

5. Resultados

Foi feita uma avaliação paramétrica utilizando os módulos computacionais de simulação de supermercados desenvolvidos no presente trabalho. Todas as execuções foram realizadas com as mesmas condições de carga térmica de refrigeração, somente mudando os refrigerantes e fluidos secundários, de modo a determinar seu impacto sobre o consumo energético de um supermercado e sobre o meio ambiente. Entre esses refrigerantes testou-se uma nova mistura, Genetron Performax® LT R407F (Honeywell, 2010), desenvolvida por uma empresa estadunidense.

Inicialmente, rodaram-se diversos casos para cada um dos sistemas e, posteriormente, foi feita uma análise comparativa entre os três sistemas trabalhando com as mesmas condições de baixa temperatura (BT), para assim determinar qual sistema apresenta maiores vantagens.

5.1. Sistema de expansão direta

A seguir mostram-se os dados de entrada utilizados para a simulação do sistema de expansão direta, os quais são os mesmos que foram utilizados no capítulo 4 para a validação do modelo. São descritos novamente nas tabelas 23 e 24:

Tabela 23 - Dados gerais de locação e do sistema a ser utilizado

Dados Gerais	
Locação	Atlanta, Geórgia
Área do Supermercado	4180.63 m ²
Tipo de Sistema	Expansão Direta

Tabela 24 – Condições de operação do sistema

Dados de Projeto	Baixa Temperatura (LT)	Média Temperatura (MT)
Temp. de saturação na sucção (SST)	-28,9 °C (-20 °F)	-6,7 °C (20 °F)
Temp. de saturação na descarga (SDT)	43,3 °C (110 °F)	43,3 °C (110 °F)
Grau de superaquecimento	36,1 K (65 °R)	13,9 K (25 °R)
Grau de sub-resfriamento Mecânico	10 °C (50 °F)	-17,8 °C (0 °F)
Carga térmica de Refrigeração	87,84 kW (300.000 BTU/h)	250,7 kW (856.079 BTU/h)

Os refrigerantes testados foram os seguintes:

- R404A
- R407A
- R407C
- Genetron Performax® LT (R407F)

Calculou-se o consumo energético, o TEWI e o LCCP para os quatro refrigerantes. Os resultados são mostrados a seguir para cada um dos refrigerantes acima mencionados. Para o refrigerante R404A determinaram-se os seguintes resultados, mostrados na tabela 25:

Tabela 25 – Consumo energético e LCCP para R404A – Expansão direta

		Baixa temperatura	Média temperatura	Supermercado
1.	Temperatura de projeto (°C)	-28.9	-6.7	
2.	Refrigerante	R404A	R404A	
3.	Carga total de Refrigeração (kW)	87.84	250.7	
4.	Consumo de energia (kWh/ano)	6.46E+05	1.14E+06	1.79E+06
	(a) Compressores	3.39E+05	5.92E+05	9.31E+05
	(b) Outros (degelo, aquecedores, etc)	3.07E+05	5.48E+05	8.55E+05
5.	TEWI (kg CO ₂)	3.28E+07		
		Efeito direto	Efeito indireto	Total LCCP
6.	LCCP(kg CO ₂)	1.82E+07	1.74E+07	3.56E+07

Esses resultados podem ser exibidos em gráficos de barras tanto para o consumo energético, na figura 25, como para emissões de CO₂, na figura 26.

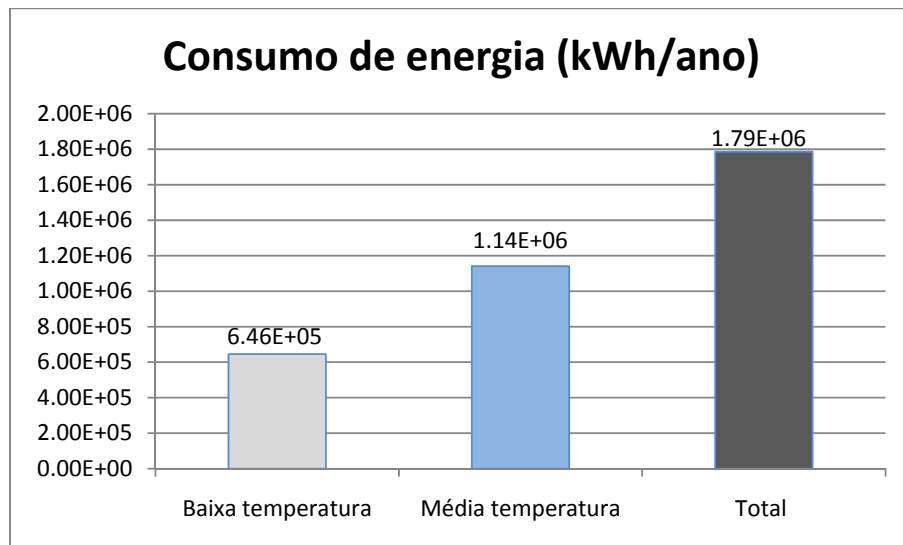


Figura 25 – Gráficos de barras do consumo energético R404A – Expansão direta

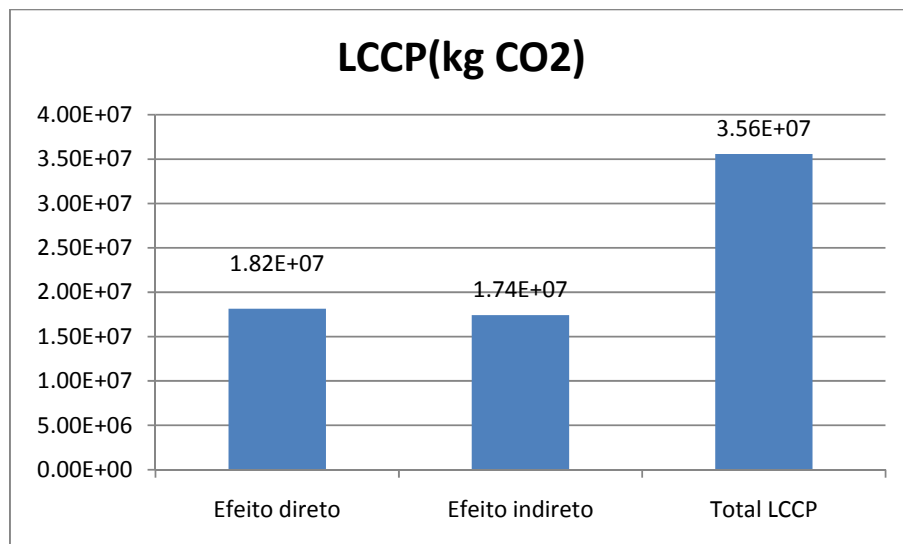


Figura 26 – Gráfico de barras para LCCP R404A – Expansão direta

Realizou-se a mesma análise para os outros três refrigerantes: R407A, R407C e o R407F para, posteriormente, fazer uma comparação entre si.

Na Tabela 26 observam-se os resultados para o R407A e, nas figuras 27 e 28, o consumo energético e emissões de CO₂, respectivamente.

Tabela 26 – Consumo energético e LCCP para R407A - Expansão direta

Expansão direta		Baixa temperatura	Média temperatura	Supermercado
1.	Temperatura de projeto (°C)	-28,9	-6,7	
2.	Refrigerante	R407A	R407A	
3.	Carga total de Refrigeração (kW)	87,84	250,7	
4.	Consumo de energia (kWh/ano)	6,45E+05	1,13E+06	1,77E+06
	(a) Compressores	3,38E+05	5,81E+05	9,19E+05
	(b) Outros (degelo, aquecedores, etc)	3,07E+05	5,48E+05	8,55E+05
5.	TEWI (kg CO ₂)	2,31E+07		
		Efeito direto	Efeito indireto	Total LCCP
6.	LCCP(kg CO ₂)	5,90E+06	1,73E+07	2,32E+07

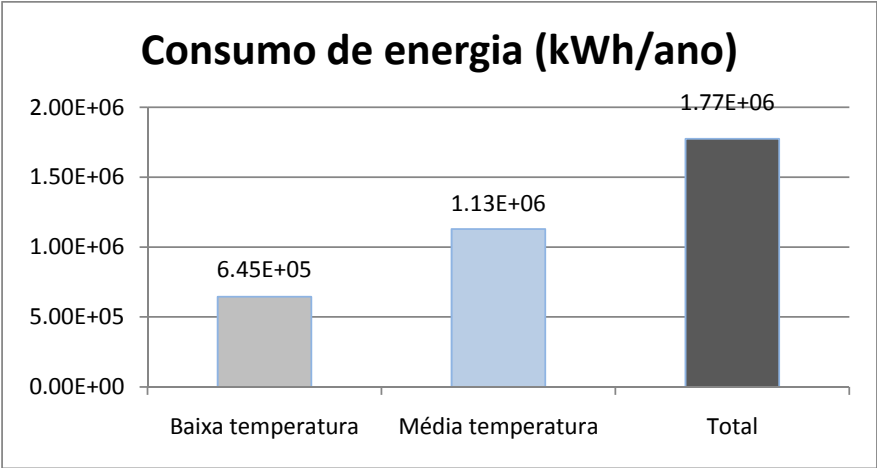


Figura 27 – Gráfico de barras do consumo energético R407A – Expansão direta

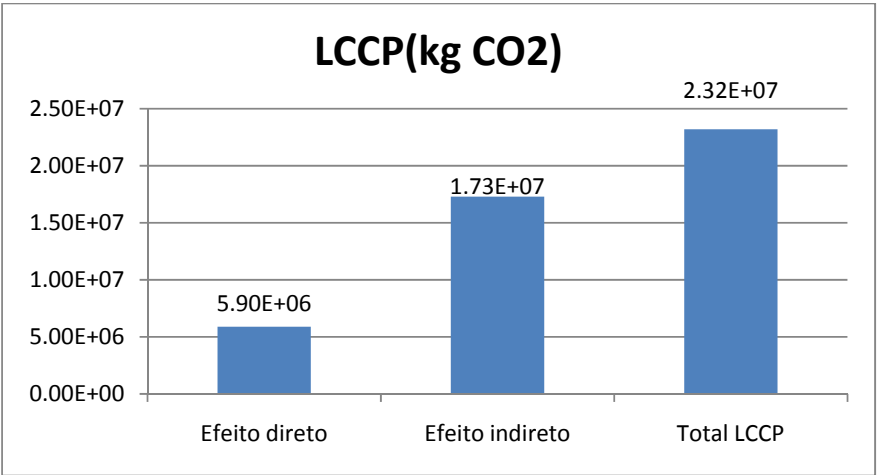


Figura 28 – Gráfico de barras para LCCP R407A – Expansão direta

Na tabela 27 apreciam-se os resultados para o R407C e, nas figuras 29 e 30, o consumo energético e emissões de CO₂, nesta ordem.

Tabela 27 – Consumo energético e LCCP para R407C - Expansão direta

Expansão direta		Baixa temperatura	Média temperatura	Supermercado
1.	Temperatura de projeto (°C)	-28,9	-6,7	
2.	Refrigerante	R407C	R407C	
3.	Carga total de Refrigeração (kW)	87,84	250,7	
4.	Consumo de energia (kWh/ano)	6,45E+05	1,13E+06	1,77E+06
	(a) Compressores	3,41E+05	5,84E+05	9,25E+05
	(b) Outros (degelo, aquecedores, etc)	3,07E+05	5,48E+05	8,55E+05
5.	TEWI (kg CO ₂)	2,31E+07		
		Efeito direto	Efeito indireto	Total LCCP
6.	LCCP(kg CO ₂)	5,83E+06	1,74E+07	2,32E+07

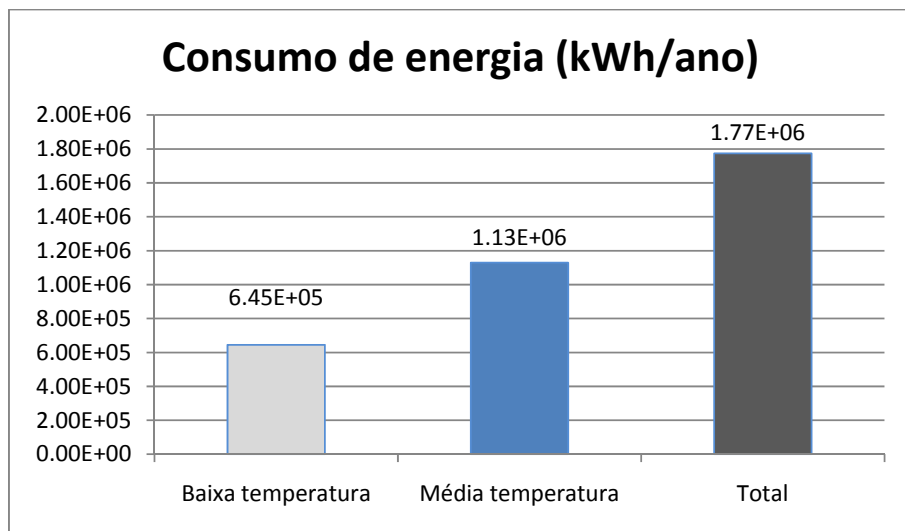


Figura 29 – Gráfico de barras do consumo energético R407C – Expansão direta

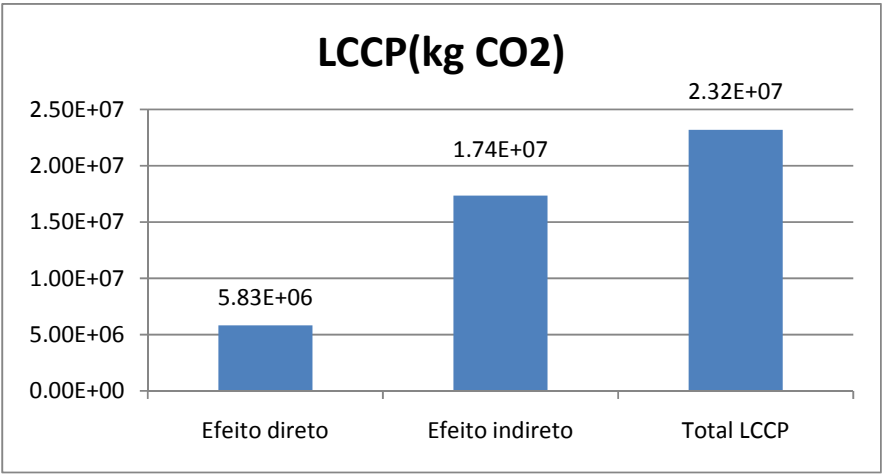


Figura 30 – Gráfico de barras para LCCP R407C – Expansão direta

Na Tabela 28 são verificados os resultados para o R407C e, nas figuras 31 e 32, o consumo energético e emissões de CO₂, respectivamente.

Tabela 28 – Consumo energético e LCCP para o R407F

Expansão direta		Baixa temperatura	Média temperatura	Supermercado
1.	Temperatura de projeto (°C)	-28,9	-6,7	
2.	Refrigerante	R407F	R407F	
3.	Carga total de Refrigeração (kW)	87,84	250,7	
4.	Consumo de energia (kWh/ano)	6,46E+05	1,11E+06	1,75E+06
	(a) Compressores	3,39E+05	5,60E+05	8,99E+05
	(b) Outros (degelo, aquecedores, etc)	3,07E+05	5,48E+05	8,55E+05
5.	TEWI (kg CO ₂)	2,28E+07		
		Efeito direto	Efeito indireto	Total LCCP
6.	LCCP(kg CO ₂)	5,77E+06	1,71E+07	2,29E+07

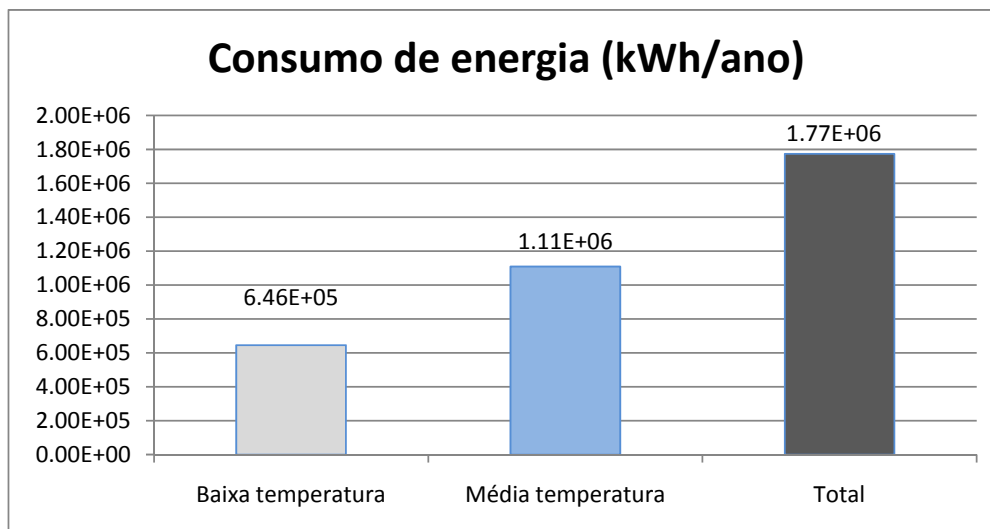


Figura 31 – Gráfico de barras do consumo energético R407F – Expansão direta

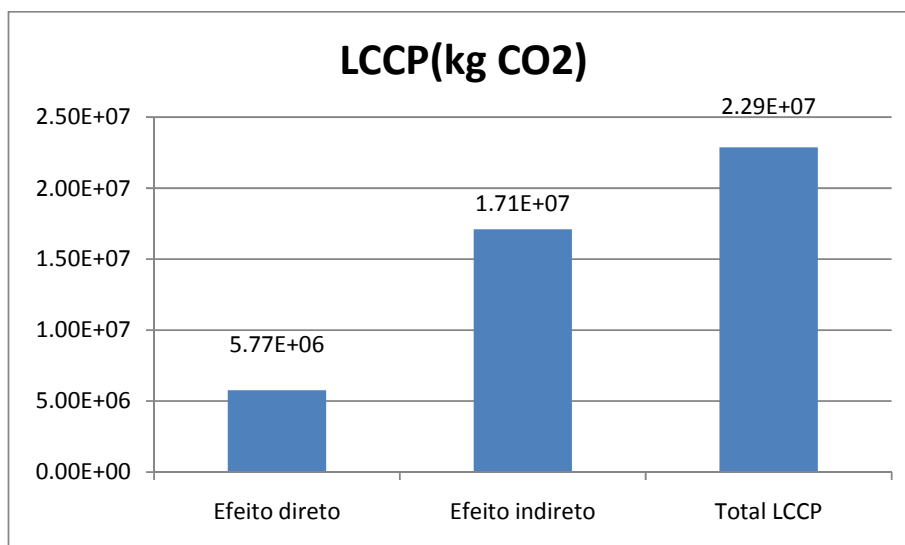


Figura 32 – Gráfico de barras para LCCP R407F – Expansão direta

Posteriormente, na figura 33, realizou-se uma comparação mediante gráficos de barras das quatro alternativas para verificar quais apresentam o menor consumo energético para uma mesma opção e, quais emitem menos CO₂ para a atmosfera. As emissões são apresentadas na figura 34.

É importante esclarecer que, em ocasiões, uma opção pode resultar positivamente para a redução das emissões de CO₂, porém, ao mesmo tempo, pode representar um consumo maior de energia. Por este motivo, as

ferramentas computacionais de simulação ajudam a testar diferentes opções de refrigerantes, para, posteriormente, passar-se ao desenvolvimento físico e aos testes de laboratório.

Tabela 29 – Comparação entre os diferentes refrigerantes – Sistema de Expansão direta

	Consumo	LCCP		
	Energético Anual	Efeito Direto	Efeito Indireto	Total
	(kWh)	(kg CO ₂)	(kg CO ₂)	(kg CO ₂)
R404A	1.79E+06	1.82E+07	1.74E+07	3.56E+07
R407A	1.77E+06	5.90E+06	1.73E+07	2.32E+07
R407C	1.78E+06	5.83E+06	1.74E+07	2.32E+07
R407F	1.75E+06	5.77E+06	1.71E+07	2.29E+07

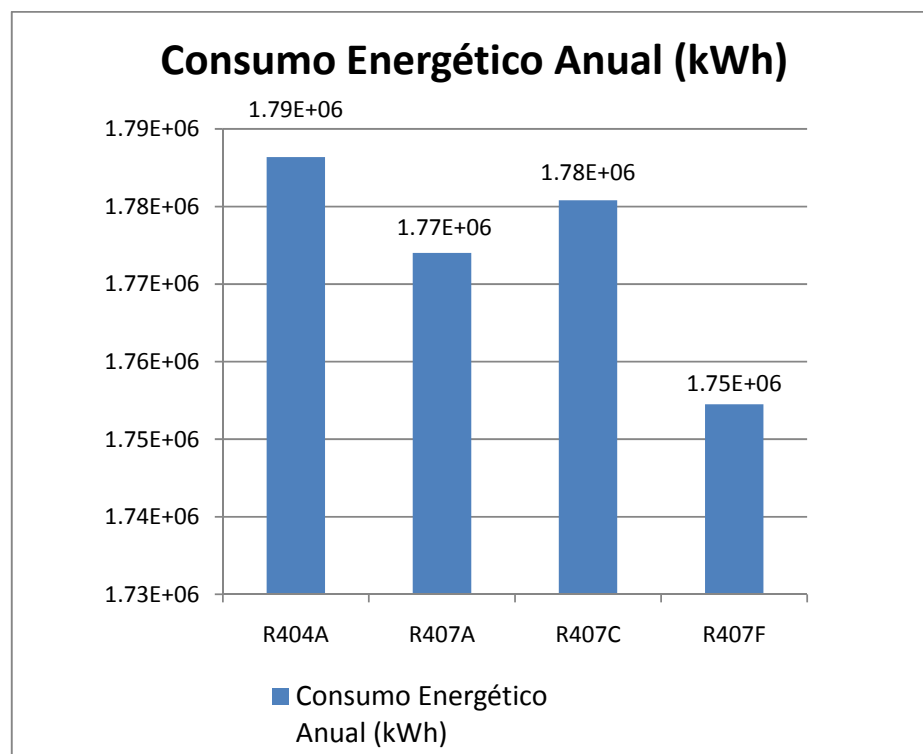


Figura 33 – Gráfico de comparação entre alternativas (consumo de energia)

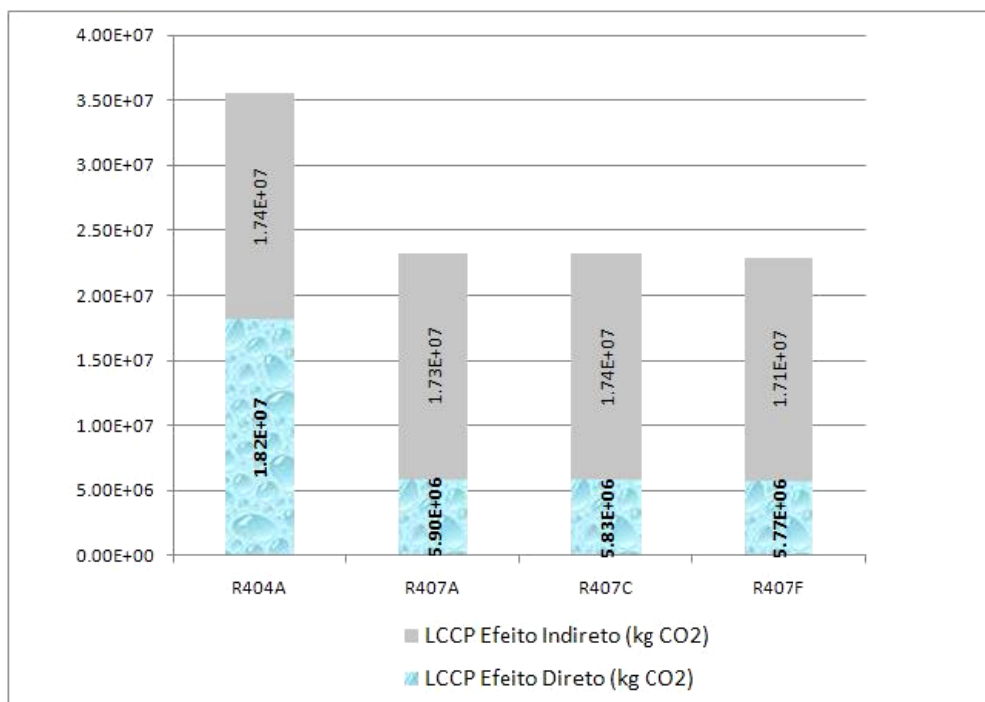


Figura 34 – Gráfico de comparação entre alternativas (LCCP)

Percebe-se que o R407F, apresenta um consumo energético mais baixo dentre as alternativas comerciais avaliadas. Por outro lado, o R404A apresenta o maior consumo energético pelo fato de ter um COP (coeficiente de rendimento) baixo.

Percebe-se, também, que o R407F apresenta o LCCP mais baixo dentre as alternativas avaliadas. Por outro lado, o R404A apresenta o maior valor de LCCP, devido a o elevado consumo energético (efeito indireto) e ao elevado valor de GWP (efeito direto) de esta mistura refrigerante.

5.2. Sistema com fluido secundário

No segundo estudo de caso apresenta-se o sistema com fluido secundário operando com o R407F no lado de expansão direta e no circuito secundário com etileno glicol.

Os outros parâmetros de funcionamento do ciclo são os mesmos utilizados com expansão direta e mostrados anteriormente nas tabelas 23 e 24, mas com a diferença de utilizar uma bomba de recirculação para o circuito secundário.

Para a configuração descrita obtiveram-se os resultados para o consumo energético apresentados na tabela 30. Em adição, na figura 35 apresenta-se um gráfico de barras para dar melhor idéia das magnitudes.

Tabela 30 – Consumo energético e LCCP para o R407F – Fluido secundário

	Fluido secundário	Baixa temperatura	Média temperatura	Supermercado
1.	Temperatura de projeto (°C)	-28,9	-6,7	
2.	Refrigerante	R407F	R407F	
3.	Fluido secundário	Etileno glicol	Etileno glicol	
4.	Carga total de Refrigeração (kW)	87,84	250,7	
5.	Consumo de energia (kWh/ano)	6,51E+05	1,14E+06	1,79E+06
	(a) Compressores	3,27E+05	5,41E+05	8,68E+05
	(b)Bombas	1,75E+04	5,01E+04	6,76E+04
	(b) Outros (degelo, aquecedores, etc)	3,07E+05	5,48E+05	8,55E+05
6.	TEWI (kg CO ₂)	1,78E+07		
		Efeito direto	Efeito indireto	Total LCCP
7.	LCCP(kg CO ₂)	3,93E+05	1,75E+07	1,79E+07

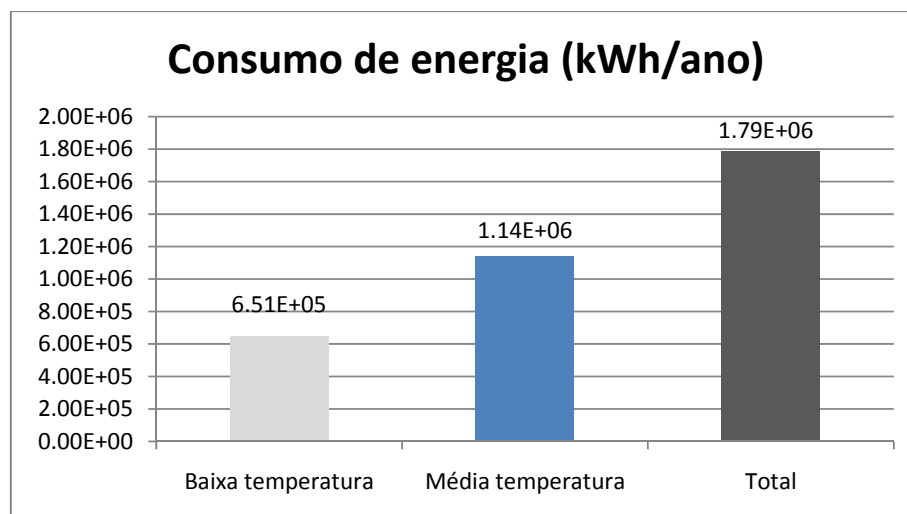


Figura 35 – Gráfico de barras do consumo energético com R407F – Fluido secundário

Posteriormente, realizou-se uma análise de LCCP para o mesmo arranjo e calculou-se um valor do efeito indireto muito próximo ao calculado com o sistema de expansão direta, figura 36, visto que os consumos de energia são equivalentes. Por outro lado, a diferença reside no baixo valor do efeito direto por utilizar fluido secundário, o qual é inócuo para a camada de ozônio.

Na figura 36, pode-se observar a grande diferença entre os efeitos direto e indireto devido à utilização do fluido secundário. Isto porque os sistemas operando com fluido secundário apresentam um ciclo de expansão direta mais compacto e, portanto, com menor carga de fluido refrigerante. Em adição, um sistema mais compacto não requer tantas junções pelas quais, comumente, acontecem os vazamentos.

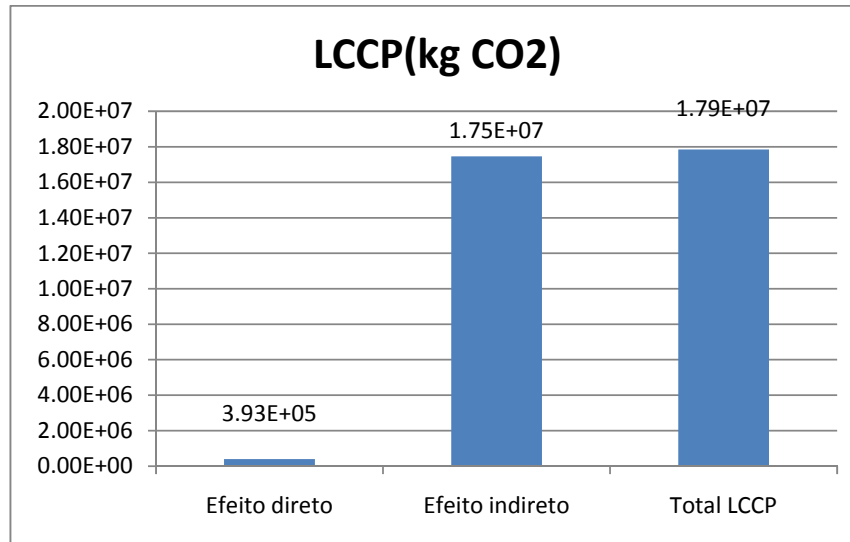


Figura 36 – Gráfico de barras para LCCP com R407F – Fluido secundário

5.3. Sistema Cascata

No terceiro estudo de caso apresenta-se o sistema cascata funcionando com a nova mistura refrigerante (Genetron® Performax R407F) do lado de alta temperatura. No lado de baixa temperatura, utilizam-se os seguintes refrigerantes:

- Dióxido de carbono.
- R410A.

Devido ao fato de o sistema em cascata servir para atingir baixas temperaturas, considerou-se as propriedades do sistema de expansão direta, porém considerando alguns outros parâmetros de funcionamento, conforme tabela 31.

Tabela 31 – Parâmetros de funcionamento do sistema em cascata

Diferença de temperatura no IHX	4°C (7.2 °R)
Refrigerante de alta temperatura	R407F
Refrigerante de baixa temperatura	CO ₂

Para o primeiro caso foi testado o CO₂ para o circuito de baixa temperatura e, obtiveram-se resultados obtidos com o presente modelo, os quais são mostrados na tabela 32 e também na figura 37 a seguir:

Tabela 32 – Consumo energético e LCCP para a Cascata (R407F/CO₂)

EM CASCATA		Baixa temperatura	Alta temperatura	Supermercado
1.	Temperatura de projeto (°C)	-28,9	-	
2.	Refrigerante	CO ₂	R407F	
3.	Carga total de Refrigeração (kW)	5,4	-	
4.	Consumo de energia (kWh/ano)	3,26E+05	1,79E+05	5,05E+05
	(a) Compressores	1,89E+04	1,79E+05	1,98E+05
	(b) Outros (degelo, aquecedores, etc)	3,07E+05	0,00E+00	3,07E+05
5.	TEWI (kg CO ₂)	4,92E+06		
6.	LCCP(kg CO ₂)	3,18E+06	2,58E+06	5,76E+06
	Efeito direto	3,16E+03	8,35E+05	8,38E+05
	Efeito indireto	3,18E+06	1,75E+06	4,92E+06

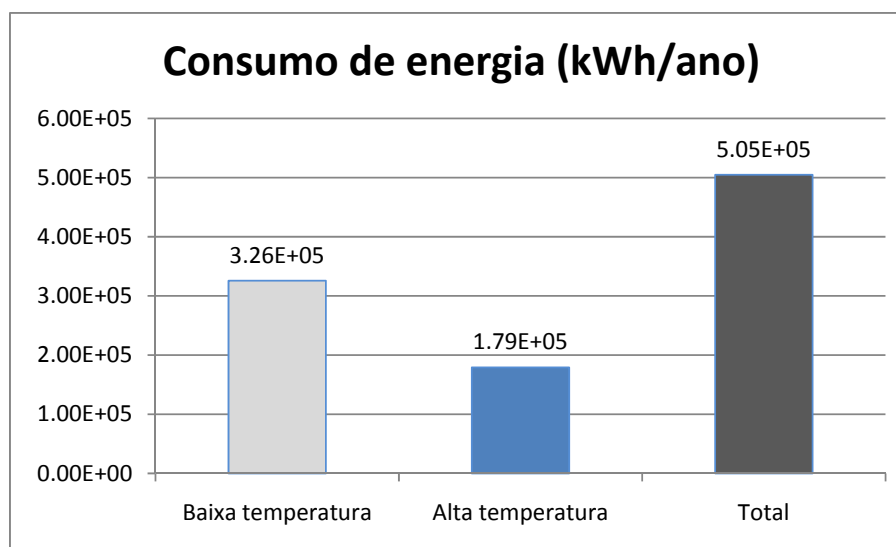


Figura 37 – Gráfico de barras do consumo energético a Cascata (R407F/CO₂)

Para o indicador LCCP, calculou-se em duas etapas. Em primeiro lugar, foi calculado para o sistema de baixa temperatura e, posteriormente, para o sistema de alta temperatura. Na figura 38 mostram-se os resultados com o circuito de alta temperatura operando com CO₂.

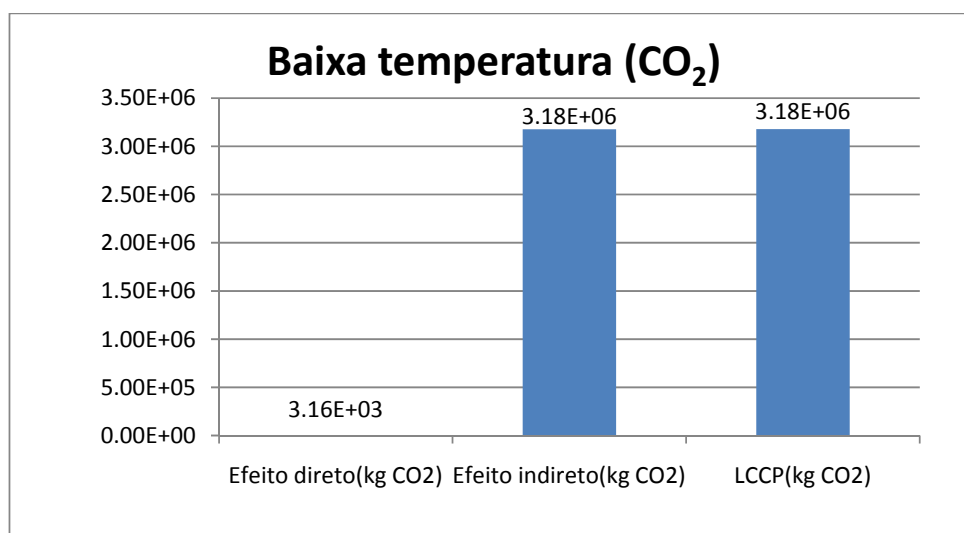


Figura 38 – Gráfico de barras para LCCP no sistema em Cascata (R407F/CO₂) – Sistema de baixa Temperatura

Na figura 39 demonstra-se o LCCP do sistema de alta temperatura funcionando com a nova mistura, que é mantida constante em ambos os casos.

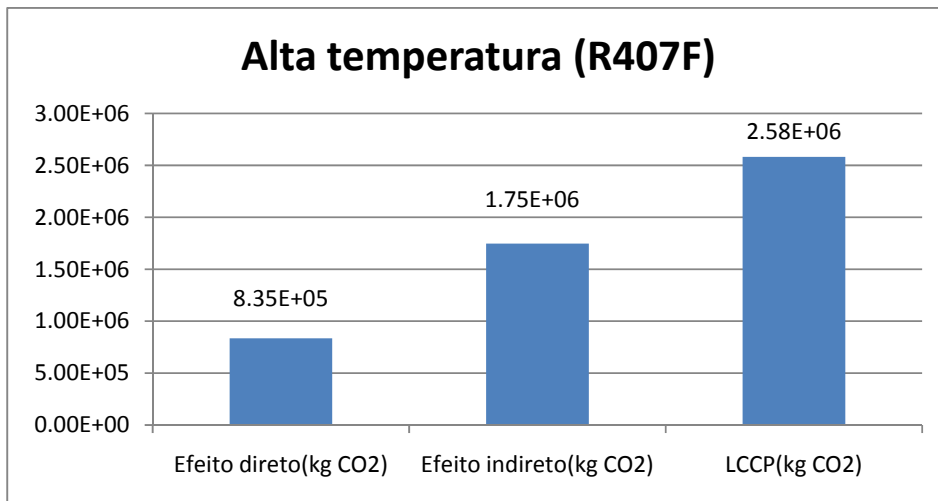


Figura 39 – Gráfico de barras para LCCP no sistema em Cascata (R407F/CO₂) – Sistema de alta Temperatura

Para o segundo caso utilizou-se o refrigerante R410A para o lado de baixa temperatura e mantém-se o R407F para o lado de alta temperatura. Foram obtidos os seguintes resultados, na tabela 33 e figura 40:

Tabela 33 – Consumo energético e LCCP para o sistema em Cascata (R407F/R410A)

EM CASCATA		Baixa temperatura	Alta temperatura	Supermercado
1.	Temperatura de projeto (°C)	-28,9	-	
2.	Refrigerante	R407F	R410A	
3.	Carga total de Refrigeração (kW)	5,4	-	
4.	Consumo de energia (kWh/ano)	3,81E+05	1,98E+05	5,79E+05
	(a) Compressores	7,41E+04	1,98E+05	2,72E+05
	(b) Outros (degelo, aquecedores, etc)	3,07E+05	0,00E+00	3,07E+05
5.	TEWI (kg CO ₂)	6,45E+06		
6.	LCCP(kg CO ₂)	3,72E+06	2,74E+06	6,46E+06
	Efeito direto	3,56E+03	8,06E+05	8,09E+05
	Efeito indireto	3,71E+06	1,93E+06	5,65E+06

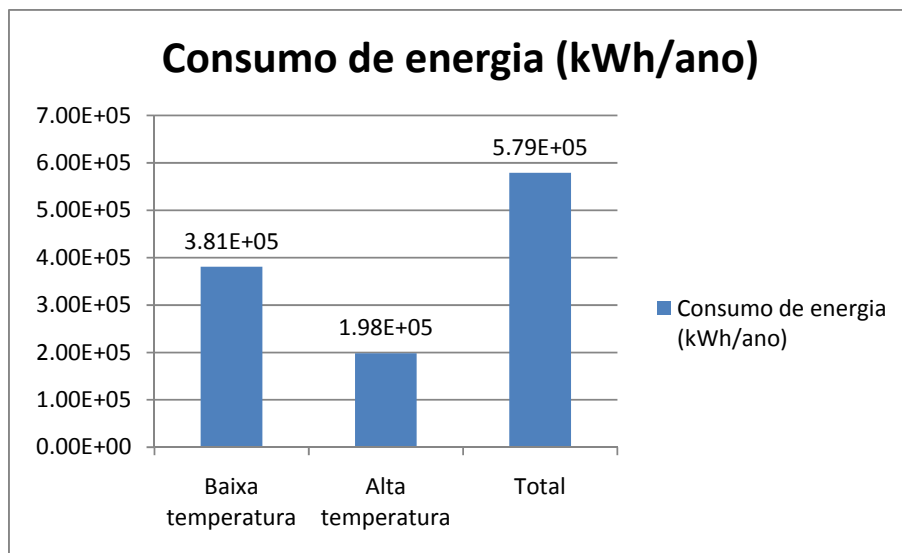


Figura 40 – Gráfico de barras do consumo energético – Sistemas em cascata (R407F/R410A)

Para o cálculo do LCCP, no lado de baixa temperatura, foram obtidos os seguintes resultados (ver figura 41 e figura 42):

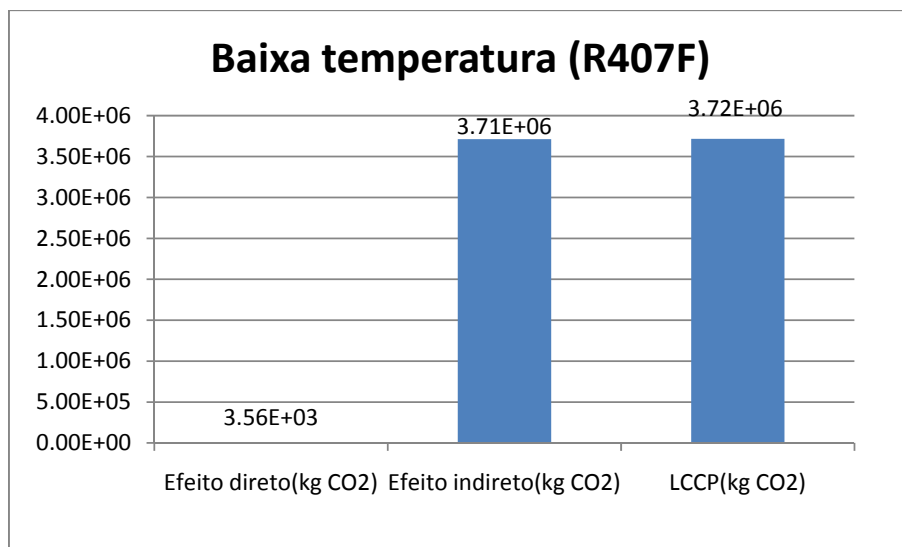


Figura 41 – Gráfico de barras para LCCP a Cascata (R407F/410A) – Baixa Temperatura

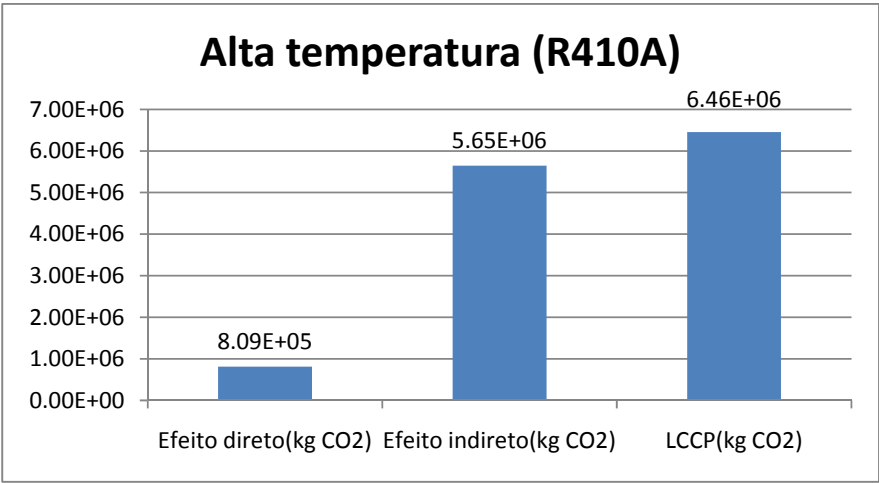


Figura 42 – Gráfico de barras para LCCP a Cascata (R407F/R410A) – Alta Temperatura

A seguir, na tabela 34 mostra-se uma análise comparativa entre as duas opções, tanto do ponto de vista de consumo de energia como para o LCCP.

Tabela 34 – Tabela comparativa para o sistema cascata

	Consumo (kWh/ano)		LCCP (KG CO ₂)		
	Alta temperatura - Nova mistura		Efeito Direto	Efeito Indireto	Total
Baixa temperatura	R407F/CO ₂	5,05E+05	8,38E+05	4,92E+06	5,76E+06
	R407F/R410A	5,79E+05	4,85E+06	5,65E+06	1,05E+07

Nas figuras 43 e 44 apresenta-se uma representação gráfica de comparação, para consumo energético e para o LCCP.

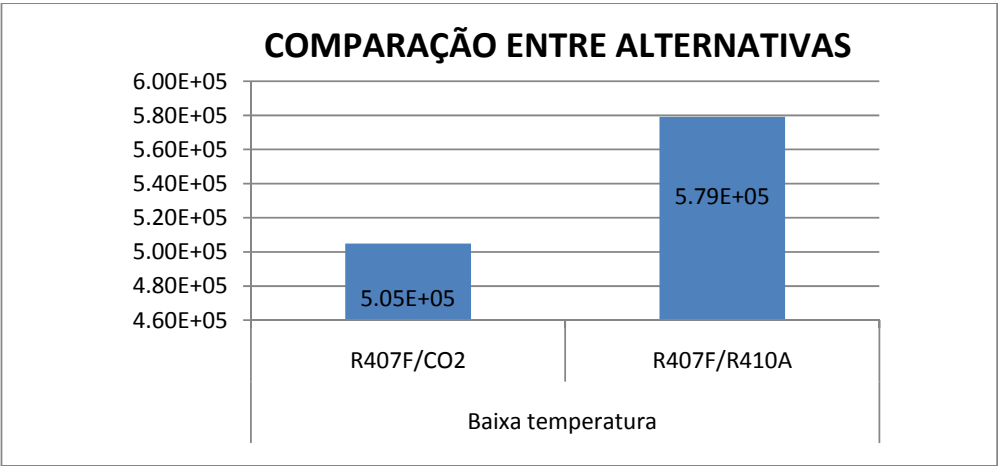


Figura 43 – Gráfico de barras para o consumo energético (Circuito em cascata)

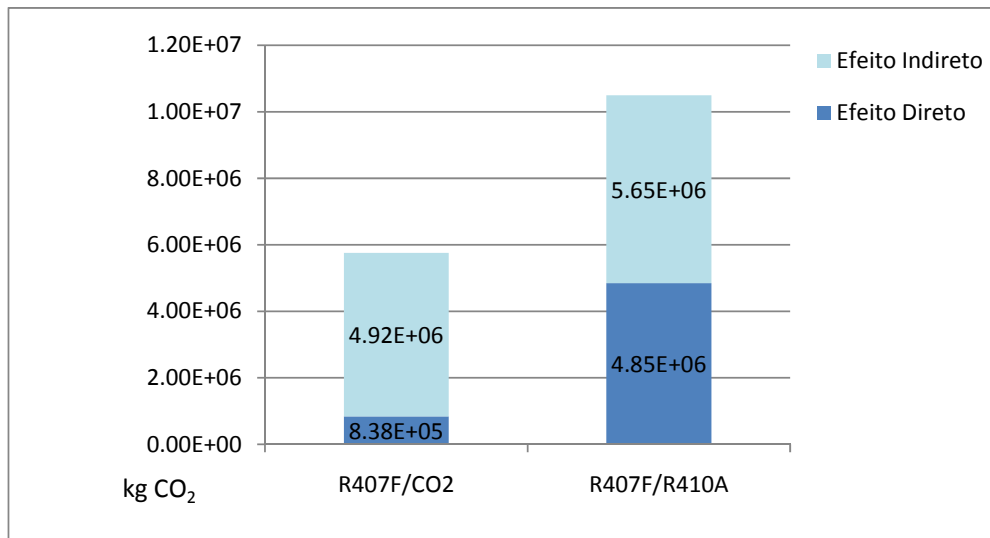


Figura 44 – Gráfico comparativo de barras para do LCCP do sistema em cascata

Observa-se que a utilização de CO₂ como fluido de baixa temperatura representa um menor consumo de energia trabalhando em conjunto com o R407F, comparando com outro refrigerante, como o R410A.

Por outro lado, a utilização do CO₂ representa um baixo LCCP em comparação à utilização do R410A. Portanto, o CO₂ mostra ser uma boa opção para trabalhar com sistemas em cascata.

5.4. Comparação dos sistemas (DX, FS e Cascata)

O próximo passo consiste em comparar as três opções de sistemas operando com o novo refrigerante (R407F) e, verificar qual deles apresenta menor consumo energético e impacto ambiental mais baixo.

Nos três sistemas apresentados fez-se uma comparação do consumo energético e do LCCP. Os resultados constam nas figuras 45 e 46.

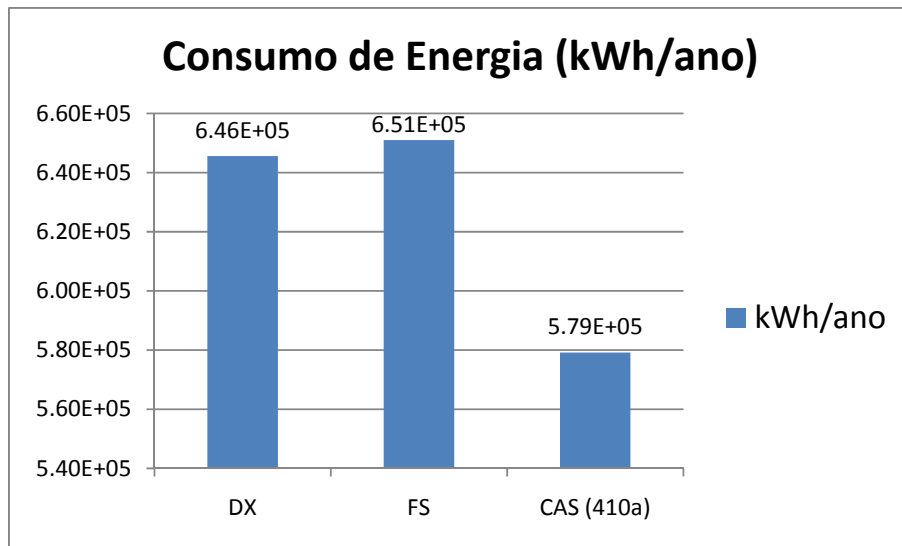


Figura 45 – Gráfico de barras da comparação entre as alternativas (Consumo energético)

Para o sistema de expansão direta (DX) utilizou-se o refrigerante R407F.

Para o sistema de fluido secundário (FS) utilizou-se como refrigerante primário o refrigerante R407F e o etileno glicol como fluido secundário.

Para o sistema em cascata (CAS) utilizou-se o par 407F/CO₂.

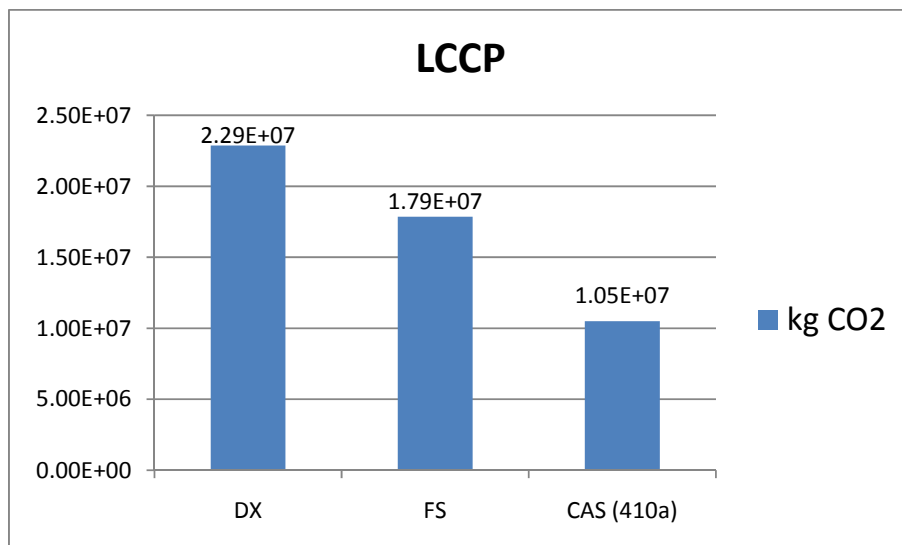


Figura 46 – Gráfico de barras da comparação entre as alternativas (LCCP)

Para o sistema de expansão direta (DX) utilizou-se o refrigerante R407F.

Para o sistema de fluido secundário (FS) utilizou-se como refrigerante primário o refrigerante R407F e o etileno glicol como fluido secundário.

Para o sistema em cascata (CAS) utilizou-se o par 407F/CO₂.

Conclue-se pela solução do sistema cascata, no que diz respeito a consumo energético anual e impacto ambiental (LCCP). De fato, o sistema em cascata mostra ser uma opção vantajosa, operando em conjunto com o CO₂ como fluido de baixa temperatura, tanto para ponto de vista de consumo energético quanto ambiental. O sistema demanda um menor consumo energético dos compressores e também apresenta um baixo LCCP, pelo fato de o CO₂ ser um refrigerante natural (GWP=1).