

CRIAÇÃO NOVO ÍNDICE DE TOMADA DE DECISÃO DE FLUIDO REFRIGERANTE, O TEWI+S+R

Alexandre F. Santos – projetos.etc@gmail.com.

Faculdade Profissional - FAPRO

Daiane Busanello. – daiane.etc@gmail.com.

Instituto Lactec. Curitiba – Paraná.

Gustavo Nascimento Lira. - gustavolira.etc@gmail.com.

Faculdade Profissional – FAPRO - Curitiba – Paraná.

Fabio F. Ferreira – fabio.ferreira.etc@gmail.com.

Faculdade Profissional – FAPRO. Curitiba – Paraná.

Heraldo José L. de Souza – heraldosouza1@gmail.com.

Faculdade Profissional – FAPRO. Curitiba – Paraná.

Eliandro Barbosa de Aguiar – eliandro.etc@gmail.com.

Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Curitiba – Paraná.

3.2 - Aplicações de AVAC (Ar-Condicionado, Ventilação e Aquecimento)

Resumo. Estudos estimaram que uma quantidade considerável das emissões globais de gases de efeito estufa (GEE) são resultado da produção de alimentos e da agricultura. Aproximadamente 26-31% das emissões antropogênicas de GEE estão relacionadas à cadeia de suprimentos alimentares (a proporção restante está associada ao uso da terra, à produção de culturas e à criação de animais). A indústria alimentícia é economicamente importante e é essencial para muitos dos objetivos de desenvolvimento sustentável da ONU. O setor alimentício frequentemente tem um grande impacto no PIB de um país, especialmente nos países menos desenvolvidos. O foco deste artigo é uma simulação numa câmara frigorífica de TEWI de múltiplas opções e a criação de um novo índice chamado TEWI+S+R que possa ser um novo indicador de tomada de decisão na escolha do fluido refrigerante.

Palavras-chave: Emissões de carbono, Energia, Cadeia alimentar, TEWI.

1. INTRODUÇÃO

As cadeias alimentares são cruciais para a vida moderna. Elas possibilitam a produção, armazenamento e transporte seguro dos alimentos, garantindo aos consumidores a confiança na qualidade dos produtos que adquirem e consomem. No entanto, essas cadeias demandam grandes quantidades de energia para manter os alimentos na temperatura adequada, o que resulta em emissões globais de gases de efeito estufa (GEE).

Devido ao aquecimento global, o mundo está enfrentando temperaturas mais elevadas. Entre 2012 e 2021, as temperaturas médias globais próximas à superfície foram de 1,11 a 1,14 K mais altas em comparação aos níveis pré-industriais. Isso torna a última década a mais quente já registrada. Os países membros da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) se comprometeram com o Acordo de Paris, que tem como objetivo limitar o aumento da temperatura global até 2050 a menos de 2 K acima dos níveis pré-industriais, com a meta ideal de restringir o aumento a menos de 1,5 K (Agência Europeia do Ambiente, 2023).

A refrigeração tem um papel vital na construção de cadeias alimentares seguras, sustentáveis e resilientes. O Instituto Internacional de Refrigeração (IIR, 2020) estima que 778 milhões de toneladas de alimentos são conservadas por refrigeração globalmente a cada ano. No entanto, idealmente, 1.661 milhões de toneladas deveriam ser refrigeradas, o que revela uma significativa falta de acesso a sistemas de refrigeração. Cerca de 13% dos alimentos produzidos mundialmente são perdidos por falta de refrigeração adequada; se fossem corretamente refrigerados, poderiam alimentar 950 milhões de pessoas por ano (Dupont, El Ahmar e Guilpart, 2020). Em países de baixa renda, a maior parte dos alimentos se perde no início da cadeia devido a deficiências logísticas, falta de refrigeração e manuseio inadequado. Já em países de alta renda, o desperdício ocorre principalmente no final da cadeia alimentar, pelo consumidor. Reduzir a perda e o desperdício de alimentos é essencial, pois isso não só diminui as emissões de carbono, mas também aumenta a disponibilidade de alimentos para consumo.

Além das emissões diretas, a cadeia alimentar gera emissões significativas devido à energia utilizada para operar sistemas de refrigeração, transporte de alimentos e manutenção de sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado (HVAC). Essas emissões também provêm do fluido refrigerante utilizado nos equipamentos que por mais bem instalados e mantidos algum momento vão vaziar. A refrigeração frequentemente consome a maior parte da energia elétrica nas cadeias alimentares, destacando-se como uma área com grandes oportunidades para reduzir o consumo de energia e as emissões de carbono. Dentro dessa cadeia, a chamada "cadeia do frio" é crucial. Em um mundo que valoriza cada vez mais a descarbonização, a qualidade de vida e a confiabilidade, é essencial desenvolver um índice que associe descarbonização e eficiência com segurança e confiabilidade.

2. ESTADO DA ARTE

Após o Brasil aderir ao Protocolo de Montreal em 1990, em 2009 o Seminário Nacional “Governo e Sociedade a Caminho da Eliminação dos HCFCs” iniciou a elaboração do Programa Brasileiro de Eliminação dos HCFCs (PBH). Este documento define as diretrizes e ações para que o Brasil cumpra as metas de eliminação do consumo de HCFCs (hidroclorofluorcarbonos). No setor de climatização e refrigeração, o programa estabelece que até 2040 o consumo de HCFCs deve ser totalmente eliminado. Com a Emenda de Kigali, novos prazos foram estabelecidos para a eliminação dos HFCs, tornando necessário aprofundar o conhecimento sobre tecnologias de menor impacto ambiental. A tendência de mercado é a transição para fluidos refrigerantes naturais, como amônia (R-717), dióxido de carbono (R-744) e hidrocarbonetos, que, apesar de possuírem melhores índices de GWP (*Global Warming Potential*), podem ser tóxicos, inflamáveis ou operarem apenas sob altas pressões, exigindo fiscalizações mais rigorosas e a adoção de medidas e normas de segurança apropriadas (Gov.ibama, 2024).

As preocupações ambientais se tornaram a força motriz para otimizar os projetos ecológicos através do aumento da eficiência energética, pesquisa de novos refrigerantes e uso eficiente dos sistemas existentes. O sistema climático sempre teve influência humana, sendo, portanto, crucial criar métodos transparentes e fáceis de utilizar ao projetar um sistema de energia com baixo impacto ambiental. As métricas ambientais utilizadas no processo de seleção de refrigerantes são GWP e TEWI, que serão explicadas a seguir. Cada métrica visa quantificar o impacto dos refrigerantes no aquecimento global, mas seu uso pode levar a conclusões diferentes (Santos, et al., 2022).

2.1 *Global Warming Potential* – GWP

O GWP é a métrica ambiental mais utilizada. Trata-se do índice que compara o impacto no aquecimento global da emissão de um gás de efeito estufa em relação a uma emissão proporcional de CO₂. O impacto é estimado durante um determinado tempo. O horizonte temporal de 100 anos é o mais adotado e, normalmente, assumido quando nenhuma informação no horizonte temporal é dada. O GWP é uma métrica fácil de usar, pois quanto menor o GWP, menor a contribuição de uma substância para o aquecimento global.

2.2 *Total Equivalent Warming Impact* – TEWI

O TEWI é uma métrica do impacto do aquecimento global de equipamentos com base no total de emissões, relacionadas a gases de efeito estufa durante a operação do equipamento e a eliminação dos fluidos operacionais no fim da vida útil. TEWI leva em conta tanto as emissões diretas quanto as emissões indiretas, produzidas através da energia consumida na operação dos equipamentos. TEWI é medido em kg de dióxido de carbono equivalente (kg CO₂e) (Santos, et al., 2023).

TEWI é calculado com a soma de duas partes, são elas:

1. Emissão Direta - Refrigerante liberado durante a vida útil do equipamento, incluindo perdas não recuperadas sobre a disposição final;
2. Emissão Indireta - O impacto das emissões de CO₂ dos combustíveis fósseis utilizados para gerar a energia elétrica que é utilizada na operação do equipamento ao longo de sua vida.

Uma das ações para criar uma simulação de sistema é entender como foi o progresso dos fluidos refrigerantes, a evolução deles, que se baseiam em quatro marcos importantes (Webarcondicionado, 2024):

- 1ª Geração (1834~1930) – Solventes, líquidos voláteis ou quaisquer substâncias que funcionassem como fluidos refrigerantes, como éteres, amônia (R-717), cloreto de metila (R-40), dióxido de enxofre (R-764), dentre outros;
- 2ª Geração (1931~1990) – Focada em segurança e durabilidade, os fluidos mais utilizados foram CFCs (cloro-fluorcarbonos), HCFCs (hidroclorofluorcarbonos), HFCs (hidrofluorcarbonos), amônia e água (R-718);
- 3ª Geração (1991~2010) – A era que se propôs a reduzir os impactos da camada de ozônio. Após o Protocolo de Montreal os HCFCs foram usados para transição, assim como houve o aumento do uso de HFCs, amônia, água, hidrocarbonetos e dióxido de carbono (R-744);
- 4ª Geração (2010 em diante) – Inclusão de fluidos zero PDO (Potencial de Destruição do Ozônio), alta eficiência e baixo impacto ambiental como HFOs (hidrofluorolefinas) e aumento no uso de fluidos com baixo GWP como amônia, dióxido de carbono, hidrocarbonetos e água.

2.3 Protocolo de Montreal

O Protocolo de Montreal é um tratado internacional com o objetivo de proteção à camada de ozônio por meio da eliminação da produção e consumo das SDOs (Substâncias Destruidoras da Camada de Ozônio). O Protocolo possui um positivo aspecto de ser atualizado por meio de emendas, podendo assim se adaptar aos avanços científicos, tecnológicos e sociais do setor. Seguindo as diretrizes do Protocolo de Montreal, foi criado um cronograma para a redução e, posteriormente, eliminação no consumo dos HCFCs, conforme a tabela a seguir (Gov.mma, 2023).

Tabela 1 - Cronograma estabelecido pelo Programa Brasileiro de Eliminação dos HCFCs (PBH), pelo Protocolo de Montreal (Gov.mma, 2023).

ANO	ETAPA
2013	Congelamento do consumo e produção dos HCFCs baseado no consumo médio entre 2009~2010
2015	Redução de 10% do consumo
2020	Redução de 35% do consumo
2025	Redução de 67,5% do consumo
2030	Redução de 97,5% do consumo*
2040	Redução de 100% do consumo

Nota: O consumo residual (2,5%) poderá ser usado apenas para o setor de serviço.

Em janeiro de 2019, entrou em vigor a Emenda de Kigali, que objetiva a eliminação dos HFCs (hidrofluorcarbonos), que foram desenvolvidos como alternativa aos gases proibidos pelo Protocolo de Montreal. Embora os HFCs não destruam a camada de ozônio, eles possuem um potencial de aquecimento global muito elevado. O cronograma apresentado na emenda de Kigali está representado a seguir (Kigali, 2024).

Tabela 2 - Cronograma da Emenda de Kigali para HFCs (Kigali, 2024).

ANO	ETAPA
2024	Congelamento do consumo e produção dos HFCs baseado no consumo médio entre 2020~2022
2029	Redução de 10% do consumo
2035	Redução de 30% do consumo
2040	Redução de 50% do consumo
2045	Redução de 80% do consumo

Para efeito de análise, as principais características dos fluidos refrigerantes sintéticos e naturais estão apresentadas na tabela a seguir.

**MERCOFRIO 2024 - 14º CONGRESSO INTERNACIONAL DE
AR-CONDICIONADO, REFRIGERAÇÃO, AQUECIMENTO E VENTILAÇÃO**

Tabela 3 - Características dos refrigerantes sintéticos e naturais (Gov.MMA, 2011).

Refrigerantes	R22	R404A	R507A	R134a	R410A	R407C	R422D	R427A	R717	R744	R290	R1270
Substância Natural	não	não	não	não	não	não	não	não	sim	sim	sim	sim
Nome Comercial	-	-	-	-	-	-	Isceon MO29	FX100	Amônia	Dióxido Carbono	Propano	Propileno
Fabricante	vários	vários	vários	vários	vários	vários	DuPont	Arkema	vários	vários	vários	vários
Composição Química	CHF ₂ CL	R143a/R125/R134a	R143a/R125	CF ₃ CH ₂ F	R32/R125	R32/R125/R134a	R125/R134a/R600a	R32/R125/R143a/R134A	NH ₃	CO ₂	C ₃ H ₈	CO ₂
Destruição Camada Ozônio (ODP)*	0,05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Potencial Aquecimento Global (GWP)**	1500	3260	3300	1300	1725	1525	2230	1830	0	1	3	3
Temperatura Glide (K)	0	0,7	0	0	0,2	7,4	4,5	7,1	0	0	0	0
Ponto de Ebulição (°C)	-40,86	-47	-47	-26,07	-51	-40	-45	-43	-33	-57 (sulmb.)	-42	-47,7
Temperatura Crítica (°C)	96,15	73	71	101,15	72	86	81	87	133	31	96,7	92,4
Pressão Crítica (bar)	50,54	37,8	37,9	40,67	49,5	46,5	39,08	44	113,5	73,8	42,48	46,65
Inflamabilidade	não	não	não	não	não	não	não	não	baixa	não	alta	alta
Toxicidade	baixa	baixa	baixa	baixa	baixa	baixa	baixa	baixa	alta	baixa	baixa	baixa
Tipo de Óleo lubrificante ***	MO/AB/MO+AB	POE	POE	POE	POE	POE	MO/AB/POE	MO/AB/POE	MO/PAO	POE	MO/PAO/POE	MO/PAO/POE
Tipo de aplicação***	HT/MT/LT	MT/LT	MT/LT	HT	HT	HT	HT/MT/LT	HT/MT/LT	HT/MT/LT (Sist. Indiretos)	MT/LT	HT/MT/LT (Sist. Indiretos)	MT/LT (Sist. Indiretos)
Custo Relativo Refrigerante/Kg	1	3	4	2	4	3	8	10	0,1	0,1	0,1	0,1
Eficiência Energética Relativa Média (%)	100	99	102	97	95	100	95	95	105	120 (sub crítico)	102	101
Equipamentos (Retrofit)	-	Novos	Novos	Novos	Novos	Novos	Existentes	Existentes	Novos	Novos	Novos	Novos

**MERCOFRIO 2024 - 14º CONGRESSO INTERNACIONAL DE
AR-CONDICIONADO, REFRIGERAÇÃO, AQUECIMENTO E VENTILAÇÃO**

*Destruição da Camada de Ozônio (ODP- *Ozone Depletion Potencial*): é um índice baseado inteiramente na referência do gás refrigerante R11 (100%). Por exemplo, o R22 possui um ODP = 0,05, ou seja, tem um potencial de destruição do ozônio de 5% comparado ao R11.

**Potencial de Aquecimento Global (GWP - *Global Warming Potencial*) - é um índice que compara o efeito do aquecimento produzido pelos gases na atmosfera ao longo do tempo (normalmente 100 anos), em relação a quantidades semelhantes de CO₂ (em peso). Por exemplo, 1 kg de R404A liberado na atmosfera produz o mesmo efeito de aquecimento global equivalente a 3260 Kg de CO₂. É o mesmo valor que um carro popular levaria para contaminar a atmosfera circulando durante 2 anos na cidade de São Paulo.

*** Tipo de Aplicação: HT= Alta temperatura de evaporação (ar-condicionado), MT = Média temperatura de evaporação (sistema de resfriados), LT = Baixa temperatura de evaporação (sistema de congelados).

Para o desenvolvimento deste estudo, foram criados simulações e índices para que a replicação de soluções fosse favorecida.

O índice kg CO₂/TR, criado devido à dificuldade de obtenção de dados da capacidade efetiva instalada no país, para que seja possível simular cenários, entender oportunidades e replicar soluções, demonstra como cada sistema, com seu respectivo fluido refrigerante, atua no aquecimento global de acordo com a carga térmica atendida.

Além da questão do GWP a Ashrae separa os fluidos refrigerantes em classificação de inflamabilidade e toxicidade, a exemplo da figura abaixo (Ashrae 34, 2010):



Figura 1 – Comparação de parâmetros de inflamabilidade

Sendo a melhor classificação de segurança a classe A1 (não tóxico e não inflamável), e a pior a classe B3 (tóxico e inflamável).

3 Materiais e Métodos

O cálculo do *Total Equivalent Warming Impact* (TEWI) considera o consumo de energia ao longo do período de vida útil, incluindo índices como COP, IPLV e NPLV nas simulações de vida útil, assim como as emissões diretas e indiretas. No entanto, ele ignora aspectos cruciais como inflamabilidade, toxicidade e confiabilidade, fatores que também devem ser considerados ao avaliar a melhor opção de fluido refrigerante para uma aplicação específica. A confiabilidade, por exemplo, pode ser afetada pela temperatura de descarga do compressor e pelo glide de temperatura. Portanto, o TEWI, isoladamente, não é uma medida abrangente (Santos et al, 2022).

Em ambientes como supermercados, a toxicidade e a inflamabilidade são tão importantes quanto o consumo de energia e as emissões, juntamente com a confiabilidade. Assim, é proposto um índice expandido, o TEWI-S+R, onde, o S é de ‘*SAFETY*’ e o R é de ‘*REABILITY*’, que pode fornecer uma melhor classificação dos fluidos refrigerantes para os clientes, considerando todos esses fatores.

Foi realizado uma pesquisa com 10 professores de refrigeração da Fapro-ETP, abordando as seguintes questões:

Em uma escala de 1 a 5, qual seria a relevância dos fatores: consumo de energia e sustentabilidade, segurança e confiabilidade?

Se mensurássemos a segurança, qual seria o índice para cada categoria de fluidos refrigerantes, de A1 a B3?

Qual seria a importância da temperatura de descarga do compressor e do glide de temperatura?

Com base na média ponderada das respostas foi obtido os seguintes resultados:

Índice de Segurança (S):

A classificação de segurança (S) é indicada da seguinte forma:

- Classe A1: Nota máxima = 1.
- Classe A2L: Nota = 0,8.
- Classe B1: Nota = 0,6.
- Classe B2L: Nota = 0,4.
- Classes A2 e A3: Nota = 1 se inferior a 150 gramas e Nota = 0,4 se superior a 150 gramas.
- Classes B2 e B3: Nota = 0.

Esses valores são justificados pela diferença significativa nas energias de ignição. Por exemplo, um fluido A2L como o R454-B necessita de uma energia de ignição próxima de 1000 vezes maior que o R-290 (propano). Além disso, a NH₃, classificado como B2L, é tóxico e levemente inflamável, enquanto o R-290 não é tóxico, mas altamente inflamável, embora aceitável em doses menores que 150 gramas conforme a NBR 16069.

Índice de Confiabilidade (R):

A confiabilidade de um sistema é fortemente influenciada pela temperatura de descarga do fluido refrigerante. Temperaturas de descarga elevadas (>150°C) podem levar à decomposição do óleo, afetando a durabilidade do sistema. Além disso, altos valores de glide de temperatura podem causar problemas de manutenção se os profissionais não forem qualificados, e ainda se houver vazamento de um “Blend” haverá um vazamento maior de um dos fluidos (visto que são misturas) podendo, gerar desequilíbrios indesejáveis e alteração de rendimento (Ahrinet, 2024) (Li et al, 2023).

A fórmula para o índice de confiabilidade (R) é descrita como: $R=(0,8 \times \text{Fator de Temperatura de Descarga})+(0,2 \times \text{Fator de Glide de Temperatura})$.

Fator de Temperatura de Descarga:

- Menor que 90°C: 1.
- Entre 90°C e 100°C: 0,8.
- Entre 100°C e 120°C: 0,6.
- Entre 120°C e 130°C: 0,4.
- Acima de 130°C: 0.

Fator de Glide de Temperatura:

- Glide Zero: 1.
- Até 1°C: 0,9.
- Entre 1°C e 2°C: 0,8.
- Entre 2°C e 4°C: 0,6.
- Entre 4°C e 6°C: 0,4.
- Acima de 6°C: 0.

Na comparação entre fluidos refrigerantes, o TEWI mais baixo terá um peso de 3, enquanto os outros fluidos terão um peso proporcional. A fórmula final do TEWI-S+R é descrita como:

$$TEWI + S + R = (3 \times \text{Fator TEWI}) + \text{Fator Safety} + \text{Fator Reliability} \quad (1)$$

O fluido refrigerante que obtiver uma nota mais próxima de 5, certamente será a melhor opção ecológica, segura e confiável.

É importante destacar que o equivalente de kgCO₂/kWh varia de país para país, o que implica que uma solução ideal para um país pode não ser a melhor para outro.

4 Análise e discussão

Para a simulação inicial foi utilizada uma carga térmica de resfriados de 45 kW, que serão simuladas em dois países Brasil e Estados Unidos, com 06 opções de fluido refrigerante:

- R-134 A.
- R 404 A.
- R 744 + R 290 (cascata Subcrítico).
- R 744 + R 32.
- R 32.
- R 410 A.

As simulações foram feitas no sentido de encontrar o consumo de energia utilizando o software Coolpack+IPU e Solkene, em todas as opções foram utilizadas as seguintes características:

- Carga Térmica = 45 kW.
- Temperatura de Evaporação = -30°C.
- Superaquecimento Total = 8 °C.
- Subresfriamento = 2°C.
- Temperatura de Condensação = 43°C.
- Eficiência Isentrópica = 0,7.
- Perdas de calor no compressor = 0,1 (10%).

Para tanto foram obtidos os seguintes resultados:

Tabela 4 – Características de cada fluidos.

Características	R-407-C	R-404A	R744+R290	R-32	R-410-A	R290
COP	1,54	1,36	1,37	1,61	1,502	1,558
Temp.Descarga °C (qdo subcrítico pior situação)	95,6	71,9	62,4	85,18	104,3	75,4
Energia Consumida (kWh)	102578,8	115987,6	114658,4	97761	105005,6	101194,8
Diametro Linha sucção(mm)	82,5	78,1	64,5	67,93	62	80,6
Deslocamento mássico (kg/s)	0,31	0,4781	0,24	0,349	0,3	0,18
Carga de fluido refrigerante (kg)	11,2	16,07	6,3	5,712	14,07	4,48
TEWI Direto (kgCO2/vida útil) USA	54691,84	176474,3	24,87	10795,68	82258,85	37,63
TEWI Indireto (kgCO2/vida útil) USA	844633,84	955041,9	944097,27	804964,1	864616,1	833238
TEWI Total (kgCO2/vida útil) USA	899325,68	1131516	944122,14	815759,8	946875	833275,6
TEWI Direto (kgCO2/vida útil) Brasil	54691,84	176474,3	24,87	10795,68	82258,85	37,632
TEWI Indireto (kgCO2/vida útil) Brasil	180538,69	204138,2	201798,78	172059,4	184809,9	178102,8
TEWI Total (kgCO2/vida útil) Brasil	235230,53	380612,5	201823,66	182855	267068,7	178140,5
Vida útil anos	20	20	20	20	20	20
Taxa vazamento anual (%)	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125
GWP AR-4(quando ciclo subcritico média ponderada)	1744	3922	1,41	675	2088	3
Índice Reciclagem (%)	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Índice Emissão Carbono por kW Brasil (kg/kW)	0,088	0,088	0,088	0,088	0,088	0,088
Índice Emissão Carbono por kW USA (kg/kW)	0,4117	0,4117	0,4117	0,4117	0,4117	0,4117
Classe Ashrae (pior situação)	A1	A1	A3	A2L	A1	A3
Glide de Temperatura (K)	7,4	0,8	0	0	0,1	0

Pelo CoolPack foram obtidos os COPs, as temperaturas de descarga, energia consumida (onde foi utilizado um multiplicador de fator de utilização de 40% anual), os diâmetros da linha de sucção e os deslocamentos mássicos de todos os fluidos refrigerantes com exceção do R-32 que foi utilizado o Solkane, a vida útil é baseada na ASHRAE *Equipment Life Expectancy chart* para compressores recíprocos (ASHRAE, 2024), os valores de GWP pela AR-4 IPCC, os valores de emissão em kg de CO₂ por kWh foram obtidos nos relatórios do EPE, os valores de vazamento e recolhimento foram obtidos pela AIRAH (THE AUSTRALIAN INSTITUTE OF REFRIGERATION, AIR CONDITIONING AND HEATING) e as massas de fluido refrigerante foram fornecidas nos Laboratórios da Fapro ETP em análises de equipamentos existentes nos laboratórios.

Antes de analisar o novo índice TEWI+S+R, é importante frisar que o COP mais alto foi do R-32, o COP mais baixo foi da associação do R-404-A, a pior temperatura de descarga do Fluido refrigerante foi o R-410-A, no Brasil o melhor índice de TEWI foi do R-290, ou seja, esse fluido se fosse esse o único indicativo seria a melhor opção nesse país, já nos USA a melhor opção seria o R-32 comprovando que a melhor opção em um país não necessariamente a melhor opção em outro, segue um gráfico comparando os dois países (Brasil e USA) (Coolpack, 2011) (EPE, 2020).

Como pode notar a fonte mais sustentável do Brasil faz grande diferença frente aos USA numa tomada de decisão. Já aproveitando para aplicar o Índice TEWI+S+R, obtém-se no Brasil:

Tabela 5 – Índice TEWI+S+R Brasil

	R-407-C	R-404A	R744+R290	R-32	R-410-A	R290
TEWI Brasil	2,27	1,40	2,65	2,92	2,00	3,00
Safety	1	1	0,4	0,8	1	0,4
Reliability 80% Temp Condensação	0,64	0,8	0,8	0,8	0,48	0,8
Reliability 20% Glide Temperatura	0	0,18	0,2	0,2	0,18	0,2
Soma Índice TEWI+S+R Brasil	3,91	3,38	4,05	4,72	3,66	4,40

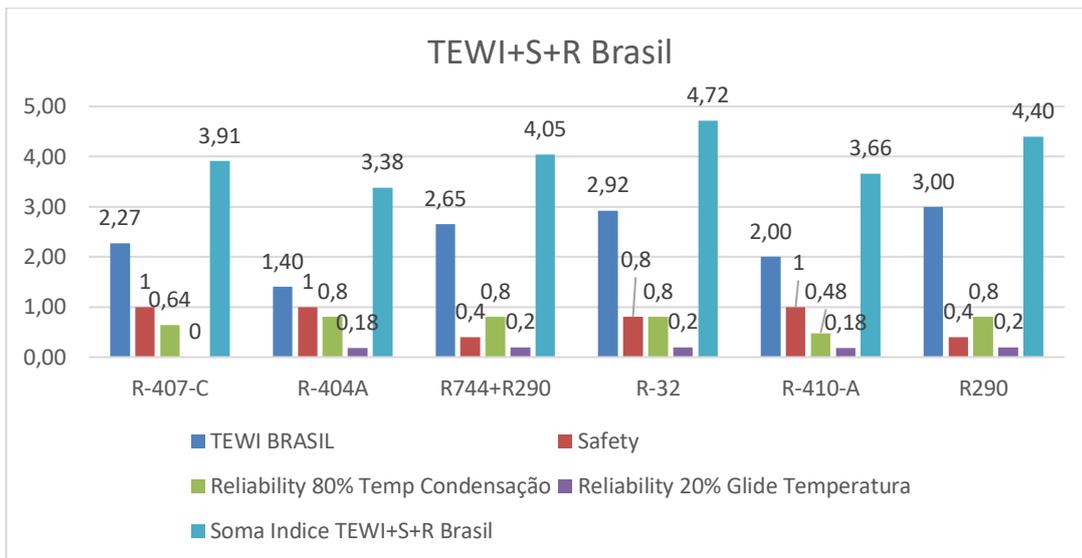


Gráfico 1 – TEWI+S+R Brasil

Tabela 6 – TEWI +S+R USA

	R-407-C	R-404A	R744+R290	R-32	R-410-A	R290
TEWI-USA	2,72	2,51	2,65	3	2,58	2,94
Safety	1	1	0,4	0,8	1	0,4
Reliability 80% Temp Condensação	0,64	0,8	0,8	0,8	0,48	0,8
Reliability 20% Glide Temperatura	0	0,18	0,2	0,2	0,18	0,2
TEWI+S+R USA	4,36	4,49	4,05	4,8	4,24	4,34

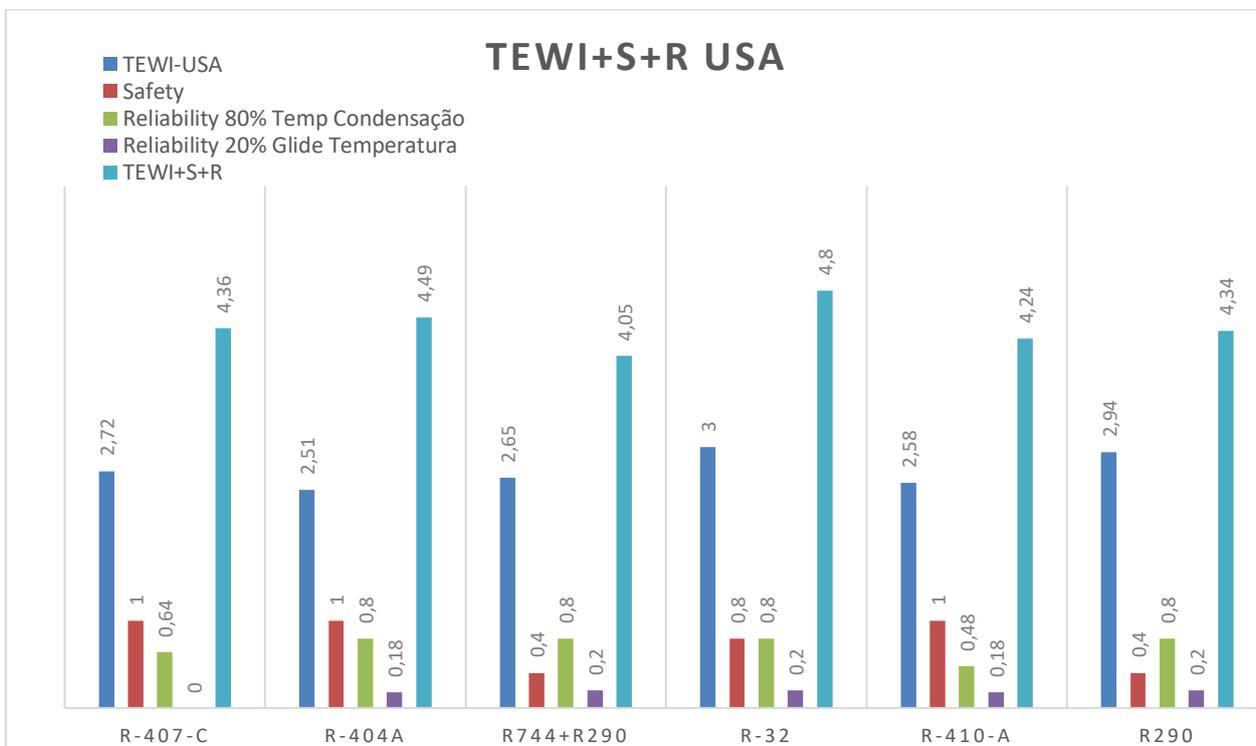


Gráfico 2 – TEWI+S+R USA

Tabela 7 – TEWI +S+R Brasil e fluidos

BRASIL	
FLUIDO	TEWI+S+R
R32	4,72
R290	4,4
R744+R290	4,05
R407 C	3,91
R410 A	3,66
R404 A	3,38

Tabela 8 – TEWI +S+R USA e fluidos

USA	
FLUIDO	TEWI+S+R
R32	4,8
R404 A	4,49
R407 C	4,36
R290	4,34
R410 A	4,24
R744+R290	4,04

Como pode-se analisar a ordem no Brasil dos fluidos em relação ao TEWI+S+R foram R32, R290, R744+R290, R407 C, R410 A e por último R404 A. E a ordem de fluidos dos USA foram R32, R4i04 A, R407 C, R290, R744+R 290 e por último R410 A.

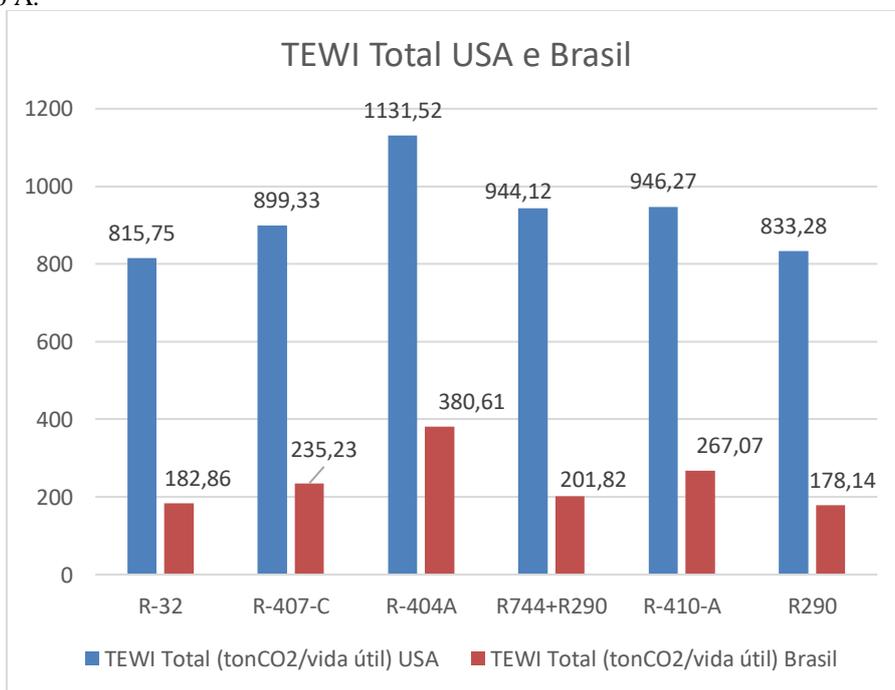


Gráfico 3 – TEWI+S+R USA e BRASIL

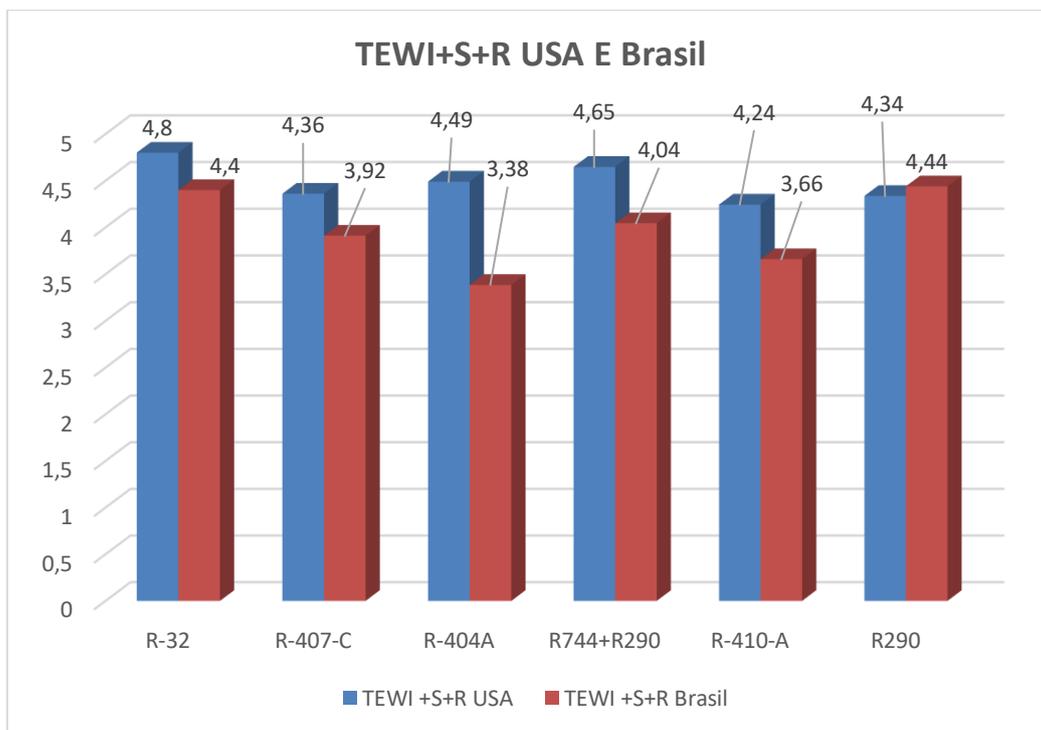


GRÁFICO 4 – TEWI+S+R BRASIL

Conforme se analisar os gráficos acima, se observa:

Análise Comparativa dos Resultados.

Viabilidade dos Fluidos Refrigerantes.

1. R32:

- **Brasil:** 4,72.
- **USA:** 4,80.
- **Discussão:** O R32 mostra alta viabilidade em ambos os países. Este fluido é conhecido por sua boa eficiência energética, médio impacto ambiental (sustentabilidade), segurança e confiabilidade, o que justifica seus altos índices de viabilidade, nos USA pelo fator da matriz menos sustentável o impacto do GWP do fluido impacta menos que a eficiência energética, fato que o R-32 tem resultado superior no índice dos USA.

2. R290:

- **Brasil:** 4,40.
- **USA:** 4,49.
- **Discussão:** O R290, ou propano, apresenta alta viabilidade em ambos os países. Este fluido é apreciado por seu baixo impacto ambiental e eficiência. No entanto, suas propriedades inflamáveis exigem cuidados adicionais de segurança, o que gera necessidade maior de treinamento.

3. R744+R290:

- **Brasil:** 4,05.
- **USA:** 4,36.
- **Discussão:** A combinação R744+R290, que junta CO₂ e propano, resulta em uma boa viabilidade, com índices mais altos nos EUA. A mistura se beneficia das propriedades dos dois componentes, apresentando uma boa relação entre sustentabilidade, segurança e confiabilidade, mas foi a opção menor viável nos USA.

4. R407 C:

- **Brasil:** 3,91.
- **USA:** 4,34.
- **Discussão:** O R407 C, usados frequentemente como substituto do R22, apresenta uma viabilidade moderada, com índices mais altos nos EUA. Este fluido no Brasil não oferece uma boa relação de sustentabilidade, segurança e confiabilidade, mas pode variar seu desempenho de acordo com o clima e tecnologia disponível.

5. R410 A:

- **Brasil:** 3,66.
- **USA:** 4,24.
- **Discussão:** O R410 A apresenta uma diferença significativa de viabilidade entre os dois países, sendo mais viável nos EUA. Este fluido é amplamente utilizado e considerado seguro e confiável.

6. R404 A:

- **Brasil:** 3,38.
- **USA:** 4,04.
- **Discussão:** O R404 A tem a menor viabilidade no Brasil e uma viabilidade moderada nos EUA. Devido ao seu alto impacto ambiental, há uma tendência global de substituí-lo por opções mais sustentáveis. Em termos de segurança e confiabilidade, ele é menos favorável em comparação com outros fluidos.

5 Conclusão

A análise dos fluidos refrigerantes no contexto da cadeia alimentar, especialmente dentro da "cadeia do frio", é crucial para entender as oportunidades de redução de consumo de energia e emissões de carbono. Conforme discutido, os sistemas de refrigeração representam uma parcela significativa do consumo energético e das emissões de gases de efeito estufa na cadeia alimentar. Nesse cenário, a escolha do fluido refrigerante torna-se uma decisão estratégica que impacta diretamente a sustentabilidade, segurança e confiabilidade do sistema.

Os resultados apresentados mostram uma variação significativa na viabilidade dos diferentes fluidos refrigerantes entre Brasil e EUA. O fluido R32 se destaca pela sua alta viabilidade em ambos os países, com um desempenho ligeiramente superior nos EUA, possivelmente devido à matriz energética menos sustentável gerando no TEWI uma maior ênfase na eficiência energética. Este fluido combina eficiência, sustentabilidade, segurança e confiabilidade de maneira equilibrada.

O R290, ou propano, também se mostra altamente viável, sendo apreciado por seu baixo impacto ambiental. Contudo, suas propriedades inflamáveis requerem medidas de segurança rigorosas e treinamento especializado, o que pode limitar sua aplicabilidade em certos contextos. A combinação R744+R290 oferece uma boa viabilidade geral, beneficiando-se das propriedades do CO₂ e do propano, mas apresenta uma menor viabilidade relativa nos EUA, isso se deve pela matriz menos sustentável e a ênfase na eficiência energética.

O R407C e o R410A apresentam diferenças significativas entre os dois países, com índices de viabilidade mais altos nos EUA. O R404A, por outro lado, apresenta a menor viabilidade no Brasil e uma viabilidade moderada nos EUA, reforçando a necessidade de sua substituição por alternativas mais sustentáveis devido ao seu alto impacto ambiental.

Em conclusão, a escolha do fluido refrigerante na cadeia alimentar deve ser feita considerando um balanço entre sustentabilidade, segurança e confiabilidade. A análise comparativa entre Brasil e EUA destaca a importância de adaptar as escolhas tecnológicas às especificidades regionais, levando em conta fatores como a matriz energética, a regulamentação vigente e a infraestrutura disponível.

5.1 Trabalhos Futuros

Para aprofundar esta análise, sugerimos que futuros estudos realizem uma simulação mais sistêmica, como a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Essa abordagem permitirá avaliar não apenas a eficiência e sustentabilidade dos fluidos refrigerantes, mas também a massa equivalente de substâncias liberadas em diferentes ecossistemas (ar, água e solo) ao longo da vida útil dos sistemas de refrigeração, desde a construção do equipamento até o seu funcionamento e desmantelamento. Além disso, é recomendável ampliar a participação de profissionais na pesquisa, especialmente no que diz respeito à importância relativa da segurança e confiabilidade, garantindo uma visão mais abrangente e robusta sobre as melhores práticas e escolhas tecnológicas no campo da refrigeração (Rossi et al, 2021).

Esta abordagem integrada permitirá uma melhor compreensão dos impactos ambientais e operacionais, contribuindo para o desenvolvimento de soluções mais sustentáveis e eficientes para a cadeia alimentar global. A implementação de índices que combinem descarbonização, eficiência, segurança e confiabilidade será fundamental para enfrentar os desafios ambientais e garantir a qualidade de vida e a confiabilidade dos sistemas de refrigeração no futuro.

REFERÊNCIAS

- ABNT. NBR 16069 - **SEGURANÇA EM SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO**. 2004.
- AGÊNCIA EUROPÉIA DO AMBIENTE, 2023. (European Environment Agency). **Global and European temperatures**. Published 29 Jun 2023. Disponível em <https://www.eea.europa.eu/ims/global-and-european-temperatures>. Acessado em 20/06/2024.
- AIRAH. **THE AUSTRALIAN INSTITUTE OF REFRIGERATION, AIR CONDITIONING AND HEATING**. Disponível em <https://www.airah.org.au/>. Acessado em 16/6/2024.
- AHRINET. **CHEMICAL AND THERMAL STABILITY OF REFRIGERANT LUBRICANT MIXTURES WITH METALS**. Atlanta, GA. Disponível em <https://www.ahrinet.org/system/files/2023-06/Chemical%20and%20Thermal%20Stability%20of%20Refrigerant-lubricant%20Mixtures%20with%20Metals-Huttenlocher%201992-DOE-CE-23810-5.pdf>. Acessado em 20/06/2024.
- ASHRAE **Equipment Life Expectancy chart** ASHRAE is the industry organization that sets the standards and guidelines for most all HVAC-R equipment. For additional info about ASHRAE the website is www.ashrae.org. 2024.
- ASHRAE **Addendum f to ANSI/ASHRAE Standard 34-2019** Designation and Safety Classification of Refrigerants Approved by the ASHRAE Standards Committee on October 16, 2019

- COOLPACK. **Software COOLPACK Version 1.49**; IPU & Department of Mechanical Engineering Technical University of Denmark. Lynby, Denmark, 2011.
- Dupont J. L., El Ahmar A. and Guilpart J. **The Role of Refrigeration in Worldwide nutrition** (2020), 6th Informatory Note on Refrigeration and Food. 2020.
- EPE. **Balço Energético Nacional 2019**. Relatório Síntese / Ano Base 2018; Ministério de Minas e Energia–MME/ Empresa de Pesquisa Energética–EPE. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-470/Relat%C3%B3rio%20S%C3%20BEN%202019%20Ano%20Base%202018.pdf>. Acessado em /06/2024.
- GOV.IBAMA. 2024. **Protocolo de Montreal**. Disponível em <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/emissoes-e-residuos/emissoes/protocolo-de-montreal>. Acessado em 25/05/2024.
- GOV.MMA, 2024. **Relatório com informações sobre tecnologias equipamentos debaixo gwp para ar-condicionado residencial**. Disponível em <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/mudanca-do-clima/ozonio/relatorio-com-informacoes-sobre-tecnologias-equipamentos-de-baixo-gwp-para-ar-condicionado-residencial.pdf>. Acessado em 20/05/2024.
- GOV.MMA, 2011. **Características dos refrigerantes sintéticos e naturais**. Ministério do Meio Ambiente (MMA), 2011.
- IIR, 2020. **The Role of Refrigeration in Worldwide nutrition**. 6th Informatory Note on Refrigeration and Food. 2020.
- IPCC. **Fourth Assessment Report**. Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC. 2007.
- Li, Yalun, Yang, Jialiang; WU, Xilei; Liu, Ying; Zhuang, Yuan; Zhou, Peixu; Han, Xiaohong; Chen, Guangming. **Leakage, diffusion and distribution characteristics of refrigerant in a limited space: A comprehensive review**. Thermal Science and Engineering Progress. Volume 40, 1 May 2023, 101731. Elsevier. 10.1016/j.tsep.2023.101731.
- KIGALI. 2024. **Folder Emenda Kigali**. Disponível em <https://kigali.org.br/wp-content/uploads/2021/09/Folder-Emenda-Kigali.pdf>. Acessado em 27/02/2024.
- Rossi, Marta; Favi, Claudio; Germani, Michele; Omicioli, Matteo. **Comparative life cycle assessment of refrigeration systems for food cooling: eco-design actions towards machines with natural refrigerants**. International Journal of Sustainable Engineering. Volume 14, 2021 - Issue 6. Doi .org/10.1080/1939038.2021.1970274.
- SANTOS, Alexandre. Gaspar, Pedro; Souza, Herald J. L. de. **Evaluating the Energy Efficiency and Environmental Impact of COVID-19 Vaccines Coolers through New Optimization Indexes: Comparison between Refrigeration Systems Using HFC or Natural Refrigerants**. Processes 2022, 10(4), 790; <https://doi.org/10.3390/pr10040790>. Publicado em 17/04/2022.
- SANTOS, Alexandre; et al. **INNOVATIVE HYBRID GEOTHERMAL/AIR HEAT SYSTEM FOR BIOGAS PRODUCTION**. Journal of Engineering Research, v. 3, p. 2-12, DOI:10.22533/at.ed.3173272314081. 2023..
- WEBARCONDICIONADO, 2024. **História dos fluidos refrigerantes da origem ao cenário atual**. Disponível em <https://www.webarcondicionado.com.br/historia-dos-fluidos-refrigerantes-da-origem-ao-cenario-atual>. Acessado e, 16/06/2024.

CREATION OF NEW REFRIGERANT DECISION-MAKING INDEX, TEWI+S+R

Abstract. *Studies have estimated that a considerable amount of global greenhouse gas (GHG) emissions is recovered from food production and agriculture. Approximately 26-31% of anthropogenic GHG emissions are related to the food supply chain (the remaining proportion is associated with land use, agricultural production and livestock). The food industry is economically important and essential to many of the UN's sustainable development goals. The food sector often has a major impact on a country's GDP, especially in the least developed countries. The focus of this article is a multi-option TEWI cold room simulation and the creation of a new index called TEWI+S+R.*

Keywords: Carbon Emissions, Energy, Food Chain, TEWI.