



XVI CONBRAVA - CONGRESSO BRASILEIRO DE REFRIGERAÇÃO, AR-CONDICIONADO, VENTILAÇÃO, AQUECIMENTO E TRATAMENTO DO AR
São Paulo Expo - 10 a 13 de setembro de 2019

GUIA DE APLICAÇÃO DE SISTEMAS DE AR CONDICIONADO CONFORME CAPACIDADE, CUSTO, LOCALIZAÇÃO E EFICIÊNCIA – ÁGUA GELADA x VRF x PACKAGE

Jorge Osvaldo Zato, Fred Akira Kohiyama, Christyam Alcantara Paulo da Silva, Murillo Mendes, André Guidelli Camilo dos Santos

RESUMO

A questão energética dos sistemas HVAC, que representam grande participação na matriz elétrica mundial, nunca foi tão discutida. Na busca do "zero balance" em uma edificação, a eficiência e viabilidade dos consumidores de energia são tão importantes quanto o uso de fontes alternativas. Dessa forma, este estudo teve como objetivo construir um comparativo técnico entre três conceitos de projeto para HVAC: água gelada, VRF e package. Foram utilizados sistemas de pequenas, médias e altas capacidades, e considerados quatro perfis climáticos do Brasil, com base nas cidades de São Paulo, Rio de Janeiro, Brasília e Curitiba. Através do levantamento de custo das instalações, da análise do consumo energético e dos dados técnicos, obteve-se um "Guia de Aplicação" indicando os pontos fortes e fracos de cada sistema, relacionando capacidade, eficiência, custo, espaço ocupado, entre outros. Este resultado pode ser utilizado como uma ferramenta para auxiliar na tomada de decisão inicial em projetos de HVAC.

Palavras-chave: HVAC, eficiência energética, zero balance

ABSTRACT

The HVAC systems energy issue, which represents a large share of the world's electricity matrix, has never been more discussed. In search of "zero balance" in a building, the efficiency and viability of energy consumers are as important as the use of alternative sources. This way, this study aimed to build a technical comparison between three HVAC concept designs: chilled water, VRF and package. Small, medium and high capacity systems were verified, and considered four climatic profiles in Brazil, based in the cities of São Paulo, Rio de Janeiro, Brasília and Curitiba. Through the collection of installation cost, technical data and energy consumption analysis, an "Application Guide" was obtained indicating the strengths and weaknesses of each system, relating capacity, efficiency, cost, occupied space, among others. This result can be used as a tool to help in the initial decision in HVAC projects.

Keywords: HVAC, energy efficiency, zero balance

1 INTRODUÇÃO

A demanda por conforto térmico e qualidade do ar interior cresceu rápido nos últimos anos, sendo que equipamentos de ventilação e ar condicionado consomem atualmente 20% de toda a eletricidade utilizada no mundo em construções (IEA,2018). Paralelamente a isso, a partir de 2006 o Departamento de Energia dos Estados Unidos, estabeleceu o conceito de construções de “energia zero” (*Zero Energy Buildings – ZEB*), que através de cogeração e equipamentos eficientes objetiva a redução de consumo energético global (TORCELLINI, et al, H2006). Nesse contexto, um dos principais objetivos de um projeto de ar condicionado é a otimização dos sistemas buscando melhor eficiência energética.

A fim de se atingir o conforto térmico, o sistema de ar condicionado busca manter a temperatura interna do ambiente e umidade relativa em níveis aceitáveis. Existem diversas normas e recomendações sobre tais níveis, como por exemplo a norma NBR 16401 (ABNT, 2008). Já a qualidade do ar interior é estabelecida com renovação com ar externo e níveis de filtragem pertinentes (ASHRAE, 2017).

O conceito principal de refrigeração baseia-se no ciclo de compressão a vapor (ASHRAE, 2017). As diferentes linhas de solução diferenciam-se por particularidades no ciclo, como por exemplo sistemas de expansão direta e sistemas de expansão indireta.

Em se tratando de ambientes comerciais, algumas das principais soluções hoje utilizadas para tratamento de ar são sistemas de água gelada, VRF e *package* onde cada sistema possui características distintas de instalação, consumo e operação.

Os sistemas de água gelada são pioneiros, desde o início do século XX, e amplamente utilizados, principalmente onde há grande demanda de carga térmica (CARRIER, 2019). Trata-se de um sistema em que o fluido refrigerante não é circulado pelo ambiente interno; o fluido de trabalho é a água. A unidade externa para resfriamento da água é denominada chiller, que irá bombear água às unidades de tratamento de ar (UTA), responsáveis por resfriar e filtrar o ar ambiente (ASHRAE, 2016). A utilização mais comum de água gelada está relacionada a sistemas centrais, em que o dimensionamento é feito para toda a construção em um único sistema.

O sistema *package*, popularizado a partir da década de 1970, é uma solução de expansão direta onde o fluido de trabalho é o próprio refrigerante (SMITH, 2019). No modo de resfriamento, a unidade externa (condensadora) é responsável por rejeitar o calor absorvido do ambiente e a unidade interna (evaporadora) promove o resfriamento do ar. Uma subdivisão desse sistema é conhecida como *Split* (dividido), as evaporadoras, em geral, têm o mesmo porte das UTA's, porém a unidade externa é individualizada formando um conjunto um para um.

Mais recentemente, a partir da década de 1990, surgiu o sistema VRF (*variable refrigerant flow* – fluxo variável de refrigerante) que é similar ao

sistema *package*, expansão direta, porém com a possibilidade de utilização de apenas uma unidade externa para diversas unidades internas (DAIKIN, 2013). O porte das evaporadoras é limitado em relação ao *package*, porém o VRF possibilita uma maior flexibilidade de instalação. Sistemas mais robustos de VRF possibilitam também o resfriamento e aquecimento simultâneo de diferentes zonas através do mesmo circuito de refrigerante (ASHRAE, 2016).

Nesse contexto, os projetistas de HVAC com base em sua experiência e referências normativas estabelecem hipóteses iniciais para o projeto escolhendo uma linha de solução. A literatura técnica para o segmento de refrigeração e ar condicionado já é bem consolidada e viva. Diversas instituições e companhias, como a ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*), dedicam-se no desenvolvimento e normatização das tecnologias, buscando sempre uma maior eficiência e eficácia das soluções.

Após escolhido o sistema, o desenvolvimento de um projeto passa por etapas de análise de eficiência energética, viabilidade econômica, espaço ocupado, entre outros. Portanto cada linha de solução percorre a evolução de performance individualmente. Ao final do projeto restam algumas questões: O sistema foi o de melhor custo benefício e o mais adequado ao tamanho da construção entre as diversas linhas de solução existentes? O conceito adotado apresenta os mesmos resultados em diferentes localidades?

Portanto, o objetivo do presente trabalho é estabelecer um guia de aplicação de sistemas de ar condicionado, conforme capacidade, custo, localização e eficiência; comparando uma construção comercial típica com uso de sistema de água gelada, *package* e VRF.

2 METODOLOGIA

A primeira hipótese adotada foi analisar apenas construções comerciais típicas no contexto brasileiro. Isso faz com que as dimensões dos ambientes, as instalações hidráulicas, de iluminação, os materiais da obra, a ocupação, enfim, as características da edificação sejam para um contexto de escritórios.

Para o trabalho em questão foi utilizado o projeto de um prédio administrativo existente de porte médio. A avaliação de construções de pequeno porte foi realizada delimitando a área do prédio escolhido em uma porção menor. Já para avaliação de construções de grande porte, foi considerada a multiplicação dos andares deste prédio.

Como o tamanho da construção está diretamente relacionado com a carga térmica, foram adotadas 05 (cinco) faixas de capacidade para representar os diferentes portes de edificação: 30 TR, 80 TR, 200 TR, 500 TR, 1000 TR.

Uma vez que o perfil climático brasileiro também é bem diverso, foram escolhidas 04 (quatro) capitais brasileiras de diferentes regiões: São Paulo, Rio de Janeiro, Brasília e Curitiba.

Mesmo delimitando os tipos de sistema (Água gelada, *Package* e VRF), existem inúmeras tecnologias diferentes para cada um deles. Uma hipótese importante é que todos os sistemas devem operar com compressor em frequência variável (*inverter*), isso porque são mais eficientes e por consequência são os mais utilizados em projetos ZEB.

Outra hipótese é que todos os sistemas devem possuir o mesmo desempenho em relação a conforto térmico e distribuição de ar, por isso, foi considerada a distribuição de ar dutada com difusores de teto para efeito *coanda* em todos os sistemas.

Também todos os sistemas devem possuir o mesmo nível de filtragem (G4) e mesmo nível de renovação de ar. Para as UTA's e evaporadoras *package* a insuflação de ar externo foi realizada no próprio retorno. No sistema VRF, foi necessária a inclusão de ventiladores adicionais para esta insuflação. Vale ressaltar que no VRF o retorno não possui filtragem G4, apenas na tomada de ar externo, devido à baixa pressão disponível da unidade interna.

Além disso, todos os equipamentos foram adotados com condensação a ar. Assim o ponto de partida para os projetos pode ser resumido pela Tabela 1, e, abaixo:

Tabela 1 – Capacidades, Regiões e Sistemas analisados

Sistema	Água Gelada					Package					VRF				
Regiões															
São Paulo	30 TR	80 TR	200 TR	500 TR	1000 TR	30 TR	80 TR	200 TR	500 TR	1000 TR	30 TR	80 TR	200 TR	500 TR	1000 TR
Rio de Janeiro	30 TR	80 TR	200 TR	500 TR	1000 TR	30 TR	80 TR	200 TR	500 TR	1000 TR	30 TR	80 TR	200 TR	500 TR	1000 TR
Brasília	30 TR	80 TR	200 TR	500 TR	1000 TR	30 TR	80 TR	200 TR	500 TR	1000 TR	30 TR	80 TR	200 TR	500 TR	1000 TR
Curitiba	30 TR	80 TR	200 TR	500 TR	1000 TR	30 TR	80 TR	200 TR	500 TR	1000 TR	30 TR	80 TR	200 TR	500 TR	1000 TR

Fonte: Autoria própria.

O primeiro passo para um projeto de ar condicionado é o cálculo de carga térmica da edificação. São necessárias as características da construção (dimensões, localização geográfica, ocupação, equipamentos, materiais, iluminação, portas e janelas, etc) e também a escolha de um método. No caso deste artigo foi utilizado o método descrito no *handbook* da ASHRAE para séries de tempo radiante (ASHRAE, 2017). Todos os dados e cálculos foram processados em planilha eletrônica.

As cargas térmicas calculadas são para a condição de projeto de resfriamento anual de 1% para o bulbo seco. Mas, para a análise de operação dos equipamentos, foram coletados dados climáticos do INMET em base de dados do *Energy Plus* para cada uma das cidades escolhidas ao longo do ano de 2008, hora a hora, a partir disso foi calculada a carga térmica horária para o ano. Para o ponto de carga térmica nominal de cada sistema foram selecionados equipamentos comuns e consolidados do mercado brasileiro.

Todas as máquinas foram selecionadas através de softwares dos fabricantes, com exceção dos chillers e condensadoras que foram selecionados através de catálogos. Os dutos tiveram dimensionamento através do método da velocidade constante e recomendações ASHRAE. As

tubulações do circuito hidrônico foram dimensionadas também através de recomendações da ASHRAE e o sistema de bombeamento utilizado foi o primário variável, considerando mínimo de 50% de autoridade para as válvulas de controle.

Com os projetos definidos deu-se início a tomada de preços para avaliar o custo inicial de cada tipo de solução. Todos os preços foram considerados os praticados no mercado, com impostos pertinentes. Os preços de mão de obra também foram avaliados com instaladores locais, considerando o praticado no mercado.

Além do custo inicial, foi avaliado o custo de operação de cada sistema. Foram considerados os custos de energia, manutenção e vida dos equipamentos. Para o custo de energia, foi avaliado o consumo energético considerando a carga térmica horária em conjunto com dados de catálogo (como IPLV ou tabelas de desempenho de acordo com o componente) e software dos fabricantes, assim como as tarifas de energia de cada região, considerando construções do grupo B3 em tarifas convencionais. Os custos de manutenção foram coletados com empresas locais.

Foi avaliado também o espaço ocupado pelos equipamentos e a relação dos sistemas com o ciclo de vida da edificação.

Os principais resultados obtidos dos projetos e levantamento de custos, as discussões sobre esses resultados e as principais conclusões estão apresentadas a seguir.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da metodologia apresentada o primeiro resultado é a carga térmica de projeto calculada, apresentada na Tabela 2. Vale ressaltar, que o objetivo era atingir aproximadamente as faixas de capacidade estipuladas, porém para a mesma construção, em localidades diferentes, a carga térmica varia.

Tabela 2 – Carga térmica calculada para as diferentes situações

Sistema	30 TR		80 TR		200 TR		500 TR		1000 TR	
Regiões	CS	CL	CS	CL	CS	CL	CS	CL	CS	CL
São Paulo	18,2	5,9	62,4	20,2	167,3	53,9	387,2	124,6	774,4	249,3
Rio de Janeiro	20,1	9,6	68,4	32,8	183,2	87,9	423,8	203,3	847,7	406,5
Brasília	16,1	5,9	55,0	19,3	147,6	51,0	341,4	117,8	682,8	235,6
Curitiba	18,0	5,1	61,8	16,9	166,0	44,3	384,1	102,3	768,2	204,5

CS - Calor sensível em TR
CL - Calor latente em TR

Fonte: Autoria própria.

As combinações utilizadas de chillers, condensadoras e unidades VRF são apresentados na Tabela 3. As quantidades das UTA's selecionadas e as evaporadoras para o sistema package estão listados na Tabela 4. Vale observar que a seleção teve de ser realizada caso a caso, pois a configuração de serpentina e ventilador varia de acordo com a localidade.

Tabela 3 – Chillers, condensadoras e unidades VRF

Obra	Cidade	Água Gelada	Package	VRF (São Paulo)								
		Combinação Chillers	Combinação Condensadoras	Capacid.	Modelo	Obra	~30 TR	~80 TR	~200 TR	~500 TR	~1000 TR	
~30 TR	Curitiba	2x Chiller 15 TR (Fixo + Inverter)	1x 7,5 TR + 2x 12,5 TR	UNIDADES EXTERNAS	6,37 TR	Unid. 8 HP	0	2	6	14	28	
	Brasília	2x Chiller 15 TR (Fixo + Inverter)	2x 7,5 TR + 1x 12,5 TR		8,92 TR	Unid. Ext. 10 HP	0	0	0	0	0	
	São Paulo	2x Chiller 15 TR (Fixo + Inverter)	1x 7,5 TR + 2x 12,5 TR		9,5 TR	Unid. Ext. 12 HP	1	1	1	2	4	
	Rio de Janeiro	2x Chiller 15 TR (Fixo + Inverter)	2x 12,5 TR + 1x 17,5 TR		11,33 TR	Unid. Ext. 14 HP	0	2	6	14	28	
~80 TR	Curitiba	1x Chiller 90 TR (Inverter)	1x 7,5 TR + 5x 12,5 TR + 2x 17,5 TR		12,83 TR	Unid. Ext. 16 HP	1	1	1	2	4	
	Brasília	1x Chiller 80 TR (Inverter)	2x 7,5 TR + 4x 12,5 TR + 2x 17,5 TR		14,25 TR	Unid. Ext. 18 HP	0	0	0	0	0	
	São Paulo	1x Chiller 90 TR (Inverter)	1x 7,5 TR + 5x 12,5 TR + 2x 17,5 TR		15,95 TR	Unid. Ext. 20 HP	1	0	0	0	0	
	Rio de Janeiro	1x Chiller 110 TR (Inverter)	2x 12,5 TR + 6x 17,5 TR		17,52 TR	Unid. Ext. 22 HP	0	4	12	28	56	
~200 TR	Curitiba	1x Chiller 220 TR (Inverter)	1x 7,5 TR + 13x 12,5 TR + 6x 17,5 TR		UNIDADES INTERNAS	1,13 TR	Unid. Int. Dutada	0	2	6	14	28
	Brasília	1x Chiller 220 TR (Inverter)	2x 7,5 TR + 12x 12,5 TR + 6x 17,5 TR			1,28 TR	Unid. Int. Dutada	0	2	6	14	28
	São Paulo	1x Chiller 240 TR (Inverter)	1x 7,5 TR + 13x 12,5 TR + 6x 17,5 TR			1,8 TR	Unid. Int. Dutada	1	0	0	0	0
	Rio de Janeiro	1x Chiller 280 TR (Inverter)	2x 12,5 TR + 18x 17,5 TR			2,55 TR	Unid. Int. Dutada	4	10	30	70	140
~500 TR	Curitiba	2x Chiller 260 TR (Todos Inverter)	2x 7,5 TR + 30x 12,5 TR + 14x 17,5 TR	3,56 TR		Unid. Int. Dutada	1	20	60	140	280	
	Brasília	2x Chiller 240 TR (Todos Inverter)	4x 7,5 TR + 28x 12,5 TR + 14x 17,5 TR	4,55 TR		Unid. Int. Dutada	3	5	9	20	40	
	São Paulo	2x Chiller 280 TR (Todos Inverter)	2x 7,5 TR + 30x 12,5 TR + 14x 17,5 TR	5,12 TR		Unid. Int. Dutada	2	2	2	4	8	
	Rio de Janeiro	2x Chiller 350 TR (Todos Inverter)	4x 12,5 TR + 42x 17,5 TR									
~1000 TR	Curitiba	4x Chiller 260 TR (Todos Inverter)	4x 7,5 TR + 60x 12,5 TR + 28x 17,5 TR									
	Brasília	4x Chiller 240 TR (Todos Inverter)	8x 7,5 TR + 56x 12,5 TR + 28x 17,5 TR									
	São Paulo	4x Chiller 280 TR (Todos Inverter)	4x 7,5 TR + 60x 12,5 TR + 28x 17,5 TR									
	Rio de Janeiro	4x Chiller 350 TR (Todos Inverter)	8x 12,5 TR + 84x 17,5 TR									

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4 – UTA's e Evaporadoras Package selecionados

	TAG: UTA01	TAG: UTA02	TAG: UTA03	TAG: UTA04	TAG: UTA05
	UTA / Evap. 12,5 TR	UTA / Evap. 5 TR	UTA / Evap. 15 TR	UTA / Evap. 15 TR	UTA / Evap. 12,5 TR
Obra	Vazão: 8820 m³/h	Vazão: 3400 m³/h	Vazão: 11150 m³/h	Vazão: 10292 m³/h	Vazão: 7810 m³/h
~ 30 TR	1	1	0	1	0
~ 80 TR	1	1	2	2	2
~ 200 TR	1	1	6	6	6
~ 500 TR	2	2	14	14	14
~ 1000 TR	4	4	28	28	28

Fonte: Autoria própria.

Uma grande diferença entre os sistemas é a quantidade de máquinas instaladas, que pode ser visualizada na Tabela 5:

Tabela 5 – Quantidade de máquinas e refrigerante por sistema

Sistema	Tipo Máquina	Qtd. Máquinas e Refrigerante (São Paulo)				
		~30 TR	~80 TR	~200 TR	~500 TR	~1000 TR
ÁGUA GEL.	Chiller	2	1	1	2	4
	UTA	3	8	20	46	92
	Bomba	2	1	1	2	4
	Total	7	10	22	50	100
	Qtd. Gás Refrig.	24 kg	100 kg	245 kg	585 kg	1170 kg
VRF	Un. Externa	4	15	39	90	180
	Un. Interna	14	80	224	520	1040
	Ventilador	2	8	20	46	92
	Total	20	103	283	656	1312
	Qtd. Gás Refrig.	45 kg	138 kg	371 kg	859 kg	1719 kg
PACKAGE	Condensadora	3	8	20	46	92
	Evaporadora	3	8	20	46	92
	Total	6	16	40	92	184
	Qtd. Gás Refrig.	27 kg	88 kg	222 kg	513 kg	1026 kg

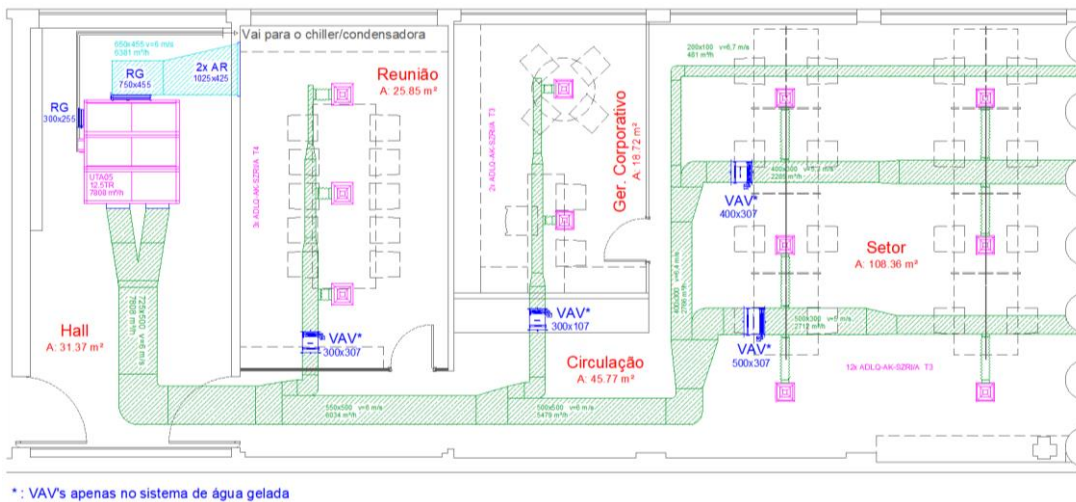
Fonte: Autoria própria.

Pela sua natureza modular e mais descentralizada, a quantidade de máquinas utilizadas no sistema VRF é de 2 a 13 vezes maior do que no sistema de água gelada. Quando comparado ao package, a diferença é menor, porém ainda significativa, de 3 a 7 vezes mais máquinas. A quantidade de gás

refrigerante também foi comparada devido aos riscos que apresenta aos ocupantes em caso de vazamento. O demonstrativo pode ser visualizado na Tabela 5.

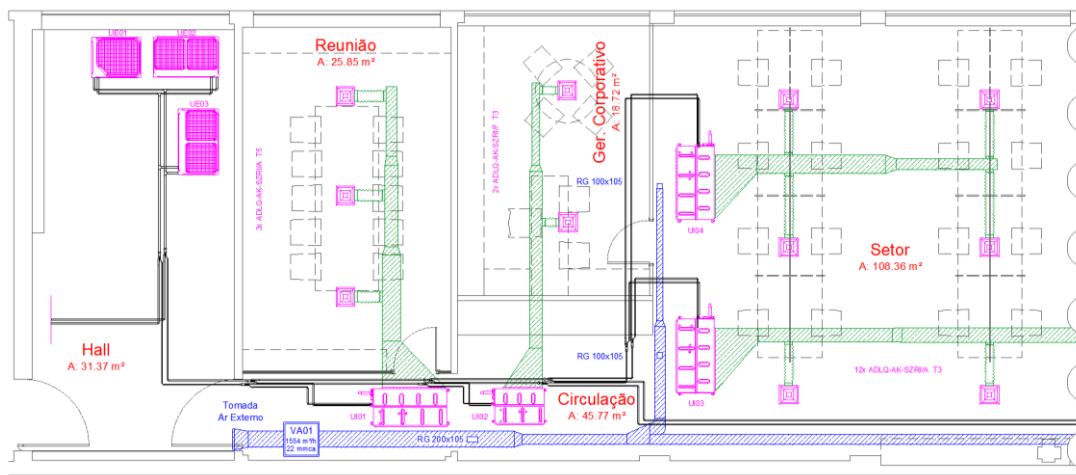
O projeto para uma das zonas pode ser visto nas Figuras 1 e 2. A Figura 1 demonstra o sistema de água gelada que por sua vez é similar ao package, com a diferença das caixas VAV's. Já a Figura 2 apresenta o projeto para o sistema VRF.

Figura 1 – Projeto do sistema de distribuição de ar (água gelada e package)



Fonte: Autoria própria.

Figura 2 – Projeto do sistema de distribuição de ar (VRF)



Fonte: Autoria própria.

Com os projetos concluídos e com a tomada de preços no mercado local, foi possível totalizar os custos iniciais de cada instalação, que estão discriminados nas Tabela 6 e 7.

CONBRAVA 2019 – São Paulo Expo, 10 a 13 de Setembro de 2019 - São Paulo, Brasil

Tabela 6 – Custos iniciais (R\$) para São Paulo e Rio de Janeiro (base de preços 03/2019)

Sistema	Composição Custo	São Paulo					Rio de Janeiro				
		~30 TR	~80 TR	~200 TR	~500 TR	~1000 TR	~30 TR	~80 TR	~200 TR	~500 TR	~1000 TR
SISTEMA ÁGUA GELADA	Automação	3 K	9 K	22 K	50 K	101 K	3 K	9 K	22 K	50 K	101 K
	Difusão	12 K	37 K	99 K	229 K	458 K	12 K	37 K	99 K	229 K	458 K
	Hidráulica	35 K	72 K	177 K	379 K	757 K	45 K	79 K	191 K	428 K	849 K
	Dutos	21 K	67 K	180 K	417 K	834 K	21 K	67 K	180 K	417 K	834 K
	VAV	26 K	80 K	207 K	479 K	958 K	26 K	80 K	207 K	479 K	958 K
	UTA	39 K	122 K	319 K	737 K	1,5 M	42 K	127 K	332 K	768 K	1,5 M
	Chiller	77 K	188 K	381 K	880 K	1,8 M	77 K	215 K	440 K	1,1 M	2,1 M
	MO	99 K	339 K	907 K	2,1 M	4,2 M	99 K	339 K	907 K	2,1 M	4,2 M
	Total	313 K	915 K	2,3 M	5,3 M	10,5 M	325 K	953 K	2,4 M	5,5 M	11,1 M
Total / TR	13,0 K	11,1 K	10,4 K	10,3 K	10,3 K	11,0 K	9,4 K	8,8 K	8,8 K	8,8 K	
SISTEMA VRF	Ventilador	5 K	20 K	51 K	116 K	233 K	5 K	20 K	51 K	116 K	233 K
	Tubulação	9 K	29 K	83 K	192 K	384 K	8 K	31 K	88 K	203 K	407 K
	Difusão	12 K	36 K	96 K	222 K	444 K	12 K	36 K	96 K	222 K	444 K
	Dutos	13 K	39 K	102 K	237 K	473 K	13 K	39 K	102 K	237 K	473 K
	Un. Interna	34 K	135 K	372 K	863 K	1,7 M	35 K	138 K	380 K	881 K	1,8 M
	MO	91 K	312 K	834 K	1,9 M	3,9 M	91 K	312 K	834 K	1,9 M	3,9 M
	Un. Externa	89 K	294 K	776 K	1,8 M	3,6 M	91 K	319 K	846 K	2,0 M	3,9 M
	Total	253 K	866 K	2,3 M	5,4 M	10,7 M	255 K	895 K	2,4 M	5,5 M	11,1 M
Total / TR	10,5 K	10,5 K	10,5 K	10,5 K	10,5 K	8,6 K	8,8 K	8,8 K	8,8 K	8,8 K	
SISTEMA PACKAGE	Tubulação	5 K	17 K	39 K	86 K	173 K	6 K	21 K	50 K	116 K	232 K
	Difusão	12 K	37 K	99 K	229 K	458 K	12 K	37 K	99 K	229 K	458 K
	Dutos	21 K	67 K	180 K	417 K	834 K	21 K	67 K	180 K	417 K	834 K
	Evaporadora	39 K	119 K	311 K	718 K	1,4 M	40 K	123 K	324 K	747 K	1,5 M
	Condensadora	55 K	176 K	456 K	1,1 M	2,1 M	70 K	225 K	598 K	1,4 M	2,8 M
	MO	65 K	221 K	591 K	1,4 M	2,7 M	65 K	221 K	591 K	1,4 M	2,7 M
	Total	197 K	637 K	1,7 M	3,9 M	7,7 M	214 K	695 K	1,8 M	4,3 M	8,5 M
	Total / TR	8,1 K	7,7 K	7,6 K	7,6 K	7,6 K	7,2 K	6,9 K	6,8 K	6,8 K	6,8 K

Obs.: Valores em R\$

Fonte: Autoria própria.

Tabela 7 – Custos iniciais (R\$) para Brasília e Curitiba (base de preços 03/2019)

Sistema	Composição Custo	Brasília					Curitiba				
		~30 TR	~80 TR	~200 TR	~500 TR	~1000 TR	~30 TR	~80 TR	~200 TR	~500 TR	~1000 TR
SISTEMA ÁGUA GELADA	Automação	3 K	9 K	22 K	50 K	101 K	3 K	9 K	22 K	50 K	101 K
	Difusão	12 K	37 K	99 K	229 K	458 K	12 K	37 K	99 K	229 K	458 K
	Hidráulica	35 K	73 K	178 K	383 K	766 K	35 K	72 K	178 K	381 K	762 K
	Dutos	21 K	67 K	180 K	417 K	834 K	21 K	67 K	180 K	417 K	834 K
	VAV	26 K	80 K	207 K	479 K	958 K	26 K	80 K	207 K	479 K	958 K
	FC	39 K	122 K	317 K	733 K	1,5 M	39 K	122 K	318 K	733 K	1,5 M
	Chiller	77 K	175 K	361 K	762 K	1,5 M	77 K	188 K	361 K	849 K	1,7 M
	MO	99 K	339 K	907 K	2,1 M	4,2 M	99 K	339 K	907 K	2,1 M	4,2 M
	Total	313 K	902 K	2,3 M	5,2 M	10,3 M	313 K	915 K	2,3 M	5,2 M	10,5 M
Total / TR	14,2 K	12,1 K	11,4 K	11,2 K	11,2 K	13,5 K	11,6 K	10,8 K	10,8 K	10,8 K	
SISTEMA VRF	Ventilador	5 K	20 K	51 K	116 K	233 K	5 K	20 K	51 K	116 K	233 K
	Tubulação	9 K	29 K	83 K	192 K	384 K	9 K	29 K	83 K	192 K	384 K
	Difusão	12 K	36 K	96 K	222 K	444 K	12 K	38 K	101 K	234 K	468 K
	Dutos	13 K	39 K	102 K	237 K	473 K	13 K	39 K	102 K	237 K	473 K
	Un. Interna	34 K	135 K	372 K	863 K	1,7 M	34 K	135 K	372 K	863 K	1,7 M
	MO	91 K	312 K	834 K	1,9 M	3,9 M	91 K	312 K	834 K	1,9 M	3,9 M
	Un. Externa	89 K	294 K	776 K	1,8 M	3,6 M	89 K	294 K	776 K	1,8 M	3,6 M
	Total	253 K	866 K	2,3 M	5,4 M	10,7 M	253 K	868 K	2,3 M	5,4 M	10,7 M
Total / TR	11,5 K	11,6 K	11,7 K	11,7 K	11,7 K	10,9 K	11,0 K	11,0 K	11,0 K	11,0 K	
SISTEMA PACKAGE	Tubulação	5 K	17 K	39 K	86 K	172 K	5 K	17 K	39 K	86 K	173 K
	Difusão	12 K	37 K	99 K	229 K	458 K	12 K	37 K	99 K	229 K	458 K
	Dutos	21 K	67 K	180 K	417 K	834 K	21 K	67 K	180 K	417 K	834 K
	Evaporadora	39 K	119 K	311 K	719 K	1,4 M	38 K	119 K	313 K	722 K	1,4 M
	Condensadora	51 K	172 K	452 K	1,0 M	2,1 M	55 K	176 K	456 K	1,1 M	2,1 M
	MO	65 K	221 K	591 K	1,4 M	2,7 M	65 K	221 K	591 K	1,4 M	2,7 M
	Total	193 K	634 K	1,7 M	3,9 M	7,7 M	196 K	638 K	1,7 M	3,9 M	7,7 M
	Total / TR	8,8 K	8,5 K	8,4 K	8,4 K	8,4 K	8,5 K	8,1 K	8,0 K	8,0 K	8,0 K

Obs.: Valores em R\$

Fonte: Autoria própria.

Os custos de operação, relacionados a consumo de energia e manutenção foram totalizados na Tabela 8. O custo de energia foi considerado constante ao longo dos anos.

Tabela 8 – Custos de operação

	Água Gelada					Package					VRF					
	~30 TR	~80 TR	~200 TR	~500 TR	~1000 TR	~30 TR	~80 TR	~200 TR	~500 TR	~1000 TR	~30 TR	~80 TR	~200 TR	~500 TR	~1000 TR	
São Paulo (R\$0,59/kWh)	Consumo Total (kWh/ano)	43,3 K	140,0 K	373,3 K	889,9 K	1,8 M	76,3 K	261,6 K	697,7 K	1,6 M	3,2 M	34,1 K	123,3 K	333,1 K	747,4 K	1,5 M
	COP calculado *	3,31	3,65	3,69	3,58	3,56	1,93	2,00	2,01	2,02	2,02	4,30	4,24	4,22	4,35	4,35
	Custo Energia (R\$/ano)	25,6 K	82,8 K	220,6 K	526,0 K	1,1 M	45,1 K	154,6 K	412,4 K	953,7 K	1,9 M	20,2 K	72,9 K	196,9 K	441,8 K	883,5 K
	Manutenção (R\$/ano)	0,5 K	1,8 K	4,9 K	11,3 K	22,5 K	0,3 K	1,1 K	2,9 K	6,7 K	13,3 K	0,5 K	1,8 K	4,9 K	11,3 K	22,5 K
Rio de Janeiro (R\$0,67/kWh)	Consumo Total (kWh/ano)	52,5 K	152,7 K	433,6 K	1,0 M	2,0 M	90,2 K	313,9 K	845,4 K	2,0 M	3,9 M	39,9 K	139,7 K	377,4 K	849,9 K	1,7 M
	COP calculado *	3,26	3,95	3,74	3,70	3,68	2,06	2,08	2,07	2,07	2,07	4,28	4,32	4,29	4,41	4,41
	Custo Energia (R\$/ano)	35,1 K	102,0 K	289,7 K	676,6 K	1,4 M	60,3 K	209,8 K	564,9 K	1,3 M	2,6 M	26,7 K	93,4 K	252,2 K	567,9 K	1,1 M
	Manutenção (R\$/ano)	0,7 K	2,4 K	6,5 K	15,0 K	30,1 K	0,4 K	1,4 K	3,8 K	8,9 K	17,8 K	0,7 K	2,4 K	6,5 K	15,0 K	30,1 K
Brasília (R\$0,75/kWh)	Consumo Total (kWh/ano)	42,9 K	148,4 K	397,1 K	893,1 K	1,8 M	87,7 K	279,6 K	731,0 K	1,7 M	3,4 M	34,4 K	123,0 K	331,7 K	744,1 K	1,5 M
	COP calculado *	3,42	3,47	3,48	3,58	3,55	2,08	2,09	2,09	2,09	2,09	4,27	4,19	4,16	4,30	4,30
	Custo Energia (R\$/ano)	32,4 K	112,0 K	299,6 K	673,9 K	1,4 M	66,1 K	210,9 K	551,6 K	1,3 M	2,5 M	25,9 K	92,8 K	250,3 K	561,4 K	1,1 M
	Manutenção (R\$/ano)	0,5 K	1,7 K	4,6 K	10,7 K	21,4 K	0,3 K	1,0 K	2,7 K	6,3 K	12,7 K	0,5 K	1,7 K	4,6 K	10,7 K	21,4 K
Curitiba (R\$0,77/kWh)	Consumo anual Total (kWh)	37,8 K	124,1 K	341,2 K	791,0 K	1,6 M	74,4 K	254,5 K	679,6 K	1,6 M	3,1 M	32,5 K	114,2 K	308,5 K	690,5 K	1,4 M
	COP calculado *	3,36	3,67	3,59	3,59	3,56	1,92	1,99	2,01	2,01	2,01	3,91	3,98	3,97	4,11	4,11
	Custo Energia (R\$/ano)	29,1 K	95,4 K	262,4 K	608,3 K	1,2 M	57,2 K	195,7 K	522,6 K	1,2 M	2,4 M	25,0 K	87,8 K	237,3 K	530,9 K	1,1 M
	Manutenção (R\$/ano)	0,5 K	1,7 K	4,6 K	10,6 K	21,3 K	0,3 K	1,0 K	2,7 K	6,3 K	12,6 K	0,5 K	1,7 K	4,6 K	10,6 K	21,3 K

* COP total do sistema

Fonte: Autoria própria.

Uma informação importante é o espaço ocupado da edificação pelos equipamentos de ar condicionado. Isso pode fazer diferença no planejamento de área útil e vendável da construção. Na Tabela 9, estão listados os *footprints (FP)* de cada sistema (a área de cada máquina foi dobrada para considerar o espaço de manutenção) para a cidade de São Paulo. Foi utilizada a média do índice FipeZap em cada cidade para o custo/m².

Tabela 9 – Footprints equipamentos

	Água Gelada					Package					VRF				
	~30 TR	~80 TR	~200 TR	~500 TR	~1000 TR	~30 TR	~80 TR	~200 TR	~500 TR	~1000 TR	~30 TR	~80 TR	~200 TR	~500 TR	~1000 TR
FP Total	3,42	21,65	37,80	86,38	172,75	5,13	15,86	40,88	94,26	188,53	5,22	17,55	46,01	106,24	212,49
FP/TR (m ² /TR)	0,14	0,26	0,17	0,17	0,17	0,21	0,19	0,18	0,18	0,18	0,22	0,21	0,21	0,21	0,21
Custo da área ocupada ¹ (R\$)	34 K	215 K	376 K	859 K	1,7 M	51 K	158 K	407 K	938 K	1,9 M	52 K	175 K	458 K	1,1 M	2,1 M

¹ Considerado índice FipeZap médio para São Paulo no mês 03/2019: R\$ 9948/m²

Fonte: Autoria própria.

Com os dados de custo inicial e operação, a análise do ciclo de vida total pôde ser realizada levando em consideração a vida útil mínima de um edifício, situada em 50 anos pelas normas brasileiras (POSSAN, 2013). Da mesma forma, a estimativa de vida para os equipamentos HVAC, segundo a

ASHRAE, são de 15 anos para o VRF e *package* e 23 anos para *chillers* (ASHRAE, 2015). Para o custo de reposição dos sistemas foi desconsiderado o custo dos dutos e difusores em todos os sistemas, assim como da tubulação de aço galvanizado. O exemplo de cálculo considerando São Paulo, assim como os resultados para cada cidade, destacando o sistema com os menores custos totais estão dispostos nas Tabelas 10 e 11.

Tabela 10 – Custo de ciclo de vida do sistema em relação ao edifício

Capacidade	30 TR			80 TR			200 TR			500 TR			1000 TR		
Sistema	AG	VRF	Package	AG	VRF	Package	AG	VRF	Package	AG	VRF	Package	AG	VRF	Package
Vida útil	23 anos	15 anos	15 anos	23 anos	15 anos	15 anos	23 anos	15 anos	15 anos	23 anos	15 anos	15 anos	23 anos	15 anos	15 anos
Tempo total ¹	50 anos			50 anos			50 anos			50 anos			50 anos		
Custo inicial (R\$)	313 K	255 K	197 K	915 K	866 K	637 K	2,3 M	2,3 M	1,7 M	5,3 M	5,4 M	3,9 M	10,5 M	10,7 M	7,7 M
Reposições sistema	1,18	2,34	2,34	1,18	2,34	2,34	1,18	2,34	2,34	1,18	2,34	2,34	1,18	2,34	2,34
Custo reposição (R\$)	250 K	228 K	164 K	746 K	791 K	533 K	1,9 M	2,1 M	1,4 M	4,3 M	4,9 M	3,2 M	8,6 M	9,8 M	6,4 M
Custo operac. total (R\$)	1,6 M	1,3 M	2,4 M	5,2 M	4,7 M	6,4 M	14,0 M	12,8 M	17,0 M	33,1 M	28,8 M	39,4 M	66,4 M	57,7 M	78,8 M
Custo total ² (R\$)	2,3 M	2,2 M	3,1 M	7,2 M	7,6 M	8,4 M	18,9 M	20,5 M	22,3 M	44,5 M	46,7 M	51,7 M	89,4 M	93,4 M	103,4 M

¹ Considerada vida útil mínima de um edifício ; ² Custo total para a cidade de São Paulo

Fonte: Autoria própria.

Tabela 11 – Custo de ciclo de vida do sistema em relação ao edifício

Capacidade	30 TR			80 TR			200 TR			500 TR			1000 TR			
Sistema	AG	VRF	Package	AG	VRF	Package	AG	VRF	Package	AG	VRF	Package	AG	VRF	Package	
Custo Total (R\$)	São Paulo	2,3 M	2,2 M	3,1 M	7,2 M	7,6 M	8,4 M	18,9 M	20,5 M	22,3 M	44,5 M	46,7 M	51,7 M	89,4 M	93,4 M	103,4 M
	Rio de Janeiro	2,8 M	2,6 M	3,9 M	8,4 M	8,9 M	13,4 M	23,1 M	24,1 M	36,1 M	53,7 M	54,9 M	83,4 M	107,8 M	109,7 M	166,9 M
	Brasília	2,5 M	2,4 M	4,1 M	8,4 M	8,4 M	13,0 M	22,2 M	22,6 M	34,2 M	50,2 M	51,3 M	78,9 M	100,9 M	102,6 M	157,7 M
	Curitiba	2,4 M	2,3 M	3,6 M	7,6 M	8,1 M	12,3 M	20,3 M	21,9 M	32,7 M	47,1 M	49,7 M	75,6 M	94,5 M	99,5 M	151,3 M
Custo Total por TR (R\$)	São Paulo	95 K	91 K	129 K	88 K	92 K	101 K	86 K	93 K	101 K	87 K	91 K	101 K	87 K	91 K	101 K
	Rio de Janeiro	95 K	87 K	132 K	83 K	88 K	133 K	85 K	89 K	133 K	86 K	87 K	133 K	86 K	87 K	133 K
	Brasília	115 K	108 K	184 K	113 K	113 K	175 K	112 K	114 K	172 K	109 K	112 K	172 K	110 K	112 K	172 K
	Curitiba	103 K	102 K	157 K	97 K	104 K	156 K	97 K	104 K	156 K	97 K	102 K	156 K	97 K	102 K	156 K

Fonte: Autoria própria.

4 CONCLUSÕES

A primeira análise fundamental é a comparativa em relação aos custos iniciais de instalação dos sistemas. Observando a Tabela 6 é possível verificar que o sistema *package* apresenta o menor custo inicial em todas as situações, o sistema de água gelada apresenta um custo maior para as capacidades de 30 e 80TR, e intermediário para 200, 500 e 1000 TR. Os sistemas VRF apresentam, em geral, custo maior, com exceção das capacidades de 30 e 80 TR.

Ainda em relação aos custos da Tabela 6, destaca-se que para a mesma obra os custos iniciais no Rio de Janeiro são entre 5 a 7% mais altos, principalmente por conta do perfil de carga térmica mais severo.

Pela Tabela 7 é possível verificar que, independente da região, o custo de energia consumida pelo sistema *package* é maior dentre os 3 tipos de sistemas devido a sua menor eficiência energética em cargas parciais e o fato de que esse sistema não utiliza VAV's, trabalhando em vazão constante.

O menor consumo de energia foi apresentado pelo sistema VRF, que possui uma eficiência maior entre os sistemas analisados. Ao verificar também o menor custo inicial a baixas capacidades, este sistema é uma boa opção para capacidades na faixa de 30 TR a 80 TR.

Considerando o uso da área construída para a instalação de equipamentos, conforme a Tabela 8, pode-se chegar à conclusão que o VRF ocupa uma área maior, já o package está em um patamar intermediário, e a água gelada ocupa menos espaço da construção, com exceção da capacidade de 80 TR.

Analisando o custo total levando em consideração a vida útil do edifício, o panorama é diferente de quando se considera apenas o custo inicial e operacional para a tomada de decisão. Devido à baixa eficiência, o sistema package apresentou o pior resultado em todas as capacidades. Para a capacidade de 30 TR, o VRF se mostrou mais competitivo, com a água gelada apresentando resultados similares apenas nas cidades de São Paulo e Curitiba. Para a capacidade de 80 TR o sistema de água gelada se saiu melhor, apenas empatando com o VRF em Brasília. Já nas maiores capacidades de 200 a 1000 TR, o sistema com água gelada obteve melhores resultados.

Um guia geral de acordo com os dados obtidos e características dos sistemas pode ser visualizado abaixo na Tabela 12.

Tabela 12 – Comparativo geral e sugestão dos sistemas de acordo com vida total.

Comparativo	Sistema			Capacidade					
	Água Gelada	VRF	Package	Cidade	30 TR	80 TR	200 TR	500 TR	1000 TR
Investimento inicial	7	7	10	São Paulo	VRF	AG / VRF	AG	AG	AG
Consumo energético	8	10	5	Rio de Janeiro	VRF	AG / VRF	AG	AG	AG
Custo total ciclo edifício	10	9	6	Brasília	VRF	AG / VRF	AG	AG	AG
Espaço ocupado	10	8	9	Curitiba	VRF	AG / VRF	AG	AG	AG
Manutenção	7	7	10						
Quantidade de máquinas	10	5	8						
Quantidade de gás refrigerante	9	5	10						
Controle de umidade	10	5	5						
Qualidade do ar interior	10	6	10						

Fonte: Autoria própria.

Neste estudo, foram obtidos comparativos considerando apenas um tipo de equipamento para cada sistema. No caso da água gelada, por exemplo, foram considerados chillers inverters condensados à ar de apenas um fabricante e sem variação no tipo do compressor (exceto pela capacidade de 30 TR), assim como apenas um sistema de bombeamento. No caso do VRF, apenas unidades externas condensadas à ar de um fabricante específico. Portanto, análises com diferentes componentes e configurações serão realizadas para complementar o estudo.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **The Ashrae Handbook 2015: Applications**: SI Editions. Atlanta, 2015. 63 caps.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **The Ashrae Handbook 2016: HVAC Systems and Equipment**: SI Editions. Atlanta, 2016. 52 caps.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **The Ashrae Handbook 2017: Fundamentals**: SI Editions. Atlanta, 2017. 40 caps.

CARRIER. **Weathermakers to the world**. Disponível em: <<http://www.williscarrier.com/m/1923-1929.php>> Acesso em 2019

DAIKIN. **ASHRAE Standards 15 and 34 – Considerations for VRV/VRF Systems**. Maio 2013

IEA [International Energy Agency]. **The Future of Cooling: Opportunities for energy-efficient air conditioning**. OECD/IEA: Paris, 2018.

POSSAN, Edna; DEMOLINER, Carlos Alberto. **Desempenho, durabilidade e vida útil das edificações: abordagem geral**. Revista técnico-científica, v. 1, n. 1, 2013.

SMITH. **History lesson ductless has come a long way**. Disponível em: <<https://www.achrnews.com/articles/102091-history-lesson-ductless-has-come-a-long-way>> Acesso em 2019

TORCELLINI P., PLESS S., DERU M. **Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition**. Agosto 2006.