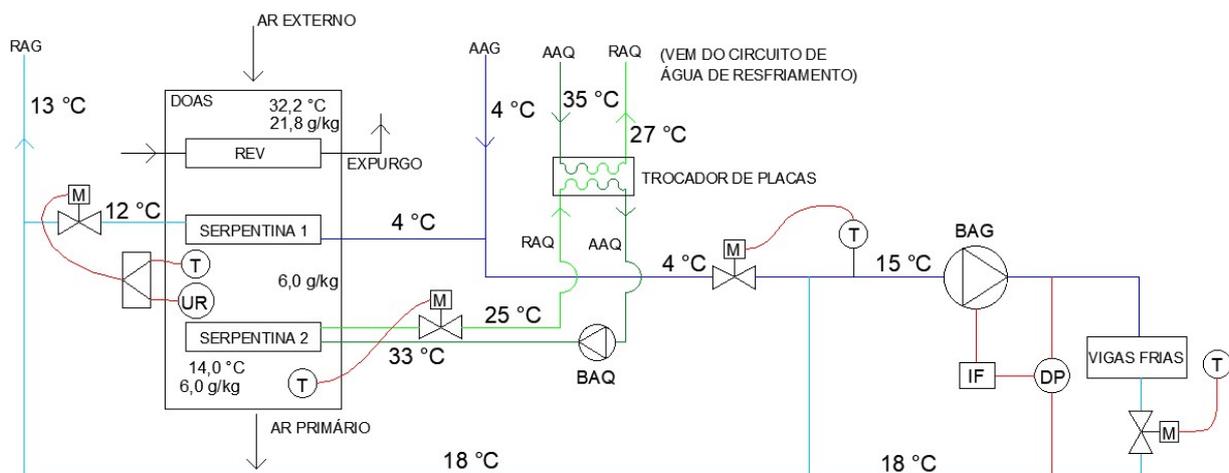
LOCAL: RECIFE – PE - ALTITUDE = 19 m					
CONDIÇÕES EXTERNAS			CONDIÇÕES INTERNAS		
TPO	27,7	°C	TBS	24	°C
TBSc	32,6	°C	UMIDADE RELATIVA	55	%
UMIDADE ABSOLUTA	21,6	g/kg	UMIDADE ABSOLUTA	10,3	g/kg
DIMENSÕES			VENTILAÇÃO		
ÁREA	30.000	m ²	OCUPAÇÃO	12.000	Pessoas
PÉ DIREITO	5,0	m	FATOR PESSOA	5,7	L/s*pessoa
VOLUME	150.000	m ³	FATOR ÁREA	0,50	L/s*m ²
CARGAS DE OCUPAÇÃO			INFILTRAÇÃO		
CARGA SENSÍVEL	75	W/pessoa	VAZÃO DE INFILTRAÇÃO	12.500	L/s
CARGA LATENTE	55	W/pessoa	TROCAS DE AR/HORA	0,3	volume/h

Fonte: Autor

Os sistemas utilizados na simulação são um do tipo *fan & coil* com volume de ar constante recebendo água gelada em sua serpentina a 5 °C, e

outro composto por DOAS e vigas frias ativas. O DOAS selecionado possui um recuperador de energia de ventilação (REV) do tipo roda entálpica, com eficiência térmica de 55%. O sistema DOAS & vigas frias foi idealizado com o conceito de um circuito único de água gelada conforme mostrado no fluxograma da figura 4. O controle da vazão de água nas serpentinas de resfriamento e desumidificação do DOAS é feito por válvula de 2 vias que utiliza a umidade absoluta de 6,0 g/kg como ponto de referência. Para reaquecimento do ar após o processo de resfriamento e desumidificação profunda, foi projetado um sistema auxiliar que reaproveita a água a temperaturas mais altas da saída dos condensadores dos *chillers* para este fim.

Figura 4 – Sistema DOAS com vigas frias ativas



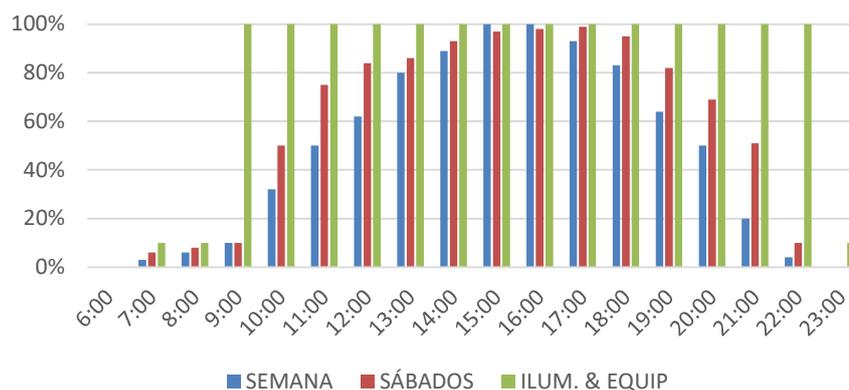
Fonte: Autor

A vazão de ar necessário para a controle das carga latentes internas é calculada de acordo com a equação 1 e depende diretamente do valor de umidade absoluta de insuflamento e do valor de carga latente interna, portanto só pode ser dimensionado após o cálculo das cargas térmicas internas, o valor obtido deve ser comparado com a vazão necessária para renovação do ambiente interno, prevalecendo o maior valor. A CAG idealizada para simulação tem o conceito de circuito único e variável de água gelada para os dois sistemas, com *chillers* compressores parafuso e condensação a água. O diferencial de temperatura para o sistemas de *fan & coils* é de 8 °C, no segundo sistema o diferencial de temperatura total da CAG é de 9 °C, sendo que na DOAS é de 8 °C e nas vigas de frias de 3 °C. Para os *chillers*, foram utilizadas as características base de eficiência do próprio software de simulação, para o sistema de *fan & coil* com temperatura de fornecimento de água a 5 °C a eficiência é de 0,637 kW/TR, no sistema de DOAS com vigas frias onde a temperatura de fornecimento de água é de 4 °C a eficiência será de 0,662 kW/TR, 4% maior, algo que se justifica pela menor de temperatura de fornecimento de água gelada.

A figura 5 demonstra os perfis horários de ocupação, iluminação e equipamentos, sendo considerado para efeitos de simulação o período de 09:00 às 22:00 para funcionamento do sistema de ar condicionado. Para

cálculo de carga térmica e dimensionamento dos sistemas, foi considerado como base o perfil de ocupação característicos dos sábados. Outro resultado a ser avaliado é o do volume de água produzido pelo processo de desumidificação de ar externo, para isto foi realizada uma análise horária da vazão de ar e da variação de umidade absoluta na entrada e saída da serpentina de desumidificação.

Figura 5 – Perfil de ocupação, iluminação e equipamentos da edificação



Fonte: Autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Seguindo os parâmetros indicados na tabela 2, a edificação foi configurada e os valores de cargas térmicas internas obtidos, assim como o dimensionamento das capacidades dos dois sistemas, os resultados são demonstrados na tabela 3.

Tabela 3 – Resultados dos valores de cargas e capacidades dos sistemas

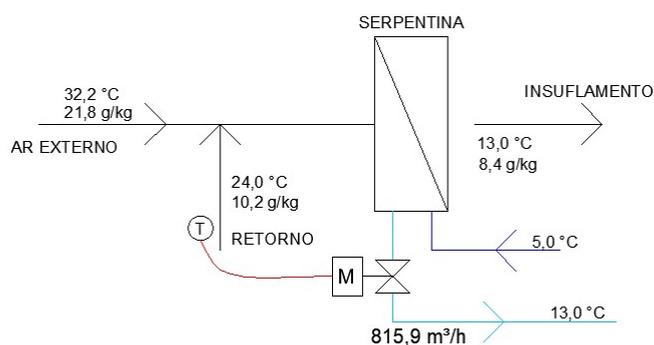
	TOTAL (kW)	SENSÍVEL (kW)	LATENTE (kW)	FCS	
CARGAS TÉRMICAS INTERNAS	3506,9	2535,5	971,4	0,72	
DIMENSIONAMENTO DOS SISTEMAS					
	TOTAL (kW)	SENS. (kW)	LAT. (kW)	FCS	Q _{AE} (m³/s)
FAN & COIL	7584,0	3884,7	3699,3	0,51	83,4
CAPACIDADE TOTAL CAG	7584,0				
REV	1908,7	363,5	1545,2		83,4
DOAS	4459,4	2140,6	2318,8	0,48	
AQUECIMENTO	673,4	673,8	-		
VIGAS FRIAS	1655,2	1655,2	-		
CAPACIDADE TOTAL CAG	6114,6				

Q_{AE}: Vazão de ar externo. FCS: Fator de calor sensível.

Fonte: Autor

É possível verificar que há uma diferença de capacidade total na ordem de 19% a menos na CAG do sistema DOAS & vigas frias, algo que pode ser justificado pela utilização do recuperador de energia do tipo roda entálpica que remove uma parcela importante de carga térmica oriunda do ar externo. A partir do valor de carga latente e dos valores de umidade

Figura 8 – Sistema VAC com valor de vazão de água calculada



Fonte: Autor

Na tabela 4 é possível verificar os consumos anuais de energia dos dois sistemas em comparação. O resultado total indica uma redução de 21% a menos de consumo para o sistema de DOAS e vigas frias. Observando os itens de forma detalhada verifica-se que o sistema de ventilação é o que gera maior impacto no resultado já que a redução é de 71%, sendo essa significativa diferença devido ao fato que o volume de ar movimentado é apenas o necessário para renovação de ar do ambiente, enquanto que no sistema de *fan & coils*, além do volume de renovação, é movimentada também a quantidade de ar necessária para tratamento das cargas sensíveis internas.

O consumo de refrigeração ficou menor em 7%, apesar da menor eficiência dos *chillers*. Para bombeamento e ventiladores das torres as reduções observadas são de 9% e 15%, respectivamente, estes resultados se justificam em virtude da menor capacidade e necessidade de refrigeração, conforme indicados na tabela 3 e na figura 6. Para o bombeio, apesar de o volume de água movimentado ser maior no sistema de DOAS & vigas frias, o menor consumo pode ser justificado pela menor carga de refrigeração solicitada, principalmente na DOAS por conta da ação da roda entálpica.

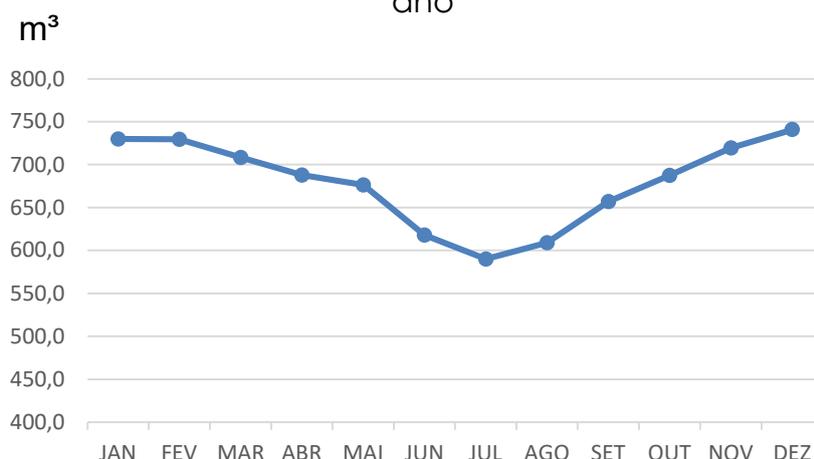
Tabela 4 – Detalhamento das economias obtidas

ITEMS	FAN & COIL (kWh)	VF & DOAS (kWh)	ECONOMIA
VENTILAÇÃO	970200,0	282025,0	71%
REFRIGERAÇÃO	3011726,0	2802355,0	7%
BOMBEIO	414833,0	377597,6	9%
VENTILADORES DAS TORRES	358151,0	305218,0	15%
TOTAL	4754910,0	3767195,6	21%

Fonte: Autor

Na figura 9 é possível visualizar o volume de água produzido a partir do processo de desumidificação do ar externo no sistema DOAS. O perfil demonstra uma queda no período de inverno, sendo o volume total anual produzido de 8.154,30 m³ que pode ser utilizado como reposição para as torres de resfriamento.

Figura 9 – Produção de condensado no sistema DOAS ao longo do ano



Fonte: Autor

5 CONCLUSÕES

A utilização de sistemas com desacoplamento de cargas térmicas, utilizando-se DOAS com sistemas radiantes e recuperadores de energia proporciona vantagens importantes de redução de consumo de energia em comparação a sistemas do tipo *fan & coil*. A principal redução observada está no sistema de ventilação, confirmando o que é colocado pela literatura de que o custo para transportar energia é mais baixo com água do que com ar. O volume de água produzido pela desumidificação do ar mostra-se como um importante benefício de ganho para a instalação, onde a utilização do sistema DOAS facilita o aproveitamento, já que centraliza a coleta. A utilização de uma parcela da energia rejeitada pelos condensadores dos *chillers* para reaquecimento do ar na DOAS mostra-se uma boa solução já que isto evita a adição de mais um sistema consumidor de energia para realização deste processo.

REFERÊNCIAS

ABNT **NBR 16401-3: 2008** – Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários – Parte 3 – Qualidade do ar interior.

ALEXANDRE, Celso Simões. **DISTRIBUCIÓN DE AIRE**. San Pablo: Novatécnica, 2009. 98 p.

ASHRAE (ed.). **ASHRAE HANDBOOK**: heating, ventilating, and air-conditioning systems and equipment. Atlanta: ASHRAE, 2012.

BABIAK, Jan; OLESEN, Bjarne W.; PETRAS, Dusan. **Low temperature heating and high temperature cooling**. Brussels: Rehva, 2007. 113 p.

CONBRAVA 2021 – São Paulo Expo, 23 à 25 de novembro de 2021 - São Paulo, Brasil

DANTAS, Francisco. **Coleta e uso do condensado para reposição nas torres de resfriamento.** 2018. Disponível em: <http://www.engenhariae arquitetura.com.br/2018/06/coleta-e-uso-do-condensado-para-reposicao-nas-torres-de-resfriamento>. Acesso em: 18 out. 2020.

DOE. **Energy Consumption Characteristics of Commercial Building HVAC Systems Volume III: Energy Savings Potential.** Cambridge: U.S. Department Of Energy, 2002. 285 f.

HOLDER, H. W. *et al.* Calculating Dew-Point Design for DOAS. **Ashrae Journal**, [s. l], p. 24-32, dez. 2015.

IEA (ed.). **The Future of Cooling:** opportunities for energy- efficient air conditioning. [S. L.]: Iea, 2018.

NALL, Daniel H.. Dual Temperature Chilled Water Plant & Energy Savings. **Ashrae Journal**, [s. l], p. 70-75, jun. 2017.

PINHEIRO, Ana Paula Basile (ed.). **Alta temperatura de resfriamento, baixa temperatura de aquecimento.** 2018. Disponível em: <http://www.engenhariae arquitetura.com.br/2018/04/alta-temperatura-de-resfriamento-baixa-temperatura-de-aquecimento>. Acesso em: 15 out. 2020.

SASTRY, Guruprakash; RUMSEY, Peter. VAV vs. Radiant: side-by-side comparison. **Ashrae Journal**, [s. l], p. 16-24, maio 2014.

TRANE. Impact of DOAS Supply-Air Dew Point Temperature on Space Humidity. ADM-APN073-EN. 2020.

VIRTA, Maija *et al.* **Chilled Beam Application Guidebook.** Brussels: Rehva, 2004. 50 p.

WOOLLETT, John; RIMMER, Julian. **Active and Passive Beam Application Design Guide.** Atlanta: ASHRAE - Brussels: REHVA, 2015. 118 f.