

EMISSÕES DE CARBONO PARA UM SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO SOLAR POR ABSORÇÃO

LÍGIA DA COSTA GARCIA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

DENER DELMIRO MARTINS

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA - UFPB

MONICA CARVALHO

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA - UFPB

RAFAELA RAMOS BARBOSA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

EMISSÕES DE CARBONO PARA UM SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO SOLAR POR ABSORÇÃO

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, observou-se a intensificação das discussões acerca da diversificação da matriz energética mundial, bem como a necessidade de ferramentas para previsão do impacto ambiental de quaisquer tecnologias operantes ou em fase de desenvolvimento. A mudança gradual de postura das nações frente ao agravamento das questões ambientais toma espaço de diversas maneiras, uma delas a partir da expansão dos mercados voltados para tecnologias renováveis.

O relatório da Agência Internacional de Energia - IEA (2020) mostra que a demanda por fontes renováveis de energia cresceu em 1,5% em todo o globo no primeiro quadrimestre de 2020, em decorrência da crise gerada pela pandemia do COVID-19. O mesmo relatório projeta a continuidade desse crescimento até o fim do ano, em função do baixo custo operacional desses sistemas. De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN) referente ao ano de 2019, o Brasil ampliou o uso de fontes renováveis em 2,8% em relação a 2018 e, com relação à energia solar em particular, experimentou um aumento expressivo de 92,2% no mesmo período.

A aplicação da energia para climatização de ambientes construídos mais do que dobrou entre 2000 e 2018, e segue crescendo em função não apenas do crescimento populacional e urbanização, mas do próprio acréscimo da temperatura média do planeta (IEA, 2018). Nesse sentido, há um esforço conjunto da comunidade científica e programas de eficientização energética para frear a demanda de eletricidade para refrigeração de construções até 2040 (IEA, 2018).

A expansão do uso de tecnologias convencionais de climatização tem acentuado os impactos ambientais nos últimos anos, tanto devido ao consumo de energia quanto devido à utilização dos refrigerantes. Mesmo após a substituição gradual dos refrigerantes a base de clorofluorcarbonetos (CFCs) por aqueles baseados em hidrofluorcarbonos (HFCs), estes ainda são gases de efeito estufa, com um potencial desencadeador do aquecimento global da ordem de 1000 vezes superior ao dióxido de carbono (DE PAULA *et al.*, 2020). Alternativas para diminuir o impacto ambiental associado a sistemas de climatização podem focar em diminuir o consumo de energia (eficiência energética), usar outros refrigerantes, e utilizar fontes de energias renováveis. As análises ambientais surgiram dessa necessidade de quantificação, devido às preocupações atuais com os impactos ambientais e as mudanças climáticas.

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia de análise ambiental, consolidada e validada internacionalmente, sendo mencionada como estado da arte pela União Europeia e implementada em várias políticas públicas (SALA *et al.*, 2016). A ACV quantifica os impactos ambientais associados a produtos, serviços e atividades (ISO 14040, 2006; ISO 14044, 2006), sendo bastante utilizada para comparar alternativas. A ACV é útil para tomadores de decisão, uma vez que possibilita a avaliação de projetos adaptados a condições ambientais específicas (BECCALI *et al.*, 2012). A ACV compreende informações de interpretação complexa e, para que gere resultados cabíveis às tomadas de decisão, deve ser transparente e o mais detalhada possível, apesar de hipóteses simplificadoras serem necessárias ou inevitáveis (BECCALI *et al.*, 2012).

Focando em trabalhos recentes que aplicam a ACV para avaliar sistemas de climatização, Beccali *et al.* (2016) compararam três sistemas distintos de climatização solar que funcionassem por 25 anos: (i) solar térmico com fonte de calor auxiliar, (ii) convencional com sistema fotovoltaico on-grid e (iii) convencional com sistema fotovoltaico off-grid, instalados em Palermo, Itália, e em Zurique, Suíça. Desse estudo, foi verificada a sensibilidade das emissões ao local de instalação, uma vez que as emissões de todos os sistemas foram menores

em Palermo. Os autores atribuíram essa diferença à alta demanda de gás natural nos *boilers* auxiliares da instalação de Zurique (25 vezes maior que em Palermo), dada a menor média anual de temperaturas na cidade suíça. Solano-Olivares et al. (2019) realizaram a avaliação ambiental de um protótipo de sistema de ar-condicionado por absorção solar, em uma Universidade no México, comparando com um sistema comercial de ar-condicionado. O sistema solar obteve melhores resultados em todas as categorias de impacto, gerando uma mitigação significativa dos impactos ambientais. Longo *et al.* (2020) desenvolveram ACVs para configurações distintas de sistemas de climatização por absorção para refrigeração e aquecimento instalados em Atenas, Grécia. Três sistemas foram estudados: (i) solar térmico com *boiler* auxiliar, (ii) convencional (ligado à rede elétrica) e (iii) convencional com sistema fotovoltaico off-grid. Os resultados mostraram que os maiores valores de emissões durante a operação foram encontrados no sistema (ii) (em função do alto consumo relativo de eletricidade), seguido pelo sistema (i) (devido ao consumo de gás natural no *boiler* de apoio) e por último o sistema (iii) (no qual as emissões durante operação foram proporcionalmente menores que nos outros dois sistemas).

Apesar de haver estudos similares em termos de metodologia e natureza dos sistemas estudados, não há estudos publicados em base de dados internacionais considerando a matriz energética e condições climáticas do Brasil. Soma-se a isso a necessidade estudos detalhados que possibilitem a comparação de metodologias e resultados, e que agreguem novos dados relativos aos impactos ambientais para sustentar as tomadas de decisões.

PROBLEMA DE PESQUISA E OBJETIVO

Dado o cenário atual de utilização crescente da climatização de ambientes, é imprescindível o desenvolvimento de mais avaliações quantitativas e qualitativas dos impactos ambientais de projetos nesse setor. O objetivo deste artigo é aplicar a metodologia da ACV para quantificar as emissões de carbono associadas a um sistema de refrigeração por absorção com uso de energia solar, cuja proposta de instalação se situa na Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, em Natal-RN.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O ciclo de refrigeração é um ciclo termodinâmico que modela o funcionamento das máquinas frigoríficas (Althouse et al., 2004). Os dois principais ciclos de refrigeração são o ciclo de compressão de vapor (também chamado de convencional), e o ciclo de absorção de vapor.

Para fins de climatização, os sistemas de refrigeração por absorção têm mostrado cada vez maior aplicabilidade. Estes apresentam duas diferenças principais em relação aos sistemas convencionais por compressão de vapor. A primeira é a recirculação do refrigerante, promovida pela entrada de calor de uma fonte de baixa temperatura, que utiliza trabalho mecânico em quantidades relativamente baixas. Isso se deve ao uso de bombas ao invés de compressores. A segunda é o uso de um fluido auxiliar (absorvente), recirculado entre um absorvedor e um gerador para transportar o refrigerante (absorvato) em forma de solução líquida (SHIRAZI *et al.*, 2018).

Para que se alcance a viabilidade técnica e econômica do par absorvente-absorvato, os dois fluidos devem, portanto, apresentar grande diferença entre pontos de ebulição, ser miscíveis, quimicamente estáveis, não corrosivos e de baixo custo (SHIRAZI *et al.*, 2018). Embora existam diversos pares possíveis de substâncias, aqueles mais utilizados são água-amônia (H_2O-NH_3) e brometo de lítio-água ($LiBr-H_2O$).

Os sistemas de refrigeração têm mostrado potencial para aplicação conjunta às fontes renováveis (SHIRAZI *et al.*, 2018). De acordo com Schmid *et al.* (2019), algumas vantagens da energia solar para climatização incluem o desenvolvimento acelerado experimentado por essa

tecnologia, concomitância entre crescimento da demanda de frio em ambientes interiores e a disponibilidade de energia solar, além da não recorrência direta às fontes fósseis como energia primária.

Tais sistemas podem ser enquadrados em duas categorias: eletricamente acionado (com uso de módulos fotovoltaicos acoplados a um *chiller* por compressão de vapor) termicamente acionados (com uso de coletores solares acoplados ao gerador) (WANG & GE, 2016). O primeiro tipo é relativamente simples e aplicável em pequena escala (ZEYGHAMI *et al.*, 2015). O segundo, por sua vez, pode ser ainda subdividido em ciclos por absorção, adsorção, dessecante e ejetor. Os sistemas termicamente acionados por absorção têm mostrado maior confiabilidade e competitividade em relação aos equipamentos convencionais de ar-condicionado.

MATERIAIS E MÉTODOS

A climatização da Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte é o primeiro passo deste estudo. Para o dimensionamento do sistema de climatização por absorção considerou-se a carga térmica projetada de 1.735 kW já empregada no sistema convencional instalado nos quatro pavimentos do prédio desde 2010 (Garcia, 2018).

O sistema proposto inclui três máquinas de refrigeração por absorção com potência frigorífica de 615 kW da marca Thermax, modelo 5G3AC (THERMAX, 2017). Para o dimensionamento do sistema de coletores solares, utilizou-se uma metodologia baseada em Duffie & Beckman (2014), porém mais detalhada e realista.

Considerando os dados climatológicos de Natal (CLIMATE-DATE ORG, 2020; CRESESB, 2020) e a metodologia descrita por Barbosa e Carvalho (2019) o sistema térmico de energia solar contém 2040 Coletores S-81 Solar Tech e 9 tanques de armazenamento de 400 m³ da Eurotank. O abastecimento de água quente possui saída mínima à 90°C, retorno à 85°C e vazão de 132,89 m³/h. O sistema de climatização possui três arranjos iguais ao esquematizado na Figure 1.

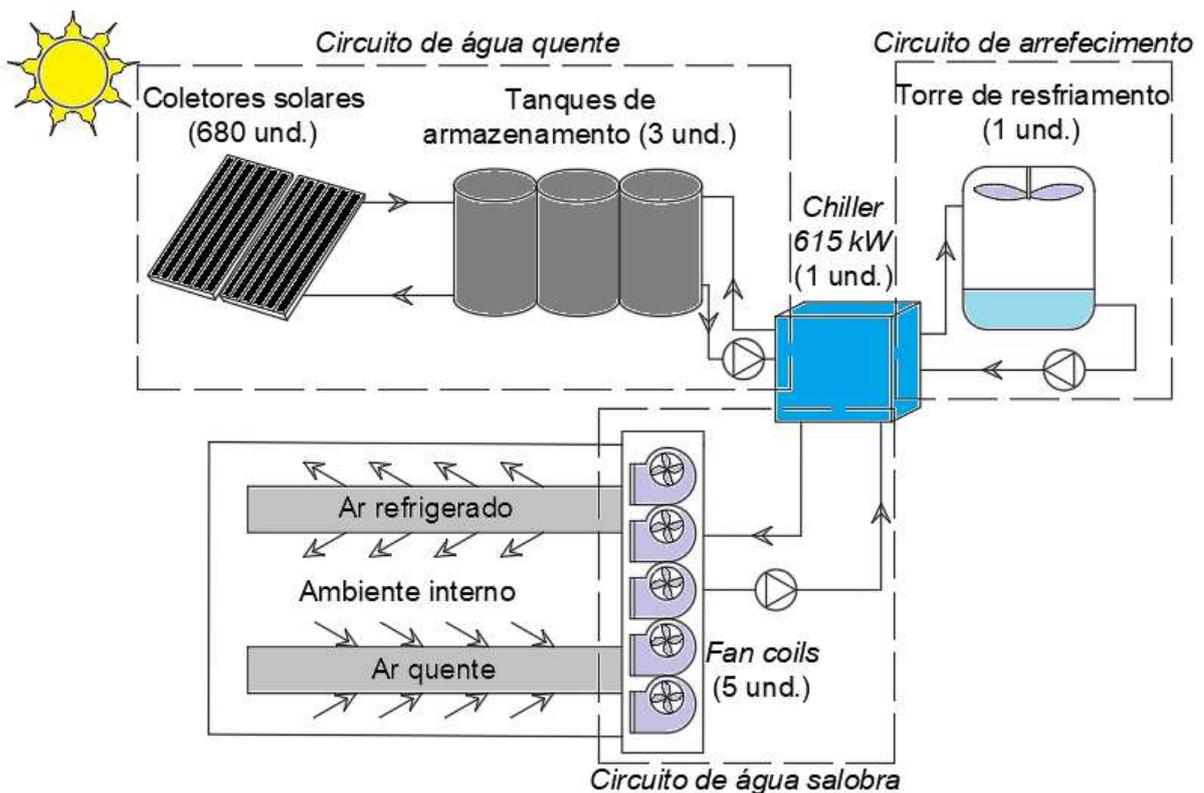


Figura 1. Esquema de um arranjo do sistema solar de climatização por absorção.

Para o circuito de água arrefecida utilizou-se a torre de resfriamento de modelo TRA 100 da marca Caravela (CARAVELA®, 2020), que tem como temperaturas de entrada 36,6°C e de saída 30°C. As tubulações hidráulicas desse circuito são de PVC e aço galvanizado com cerca de 25 m cada e sem isolamento. Para os circuitos de água salobra e água quente, considerou-se 145 m de tubulação hidráulica de aço galvanizado, com isolamento de lã de vidro revestido de fina película de alumínio.

O sistema de absorção comporta quinze fan-coils da marca Premium Ar-Condicionado e modelo ICP 40TR (PREMIUM, 2020), cuja temperatura de sucção é 7°C e a de recalque 12°C. Os dutos de ar são de aço galvanizado, com isolamento de lã de vidro revestido com fina película de alumínio. Os dutos de retorno não possuem isolamento.

A unidade funcional foi determinada como a capacidade térmica total do sistema de 1.735 kW. As fronteiras do processo em análise vão do berço ao túmulo, ou seja, incluem a extração da matéria prima, transportes, manufatura, operação, até o descarte. Considerou-se um deslocamento de 3000 km para todos os equipamentos e dispositivos (origem: São Paulo). Durante a vida útil do sistema, de 30 anos, realizam-se manutenções semestrais, que foram contabilizadas. Foi considerada apenas a manutenção preventiva, ou seja, controle dos parâmetros e lavagem do sistema. Não foram contabilizadas manutenções corretivas nem troca de peças. Após o final de sua vida útil, o destino do sistema será o aterro municipal, de forma que se contabilizou o transporte até o aterro sanitário da cidade de Natal e as operações lá realizadas.

Para o desenvolvimento da ACV utilizou-se o software SimaPro v.9.1.0.8 (SIMAPRO, 2020), a base de dados *Ecoinvent* 3.6 (2019) e o método IPCC 2013 GWP 100a (*Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC*, 2013). O método IPCC 2013 GWP 100a engloba apenas o potencial de aquecimento global como categoria de impacto, sendo essa uma limitação deste estudo. Nesse método, os cálculos se dão de modo que, ao longo de 100 anos, as sequelas cumulativas dos gases de efeito estufa são contabilizadas e expressas em kg CO₂-eq (quilogramas de CO₂ equivalente) (IPCC, 2013).

Nas Tabelas 1 e 2 consta a descrição dos principais materiais que compõem cada coletor solar e cada reservatório térmico utilizados no sistema proposto.

Tabela 1. Principais materiais que compõem o coletor solar plano S-81 da Solar Tech (2019).

Componente	Material	Quantidade
Cobertura de vidro	Vidro (m ³)	5,16x10 ⁻³
Placa Absorvedora	Alumínio + Tinta absorvedora (kg)	3,85
Caixa de Contenção	Alumínio Extrudado (kg)	3,60
Arranjo de Tubos	Cobre Puro (kg)	2,18
Vedação	Silicone (kg)	0,10
Solda	Foscooper (kg)	0,02
Isolante Térmico	Lã de Rocha (kg)	1,10

Tabela 2. Principais materiais que compõem o reservatório de 400m³ (adaptado de AWWA, 2013 e Eurotank works, 2020).

Componente	Isolante Térmico	Revestimento Externo e pés	Revestimento Interno	Conexões
Material	Poliestireno Expandido	Chapa de Alumínio	Aço Inox 304	Aço Inox 304
kg	911,61	1200	16800	148

Para as máquinas de refrigeração por absorção, a metodologia descrita por Carvalho, Delgado e Chacartegui (2016) foi seguida, com base nos dados do fabricante para o modelo 5G 3A C de 175 TR (THERMAX, 2020) e a composição de seu material está listada na tabela 3.

Tabela 3. Principais materiais que compõem a máquina de refrigeração por absorção de duplo efeito (modelo 5G 3A C, THERMAX, 2020).

Material	Aço inox	Aço baixa liga	Alumínio	Cobre	PVC	Glycol	Eletrônicos	Lã de rocha	Isolamento
kg	1460	1460	2560	2930	244	915	59	427	427

Para a instalação do sistema, foram contabilizados os materiais de válvulas, filtros, instrumentos de medida, bombas e motores, tubulações hidráulicas, isolamentos, torres de refrigeração, fan-coils e dutos. A Tabela 4 mostra os materiais que constituem a instalação do sistema.

Tabela 4. Principais materiais que compõem a instalação do sistema de climatização.

Material	Quantidade (kg)
Ferro fundido	10.027,98
Aço Inox	2.988,30
Aço	84.053,06
Poliéster	7.872,00
Poliestireno	60,00
Polipropileno	185,52
PVC	1.519,92
Poliamida (nylon)	12,00
Fibra de vidro	240,00
Alumínio	2.604,32
Borracha sintética	72,00
Cobre	3.576,00
Latão	120,00
Lã de vidro	7.584,77

Para contabilizar o consumo de eletricidade do sistema de climatização em análise (principalmente associado às bombas – 2,55 kW), considerou-se a seguinte composição da matriz elétrica nacional: 66,67% hidroelétrica, 9,28% gás natural, 9,15% eólica, 8,25% biomassa (bagaço de cana-de-açúcar), 2,79% nuclear, 1,62% carvão, 1,55% óleo, e 0,69% solar (ONS, 2020). Essas informações foram necessárias para estimar as emissões de gases de efeito estufa associadas ao consumo de 1 kWh de energia da matriz elétrica do Brasil no ano de 2019, de acordo com a metodologia empregada por Carvalho e Delgado (2017).

As emissões totais associadas ao sistema de climatização são constituídas de uma parte fixa, devida aos equipamentos, e uma parte variável, devida ao consumo de eletricidade. As emissões fixas são obtidas contabilizando-se os equipamentos (composição material, transporte, manutenção, descarte) e dividindo-se por sua vida útil (30 anos). As emissões variáveis são obtidas a partir do consumo anual de eletricidade necessário para o funcionamento do sistema. O valor total das emissões é dado em kg CO₂-eq/ano.

Devido à impossibilidade de medição de dados *in situ* para estabelecimento das demandas de eletricidade aplicou-se o método dos graus-dia (ERBS e KLEIN *et al.*, 1983, SHIN e DO, 2016, D'AMICO *et al.*, 2019). Foram considerados dados climáticos para a cidade de Natal (CLIMATICUS, 2011) com uma temperatura de conforto de 22°C e dados sobre a ocupação do edifício (ECT - Escola de Ciências e Tecnologia, 2019). Essa abordagem fornece resultados aceitáveis para as demandas de refrigeração e tem sido usada em estudos de otimização (CARVALHO *et al.*, 2019, DELGADO *et al.*, 2018). A Figura 2 mostra o perfil de demanda do sistema de climatização.

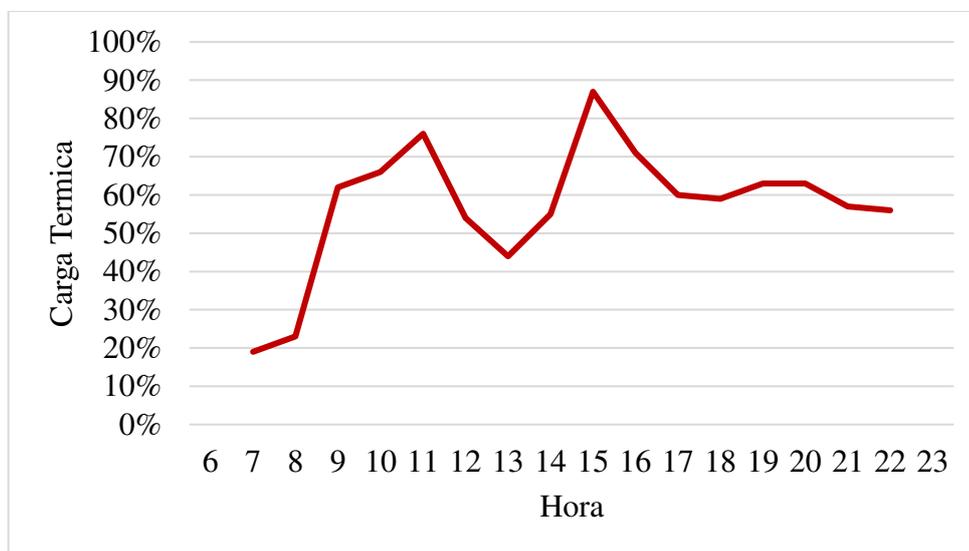


Figura 2. Gráfico do perfil de demanda do sistema de climatização da Escola de Ciências e Tecnologia.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após construção do inventário de fluxos de matéria e energia, selecionou-se o método de avaliação de impacto ambiental IPCC 2013 GWP 100a, cujo resultado está mostrado na Tabela 5.

Considerando o mix elétrico de 2019, e seguindo a metodologia de Carvalho e Delgado (2017), obteve-se 0,227 kg CO₂-eq emitidos por kWh consumido da rede elétrica em baixa tensão. A partir da demanda diária (Figura 2), o consumo elétrico diário foi estimado em 70 kWh. Considerando 200 dias de operação, a demanda anual é de 14 MWh. As emissões operacionais também estão mostradas na Tabela 5.

Tabela 5. Emissões de gases de efeitos estufa associadas ao sistema de climatização por absorção da Escola de Ciências e Tecnologia.

ITEM	QUANT.	EMISSÕES (kg CO ₂ -eq)			
		MATERIAIS	TRANSPORTE	MANUT.	DESCARTE
Coletor	2040	279.705,55	33.599,13	1.314,35	30.318,61

Tanque	9	603.367,55	115.784,89	107.006,84	
Chiller	3	235.116,16	18.484,96	17.083,55	TOTAL
Instalação	1	314.655,63	83.852,80	75.665,65	1.915.955,67
Emissões fixas (kg CO ₂ -eq/ano)					63.865,19
Emissões variáveis (kg CO ₂ -eq/ano)					3.178,00
Emissões totais (kg CO ₂ -eq/ano)					67.043,19

Na Figura 3, destaca-se a cota de 41 % das emissões totais associada aos tanques, visto que se trata de 9 unidades desse equipamento (ver tabela 5) formadas por 85,5% (em massa) de metais. A quantidade de massa contida na instalação fica aquém apenas daquela dos tanques e correspondem, por sua vez, a quase 24% das emissões totais.

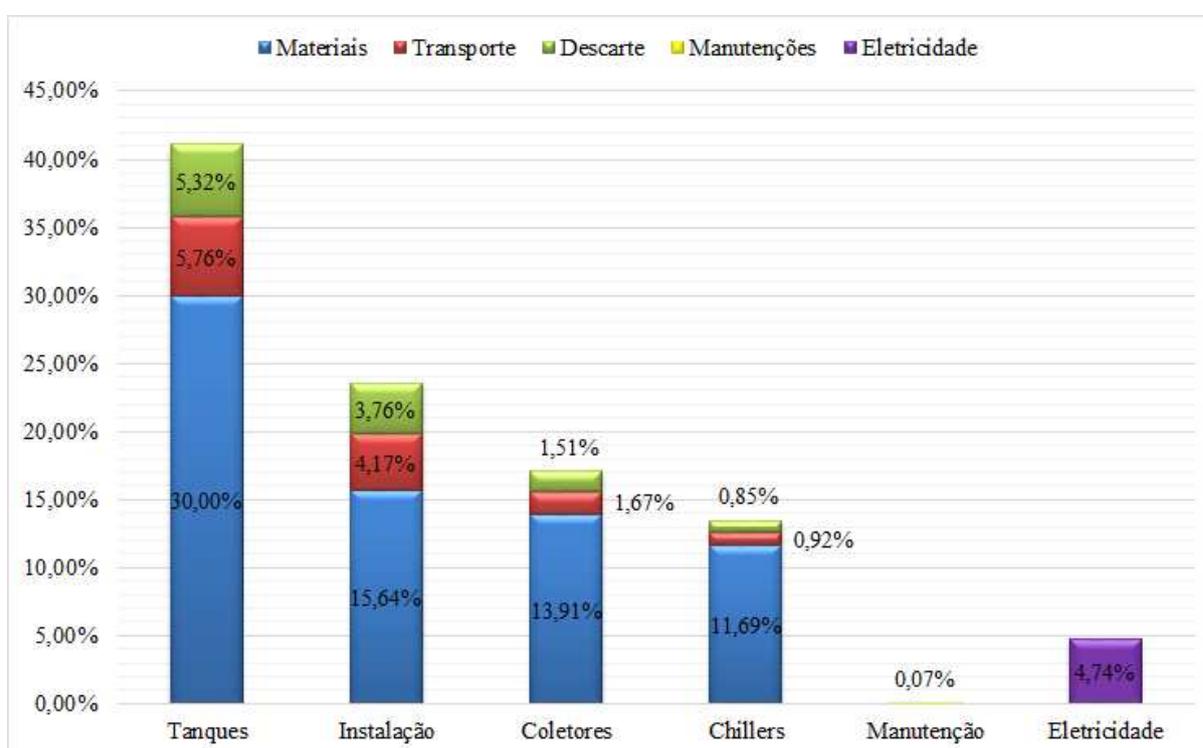


Figura 3. Gráfico da contribuição em percentual das emissões de poluentes das partes do sistema de climatização por absorção da Escola de Ciências e Tecnologia.

Apesar de os *chillers* integrarem mais peso ao sistema que os coletores, estes últimos geram mais emissões. Uma explicação é o fato de os coletores serem compostos por seis vezes mais alumínio que os *chillers*, elemento de maior impacto ambiental em ambos os equipamentos. Além disso, os coletores contribuem com quase o dobro de emissões referentes ao transporte e ao descarte quando comparados com os *chillers*.

O valor obtido para as manutenções preventivas foi de 1.314,35 kg CO₂-eq. Esse resultado corresponde a apenas 0,07% das emissões totais. Na prática, pode ser necessária a realização de manutenções corretivas não planejadas, além da necessidade de peças de reposição. Conjuntamente, os dois fatores elevariam o montante de emissões nessa categoria.

As emissões totais obtidas para o sistema foram de 2.011.295,67 kg CO₂-eq (ao longo de 30 anos), ou 67.043,19 kg CO₂-eq/ano. O item “Materiais”, referente à aquisição de matérias-primas e processos de fabricação é o maior contribuinte (71,24%). Em seguida,

encontram-se o transporte (12,52%), descarte (11,44%), consumo de eletricidade (4,74%) e manutenção (0,07%).

É notório que as emissões anuais relacionadas ao consumo de energia elétrica representam fração muito pequena do resultado global da avaliação. Com efeito, a substituição do conjunto compressor pela tecnologia de absorção solar foi capaz de poupar um considerável montante de kWh necessário anualmente. Nos estudos de Beccali *et al.* (2016) e Longo *et al.* (2020), por outro lado, as parcelas de emissões relativas à etapa de operação dos sistemas foram relativamente altas em função do consumo extra de combustível nos *boilers* auxiliares, equipamento que não foi utilizado neste estudo.

A partir dos resultados de Beccali *et al.* (2016), é possível verificar grandes variações entre os resultados de emissão de carbono em locais diferentes. Nesse sentido, é possível inferir que há grande sensibilidade dos resultados de emissões em função do clima, devido à necessidade ou não de combustíveis fósseis auxiliares. Tal resultado pode ser confirmado em estudos futuros de ACV em instalações similares nas regiões sudeste e sul do Brasil.

A Metodologia ACV é capaz de nortear diversas decisões acerca do sistema em estudo. O detalhamento mais profundo dos materiais pode, em estudos posteriores, possibilitar a otimização do projeto, através da escolha de equipamentos que comprovadamente apresentem menores níveis de emissões, ou mesmo rearranjo dos equipamentos existentes. É possível, ainda, reavaliar as operações logísticas no transporte e descarte dos equipamentos. Futuramente, assumindo-se que esses sistemas amadureçam a sua presença no mercado, a ACV fornece a oportunidade de fortalecimento de marketing, através do uso de etiquetas ecológicas. Nesse sentido, o destaque para produtos de baixo impacto ambiental pode ser feito não apenas com base nas emissões de carbono, mas também outros índices como exigência global de energia (GER) potencial de ecotoxicidade (EP) e potencial de poluição (EP).

CONCLUSÕES

Neste trabalho, a Avaliação de Ciclo de Vida foi aplicada em um sistema de refrigeração por absorção solar com *chillers* de duplo efeito, instalado na Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. O método empregado foi o IPCC GWP 100a, que quantificou, através de simulação no SimaPro, a emissão de carbono equivalente ao longo dos 30 anos de funcionamento com abordagem do berço ao túmulo.

As emissões totais (fixas + variáveis) obtidas foram de 2.011.295,67 kg CO₂-eq, ou 67.043,19 kg CO₂-eq/ano. A maior parcela de emissões foi observada no item “materiais” (obtenção de matéria-prima e fabricação), que corresponde a 71,24%, seguida do transporte (12,52%), descarte (11,44%), consumo de eletricidade (4,74%) e manutenção (0,07%).

Uma vez que a metodologia da ACV está em processo de desenvolvimento de padronização, ainda não existem trabalhos que adotem escopos e objetivos compatíveis a comparações. Entretanto, foi possível verificar a contribuição significativa dos equipamentos com relação às emissões, bem como o volume de poluentes associado ao alumínio dos coletores, que na instalação proposta, aparecem em grande número.

Trabalhos futuros podem inserir modelagens de *boilers* como equipamentos de suporte para momentos de alta demanda de calor nos geradores de alta e baixa pressão internos aos *chillers*. Outras categorias de impacto ambiental podem ser computadas e avaliadas. Por fim, uma avaliação econômica é necessária para promover maiores otimizações e nortear decisões.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de mestrado.

REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014b, “NBR 14044: Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Requisitos e orientações (Versão corrigida)”, Rio de Janeiro.
- ALTHOUSE, A. D., TURNQUIST, C. H., et al., 2004, “Modern refrigeration and air conditioning”, Goodheart-Willcox.
- AWWA - American Water Works Association, 2013, Manual of Water Supply Practices, M42. Steel Water-Storage Tanks. Denver, EUA: AWWA.
- BARBOSA, R. R., CARVALHO, M., 2019, “A step by step design guide for a solar water heating system considering thermal losses”, Engenharia Térmica, v. 18, p. 26.
- BECCALI, M. et al., 2012, “LCA of a solar heating and cooling system equipped with a small water–ammonia absorption chiller”, Solar Energy, v. 86, n. 5, p. 1491-1503.
- BECCALI, M. et al., 2016, Solar heating and cooling systems versus conventional systems assisted by photovoltaic: Application of a simplified LCA tool, “Solar Energy Materials and Solar Cells”, v. 156, p. 92-100.
- CARAVELA®, 2020, “Torres de resfriamento de água”, Thermotank Group, Santa de Parnaíba-SP, 09 jul. 2020. Disponível em: <https://www.torre-caravela.com.br/torre-de-resfriamento-de-agua-modelo-wt>, Acesso em: 28 ago. 2020.
- CARVALHO, B. C. T., et al., 2019, Multicriteria optimization of renewable-based polygeneration system for tertiary sector buildings. “Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)”, v. 18, n. 11.
- CARVALHO, M.; DELGADO, D. B. M.; CHACARTEGUI, R., 2016, “Life cycle analysis as a decision criterion for the implementation of solar photovoltaic panels in Northeast Brazil hospital”l. In: energy, transportation and global warming. Springer, Cham, p. 295-310.
- CARVALHO, M.; DELGADO, D., 2017, Potential of photovoltaic solar energy to reduce the carbon footprint of the Brazilian electricity matrix, “LALCA: Revista Latino-Americana em Avaliação do Ciclo de Vida”, v. 1, n. 1, p. 64-85.
- CLIMATE-DATA.ORG., Clima Natal (Brasil), Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/rio-grande-do-norte/natal-2030/>>. Acesso em 14 ago. 2020.
- CLIMATICUS 4.2., 2011, “Climatic database: Project strategies for 58 Brazilian cities”. INMET1961–1990 database. Beta version. Faculty of Architecture and Urbanization, University of São Paulo, Technology department, Laboratory of environmental comfort and energy efficiency. Disponível em http://www.fau.usp.br/arquivos/cpq/labs/labaut/conforto/Climaticus_2011%28beta%29.xlsm, Acesso em 25 junho 2020.
- CRESESB: Centro de Referência para a Energia Solar e Eólica Sérgio Brito, “Potencial Energético: Potencial Solar – SunData”, Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>>, Acesso em: 14 ago. 2020.
- D'AMICO, A., et al., 2019, “Building energy demand assessment through heating degree days: The importance of a climatic dataset”. Applied Energy, v. 242, p. 1285-1306.
- DE PAULA, C. H. et al., Optimal design and environmental, energy and exergy analysis of a vapor compression refrigeration system using R290, R1234yf, and R744 as alternatives to replace R134a. “International Journal of Refrigeration”, v. 113, p. 10-20, 2020.
- DELGADO, D., et al., 2018, “Photovoltaic solar energy in the economic optimisation of energy supply and conversion”. IET Renewable Power Generation, v. 12, n. 11, p. 1263-1268.
- DUFFIE, J. A., BECKMAN, W. A., 2014, “Solar Engineering of Thermal Processes”, Wiley.
- ECOINVENT, 2019, “The ecoinvent database 3.6.”, Disponível em: <<http://www.ecoinvent.org/>>, Acesso em 21 ago. 2020.

- ECT - Escola de Ciências e Tecnologia, 2019, “Agenda: Eventos semanais”, In: Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Disponível em: <https://agenda.ect.ufrn.br/horariosPesquisar>, Acesso em: 30 jun. 2020.
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética, 2020, “Balanço Energético Nacional 2020”, Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2020>. Acesso em: 17 de agosto de 2020.
- ERBS, D. G., KLEIN, S. A., BECKMAN, W. A., 1983, “Estimation of degree-days and ambient temperature bin data from monthly-average temperatures”, *ASHARE J.*, 25, (6), pp. 60–65.
- EUROTANK WORKS, 2020, “Vertical steel tank”, vol.400 CBM (AST-400). Disponível em: <https://eurotankworks.com/storage-tanks/vertical-storage-tanks/vertical-tank-vol-400/> Acesso em 04 ago. 2020.
- GARCIA, L.C., 2018, “Plano de Manutenção, Operação e Controle – PMOC – aplicado à ECT da UFRN”, Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia) - Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Disponível em: <<https://monografias.ufrn.br/jspui/handle/123456789/6854>>, Acesso em: 12 jul. 2019.
- IEA - International Energy Agency, 2018. Energy Efficiency 2018: “Analysis and outlooks to 2040”. International Energy Agency, 2020. Disponível em: <https://webstore.iea.org/download/direct/2369>. Acesso em: 20 de agosto de 2020.
- IEA - International Energy Agency, 2020. Global Energy Review 2020: “The impacts of the Covid-19 crisis on global energy demand and CO2 emissions”. International Energy Agency, 2020. Disponível em: https://webstore.iea.org/download/direct/2995?fileName=Global_Energy_Review_2020.pdf. Acesso em: 13 de agosto de 2020.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013, “Revised supplementary methods and good practice guidance arising from the Kyoto protocol”, Disponível em: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/kpsg/>, Acesso em: 21 ago. 2020.
- ISO - International Standard Organization 14040, 2006, “Environmental management – life cycle assessment – principles and framework”, Genebra, Suíça.
- ISO - International Standard Organization 14044, 2006, “Environmental management – life cycle assessment – requirements and guidelines”, Genebra, Suíça.
- KLUPPEL, R. P., 2016, “Curso de Conversão Térmica da Energia Solar”. João Pessoa: CEAR/UFPB.
- LONGO, S. et al. Energy and environmental life cycle impacts of solar-assisted systems: The application of the tool ELISA. “Renewable Energy”, v. 145, p. 29-40, 2020.
- PREMIUM, 2020, “Fan Coil, Catálogo Técnico”, Premium Ar Condicionado, Disponível em: <https://www.premiumarcondicionado.com.br/fan-coil/>, Acesso em: 31 ago. 2020.
- SALA, S., REALE, F., et al., 2016, “Life cycle assessment for the impact assessment of policies”, European Commission: Ispra, Italy.
- SCHMID, F.; BIERLING, B.; SPINDLER, K., 2019, Development of a solar-driven diffusion absorption chiller, “Solar Energy”, v. 177, p. 483-493.
- SHIN, M., DO, S. L., 2016, “Prediction of cooling energy use in buildings using an enthalpy-based cooling degree days method in a hot and humid climate. *Energy and Buildings*, v. 110, p. 57-70.
- SHIRAZI, A. et al., 2018, Solar-powered absorption chillers: A comprehensive and critical review, “Energy Conversion and Management”, v. 171, p. 59-81.
- SIMAPRO, 2019, “Software SimaPro v.9.”, Disponível em: <www.simapro.nl>, Acesso em 21 ago. 2020.
- SOLANO-OLIVARES, K. *et al.*, 2019, Life cycle assessment of a solar absorption air-conditioning system, “Journal of Cleaner Production”, Vol. 240, pp. 118-206.

- THERMAX, 2017, Hot water vapour Absorption Chiller 15TR to 1525TR (50kW to 5350kW), “Cooling and Heating Division”, 5G/01, US. Disponível em: <http://www.thermax-usa.com/pdf/Hot-Water-driven-absorption-Chillers/Hot-Water-driven-absorption-Chillers.pdf>. Acesso em: 20 de ago. de 2020.
- WANG, R.; GE, T. (Ed.), “Advances in solar heating and cooling”, Woodhead Publishing, 2016.
- ZEYGHAMI, M.; GOSWAMI, D. Y.; STEFANAKOS, E., A review of solar thermo-mechanical refrigeration and cooling methods, “Renewable and Sustainable Energy Reviews”, v. 51, p. 1428-1445, 2015.