

# **ANÁLISE DE CUSTO OPERACIONAL DE CONDENSADORES DE AMÔNIA DE ACORDO COM DADOS CLIMÁTICOS DA REGIÃO DE INSTALAÇÃO DO EQUIPAMENTO PARA OBTENÇÃO DO MELHOR *PAYBACK***

**Rodolfo de Campos Lima, [rodolfodecamposlima@gmail.com](mailto:rodolfodecamposlima@gmail.com)<sup>1</sup>**

**Sérgio Wortmann (orientador), [sergio.wortmann@farroupilha.ifrs.edu.br](mailto:sergio.wortmann@farroupilha.ifrs.edu.br)<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – Campus Farroupilha, Avenida São Vicente, 785, Cinquentanário, Farroupilha, RS.

**Resumo:** *O presente trabalho apresenta a implementação de uma análise de seleção de diferentes condensadores para um sistema de refrigeração, comparando as tecnologias de condensação a ar, adiabática e evaporativa. Analisou-se o clima das cinco regiões do Brasil a partir da classificação Köppen-Geiger, obtendo as informações anuais de temperatura através do Instituto Nacional de Meteorologia INMET. Essa estrutura de escolha teve seus resultados obtidos nos softwares de seleção do fabricante e planilhas de cálculos, comparando os custos operacionais de acordo com a região de instalação do equipamento, com condensação constante. Foram analisados o investimento inicial, o custo energético e os custos de água e no final, fez-se um comparativo de retorno de investimentos entre as regiões de acordo com a tecnologia.*

**Palavras-chave:** *Análise de retorno de investimento, Condensadores, Análise Climática e Refrigeração.*

## **1. INTRODUÇÃO**

O aumento no consumo de alimentos, as rápidas mudanças de consumo causadas por um mundo cada vez mais dinâmico proporcionam crescimento na utilização de sistemas de refrigeração na indústria de alimentos, de armazenamento, assim como na climatização de diversos tipos de ambientes. Isso faz com que a procura por recursos energéticos mais eficientes aumentem anualmente. Logo, a busca por meios de melhor rendimento para manter a temperatura de ambientes em condições ideais motiva o desenvolvimento de técnicas que utilizem menos energia e que desenvolvam melhores ferramentas para seleção dos componentes do sistema.

Segundo dados da Associação Brasileira de Supermercados (Abras), (CABRINI, 2019), cerca de aproximadamente 70% do consumo energético em um supermercado é oriundo dos equipamentos de refrigeração. Esses dados mostram que a escolha correta dos componentes e suas tecnologias é de extrema importância no desenvolvimento de uma indústria mais competitiva e mais sustentável.

Segundo (LIMA, 2018), a refrigeração industrial tem como objetivo, manter ou reduzir a temperatura de uma substância ou meio. Na indústria são utilizados diferentes ciclos frigoríficos para realização deste processo. Os mais comuns são refrigeração por compressão de vapor, por absorção de amônia, sistemas de fluidos secundários, sistemas em cascata e suas variantes. Cada ciclo possui suas características e componentes utilizados, porém sua aplicação depende das capacidades frigorígenas, características da planta e do tipo de alimento ou ambiente a ser refrigerado. Qualquer sistema de compressão a vapor tem 4 componentes principais, válvula de expansão, evaporador, compressor e condensador. Os condensadores, que são objeto deste estudo, são responsáveis pela rejeição de calor do sistema e são categorizados de acordo com o princípio de funcionamento. Os principais tipos são classificados como, condensadores aletados a ar, adiabático ou evaporativos, casco e tubo e placas. Cada tecnologia de condensação possui princípios de operação distintos o que impacta na escolha de acordo com o clima do local de instalação e sistema.

Tendo em vista as ponderações desenvolveu-se, neste trabalho, um comparativo de seleção de condensadores a ar, adiabáticos e evaporativos, os quais são os mais comuns dentro dos sistemas de refrigeração industrial e que foram comparados para o desenvolvimento deste artigo. Para obtenção da melhor tecnologia e melhor retorno de investimento dentro do prazo de dois anos de acordo com o local de instalação. Esta metodologia foi desenvolvida a partir de análises climáticas de 121 cidades de todas as regiões climáticas do Brasil, ou seja, as cinco regiões do país (Norte, Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste e Sul).

Objetiva-se com este trabalho entregar aos profissionais que fazem seleção de condensadores um comparativo de custos de seleção de condensadores visando ao aprimoramento de recursos como energia e água, a fim de obter o melhor retorno de investimento. Embora os condensadores sejam utilizados desde o princípio do sistema de refrigeração industrial e comercial, além de e que a seleção destes componentes é realizada de maneira satisfatória através de temperaturas de seleção obtidas por sites como INMET e tabelas normatizadas pela ASHRAE, estes modelos

tradicionais de escolha não consideram as variações climáticas e não avaliam os custos operacionais e recursos como água e energia para definição de qual tecnologia deva ser utilizada num sistema de refrigeração.

Este trabalho analisou o comportamento de uma tecnologia recente de condensação no Brasil, os condensadores adiabáticos. Eles apresentam como principal vantagem o comportamento híbrido entre um condensador evaporativo e a ar. Isso faz com que essa tecnologia utilize menos água e mais energia em comparação ao evaporativo, porém, ocupa menos área instalada e menos energia em comparação ao ar. Como os princípios de seleção, operação e o uso dos recursos entre as tecnologias são diferentes e como o clima tem impacto direto na seleção, a escolha destes componentes sem uma análise mais profunda dos climas e suas variações durante o ano, tornam este trabalho uma prática não comum para o segmento de refrigeração.

Nesse contexto, apresenta-se o resultado da ótima seleção de condensadores de acordo com a cidade de instalação levando em consideração os custos de energia elétrica dos equipamentos e de água, de um sistema de refrigeração de carga térmica de 750 kW. Com os modelos definidos e com auxílio dos softwares dos fabricantes, obteve-se a modelagem de cada componente de forma que as equações desenvolvidas pudessem levar a planta controlada a um ponto de operação mais eficiente. Tendo em vista a necessidade de se oferecer meios de resfriamento mais eficientes aos ciclos frigoríficos.

Para realização deste trabalho primeiramente foi realizada uma verificação da literatura a respeito do tema abordado. Não foram encontrados trabalhos diretamente relacionados com a proposta deste. Entretanto, utilizaram-se pesquisas acadêmicas desenvolvidas na busca da melhoria da eficiência energética de sistemas de refrigeração o que diretamente se relacionam com o custo operacional dos sistemas. Os estudos estão descritas abaixo, para fundamentação e conceituação da pesquisa.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

(LIMA, 2016), trabalha com uma aplicação da temperatura ótima de condensação em uma cervejaria. O objetivo do trabalho foi de otimizar a eficiência energética do sistema de refrigeração que corresponde a 40% do consumo de energia elétrica da empresa. Através de uma série de ações baseadas em uma metodologia de boas práticas de eficiência energética em sistemas de refrigeração obteve-se uma redução mensal em um mês analisado de 15%.

(WALTHER, 2009), realizou um estudo experimental em um condensador evaporativo em escala reduzida. Neste trabalho, foi avaliado o impacto da temperatura de bulbo úmido na capacidade de um condensador evaporativo. Através de testes em laboratório baseado na norma ASHRAE 64-1995, ele observou uma redução de média de 13% na capacidade do condensador evaporativo com o aumento de 2 °C na temperatura de bulbo úmido.

(SOUZA, 2020a), modelou um condensador do tipo tubo-aletado, para analisar o desempenho termodinâmico deste componente. O modelamento foi de acordo com o método de Volumes Finitos através da linguagem de programação FORTRAN. Neste trabalho, observou-se o comportamento do condensador de acordo com a temperatura de entrada do ar, as faixas de temperatura analisadas foram de 24 °C a 34 °C, variando a temperatura a cada 2°C. A partir do estudo, observou uma redução média de 5,2% na capacidade do condensador ao aumento de temperatura de entrada a cada aumento de 1 °C.

(SOUZA, 2020b), analisou para um mesmo sistema de refrigeração por compressão a vapor, para a cidade de Bragança Paulista, duas tecnologias de condensação para três tipos de fluido refrigerante. Ele comparou através do software CoolPack a eficiência energética e a emissão de CO<sub>2</sub> entre um condensador a ar e um condensador evaporativo. Os resultados mostram que o condensador evaporativo, apesar de apresentar 2,8% mais emissão de CO<sub>2</sub>, tem uma eficiência energética maior.

Apesar de não ter encontrado trabalhos que tenham exatamente as características da proposta deste artigo, todos abordam estudos que contribuem com a realização deste, mas nenhum deles se refere à análise climática do Brasil para definição da temperatura de seleção e a melhor tecnologia de condensação de acordo com a variação climática da região.

## 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 3.1. CICLO DE REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO DE VAPOR

De acordo com (LIMA, 2018), um sistema de refrigeração caracteriza-se pela troca de calor de um determinado ambiente através da transferência de energia, em forma de energia térmica, em um fluido refrigerante, conforme um ciclo frigorífico. Para realizar a transferência térmica, o refrigerante passa por uma série de processos de forma cíclica mantendo as condições de projeto. para manter a temperatura desejada em um ambiente específico. Dando continuidade à explicação sobre o ciclo de refrigeração, apresenta-se na Figura 1, a representação do diagrama de fases, nele T é temperatura e s entropia específica característica deste sistema. Neste, QL é o calor retirado do ambiente refrigerado, Win é o trabalho que deve ser fornecido para elevar a pressão do sistema e QH é o calor trocado com o ambiente. Nota-se, então, que o ciclo é composto por quatro processos: 1-2 Compressão mecânica; 2-3 Condensação; 3-4 Expansão; 4-1 Evaporação.

Em um ciclo de refrigeração por compressão de vapor, o fluido refrigerante ingressa no compressor como vapor saturado a baixa pressão [1] e, devido ao trabalho realizado sobre ele, e descarregado, como vapor superaquecido em

alta pressão no condensador [2], onde ocorre a transferência de calor para o meio. Após o condensador, como líquido saturado, ainda em pressão elevada [3].

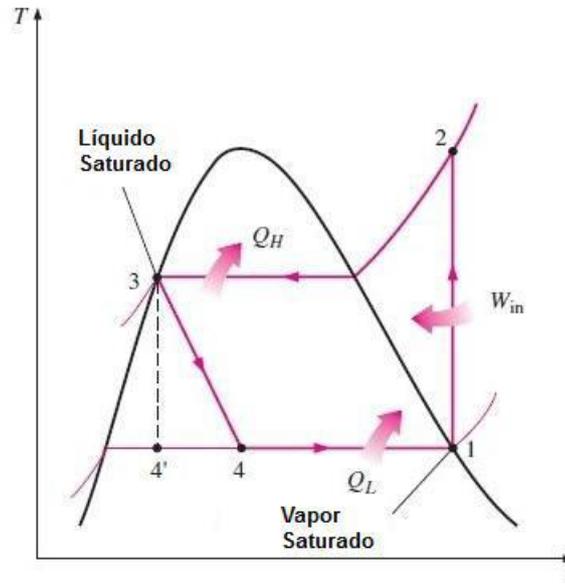


Figura 1 – Diagrama de Fases e Temperatura x Entropia, indicando o ciclo de refrigeração a compressão de vapor (Fonte: Disponível em <https://hotgasblog.wordpress.com/page/3/>)

### 3.2. CONDENSADORES

Segundo Stoecker e Jabardo (2018), há diversos modelos de condensadores utilizados na indústria, os principais são os a ar, a água e os evaporativos. Pode-se dizer que os condensadores evaporativos são uma combinação dos condensadores a água e a ar, pois apresentam características de ambos. Além disso, diferentemente dos condensadores a ar, os evaporativos trabalham, com a temperatura de bulbo úmido, o que permite uma melhor troca térmica por área. Nos condensadores evaporativos, um sistema de chuveiros é responsável por borrifar uma quantidade de água sobre a superfície externa dos tubos, onde circula o fluido refrigerante em seu interior.

Além disso, o equipamento tem um conjunto de ventiladores que gera uma corrente de ar, na temperatura de bulbo úmido, que circula na superfície externa do tubo, em contracorrente ao fluxo de refrigerante. Neste processo, segundo, a água que evapora cede calor ao vapor de líquido. Conseqüentemente, o fluido refrigerante condensa no interior dos tubos. Normalmente, a transferência de calor do fluido para o meio, num condensador é dividida em três etapas distintas. São elas: o dessuperaquecimento, a condensação e o subresfriamento. Na etapa de dessuperaquecimento, o gás superaquecido é resfriado da temperatura de descarga até a temperatura de condensação do fluido. No próximo estágio, o gás é condensado com temperatura e pressão constante e, posteriormente, o líquido é subresfriado garantindo que a válvula de expansão trabalhe apenas com a fase líquida do fluido, resultando na melhora do efeito frigorífico.

### 3.3. CONDENSADORES A AR

Segundo Stoecker e Jabardo (2018), condensadores a ar tem a função de trocar calor, rejeitando o calor absorvido pelo evaporador e o calor equivalente a energia fornecida pelo compressor, fazendo com que a substância mude de estado físico de vapor para líquido, com o auxílio de ventiladores para forçar a passagem do ar através da superfície aletada. Este sistema de resfriamento a ar apresenta menor custo inicial aliado a um custo reduzido de manutenção e operacional, uma vez que não há circulação ou evaporação de água, porém em contrapartida tem um consumo elevado de energia. Na Figura 2, ilustra-se o princípio de operação.

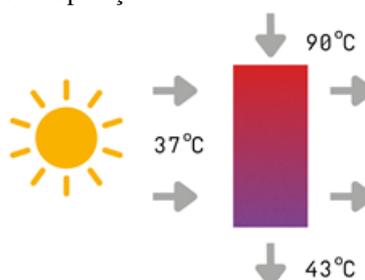


Figura 2 – Conceito Condensador a Ar (Fonte: Próprio autor)

### 3.4. CONDENSADORES ADIABÁTICOS

De acordo com a Figura 3, observa-se que os condensadores Adiabáticos funcionam de forma semelhante aos sistemas de resfriamento a ar, mas com a incorporação de painéis evaporativos de celulose (PADs). Neste sistema de resfriamento, os PADs permanecem inativos quando a temperatura no sistema não excede um limite predefinido e, então, não é usada água para resfriamento do ar. Uma vez ultrapassado o limite devido a um pico de carga ou temperatura ambiente, a umidificação é ativada e ajustada dinamicamente pelos módulos de controle. O ACS (Sistema de Resfriamento Adiabático) é um sistema que oferece uma solução com alta eficiência energética, que permite uma economia significativa de água em relação ao sistema de condensadores evaporativos, pois utiliza água somente quando a temperatura ambiente e a demanda do sistema exigem. O custo de manutenção é considerado moderado pois os PADs de umidificação secam durante a operação, então nenhuma desinfecção ou outro tratamento químico da água é necessário para garantir a higiene e a operação ser eficiente, entretanto, é necessário limpeza com frequência dos painéis evaporativos. Já o consumo de energia utilizado no sistema é moderado.

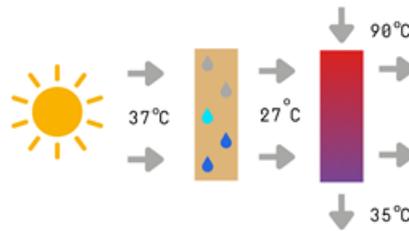


Figura 3 – Conceito Condensador Adiabático (Fonte: Próprio autor)

### 3.5. CONDENSADORES EVAPORATIVOS

De acordo com Stoecker e Jabardo (2018), condensadores evaporativos realizam troca de calor de forma indireta, ou seja, realiza a troca térmica através de uma superfície metálica, não obtendo contato direto entre o vapor a ser condensado e a água de resfriamento, o calor rejeitado pelo refrigerante é transferido sucessivamente à água e ao ar ambiente. Condensadores evaporativos de última geração contam com menores custos operacionais, maior eficiência e sustentabilidade. Reduzem consideravelmente o consumo de energia, porém o consumo de água utilizado no sistema é elevada, assim como, o custo de manutenção. Na Figura 4, ilustra-se o princípio de operação.

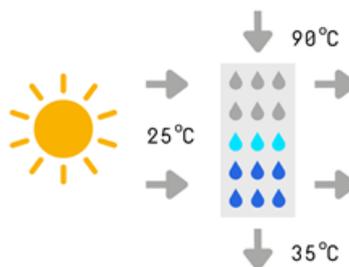


Figura 4 – Conceito Condensador Evaporativo (Fonte: Próprio autor)

A tabela 5, a seguir, mostra um comparativo de consumo qualitativo de energia, água e custos operacionais das três tecnologias apresentadas.

	ENERGIA	ÁGUA	MANUTENÇÃO
Cond. a Ar	***	-	*
Cond. Adiabático	**	*	**
Cond. Evaporativo	*	***	***

Figura 5 – Comparativo Conceitos de Condensadores (Fonte: Güntner)

\*Consumo/custo baixo \*\*Consumo/custo moderado \*\*\*Consumo/custo elevado

### 3.6. CLASSIFICAÇÃO DE KÖPPEN GEIGER

De acordo com Wikipedia, o Brasil pode ser dividido em 7 subclimas de acordo com a classificação climática de Köppen, que é o sistema de classificação global dos tipos climáticos mais utilizados em geografia, climatologia e ecologia. Ela é baseada no conceito de que a vegetação natural é uma expressão do clima nela prevalente, pois os climas são definidos de acordo com a sazonalidade e os valores médios anuais e mensais da temperatura e da precipitação. Os grandes climas são especificados por códigos constituídos pela letra maiúscula e as minúsculas

denotam os subclimas. Nesta especificações os climas são divididos em Tropical (A), Seco (B), Temperado (C), Continental (D) e Polar (E). No Brasil, somente os climas A, B e C aparecem.

No grupo A, conforme Figura 6, o clima tropical que é caracterizado pelas altas temperaturas e sobre a variação entre uma estação seca e uma estação chuvosa. Este clima ocorre nas regiões Sudeste e Centro-Oeste. No grupo B, temos o clima seco, definido por seu baixo nível de precipitação ao longo do ano e com diversidade nas temperaturas. Este clima ocorre no Nordeste já o grupo C, o clima temperado que é um grupo climático com temperaturas médias de  $10^{\circ}\text{C}$ , sendo que o mês mais frio com média entre  $-3^{\circ}\text{C}$  a  $18^{\circ}\text{C}$ , ocorre nos estados do Sul e Estado de São Paulo.



Grupo	Tipo		Subtipo		Característica	
A	Tropical	f	Equatorial	-	-	Temperatura média de 18°C e precipitação significativa
		m	Monçônico	-	-	Temperatura média de 18°C ou superior e precipitação significativa
		w	Savânico	-	-	Temperatura média de 18°C ou superior e precipitação significativa - estação mais seca no inverno ou no verão.
		s		-	-	
B	Seco	s	Semiárido	h	quente	Baixo nível de precipitação.
C	Temperado	f	S/ estação seca	a	verão quente	O mês mais frio com média acima de 0 °C ou -3 °C, e pelo menos um mês com temperatura média acima de 22 °C e pelo menos quatro meses com média acima de 10 °C.
				b	verão fresco	O mês mais frio com média acima de 0 °C ou -3 °C, todos os meses possuem temperatura média abaixo de 22 °C e pelo menos quatro meses apresentam média acima de 10 °C.
		w	Inverno seco	a	verão quente	O mês mais frio com uma média acima de 0 °C ou -3 °C, com pelo menos um mês de temperatura média acima de 22°C e ao menos quatro meses com média acima de 10 °C. Com o verão pelo menos é dez vezes mais chuvoso que o inverno.
				b	verão fresco	O mês mais frio com uma média acima de 0 °C ou -3 °C, com todos os meses de temperatura média abaixo de 22°C e ao menos quatro meses com média acima de 10 °C.
		s	Verão seco	a	verão quente	O mês mais frio com uma média acima de 0 °C ou -3 °C, com pelo menos um mês de temperatura média acima de 22°C e ao menos quatro meses com média acima de 10 °C. Ocorre ao menos três vezes mais precipitação no mês mais chuvoso do inverno do que no mês mais seco do verão, e o mês mais seco do verão recebe menos de 30 mm.
				b	verão fresco	O mês mais frio com uma média acima de 0 °C ou -3 °C, com todos os meses de temperatura média abaixo de 22°C e ao menos quatro meses com média acima de 10 °C. Ocorre ao menos três vezes mais precipitação no mês mais chuvoso do inverno do que no mês mais seco do verão, e o mês mais seco do verão recebe menos de 30 mm

Figura 6 – Climas Tropical, Seco e Temperado(A, B e C) (Fonte: Obtido em Wikipedia)

## 4. METODOLOGIA

### 4.1. ANÁLISE CLIMÁTICA

A partir da classificação do clima dividiu-se o Brasil em regiões (Norte, Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste e Sul). Para cada região foram avaliadas as variedades de climas existentes e assim definidas as cidades para a realização deste trabalho. No total foram 121 cidades analisadas. A definição das cidades ocorreu sob alguns critérios. Primeiro foram escolhidas as capitais, em segundo as cidades mais populosas e por último foram escolhidas as cidades mais habitadas dos climas faltantes de cada estado brasileiro, até que cada estado tivesse todos os climas analisados, conforme Figura 7. Em verde estão as cidades do Norte, em vermelho do Nordeste, em laranja do Centro-Oeste, em amarelo do Sudeste e roxo do Sul.



Figura 7 – Mapa das Cidades do Brasil Analisadas (Fonte: Próprio autor)

Então, analisaram-se as informações de todas as cidades selecionadas, através dos dados de temperaturas e umidade dos últimos três anos (2019/2020/2021) disponibilizados pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). A partir dos dados coletados, verificou-se a temperatura mínima, média e a temperatura máxima bulbo seco (TBS) para cada hora do dia dos três anos, o que totaliza 8760 horas ou condições climáticas máximas. Do mesmo modo foi realizado para a temperatura de bulbo úmido (TBU) e para a umidade relativa. Assim, definiu-se a TBU e TBS máximas para cada cidade para que o condensador atenda as demandas de 99% do ano, conforme é solicitado na ASHRAE Fundamentals.

### 4.2. SELEÇÃO CONDENSADORES

Na Figura 8, exemplifica como foi realizado a metodologia para definição das temperaturas e umidade relativa para seleção dos condensadores, para que a capacidade de rejeição dimensionada para 99% do ano, ou seja, em 1% do ano a capacidade dos condensadores não atenderia o sistema e a pressão de condensação subiria nesses momentos. Esse modelo de seleção está exemplificado para a região Centro-Oeste, Brasília-DF. Pode-se perceber que utilizando a temperatura de TBS em 20°C como informação de seleção, o equipamento selecionado atenderia somente 44% dos dias em operação no período de um ano, ou seja, 124 dias do ano faltaria capacidade de condensação no sistema, conforme destacado em laranja. Já, se a temperatura de seleção for de 32°C, o equipamento selecionado atende 99% dos dias em trabalho no intervalo de um ano, conforme destacado em amarelo, a análise se repete para TBU. Por isso, definiu-se que o ponto de corte de seleção ocorrerá com atendimento de 99% do ano de acordo com a análise climática de cada cidade.



Dados:	25546	TBS [°C]:	31
Altitude [m]:	1160,96	TBU [°C]:	23
	TBS [°C]	TBU [°C]	UR [%]
Mínimo:	8,1	-5,8	10
Máximo:	35,5	28,6	93
	TBSPADS [°C]:	25	75%
	TBSPADSADC [°C]	24	90%
		$\eta$	

Temp. [°C]	Ocorrências				Análise			TBU [°C]	Ocorrências				Análise			UR [%]			
	2019	2020	2021	Total	Percentual [%]	Relativo [%]	Dias ano		2019	2020	2021	Total	Percentual [%]	Relativo [%]	Dias ano	2019	2020	2021	Média
20	3092	3704	3456	10252	40,14%	40%	146	10,0	41	35	89	76	0,30%	0,3%	1	79,8	81,0	78,1	79,6
21	995	930	760	2685,0	10,51%	51%	38	11,0	0	0	101	101,0	0,40%	0,7%	1	75,3	75,8	70,8	74,0
22	730	718	620	2068,0	8,10%	59%	30	12,0	126	151	213	490,0	1,93%	2,6%	7	67,0	67,7	64,4	66,4
23	696	656	575	1927,0	7,54%	66%	28	13,0	265	322	360	947,0	3,74%	6,4%	14	61,1	62,2	58,4	60,5
24	631	570	553	1754,0	6,87%	73%	25	14,0	474	507	539	1520,0	6,00%	12,4%	22	57,0	56,9	53,6	55,8
25	556	607	527	1690,0	6,62%	80%	24	15,0	625	741	659	2025,0	7,99%	20,4%	29	53,4	52,2	49,8	51,8
26	523	496	453	1472,0	5,76%	86%	21	16,0	806	763	800	2369,0	9,35%	29,7%	34	47,8	48,6	46,8	47,8
27	508	351	400	1259,0	4,93%	90%	18	17,0	759	804	822	2385,0	9,41%	39,1%	34	45,7	45,1	42,9	44,6
28	354	251	255	860,0	3,37%	94%	12	18,0	1119	1027	1152	3298,0	13,01%	52,1%	47	40,8	41,2	38,8	40,3
29	251	203	146	600,0	2,35%	96%	9	19,0	1710	1600	1354	4664,0	18,40%	70,5%	67	35,7	36,3	34,3	35,4
30	174	134	103	411,0	1,61%	98%	6	20,0	1456	1384	1066	3906,0	15,41%	85,9%	56	30,2	33,1	29,5	30,9
31	125	60	54	239,0	0,94%	99%	3	21,0	872	871	585	2328,0	9,18%	95,1%	34	24,2	24,8	24,2	24,4
32	67	37	59	163,0	0,64%	99%	2	22,0	319	344	178	841,0	3,32%	98,4%	12	19,8	19,9	19,9	19,9
33	39	38	43	120,0	0,47%	100%	2	23,0	83	88	56	227,0	0,90%	99,3%	3	17,3	17,4	16,8	17,2
34	2	18	9	29,0	0,11%	100%	0	24,0	30	44	22	96,0	0,38%	100%	1	15,5	15,7	16,0	15,7
35	1	9	2	12,0	0,05%	100%	0	25,0	20	18	13	51,0	0,20%	100%	1	15,0	13,7	15,5	14,7
36	0	2	0	2,0	0,01%	100%	0	26,0	9	6	4	19,0	0,07%	100%	0		13,5		13,5
37	0	0	0	0,0	0,00%	100%	0	27,0	0	1	2	3,0	0,01%	100%	0				0,0
38	0	0	0	0,0	0,00%	100%	0	28,0	1	0	0	1,0	0,00%	100%	0				0,0
39	0	0	0	0,0	0,00%	100%	0	29,0	0	0	1	1,0	0,00%	100%	0				0,0
40	0	0	0	0,0	0,00%	100%	0	30,0	0	0	0	0,0	0,00%	100%	0				0,0
41	0	0	0	0,0	0,00%	100%	0	31,0	0	0	0	0,0	0,00%	100%	0				0,0
42	0	0	0	0,0	0,00%	100%	0	32,0	0	0	0	0,0	0,00%	100%	0				0,0
	8744	8784	8015	25543					8715	8706	8016	25348							

Figura 8 – Metodologia para definição de temperatura de seleção de acordo com dados climáticos (Fonte: Próprio autor)

Em condensadores a ar, usa-se a TBS para seleção conforme exemplificado na fundamentação teórica, para condensadores evaporativo utiliza-se a TBU e para saber a temperatura dos condensadores adiabáticos é necessário considerar a eficiência ( $\eta$ ) dos painéis. Neste artigo foi considerado que a eficiência seria de 75% conforme especificado na ficha técnica do fabricante e para calcularmos a temperatura de bulbo seco após os painéis (TBSpads), utiliza-se a equação a seguir.

$$TBS_{pad} = TBS - \eta(TBS - TBU) \quad (1)$$

A partir deste momento, teremos definidos os pontos de seleções de cada equipamento que foi dividido em três regimes com diferentes temperaturas de condensação (35°C, 40°C e 45°C), as quais são as mais comuns, e as condições de temperatura de seleção já determinadas de acordo com a cidade. Deste modo, foi realizada a seleção do condensador que atenda a capacidade de cada regime, de aproximadamente 1000 kW, dividido nos três tipos de condensadores. Avaliou-se o preço de lista, o consumo de energia elétrica, o consumo de água e o consumo de energia do compressor. Posteriormente, é realizado a análise dos equipamentos propostos, comparando os regimes utilizados, o valor de lista, o consumo de água (se for ACS e/ou ECOSS), custos operacionais, menor investimento e o tempo do payback.

### 4.3. CUSTO OPERACIONAL

Para a análise de retorno de investimento utilizou-se a Equação 2 e os cálculos de custos operacionais realizados através da Equação 3. Desconsiderou-se, neste trabalho, os custos de manutenção, ou seja, na Equação 3 os custos de manutenção é igual a zero. Para cada tecnologia, os cálculos foram realizados com capacidade de rejeição de calor e temperatura de condensação constantes, a única variável do sistema considerada foi a temperatura ambiente. Cada temperatura terá uma determinada operação anual de acordo com o clima da cidade analisada, e esta oscilação térmica fará com que as diferentes tecnologias tenham retorno de investimento distinto.

$$\text{RetornoInvestimento} = \text{PrecoLista} + \text{CustoOperacional} \quad (2)$$

(Fonte: Güntner)

$$\text{Custosoperacionais} = \text{EnergiaCondensador} + \text{EnergiaCompressor} + \text{ConsumoAgua} + \text{CustoManuteno} \quad (3)$$

(Fonte: Güntner)

Para cada tecnologia de condensadores temos pré-definidos algumas informações nominais e algumas condições do projeto fixas de cada equipamento. Na Tabela 1, temos um exemplo de seleção nas condições nominais para Bento Gonçalves com uma condensação a 35°C, 40°C e 45°C. Nesta seleção, temos a capacidade requerida que é dimensionada pela potência absorvida do compressor mais a carga térmica do evaporador no ponto de seleção para o determinado regime do condensador, conforme Equação 4. Os equipamentos foram selecionados com o uso do software do fabricante, Güntner. Na tabela abaixo, ilustram-se essas condições.

$$q_{\text{Condensador}} = q_{\text{evaporador}} + P_{\text{potabsorvida}} \quad (4)$$

(Fonte: LIMA, R.,)

**Tabela 1. Informações Nominais de Seleção – Exemplo Bento Gonçalves. (Fonte: Próprio autor)**

Informações/Tecnologia	Ar	ACS	Evaporativo
Temp. de Condensação [°C]:	45	40	35
Capacidade Requerida [kW]:	1.003,4	973,6	947,8
Capacidade Nominal [kW]:	1.062,8	1.063,3	1.024,3
Quantidade:	1	1	1
Ativação Adiabático [°C]:	NA	26,0	NA
TBS [°C]:	33,0	33,0	33,0
TBU [°C]:	24,0	24,0	24,0
Pot. Energia Ventiladores [kW]:	38,4	32,0	14,8
Pot. Energia Bombas [kW]:	NA	NA	3,0
Pot. Energia Compressores [kW]:	249,6	219,8	192,0
Vazão de Água [m³/h]:	NA	0,8	1,1
Vazão de Ar [m³/h]:	330.000	275.000	111.846
Preço de Lista [R\$]:	563.065	702.464	1.274.899
Operação em dias:	365	365	365
Operação em horas por dia:	24	24	24

Os custos operacionais anuais do equipamento, são determinados a partir de informações variáveis. Isso significa que vai depender do local de instalação, do cliente e do ponto de seleção. Todas as máquinas selecionadas contam com

ventiladores eletrônicos os quais modulam sua velocidade de acordo com a demanda. Na Tabela 2, temos um exemplo das condições variáveis dos condensadores, como, o consumo de água, o consumo de energia do produto, consumo de energia do compressor. Essas variam conforme o ponto de seleção, a variação do ambiente, dos custos locais de água e energia, nas mesmas condições de operação da Tabela 1.

**Tabela 2. Custos de operação anual – Exemplo Bento Gonçalves – Valores em R\$. (Fonte: Próprio autor)**

Informações/Tecnologia	Ar	ACS	Evaporativo
Custo Energia por kWh [R\$/kWh]:	1,0	1,0	1,0
Custo Água por L/h [R\$/L/h]:	0,1	0,1	0,1
Custo Água Tratada por L/h [R\$/L/h]:	0,2	0,2	0,2
Consumo de Água [L]:	NA	550.253	7.636.731
Con. Energia Condensador [kWh]:	78.680	131.942	49.712
Con. Energia Compressor [kWh]:	1.699.222	1699.440	1.699.484
Con. Energia Total [kWh]:	1.777.901	1.831.382	1.749.196
Custo Água [R\$]:	NA	4.264,5	NA
Custo Água Tratada [R\$]:	NA	NA	118.369,33
Custo Energia [R\$]:	1.777.901,5	1.831.381,9	1.749.196,4
Custo Operacional [R\$]:	1.777.901,5	1.835.646,4	1.867.565,69

#### 4.4. ANÁLISE DO RETORNO DE INVESTIMENTO

A redução no custo de operação ocorre devido aos diferentes conceitos de operação de cada tecnologia, e, principalmente pelo fato da tecnologia adiabática e evaporativa, fazer o uso da água para rejeição de calor. Com a definição da capacidade do equipamento e a requerida pelo sistema, além da modulação do ventilador, pode-se obter a potência de cada produto em kW que consiste na potência da bomba, quando utilizada, e a do ventilador na rotação demandada.

No evaporativo, a potência da bomba é fixa. Então, utiliza-se sempre a potência nominal da bomba. Caso a temperatura fique abaixo da temperatura de seleção, a capacidade do equipamento aumenta e o ventilador pode ser modulado. Com o aumento do ponto de seleção o equipamento não atenda mais a capacidade, a pressão de condensação sobe e a potência do compressor aumenta.

No adiabático, o sistema pode pegar água diretamente da rede e não necessita levar em consideração o consumo de potência da bomba. Desta maneira, tem-se o consumo total dos equipamentos do sistema em kWh. Do mesmo modo que o consumo de energia, tem-se o consumo de água e juntamente seu tratamento químico, no caso do evaporativo e a água da rede no ACS. O consumo de água depende da capacidade do equipamento e das condições psicométricas do ar, ou seja, quanto menor a capacidade do equipamento e mais úmido for o ar, menor será o consumo de água; do contrário, maior será o consumo. O tratamento químico vai depender de quanto de água será consumida, quanto mais água evaporar com mais dureza ficará a água e precisará de tratamento químico para a retirada dos sais minerais que não evaporam.

Neste trabalho, para fazer a análise do custo operacional de cada tecnologia, utilizou-se da lógica de custo operacional de acordo com a Figura 9, os resultados foram desenvolvidos via tabela de cálculo do EXCEL.

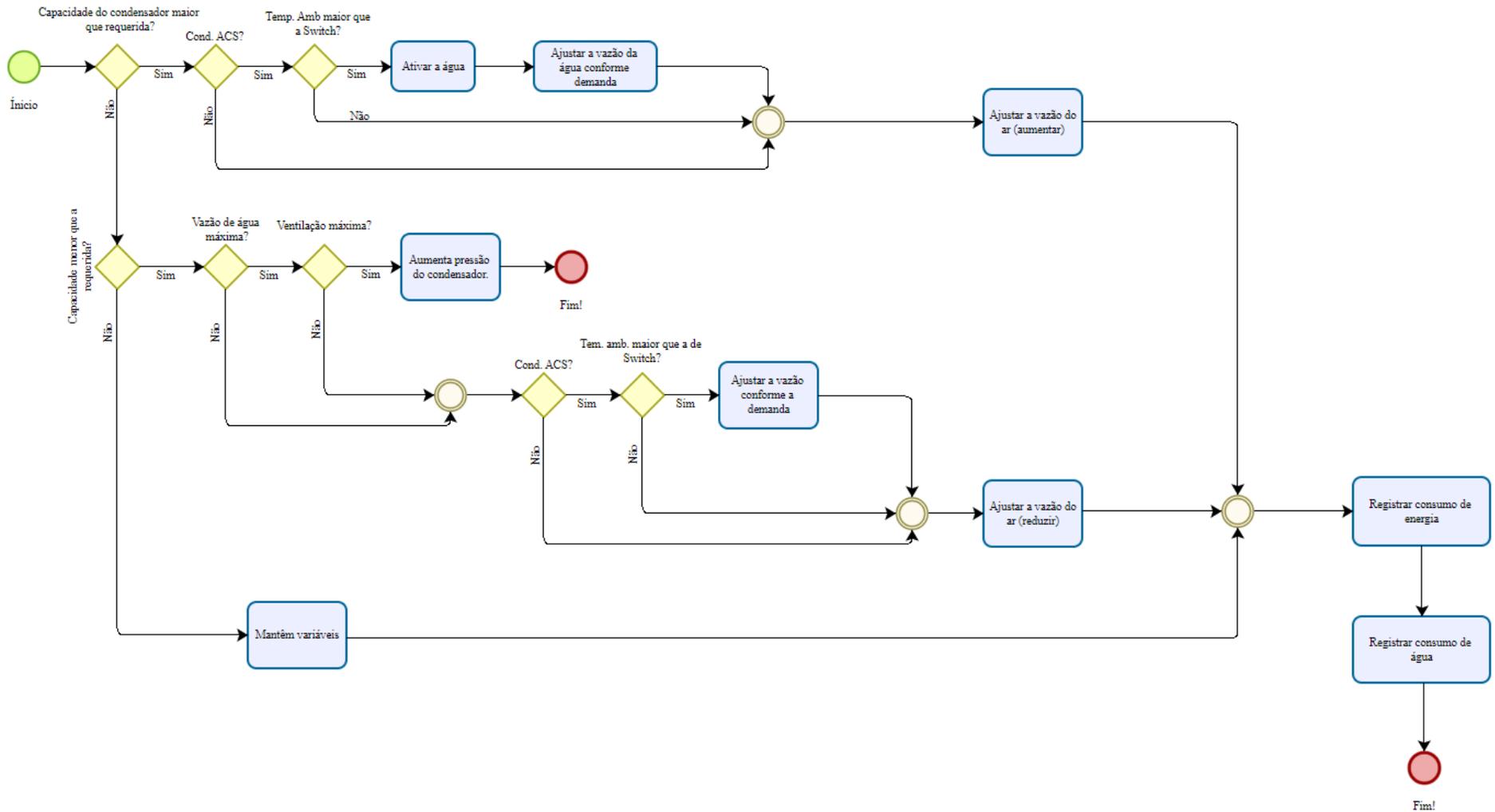


Figura 9 – Metodologia de Cálculo de Custo Operacional (Fonte: Próprio autor)

A partir da análise, detalhada no fluxograma, contabilizou-se o custo operacional de cada tecnologia de acordo com a cidade analisada armazenou-se as informações através de tabela de cálculo de EXCEL e comparou-se o investimento inicial de cada tecnologia com o custo operacional dentro do período de 2 anos, pois alguns clientes demandam esse período para payback. Assim, é possível obter o comportamento de Payback ilustrado na Figura 10.

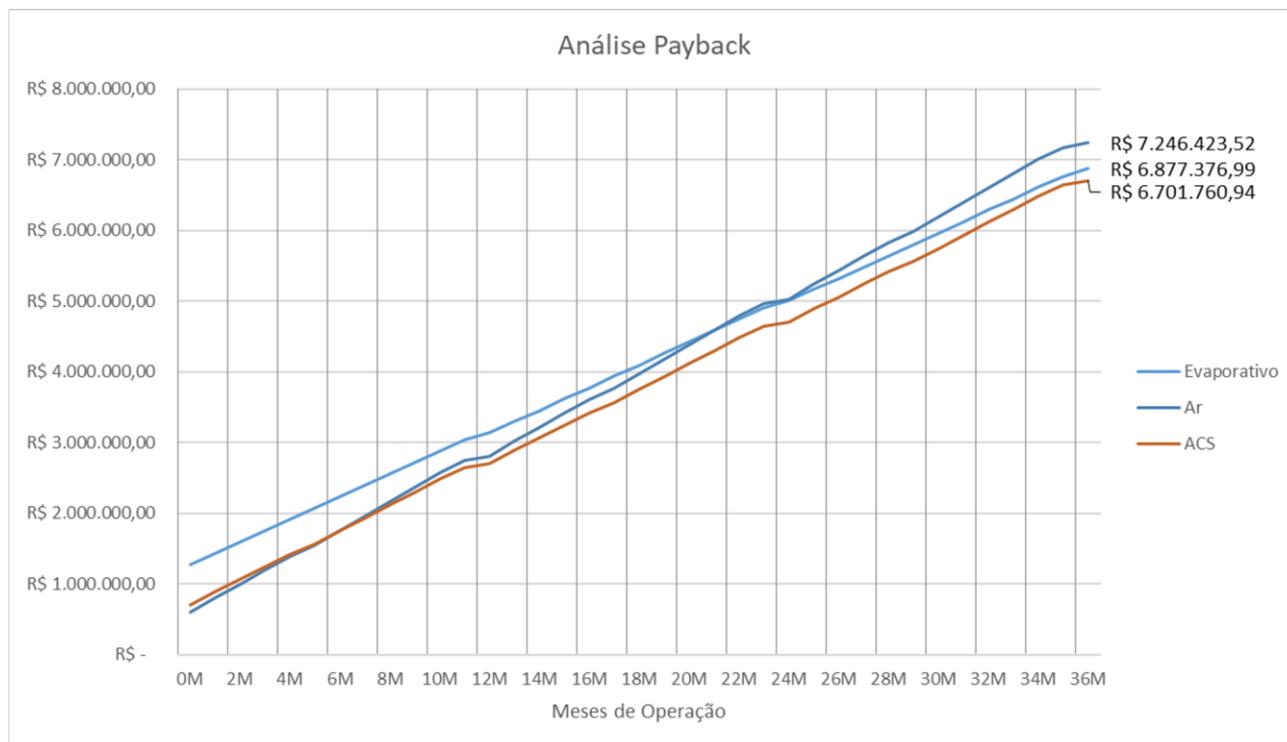


Figura 10 – Exemplo de Payback (Fonte: Próprio autor)

## 5. RESULTADOS

Como o intuito do trabalho não é obter uma resposta única de seleção de condensadores para cada uma das 121 cidades analisadas, mas, desenvolver uma metodologia de seleção, considerou-se para o cálculo de custo operacional os valores indicados na Tabela 3. Nesta seção do trabalho, serão apresentados os resultados segmentados em seções.

**Tabela 3. Valores utilizados no custo operacional. (Fonte: Próprio autor)**

Dados	Valores
Custo Energia [R\$/kWh]:	1,00
Custo Água [R\$/L]:	0,1
Custo Água Tratada por L/h [R\$/L]:	0,2

### 5.1. ANÁLISE CLIMÁTICA

Então, analisados os 26 estados brasileiros mais o Distrito Federal, 121 municípios totalizando aproximadamente 2,6 milhões de horas de dados climáticos. Como resultado da metodologia de definição média de condições de seleção de condensadores é possível dizer conforme Tabela 4, que o Brasil tem as características abaixo.

**Tabela 4. Dados da análise climática – Dados de seleção. (Fonte: Próprio autor)**

Dados	Valores
Altitude [m]:	0 a 1.359
TBU [°C]:	23 a 31
TBS [°C]:	30 a 40
UR [%]:	10 a 70
Dados [Mi]:	2,6

Os dados da Tabela 4 mostram o quão variado é o clima brasileiro e, em função disso, o comportamento dos condensadores não será igual em qualquer região.

## 5.2. RETORNO DE INVESTIMENTO

A fim de se analisar e trazer resultados mais práticos para cada região do país, a Tabela 5, traz um resultado médio das análises em relação as melhores tecnologias com retorno de investimento em 2 anos e a redução média de custo anual de operação. A partir desta tabela é possível perceber que com a escolha dos condensadores baseados na análise da variabilidade do clima, é possível obter até R\$150.000,00 de redução no custo anual de operação em comparação com condensadores a ar condensando a 45°C. Este valor muda de acordo com a região pois, o clima se comporta de diferentes maneiras.

**Tabela 5. Resultados de retorno de investimento em 2 anos. (Fonte: Próprio autor)**

Região	Ar [%]	ACS [%]	Evaporativo [%]	Redução de Custo Anual [R\$]
Norte	0	88	12	-150.000
Nordeste	14	86	0	-100.000
Centro-Oeste	6	71	24	-150.000
Sudeste	35	65	0	-100.000
Sul	6	94	0	-100.000

Na Tabela 5, está estratificado qual a porcentagem média por região em que as tecnologias tem o melhor retorno de investimento no tempo especificado.

## 5.3. ÁREA E POTÊNCIA INSTALADA, CONSUMO DE ENERGIA E ÁGUA

Foram comparados também a média da área instalada, do consumo de energia, potência instalada e de água de acordo com a região do país, pois apesar do retorno de investimento ser extremamente importante, há outros fatores que o cliente tem que analisar ao escolher a tecnologia de condensação. Nas Tabelas 6, 7, 8 e 9, é possível observar esses resultados.

**Tabela 6. Resultados de Área Instalada. (Fonte: Próprio autor)**

Região	Ar [TC: 45°C][m <sup>2</sup> ]	ACS [TC:40°C][m <sup>2</sup> ]	Evaporativo [TC:35°C][m <sup>2</sup> ]
Norte	24,2	19,6	17,5
Nordeste	21,0	20,2	11,3
Centro-Oeste	21,9	21,0	10,4
Sudeste	23,4	21,6	13,2
Sul	21,8	21,0	11,0

Observa-se que o condensador evaporativo é a tecnologia que ocupa a menor área de instalação aos demais, já os equipamentos a ar e adiabático tem diferenças pequenas de 4% até 20%, devido as oscilações do clima.

**Tabela 7. Resultados de Consumo Médio de Energia. (Fonte: Próprio autor)**

Região	Ar [TC: 45°C][kWh]	ACS [TC:40°C][kWh]	Evaporativo [TC:35°C][kWh]
Norte [Mi]	2,30	2,04	1,74
Nordeste [Mi]	2,28	2,04	1,77
Centro-Oeste [Mi]	2,29	2,03	1,77
Sudeste [Mi]	2,27	2,02	1,75
Sul [Mi]	2,24	1,99	1,75

Nota-se que o condensador evaporativo é a tecnologia que tem o menor consumo de energia em comparação aos demais, até 25% menos, e que o condensador a ar é o que tem o maior consumo de energia.

**Tabela 8. Resultados de Potência Média Instalada. (Fonte: Próprio autor)**

Região	Ar [TC: 45°C][kW]	ACS [TC:40°C][kW]	Evaporativo [TC:35°C][kW]
Norte	262,4	233,4	198,9
Nordeste	259,7	233,0	202,0
Centro-Oeste	261,1	232,2	200,6
Sudeste	258,9	230,6	199,8
Sul	255,3	228,1	199,4

O mesmo se percebe com a potência instalada, o condensador evaporativo é a tecnologia que tem o menor consumo de energia em comparação aos demais, até 25% menos, e que o condensador a ar é o que tem o maior consumo de energia.

**Tabela 9. Resultados de Consumo de Água. (Fonte: Próprio autor)**

Região	Ar [TC: 45°C][L/ano]	ACS [TC:40°C][L/ano]	Evaporativo [TC:35°C][L/ano]
Norte	0,0	1,2 Mi	8,2 Mi
Nordeste	0,0	1,7 Mi	8,2 Mi
Centro-Oeste	0,0	1,8 Mi	7,9 Mi
Sudeste	0,0	1,0 Mi	7,9 Mi
Sul	0,0	0,5 Mi	7,7 Mi

Quando se trata de consumo de água é possível observar que os condensadores evaporativos tem um consumo extremamente alto em comparação as demais tecnologias, chega a consumir aproximadamente 8 milhões de litros por ano a mais que um condensador adiabático.

Nestes resultados, é possível observar que quanto mais água se utiliza no processo de condensação, a área instalada, o consumo e potência energética reduzem. E, como no Brasil a energia, normalmente, é mais cara que a água, há uma vantagem no uso destas soluções.

## 6. Conclusões

Este trabalho através da seleção e análise da operação de condensadores em 121 cidades do Brasil, desenvolveu o projeto, com base em um metodologia de seleção para os equipamentos que mais atendem os requisitos dos usuários de acordo com uma cidade ou região, que são: menor investimento, menor consumo de água e melhor retorno de investimento.

A partir da seleção de condensadores utilizando-se de análises climáticas, é possível obter melhores retornos de investimentos se comparado aos métodos tradicionais de seleção via tabela, assim como, adiciona-se a seleção custos variáveis de custo de energia e água que não são fixos e constantes para todos clientes. Além disso, possibilita a escolha através de outros parâmetros importantes, como área e potência instalada, e, consumo total de água e energia.

Além disso, em regiões com problemas de oferta de água, é indicado o condensador a ar por não utilizar água, porém, em contrapartida temos um elevado consumo de energia e com isso é possível verificar se uma solução adiabática pode ser a melhor solução. Em regiões que não há escassez de água, pode-se avaliar qual o equipamento que têm o consumo de energia mais baixo em comparação ao sistema adiabático e um sistema de condensador evaporativo. Isso permite analisar a viabilidade de um investimento de acordo com o seu prazo de retorno.

Conclui-se que os resultados são satisfatórios validando a análise realizada. Pode-se verificar que é possível, a partir deste trabalho a realização de ajustes e implementação deste via software de seleção, otimizando ainda mais os resultados. Além disso, com o uso de um software de seleção é possível adicionar variáveis à análise aprimorando ainda mais os resultados.

## 7. AGRADECIMENTOS

À instituição de ensino e ao corpo docente, pelo ambiente de aprendizado e convivência proporcionados.

Ao Professor Dr. Sérgio Wortmann, pela orientação e apoio na elaboração deste trabalho.

Aos meus pais, irmão e companheira pelo incentivo, compreensão e ajuda no desenvolvimento deste trabalho e durante a graduação.

Aos colegas da Güntner do Brasil Sr. Lucas Freitas e Srta. Caroline Vasconcellos Pimentel, por auxiliar na realização deste trabalho.

À empresa Güntner do Brasil, por disponibilizar os softwares de seleção e os recursos necessários.

## 8. REFERÊNCIAS

- CABRINI, G., **Sistemas de refrigeração movidos à competitividade e sustentabilidade.** In: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE SUPERMERCADOS, 2019. **Sistemas de refrigeração movidos à competitividade e sustentabilidade.**, (Online) Disponível: <https://www.abras.com.br/clipping/noticiasabras/67531/sistemas-de-refrigeracao-movidos-a-competitividade-e-sustentabilidade> - Associação Brasileira de Supermercados, 2019.
- LIMA, J., **Estudo de Caso: Eficiência Energética no Sistema de Refrigeração de uma cervejaria,** (Graduação) Engenharia Mecânica - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL - ESCOLA DE ENGENHARIA, Porto Alegre - RS, 2016.
- LIMA, R., **Análise de uma estratégia de controle descentralizada para um ciclo de refrigeração por expansão direta.**, (Graduação) Engenharia de Controle e Automação - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – Campus Farroupilha, Farroupilha - RS, 2018.
- SOUZA, F. H. D., **MODELO DISTRIBUÍDO APLICADO À ANÁLISE DO DESEMPENHO DE CONDENSADORES DO TIPO TUBO-ALETADO.**, (Graduação) Engenharia Mecânica - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP, Ilha Solteira - SP, 2020.
- WALTHER, F. M., **Condensador Evaporativo em escala reduzida: Projeto, Construção e Análise Experimental.**, (Graduação) Engenharia Mecânica - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL - ESCOLA DE ENGENHARIA, Porto Alegre - RS, 2009.
- Stoecker, W. F. e Jabardo, J. M. S., **Refrigeração Industrial.**, (Livro) Editora Blucher, 2018 São Paulo.

## ABSTRACT

**Rodolfo de Campos Lima, rodolfodecamposlima@gmail.com1**

**Sérgio Wortmann (orientador), sergio.wortmann@farroupilha.ifrs.edu.br2**

<sup>1</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – Campus Farroupilha, Avenida São Vicente, 785, Cinquentanário, Farroupilha, RS.

***Abstract.** In this work, the implementation of a methodology for the selection of condensers for a refrigeration system was carried out, comparing the technologies of air, adiabatic and evaporative condensation. The climate of the 5 regions of Brazil was analyzed based on the Köppen-Geiger classification, obtaining annual temperature information through the National Institute of Meteorology INMET. This choice structure had its results obtained from the manufacturer's selection software and spreadsheets, comparing operating costs according to the region where the equipment is installed, with constant condensation. The initial investment, energy cost and water costs were analyzed and a comparison between regions according to technology was demonstrated in the end.*

***Keywords:** Condensers, Climate Analysis and Refrigeration*