

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIAS AMBIENTAIS
(PPGECIA)

ARTHUR ESTEVES DA COSTA MOTHÉ BARRETO

**AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE DE TECNOLOGIAS DE CAPTURA DE
CO₂ ATRAVÉS DA MCDA.**

São Cristóvão (SE)

2023

ARTHUR ESTEVES DA COSTA MOTHÉ BARRETO

**AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE DE TECNOLOGIAS DE CAPTURA DE
CO₂ ATRAVÉS DA MCDA.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Ambientais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciências Ambientais.

Orientadora: Prof. Dra. Inaura Carolina Carneiro Rocha

Coorientador: Prof. Dr. José Jailton Marques

São Cristóvão (SE)

2023

ARTHUR ESTEVES DA COSTA MOTHÉ BARRETO

**AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE DE TECNOLOGIAS DE CAPTURA DE
CO₂ ATRAVÉS DA MCDA.**

Dissertação de Mestrado aprovada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Ambientais da Universidade Federal de Sergipe em 28 de fevereiro de 2023

BANCA EXAMINADORA:

Profa. Dra. Inaura Carolina Carneiro da Rocha
(PPGECIA/UFS)

Prof. Dr. José Jailton Marques.
(PPGECIA/UFS)

Prof. Dr. Joel Alonso Palomino Romero Interno do PPGECIA
(PPGECIA/UFS)

Prof. Dr. Denisson Santos
(ITP/UNIT)

Dedico este trabalho à minha família, que sempre apoiou os meus estudos.

"A gente só existe porque a Terra deixa a gente viver. Ela dá vida para a gente. Não tem outra coisa que dá vida. É por isso que a gente chama ela de Mãe Terra" (Ailton Krenak).

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter abençoado minha jornada com saúde. Sou grato pela vida de meus familiares, pais, avós, irmã, sobrinhas, tias e tios. Dedico a vocês este trabalho, em retorno ao apoio que sempre recebi. À minha mãe Márcia Esteves e ao meu pai Ralph Mothé que nunca mediram esforços para me proporcionar a oportunidade de estudar. À minha guerreira-irmã Letícia Mothé, que sempre serviu de exemplo de dedicação, que junto ao meu cunhado Éden, me permitiram ser tio de minhas queridas princesas Sophia e Alice. Tenho muita alegria de conviver com minha segunda mãe e tia Gilda Esteves e, em especial, a meus avós Raymunda Esteves e José Ferreira da Costa, que, por muita sorte divina, ainda me iluminam com vida e poderei comemorar pessoalmente mais uma conquista com todos eles. Aos meus familiares de Aracaju e do Rio de Janeiro, meu querido Vovô Goiaba e, em homenagem especial, a Vovó Nilda- meu anjo que nos protege lá do céu, agradeço por todo carinho nos poucos momentos que passamos juntos. Obrigado pelos ensinamentos e momentos felizes.

À minha esposa Letícia Santana, parceira da vida, alegrias e desafios, agradeço pela escuta e risadas em todos esses cinco anos que estivemos juntos. Também sou grato pela minha segunda família, minha sogrinha Luciana Santana, meu sogro Messias, Lavínia, princesinha Maria e Felype que me receberam de braços abertos em Tobias Barreto.

Aos amigos feitos ao longo desta jornada, da escola à universidade, dos esportes, do jiu-jitsu e das viagens, não poderia deixar de agradecer-los por alegrarem e facilitarem este processo. Em especial à Deisi, Luquinhas, Papel, Felipão, Klivan, Jamily e cia, que estiveram sempre presentes.

Aos meus mestres, professores e colegas da Engenharia Ambiental e Sanitária, curso em que sou grato pela formação. Especialmente à minha amiga e orientadora, Dra. Inaura Carolina, que me guia desde os projetos de pesquisa em 2016, obrigado por todos os puxões de orelha e formação profissional. Não poderia deixar de agradecer à enciclopédia viva e co-orientador, Dr. José Jailton Marques, detentor de um conhecimento e solidariedade enormes, obrigado pelos ensinamentos.

À toda equipe da empresa DeCARB, em especial ao Flávio Pietrobon e a Alana Vieira, que acreditaram no meu trabalho, facilitaram a pesquisa e disponibilizaram um banco de dados primordial de um tema de difícil acesso à informação.

Sobretudo, aos institutos de pesquisa e apoiadores financeiros CAPES e CINTTEC que viabilizaram e permitiram minha dedicação exclusiva ao mestrado. Em momentos de desvalorização da ciência e educação no país, tê-los como parceiros, foi fundamental para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

É de conhecimento que a concentração de CO₂ na atmosfera registrava valores de 280 ppm antes da Revolução Industrial (1860), que hoje está em torno de 400 ppm e que como consequência disto, o aquecimento global e as mudanças climáticas estão acontecendo com celeridade. Para conter este desequilíbrio, as tecnologias de *Carbon Capture and Storage* (CCS) e *Carbon Capture Utilization for Sequestration* (CCUS) têm sido fundamentais, porém, como qualquer processo, estão sujeitas à geração de impactos diversos. Assim, o objetivo deste trabalho contempla avaliar a sustentabilidade das tecnologias de captura de carbono empregando a metodologia MCDA e indicadores de sustentabilidade, como auxílio à tomada de decisão, bem como a proposição de melhorias à tecnologia SiCSeGE desenvolvida pela *startup* DeCARB. Definiu-se como tecnologias comparativas de interesse as já estabelecidas no mercado internacional, pertencentes à Carbon Clean e Carbon Engineering. A metodologia empregada para a avaliação da sustentabilidade foi desenvolvida a partir da adaptação de uma abordagem MCDA, utilizando os *softwares* Excel e RISK Simulator, que permite a avaliação simultânea de critérios ambientais, sociais, econômicos e de engenharia. Assim, após validação metodológica e utilizando-se de informações oficiais das empresas envolvidas acerca dos indicadores e métricas estabelecidos, a tecnologia da “DeCARB” resultou em maior índice de sustentabilidade, especificamente com melhor média nos critérios *GWP*, percepção pública, custo de captura e potencial de armazenamento. Por outro lado, os critérios de menor desempenho do projeto DeCARB oportunizaram uma reflexão acerca de possíveis melhorias para fins de crescimento competitivo dessa *startup*.

PALAVRAS-CHAVE: aquecimento global; sustentabilidade; análise de decisão multicritério; captura de carbono; CCS.

ABSTRACT

It is known that the concentration of CO₂ in the atmosphere recorded values of 280 ppm before the Industrial Revolution (1860), which today is around 400 ppm and that as a consequence of this, global warming and climate change are happening quickly then ever. To contain this imbalance, Carbon Capture and Storage (CCS) and Carbon Capture Utilization for Sequestration (CCUS) have been fundamental technologies, however, like any process, they can generate different impacts. Thus, the objective of this work is to evaluate the sustainability of carbon capture technologies using the MCDA methodology and sustainability indicators, as an aid to decision making, as well as the proposition of improvements to the SiCSeGE technology developed by the startup DeCARB. Comparative technologies of interest were defined as those already established in the international market, belonging to Carbon Clean and Carbon Engineering. The methodology used for the sustainability assessment was developed from the adaptation of an MCDA approach, using Excel and RISK Simulator software, which allows the simultaneous assessment of environmental, social, economic and engineering criteria. Thus, after methodological validation and using official information from the companies involved about the established indicators and metrics, the "DeCARB" technology resulted in a higher sustainability index, specifically with a better average in the GWP criteria, public perception, cost of capture and storage potential. On the other hand, the lowest performance criteria of the DeCARB project provided a reflection on possible improvements for the competitive growth of this startup.

KEYWORDS: global warming; sustainability; multicriteria decision analysis; carbon capture; CCS

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1- Parâmetros dos projetos A e B..... | 47 |
| Tabela 2- Base de dados do projeto A..... | 48 |
| Tabela 3- Base de dados do Projeto B..... | 48 |
| Tabela 4- Pontuação Z para definir o tamanho da amostra..... | 61 |
| Tabela 5- Critérios selecionados para o presente estudo..... | 62 |
| Tabela 6- Dados primários para as tecnologias de CCS..... | 64 |
| Tabela 7- Dados analisados de todos os indicadores das tecnologias de CCS..... | 65 |
| Tabela 8- Síntese de melhorias e oportunidades para a tecnologia SiCSeGE e (DeCARB)..... | 87 |
| Tabela 9- Dados primários e secundários da MCDA..... | 99 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1- Mapa global dos projetos CCS | 22 |
| Figura 2- Os três processos de captura de CO ₂ | 23 |
| Figura 3- Principais reações na reforma do metano | 25 |
| Figura 4- Modelo da tecnologia SiCSeGE da DeCARB..... | 28 |
| Figura 5- Escala de Nível de Maturidade Tecnológica TRL..... | 29 |
| Figura 6- Mapa de localização do projeto da Carbon Clean | 30 |
| Figura 7- Modelo da tecnologia CDRMAX da CarbonClean..... | 31 |
| Figura 8- Modelo da tecnologia DAC da Carbon Engineering | 33 |
| Figura 9- Processo detalhado do DAC e as principais operações unitárias | 34 |
| Figura 10- Processo detalhado do armazenamento geológico independente (<i>SES</i>) | 34 |
| Figura 11- Processo detalhado da Recuperação de Óleo Aprimorada (EOR)..... | 35 |
| Figura 12- Pirâmide da informação ambiental | 36 |
| Figura 13- Barômetro da sustentabilidade..... | 37 |
| Figura 14- Interligação de indicadores..... | 38 |
| Figura 15- Árvore de decisão para modelagem ambiental..... | 40 |
| Figura 16- Análise Multicritérios para seleção de melhor rota | 41 |
| Figura 17- Estágios e etapas do MCDA para CCS | 49 |
| Figura 18- Hierarquia dos principais objetivos e subobjetivos para o estágio 1 | 50 |
| Figura 19- Resultados obtidos com a MCDA, para fins comparativos entre os projetos A e B, conforme estágio 2 | 51 |
| Figura 20- Ilustração do resultado obtido com a MCDA aplicada aos projetos A e B | 52 |
| Figura 21- Etapas da metodologia MCDA..... | 54 |
| Figura 22- Dados para validação do Projeto A (Alberta)..... | 57 |
| Figura 23- Dados para validação do Projeto B (Saskatchewan) | 57 |
| Figura 24- Tela de resultados da simulação do Projeto A..... | 58 |
| Figura 25- Tela de resultados da simulação do Projeto B..... | 58 |
| Figura 26- Principais critérios utilizados para avaliação de tecnologias de CCS | 60 |
| Figura 27- Entrada de dados da tecnologia SiCSeGE (DeCARB) via RISK Simulator | 66 |
| Figura 28- Entrada de dados da tecnologia <i>DAC</i> (<i>Carbon Engineering</i>) via RISK Simulator | 66 |
| Figura 29- Entrada de dados da tecnologia <i>CDRMAX</i> (<i>Carbon Clean</i>) via RISK Simulator | 67 |
| Figura 30- Fluxograma para avaliação da sustentabilidade das tecnologias CCS | 68 |
| Figura 31- Avaliação da sustentabilidade da tecnologia SicSeGE-DeCARB..... | 69 |
| Figura 32- Avaliação da sustentabilidade da tecnologia <i>Direct Air Capture</i> -Carbon Engineering | 69 |
| Figura 33- Avaliação da sustentabilidade da tecnologia <i>CDRMAX</i> - Carbon Clean..... | 69 |
| Figura 34- Comparativo da MCDA entre as tecnologias DeCARB, C.E e C.C vide RISK Simulator. | 70 |
| Figura 35- Comparativo do indicador GWP (gCO ₂ eqv/kwh) | 72 |
| Figura 36- Comparativo Eutrofização (g PO ₄ ³⁻ /kwh)..... | 74 |
| Figura 37- Comparativo HTP (% anos de vida perdido)..... | 75 |
| Figura 38- Comparativo do indicador social: percepção pública das tecnologias | 77 |
| Figura 39- Comparativo do indicador social: conhecimento do que é o CCS | 78 |
| Figura 40- Comparativo do indicador social: Impacto percebido na saúde humana..... | 79 |
| Figura 41- Comparativo do indicador econômico: custo de captura..... | 81 |
| Figura 42- Comparativo do indicador econômico: custo de transporte | 82 |
| Figura 43- Comparativo do indicador econômico: custo de armazenamento | 83 |
| Figura 44- Comparativo do indicador “Potencial de Armazenamento” das tecnologias | 85 |

| | |
|--|-----|
| Figura 45- Comparativo do indicador “Recuperação de Petróleo Aprimorada EOR” | 86 |
| Figura 46- Interface do software @RISK integrado com Excel | 97 |
| Figura 47- Ferramenta de MCDA-Excel adaptada do NRLI | 98 |
| Figura 48- Definindo valores de entrada dos critérios com a extensão RISK Simulator | 103 |
| Figura 49- Desenvolvimento do Modelo de Decisão | 103 |
| Figura 50- Correção matemática dos valores dos critérios | 104 |
| Figura 51- Pesos estabelecidos pelos tomadores de decisões (DM's) | 104 |
| Figura 52- Definir a previsão de pontuação | 105 |
| Figura 53- Execução da análise de risco | 105 |
| Figura 54- Resultados da simulação de risco para um critério..... | 106 |
| Figura 55- Resultado da previsão total do Projeto A da simulação de Monte-Carlo | 106 |
| Figura 56- Questionário realizado para coleta dos dados..... | 107 |
| Figura 57- Resultados da pesquisa de opinião pública via questionário: dados brutos..... | 115 |
| Figura 58- Público amostral do questionário social | 118 |
| Figura 59- Gráficos gerados para cada pergunta do questionário social via Google Forms | 118 |
| Figura 60- Gráficos das perguntas para percepção pública das tecnologias CCS..... | 125 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|----|
| Quadro 1- Estado da arte de indicadores de sustentabilidade | 43 |
| Quadro 2- Critérios utilizados em estudos de tecnologias CCS..... | 46 |

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|------|---|
| ACB | Análise de Custo-Benefício |
| ACV | Avaliação de Ciclo de Vida |
| CCS | <i>Carbon Capture and Storage</i> (Captura e Armazenamento de Carbono) |
| CCUS | <i>Carbon Capture, Utilization and Storage</i> (Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono) |
| CEO | <i>Chief Executive Officer</i> (Diretor executivo) |
| COP | Conferência das Partes |
| DDT | Dicloro-Difenil-Tricloroetano |
| EOR | <i>Enhanced Oil Recovery</i> (Recuperação de Óleo Aprimorada) |
| ESG | <i>Environmental Social and Corporate Governance</i> |
| GEE | Gases de Efeito Estufa |
| GWP | <i>Global Warming Potential</i> (Potencial de Aquecimento Global) |
| IDH | Índice de Desenvolvimento Humano |
| KPIs | <i>Key Performance Indicators</i> (Indicadores Chave de Performance) |
| MCDA | <i>Multi-Criteria Decision Analysis</i> (Análise de Decisão Multicritério) |
| MCDM | <i>Multi-Criteria Decision Making</i> (Tomada de Decisão Multicritério) |
| ODS | Objetivos do Desenvolvimento Sustentável |
| ONU | Organização das Nações Unidas |
| PNUD | Programa das Nações Unidas e Desenvolvimento |
| RPB | <i>Rotating Packed Bed</i> (Reator de Leito Recheado) |
| SGS | <i>Standalone Geologic Storage</i> (Armazenamento Geológico Independente) |
| TRL | <i>Technology Readiness Level</i> (Nível de Maturidade Tecnológica) |
| WWF | <i>World Wide Fund for Nature</i> (Fundo Mundial para a Natureza) |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----|
| 1. INTRODUÇÃO | 16 |
| 2. OBJETIVO GERAL | 19 |
| 2.1. Objetivos específicos..... | 19 |
| 3. REVISÃO DA LITERATURA..... | 20 |
| 3.1. Sustentabilidade | 20 |
| 3.2. Captura e armazenamento de carbono..... | 21 |
| 3.2.1. Pós-combustão | 23 |
| 3.2.2. Pré-combustão..... | 24 |
| 3.2.3. Oxi-combustão | 25 |
| 3.3. Descrição de tecnologias de captura e armazenamento de carbono..... | 26 |
| 3.3.1. Caracterização da DeCARB e da tecnologia “SiCSeGE” | 27 |
| 3.3.2. Caracterização da <i>Carbon Clean</i> e tecnologia CDRMax..... | 29 |
| 3.3.3. Caracterização da <i>Carbon Engineering</i> e tecnologia <i>DAC</i> | 31 |
| 3.4. Indicadores de avaliação de sustentabilidade..... | 35 |
| 3.5. Análise da Decisão Multicritérios (MCDA) | 44 |
| 3.6. A MCDA na avaliação de tecnologias CCS..... | 46 |
| 4. METODOLOGIA | 53 |
| 4.1. Metodologia para avaliação da sustentabilidade | 53 |
| 4.2. Validação da MCDA..... | 56 |
| 4.3. Aplicação da MCDA à avaliação das tecnologias de interesse..... | 59 |
| 4.3.1. Definição de indicadores e obtenção dos dados..... | 59 |
| 4.3.2. Entrada de dados no Excel | 65 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 68 |
| 5.1. Avaliação da sustentabilidade das tecnologias CCS | 68 |
| 5.2. Oportunidades de melhoria para a tecnologia SiCSeGE (DeCARB)..... | 71 |
| 6. CONCLUSÕES..... | 89 |
| 7. REFERÊNCIAS | 91 |
| ANEXO..... | 97 |
| APÊNDICE A- Dados primários e secundários das tecnologias selecionadas para MCDA | 99 |
| APÊNDICE B- Roteiro detalhado de execução da MCDA no Excel | 103 |
| APÊNDICE C- Coleta de dados para a área social | 107 |

1. INTRODUÇÃO

O aquecimento global e as mudanças climáticas, que por vezes eram tidas como um problema futuro, são factuais e estão acontecendo com celeridade. Com as prováveis alterações climáticas, é razoável, portanto, que os desastres ambientais antes considerados como acidentais e pontuais, sejam mais frequentes e de maiores proporções. A justificativa de maior consenso entre os cientistas para o aquecimento global e impulsionamento de eventos catastróficos está atrelada às emissões de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorcarbonos (HFCs), perfluorcarbonos (PFCs) e hexafluoreto de enxofre (SF₆), conforme o Protocolo de Kyoto.

Fato é que, anualmente, 9 milhões de toneladas de carbono fóssil são injetados na atmosfera, o que provocou até o momento, um aumento na concentração de CO₂ de 280 ppm para 400 ppm, desde 1860, após a Revolução Industrial. Esse aumento interfere na quantidade de radiação absorvida pelos gases na atmosfera e que não são refletidas para o espaço, devido à capacidade do CO₂ de absorção radioativa e alteração do ciclo responsável pelo equilíbrio térmico da Terra (ARTAXO, 2014). Assim, a face do planeta tem sido modificada com a elevação do nível do mar e com o desequilíbrio dos ecossistemas e dos ciclos biogeoquímicos, que sucedem para os desastres ambientais cada vez mais recorrentes.

Em vista da necessidade de mudança, 195 países aprovaram o Acordo de Paris (COP21) no ano de 2015 e voltaram a se reunir na COP26 em Glasgow (Escócia) em 2021, para acelerar o objetivo de limitar o aquecimento global em até 1,5 °C e mitigar as mudanças climáticas. Como esperado, ocorreu em novembro de 2022 a COP27, na qual os principais líderes se reuniram em Sharm el-Sheikh, no Egito, com foco em soluções e financiamentos para concretizar os compromissos estabelecidos em Glasgow. Dentre estes, mantém-se veemente a meta de limitar o aquecimento global e especula-se que compromissos mais ambiciosos sejam anunciados no bojo da neutralização do carbono. Ocorre que, para a maioria da comunidade científica, essa meta é impossível sem a utilização de tecnologias como a Captura e Armazenamento de Carbono (CCS), Captura de Carbono e Utilização (CCUS), a Tecnologia de Emissões Negativas (NET) ou até mesmo uso de Bioenergia com CCS (BECCS).

Entretanto, mesmo com a aplicação de tais tecnologias, existe a possibilidade de falhas e baixa eficiência. Assim, nenhuma está isenta de gerar impactos ambientais, mesmo que indiretos, e ser completamente limpa. Desta forma, é pertinente utilizar ferramentas específicas

de Avaliação de Sustentabilidade para auxiliar a tomada de decisão frente às alternativas disponíveis, que respeitem os pilares do *triple bottom line* apresentado por John Elkington (1998) ou também conhecido como tripé ambiental, social e econômico. Este conceito, após atualizações, passou a englobar o conceito B que envolve a governança do negócio, sua relação com a comunidade inserida e clientes.

Ressalta-se que metodologias tradicionais, a exemplo da Análise de Custo-benefício (ACB), são ineficazes para projetos energéticos ou industriais, como a Captura e Armazenamento de CO₂, devido aos impactos multifacetados prováveis a eles associados. A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), outra bastante utilizada, também possui limitações quando há mais de um critério em análise, sendo necessárias adaptações para uma solução ótima ser aplicável em um cenário real. Já o método baseado em multicritérios, do inglês *Multi-Criteria Decision Analysis* (MCDA), tem a capacidade de incorporar funções utilitárias que geram “*decision makers*” (DMs) e facilitam a tomada de decisões racionais através de dados e números. Além disso, conta com um sistema de pesos atribuídos por especialistas, para tornar o resultado realista e admissível.

Revela-se então que se encontra em aperfeiçoamento a tecnologia de captura de carbono (CO₂) conhecida como “SiCSeGE”, desenvolvida pela DeCARB, que é uma ramificação, ou seja, um *spin-off*, da *startup* RECICLI. Essa tecnologia é resultante de pesquisas científicas desde 2005, sob a coordenação do Professor Flávio Pietrobon, docente e pesquisador da Universidade do Estado da Bahia (UNEB), e atual CEO da RECICLI. A pesquisa que resultou na tecnologia SiCSeGE tem sido fomentada pelo CNPq, de forma contínua desde 2005, sendo, o referido professor, também bolsista de produtividade pelo CNPq, o que gerou o desenvolvimento dessa inovação e patente, junto ao Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), sob o pedido de código BR 10 2020 019620 0. A mesma está gerando atualmente novas patentes com aperfeiçoamentos desta tecnologia.

Pelo exposto, esta dissertação é fruto de uma parceria estabelecida entre o PPGE CIA e a RECICLI, via acordo de cooperação (em encaminhamento à COPEC) entre a UFS e UNEB, que tem como foco a avaliação da sustentabilidade de tecnologias de Captura de CO₂ empregando a metodologia MCDA e indicadores de sustentabilidade, para subsídio à tomada de decisão, proposição de melhorias e levantamento de oportunidades dentro do projeto da SiCSeGE (DeCARB), rumo à sustentabilidade.

Portanto, busca-se responder a seguinte pergunta norteadora: de acordo com a MCDA, a tecnologia SiCSeGE (DeCARB) se dá de maneira sustentável quando comparada à outras tecnologias de captura de CO₂?

2. OBJETIVO GERAL

Avaliar a sustentabilidade de tecnologias de Captura de Carbono, empregando a metodologia MCDA e indicadores de sustentabilidade, para subsídio à tomada de decisão e proposição de melhorias da SiCSeGE (DeCARB).

2.1. Objetivos específicos

- Caracterizar as tecnologias de captura de CO₂;
- Selecionar os indicadores de sustentabilidade adequados à análise das tecnologias;
- Validar a metodologia MCDA quanto à avaliação de tecnologias de captura de CO₂;
- Avaliar a sustentabilidade das tecnologias de interesse;
- Verificar melhorias e oportunidades para a tecnologia SiCSeGE da DeCARB.

3. REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura do presente trabalho pode ser classificada como integrativa, visto que permite a combinação de dados empíricos e teóricos da literatura para definir conceitos, identificar lacunas nas áreas de estudos e revisar teorias e metodologias dos estudos sobre um determinado tópico. A busca literária se deu através de periódicos internacionais, dos portais CAPES, Scielo, Google Acadêmico, livros, artigos científicos, publicações em revistas, portais governamentais, patentes, bem como por consulta de relatórios nos *websites* oficiais de empresas detentoras de tecnologias de captura de carbono.

Assim, para atender aos objetivos específicos, fez-se necessário compreender as temáticas: sustentabilidade, captura de CO₂, tecnologias CCS, indicadores de avaliação de sustentabilidade e análise de decisão multicritério, sobretudo para tecnologias de captura de carbono.

3.1. Sustentabilidade

A sustentabilidade manifesta-se através do desenvolvimento economicamente eficiente, socialmente incluyente e ecologicamente equilibrado, em decorrência da necessidade de preservação dos ecossistemas naturais do planeta para as gerações futuras. No ano de 1962, a publicação *Silent Spring* (Primavera Silenciosa), de Rachel Carson, surgiu como uma obra literária que se tornou referência para debates acerca do meio ambiente, impulsionando o banimento do pesticida DDT (Dicloro-Difenil-Tricloroetano) em países como EUA e Suíça em 1970. Nesse trilha, em 1972 ocorreu a Conferência das Nações Unidas em Estocolmo, que através do engajamento da comunidade científica, deu luz ao relatório de Brundtland “Nosso Futuro Comum”, contemplando o tema da sustentabilidade e a compreensão da tríade: meio ambiente, sociedade e economia, de forma integrada (ALVES, 2015).

Além disso, a Organização das Nações Unidas estabeleceu 17 (dezessete) objetivos globais (ODS) como um apelo universal à ação para proteger o meio ambiente, erradicar a pobreza e avançar em direção à paz mundial. Dentre estes, o de nº 13 “Combate às alterações climáticas”, dialoga estreitamente com os objetivos desta pesquisa, no âmbito do desenvolvimento de

tecnologias capazes de frear o aumento da temperatura média global em 2 °C acima dos níveis pré-industriais.

De acordo com Harding (2002), alcançar a sustentabilidade é o principal objetivo do desenvolvimento sustentável. Com isso, a criação de indicadores de sustentabilidade qualitativos e/ou quantitativos se fez necessária, de forma a diagnosticar, monitorar, planejar e/ou executar ações correlacionadas aos impactos ambientais emergentes.

Historicamente, as primeiras tentativas de padronização de um indicador global fizeram parte da Agenda 21, na Rio-92, e em 1996 parecia ter sido consolidada com a adoção dos "Princípios de Bellagio" (IISD, 2000). Contudo, contraposições feitas por Lawn (2006) demonstraram, até então, que os métodos propostos de sustentabilidade permaneciam frágeis e demandavam uma gama maior de indicadores, por ser estatisticamente improvável unificar em um índice diversas áreas (VEIGA, 2010).

Tal complexidade de estabelecer um indicador global para a sustentabilidade se deve também à resiliência dos ecossistemas, sua contínua mutação, variabilidade e diversidade entre os continentes. Dessa forma, se faz necessário limitar o objeto de estudo para obter avaliações mais assertivas. Assim, para desenvolver uma avaliação de sustentabilidade acurada, com indicadores essenciais e correspondentes ao escopo desta dissertação, buscou-se inicialmente, compreender as demandas associadas às tecnologias de captura de carbono e armazenamento.

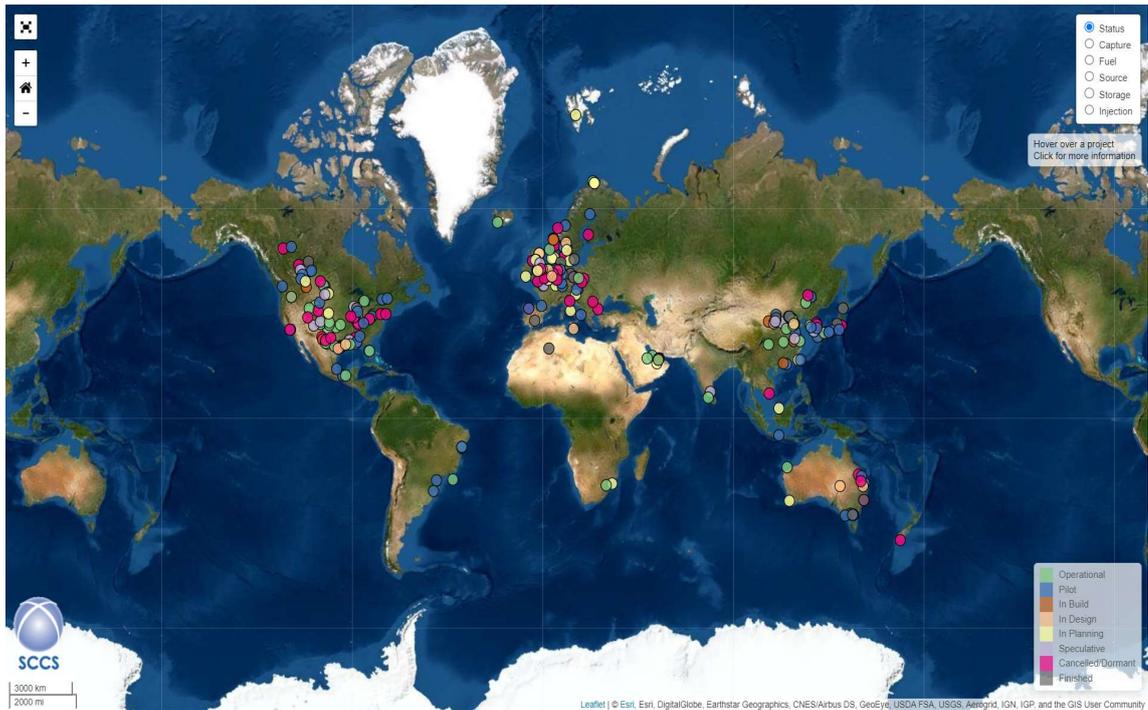
3.2. Captura e armazenamento de carbono

De acordo com Gibbs e Chalmers (2008), a captura e o armazenamento de carbono (CCS) é uma tecnologia tecnicamente viável em escala comercial, capaz de transportar o dióxido de carbono (CO₂) produzido pela queima de combustíveis fósseis para um armazenamento geológico seguro, inibindo as emissões diretas na atmosfera e acúmulo. Além disso, o uso desta tecnologia permite a transformação de fontes fósseis em vetores de energia livres da emissão de GEE (*net-zero*), como a conversão em eletricidade, calor e hidrogênio (LUCQUIAUD e GIBBINS, 2011).

De acordo com o mapeamento realizado pelo *Scottish Carbon Capture e Storage* (2021), Figura 1, existem cerca de 310 instalações e projetos pilotos que capturam, transportam e armazenam CO₂ anualmente. No Brasil, estão ativos o Projeto Buracica, desde 1990 no

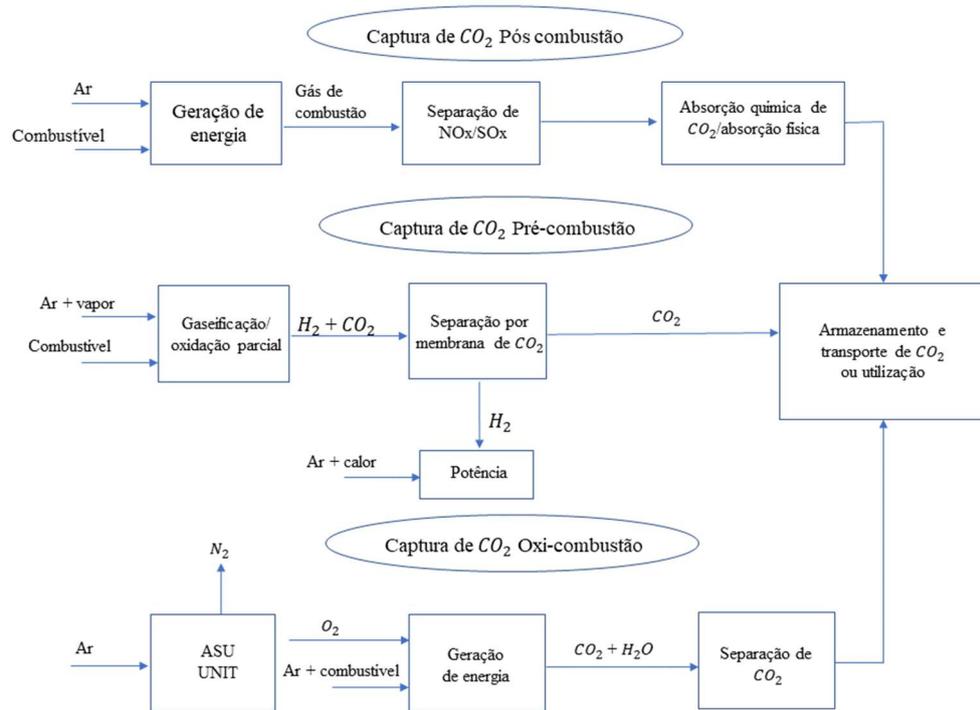
complexo de Camaçari/BA, o qual já armazenou cerca de 600.000 toneladas de CO₂ e o projeto da Petrobras na Bacia de Santos/RJ, com a reinjeção de 1x10⁶ ton CO₂/ano, em cavernas de sal submarinas a 5.000 m de profundidade e a 300 km *offshore*.

Figura 1- Mapa global dos projetos CCS



Fonte: *Scottish Carbon Capture e Storage*, 2022

De acordo com GIBBINS E CHALMERS (2008) e KANNICHE *et al.* (2010), os tipos de CCS se diferenciam principalmente pelo momento e situação em que ocorre a captura do dióxido de carbono, sendo classificados em três categorias: Captura Pós-Combustão, Captura Pré-Combustão e Oxi-Combustão, as quais foram esquematizadas na Figura 2.

Figura 2- Os três processos de captura de CO₂

Fonte: De Jesus (2022) modificado de Spigarelli e Kawatra (2013)

3.2.1. Pós-combustão

O princípio básico da pós-combustão é capturar o CO₂ nos gases de escape, uma vez que o combustível tenha sido totalmente queimado com ar. Comumente ocorre com a liquefação do CO₂, seguida de armazenamento, imediatamente após a tubulação de saída dos gases em uma indústria. Pode ser facilitado, por exemplo, através da utilização de solventes químicos (comumente se utiliza a amônia NH₃) aliada a um dispositivo (*structure packing* ou embalagem de estrutura) que aumenta a superfície de contato imediatamente após a tubulação de saída dos gases em uma indústria, fazendo a liquefação do CO₂. Após liquefeito, pode ser realizado o armazenamento geológico (permanente) e a condução até rochas sedimentares profundas ou em tanques artificiais (de forma temporária), até que seja viabilizada sua reutilização na composição de novos produtos ou processos industriais.

Uma vez que o carbono gerado na queima de combustíveis foi capturado, existem algumas alternativas de destinação, como o armazenamento permanente em rochas subterrâneas/marítimas ou a transformação em produto de valor comercial, a exemplo: da utilização do CO₂ na produção de refrigerantes; na conservação de alimentos; como estimulante

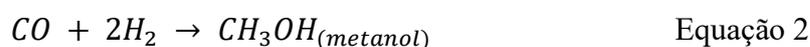
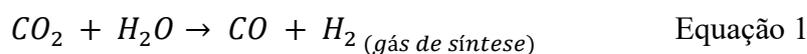
respiratório para ambientes hospitalares; como veículo para recuperação de óleo na indústria de petróleo; para controlar o nível de pH na indústria de papel e celulose, dentre outras alternativas (WHITE MARTINS, 2023).

No momento em que esse CO₂ se encontra inibido para retorno à atmosfera por mais de um século, considera-se que não apenas houve a captura, mas sim o sequestro deste carbono (LUCQUIAUD e WILKINSON, 2021). Esse sequestro de carbono pode acontecer através dos 3 principais processos: (i) captura de carbono de plantas emissoras ou diretamente do ar; (ii) conversão em formas adequadas para serem transportadas e depositadas temporariamente em tanques; e (iii) o sequestro permanente (tempo superior à 100 anos) do carbono em rochas geológicas. Esse método de captura também é o mais amplamente pesquisado e adaptável, com várias tecnologias sendo usadas para isso como, por exemplo, a absorção baseada em solvente, separação por membrana, mineralização, captura criogênica e captura de carbono baseada em microalgas (DE JESUS, 2022 *apud* SHAHHOSSEINI et al., 2017; MOKHTAR et al., 2012).

3.2.2. Pré-combustão

A pré-combustão consiste na captura de CO₂ antes mesmo da queima do combustível fóssil, que pode ocorrer através do: i) ciclo combinado integrado de gaseificação ou ii) ciclo combinado integrado reformado. O primeiro, consiste em um processo de gaseificação combinado com a geração de energia em um ciclo fechado numa indústria, enquanto o segundo, na produção de um gás de síntese para posterior aproveitamento energético (DE JESUS, 2022, *apud* DI LORENZO et al., 2013).

Em sùmula, há a transformação do CO₂ em um gás de síntese “livre de carbono”, do inglês *carbon-free*, como o hidrogênio (H₂), antes mesmo da queima, conforme a Equação 1. Destaca-se também, que a produção do metanol (Equação 2) pode ocorrer a partir da reação do gás de síntese.



Além disso, é possível identificar as principais reações que ocorrem na reforma do metano, de acordo com a Figura 3.

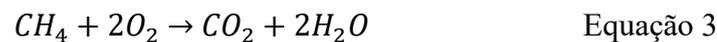
Figura 3- Principais reações na reforma do metano

| Tipo de Reação | Entalpia de Reação $\Delta H_{298}(\text{kJ/mol})$ | Nome da Reação |
|--|--|--|
| $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO} + 3\text{H}_2$ | +206,0 | Reforma do metano com vapor d'água |
| $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2$ | -41,0 | Deslocamento gás-água (<i>Water-Gas Shift</i>) |
| $\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + 4\text{H}_2$ | +165,0 | Global + shift |
| $\text{CH}_4 \rightleftharpoons \text{C} + 2\text{H}_2$ | +75,0 | Decomposição do metano |
| $2\text{CO} \rightleftharpoons \text{C} + \text{CO}_2$ | -172,0 | Boudouard |
| $\text{CO} + \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{C} + \text{H}_2\text{O}$ | -131,0 | Redução do CO |
| $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightleftharpoons \text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$ | -802,0 | Combustão |
| $\text{CH}_4 + \text{CO}_2 \rightleftharpoons 2\text{CO} + 2\text{H}_2$ | +274,0 | Reforma a Seco |
| $\text{CH}_4 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{CO} + 2\text{H}_2$ | -38,0 | Oxidação Parcial |
| $\text{CH}_4 + \frac{1}{2} x\text{O}_2 + y\text{CO}_2 + (1-x-y)\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons (y+1)\text{CO} + (3-x-y)\text{H}_2$ | ~0 | Reforma Autotérmica |
| $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ | +165,0 | Metanação |

Fonte: TACHINSKI, 2018

3.2.3. Oxi-combustão

Por último, a tipologia de oxi-combustão representa a combustão com oxigênio "puro" que força o caminho da reação a ter combustões completas, gerando como produto da reação - quase que em totalidade - as moléculas de água, conforme ilustrado na Equação 3 (combustão completa) e Equações 4-5 (combustão incompleta) (LUCQUIAUD e WILKINSON, 2021).



Ou seja, não existe uma captura "real" do CO_2 , pois o combustível fóssil é queimado em um ambiente controlado e rico em oxigênio. Esse processo não envolve a utilização de

membranas ou absorventes, tornando-se econômico e permitindo que 90% do CO₂ seja comprimido e armazenado diretamente, sem a necessidade de uma purificação adicional (DE JESUS, 2022 *apud* GOPAN *et al.*, 2014; JAIN *et al.*, 2016).

No que diz respeito ao armazenamento “direto”, de acordo com Fernandez *et al.* (2016), alguns riscos estão associados ao armazenamento geológico permanente do carbono, onde fatores como a pressão, temperatura, profundidade e permeabilidade podem afetar a injeção e variar o fluxo de CO₂ através dos dutos. A saber, cita-se o projeto bilionário em Gorgon/Austrália, idealizado pela Chevron, que deveria sequestrar e injetar 80% do CO₂ emitido pela planta de gás natural, mas tem apresentado uma eficiência de apenas 30%. A justificativa para tal se deve à obstrução de partes do sistema de armazenamento com areia, ocasionando a redução drástica da eficiência de injeção (RENEW ECONOMY, 2021).

Assim, a conversão de CO₂ em compostos, ao invés do armazenamento, surge como alternativa promissora para o mercado industrial/energético. Neste viés, observou-se na pesquisa de Kong *et al* (2019) a possibilidade de síntese do composto Carbonato de Cálcio-Sílica (CaCO₃-SiO₂) utilizando o borbulhamento de gás CO₂ em um meio contendo Ca (OH)₂ aquoso e o catalisador NH₄OH. Como resultado, os autores trouxeram à tona uma forma sólida de armazenamento do CO₂ em temperatura ambiente, que pode ser considerado como um método de captura de carbono atmosférico e de produção de composto de valor mercadológico.

Em paralelo, outro aspecto que deve ser considerado no armazenamento geológico está associado à compressão do CO₂, onde inicialmente um fluido “supercrítico” é solidificado em carbonato, devido ao risco de percolação para diversos ambientes. Eis por que selecionar a melhor forma de implementar CCS é complexo e deve ser específico para cada cenário. Avaliar o comportamento do ecossistema, da sociedade e dos impactos econômicos se fazem importantes para validação de uma tecnologia que enfoca uma opção de mitigação climática, ao passo que essas decisões de implementação podem ser auxiliadas pelo uso de ferramentas, a exemplo da metodologia de decisão multicritério (CHOPTIANY e PELOT, 2016).

3.3. Descrição de tecnologias de captura e armazenamento de carbono

A captura e armazenamento de carbono é de interesse de uma ampla gama de empresas do ramo energético e, por isso, tecnologias estão sendo desenvolvidas para permitir que as emissões de dióxido de carbono (CO₂) sejam transformadas, armazenadas em reservatórios

naturais (rochas) ou artificiais, ou até mesmo retornadas para a indústria como matéria prima (GIBBINS e CHALMERS, 2008).

3.3.1. Caracterização da DeCARB e da tecnologia “SiCSeGE”

A tecnologia SiCSeGE é do tipo pós-combustão, com proposta comercial de capturar o carbono e posterior sequestro através da transformação do CO₂ em um produto de valor comercial. Esta tecnologia se encontra abrigada na forma de patente da empresa DeCARB. Esta é uma ramificação, ou seja, uma *spin-off*, da *startup* RECICLI que está posicionada nas verticais CleanTech e IndTech. As atividades da RECICLI estão focadas em Tecnologias de Sustentabilidade Ambiental, patenteadas sob sua titularidade. Essas tecnologias são resultantes de pesquisas científicas fomentadas pelo CNPq desde 2005, sob a coordenação e orientação de Flávio Pietrobon, atual CEO da RECICLI.

A *startup* RECICLI foi fundada oficialmente em 2017, pelos sócios Sérgio Xaud Crescente e o professor Flávio Pietrobon Costa, com suporte e mentoria empresarial da incubadora do Parque Tecnológico SergipeTec, na região metropolitana de Aracaju/SE. Foi acelerada pelo SEBRAE Sergipe (Programa ALI, 2019 e 2020) e pelo Programa InovAtiva, do Ministério da Economia (2019), bem como no escopo do TechStart (*WarmUp*) na edição 2019-2020. Foi finalista premiada do Programa de Inovação Aberta FIEMG Lab 4.0 (2021), obtendo o título de melhor gestão, melhor liderança e se destacando entre as 10 melhores performances de Startups.

A RECICLI considera como principais pilares o desenvolvimento sustentável, onde a economia, a preservação dos ecossistemas e a responsabilidade social devem caminhar juntos, aplicando os conceitos da Economia Circular no escopo da sustentabilidade ambiental, reciclagem de resíduos sólidos, em especial os de alta tecnologia (eletrônicos) e de emissões industriais associadas ao Efeito Estufa.

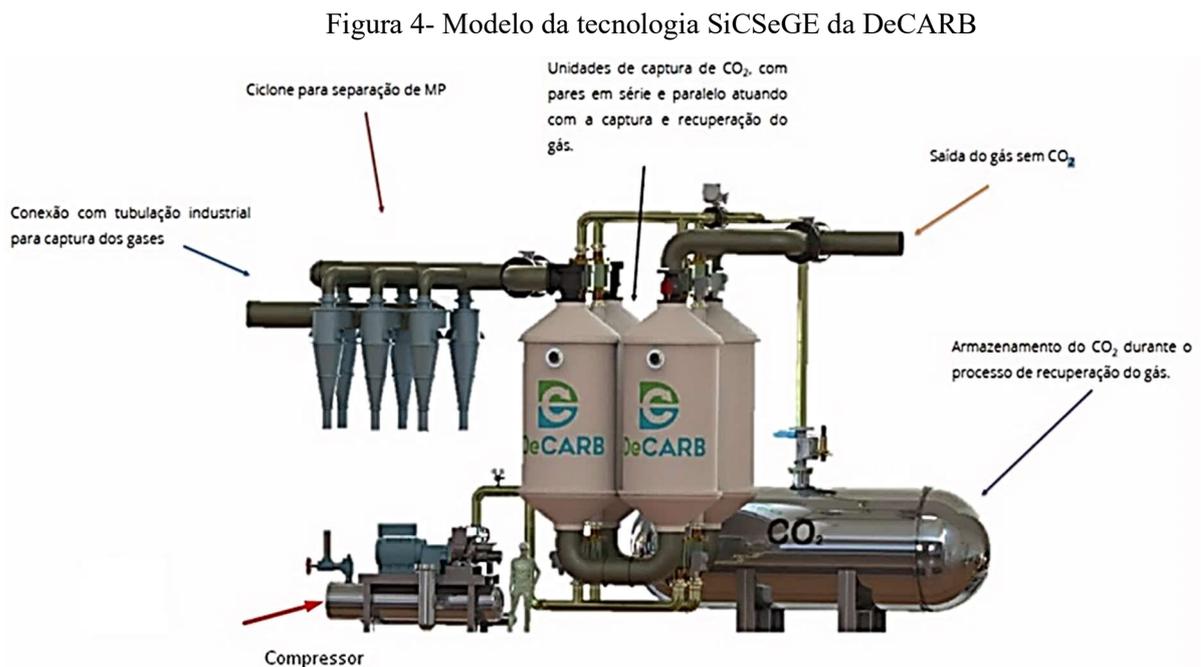
A DeCARB surgiu em 2020, abrigando a tecnologia SiCSeGE, concebida pela RECICLI e tendo a missão de desenvolver tecnologias de descarbonização. Essa tecnologia, que está em desenvolvimento pela DeCARB, tem sido validada através de provas de conceitos com indústrias como a Anglo American.

As modelagens e simulações da tecnologia SiCSeGE fazem uso de resíduos vegetais na fabricação do carvão ativado. Seu emprego ocorre considerando os parâmetros da indústria que busca sua descarbonização. Além de capturar o CO₂, a tecnologia também pode gerar

energia, sendo calculada através de métodos analíticos, com base nos parâmetros da planta, a partir das condições de saída das emanações gasosas da indústria e dos requisitos mínimos para geração de energia pela pressão ou temperatura dos gases.

Revela-se que esse processo de captura apresentou uma eficiência de remoção de 99% de CO₂ da corrente gasosa, por um período de cerca de 5 minutos. Após esse tempo, a coluna de carvão foi progressivamente reduzindo sua eficiência até saturar. O processo de recuperação do CO₂ também apresentou capacidade de 99% de pureza do gás, com tempo igual ao do processo de adsorção, de cerca de 5 minutos.

Contudo, as modelagens e simulações forneceram resultados correspondentes ao do sistema na planta industrial, com tempo de saturação similar ao realizado em laboratório, com quatro filtros de 2,68 m de altura e 1,61 m de diâmetro externo, funcionando em pares em um processo paralelo. O modelo da tecnologia consta na Figura 4.



Fonte: DeCARB, 2022

Conforme esquematizado, a operação unitária da DeCARB inicia através de uma conexão imediata à saída da tubulação industrial, realizando o apresamento do fluido. Este segue para o ciclone de separação de material particulado (MP), onde as forças centrífugas provocadas internamente induzem as partículas (mais densas que o ar) a colidirem contra as paredes da estrutura, reduzindo a velocidade e precipitando o material particulado pelo cone inferior, enquanto produz um ar com baixos teores destas impurezas que segue para a unidade de captura seguinte. O interior do núcleo de captura DeCARB contém leitos de adsorventes orgânicos

(carvão ativado) em série e em paralelo, com propriedades específicas para reter em prevalência o dióxido de carbono, ao mesmo tempo que promove a dessorção do CO₂ e sua compressão em cápsulas de armazenamento.

Vale ressaltar que o desenvolvimento da tecnologia SiCSeGE é orientado de acordo com a Escala Nível de Maturidade Tecnológica ou *Technology Readiness Level* (TRL) que, segundo MANKINS (1995), tem a seguinte representação gráfica:



Fonte: UNIVASF, 2021

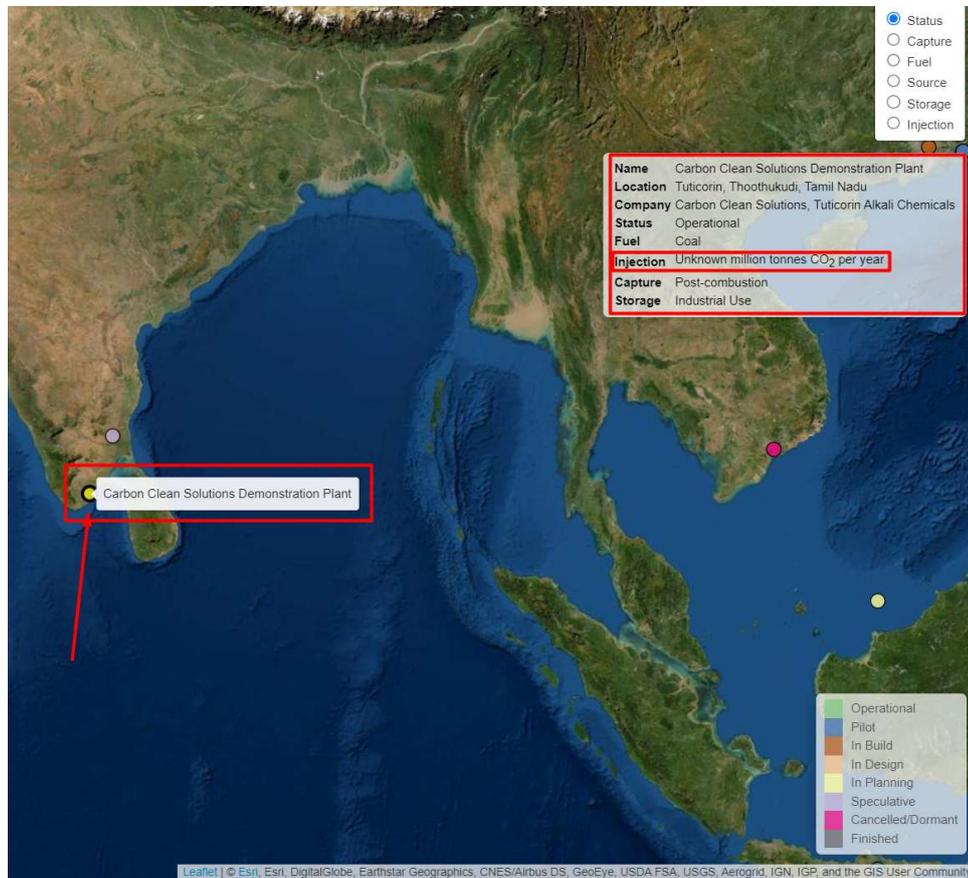
Neste momento, a DeCARB está situada na fase de início de prototipação, ou seja, já foram executadas até a fase TRL 3 e estão estabelecendo o nível TRL 4. De acordo com os diretores da empresa, a previsão é que em 22 meses estejam concluindo a etapa TRL 6. Nessa perspectiva, em 2022, a sede da empresa migrou para o centro de Belo Horizonte/MG com o objetivo de integrar uma rede dinâmica e pujante de *startups* inovadoras.

3.3.2. Caracterização da *Carbon Clean* e tecnologia CDRMax

A tecnologia CDRMax também é uma tecnologia do tipo pós-combustão, desenvolvida pela Carbon Clean. Esta foi fundada em 2009 por Aniruddha Sharma e Prateek Bumb, sua matriz está sediada em Londres, com escritórios na Índia, Espanha e Estados Unidos. Em junho de 2022, obtiveram a marca de mais de 1,5 milhão de toneladas de CO₂ removidos ao longo das 44 instalações distribuídas pelo mundo, ou seja, o equivalente à fase TRL 9, onde já está em escala completa e atuante no mercado.

O modelo de negócio da *Carbon Clean* atua dentro das operações já existentes, através da adequação do *layout* da indústria com a mínima interrupção das atividades. Além disso, estimula as corporações a alcançar a neutralidade de carbono (*net-zero*), a participação em incentivos de descarbonização e o mercado global de economia circular de carbono. Sua instalação principal está localizada na Índia, destacada em vermelho na Figura 6.

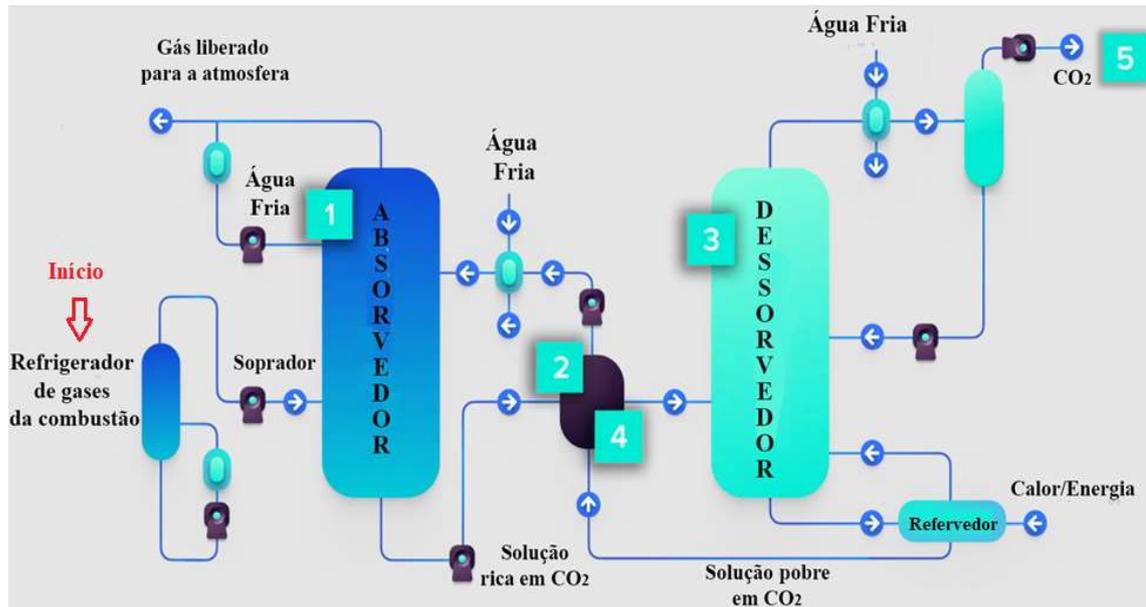
Figura 6- Mapa de localização do projeto da Carbon Clean



Fonte: Adaptado de SCOTTISH CARBON CAPTURE e STORAGE, 2022

O CDRMax usa duas tecnologias integradas: o solvente patentado APBS-CDRMax® promovido por amônia (NH₃) e o *rotating packed bed* (RPB), conforme Figura 7, que é um reator catalítico de leito fixo, com meio reacional em solução e um catalisador sólido (Rahman *et al*, 2010). O uso de RPBs aprimora a absorção de CO₂ no solvente e sua eficiência ambiental, resultando em um custo de captura de carbono aproximado a US\$ 30/tonelada.

Figura 7- Modelo da tecnologia CDRMAX da CarbonClean



Fonte: Traduzido de Carbon Clean, 2022

A tecnologia *CDRMAX*, como uma das possíveis concorrentes à DeCARB, compartilha algumas semelhanças com a SiCSeGE, tal qual a formulação anexa às indústrias e a tipologia de pós-combustão, bem como a destinação final dada ao CO₂, que assume função de matéria prima e não de resíduo, ao ser integrado à composição de um novo produto comercial.

Assim, observa-se através do fluxograma de processos na Figura 7 uma estrutura semelhante à da desenvolvida pela DeCARB, com captura do tipo pós-combustão e conexão direta à tubulação de saída da indústria. O fluido industrial percorre o absorvedor (1) contendo o solvente patentado APBS-CDRMax® à base de amônia (NH₃), onde ocorre a segregação de uma solução rica em CO₂ e outra parcela livre deste composto. Dando sequência, a solução concentrada é parcialmente aquecida no trocador de calor (2), ocorrendo a dessorção (3) da solução enriquecida através de reações térmicas ou a regeneração da solução livre (4) e posterior armazenamento do CO₂ (5), como um gás de síntese puro e passível de transformação em um produto de valor agregado, a exemplo do cimento verde, proposto pela Carbon Clean.

3.3.3. Caracterização da *Carbon Engineering* e tecnologia DAC

A tecnologia *Direct Air Capture (DAC)* possui uma proposta de captura alternativa, do tipo pós-combustão indireta, que se encontra em fase de protótipo e modelo 3D, o que fica

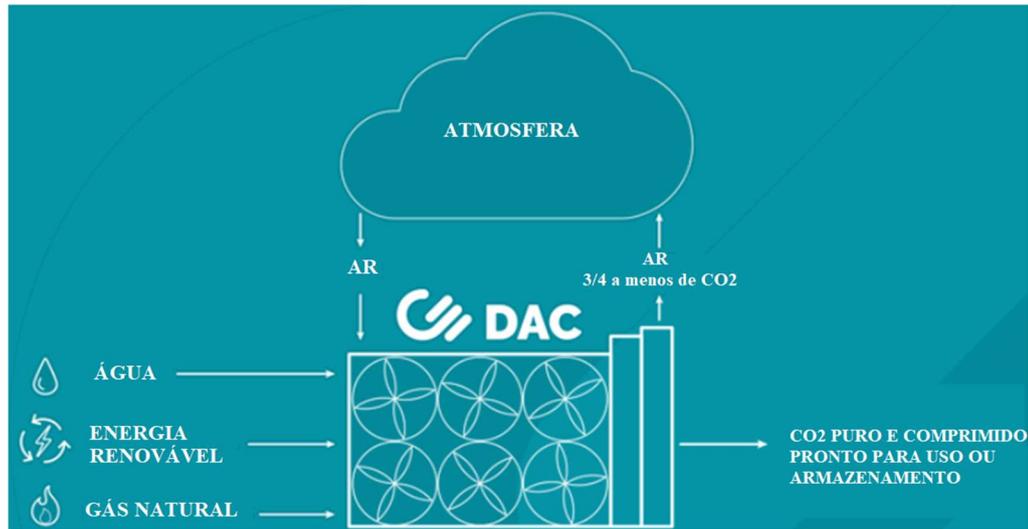
compreendido entre as fases TRL 4-6. Quando comparadas às tecnologias desenvolvidas pela DeCARB e Carbon Engineering, há diferenças no local de captura/fonte e modelo de negócio proposto, pois a *DAC* captura o ar atmosférico do entorno, enquanto a SiCSeGE e a combinação APBS-CDRMax® e RPB capturam os gases direto da tubulação de exaustão das indústrias. Por outro lado, todas apontam semelhanças entre o produto gerado: o gás CO₂ com elevado índice de pureza e potencial de comercialização enquanto matéria-prima.

A saber, a Carbon Engineering (CE) foi fundada em Calgary (Canadá) pelo professor David Keith, da Universidade de Harvard em 2009, com o objetivo de desenvolver e comercializar uma tecnologia capaz de capturar o CO₂ diretamente da atmosfera em grande escala (megatoneladas).

Keith e demais pesquisadores analisaram a captura direta do ar, como uma ferramenta adicional para a redução de emissões gasosas e a remoção do carbono da atmosfera. Assim, com o apoio de cientistas, líderes empresariais e investidores estratégicos, a CE foi fundada para fomentar a inovação.

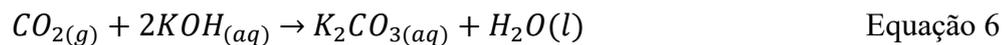
Os princípios da *DAC* contemplam a captura do ar atmosférico, seguida de uma série de reações químicas, a fim de comprimir o dióxido de carbono e transformá-lo em um gás purificado para uso ou armazenamento. Por fim, retorna o ar residual ao meio ambiente com 75% a menos de CO₂, conforme ilustra o modelo da Figura 8.

Figura 8- Modelo da tecnologia DAC da Carbon Engineering



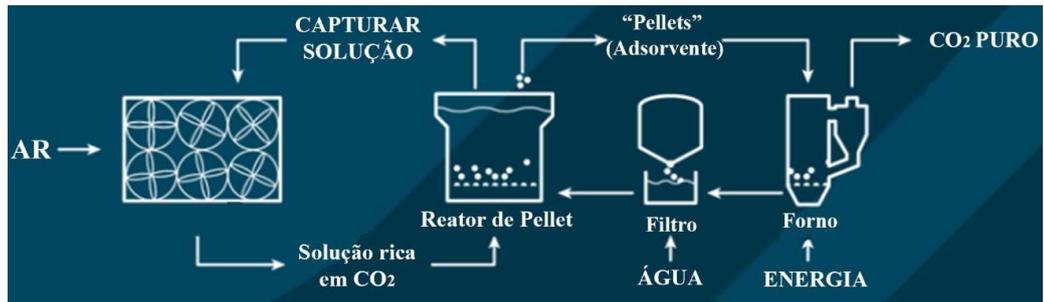
Fonte: Traduzido de Carbon Engineering, 2022

O processo tem início no “contator” de ar – uma grande estrutura modelada a partir de torres de resfriamento industriais- onde ocorre a sucção do ar atmosférico, através de um aerador. Em sua estrutura, há uma solução de hidróxido de potássio (KOH) na superfície das pás, a fim de estabelecer a interação solvente-soluto e “sequestrar” as moléculas de CO₂, na forma de uma solução líquida de carbonato de potássio (K₂CO₃), conforme a Equação 6.



Em seguida, a solução de carbonato de potássio é submetida a uma série de processos químicos para aumentar sua concentração, purificá-la e comprimi-la em um gás de síntese pronto para utilização ou armazenamento. O processo de separação do sal da solução, em pequenos agregados “*pellets*” foi adaptado da tecnologia de tratamento de água. Assim, os *pellets* são aquecidos em um forno para liberar o CO₂ na forma de gás puro, que pode ser utilizado para geração de energia (conforme Figura 3). Os detalhes podem ser observados no processo detalhado da DAC exibido na Figura 9.

Figura 9- Processo detalhado do DAC e as principais operações unitárias

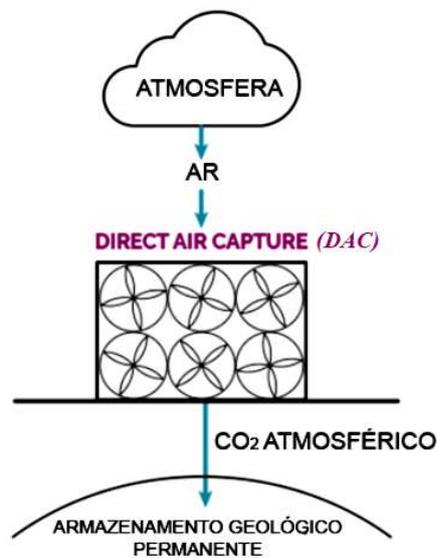


Fonte: Traduzido de Carbon Engineering, 2022

Após capturado, o armazenamento do CO₂ pode ocorrer através de duas formas:

- a) Armazenamento Geológico Independente ou *Standalone Geologic Storage (SGS)*: O CO₂ removido com a *Direct Air Capture (DAC)* pode ser armazenado com segurança em formações rochosas ou poços de petróleo depletados, conforme apresenta a Figura 10:

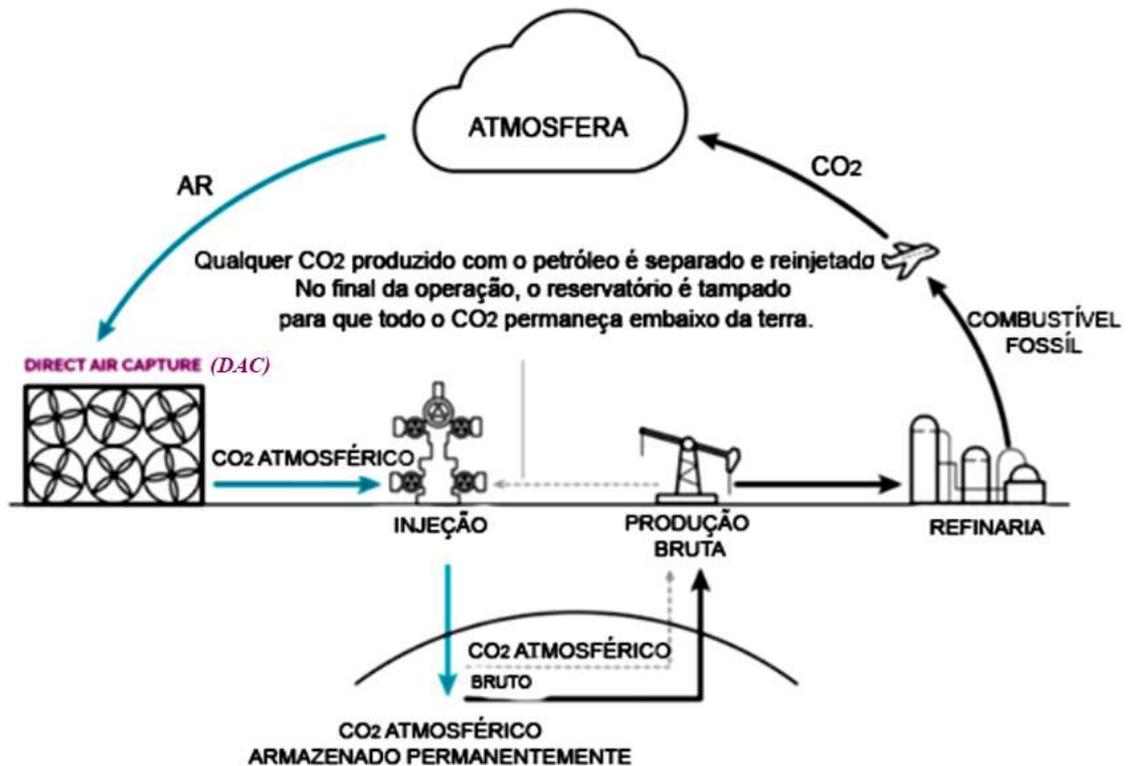
Figura 10- Processo detalhado do armazenamento geológico independente (*SES*)



Fonte: Traduzido de Carbon Engineering, 2022

- b) Recuperação de Óleo Aprimorada ou *Enhanced Oil Recovery (EOR)*: O CO₂ atmosférico capturado é armazenado permanentemente em reservatórios de petróleo, conforme esquematizado na Figura 11.

Figura 11- Processo detalhado da Recuperação de Óleo Aprimorada (EOR)



Fonte: Traduzido de Carbon Engineering, 2022

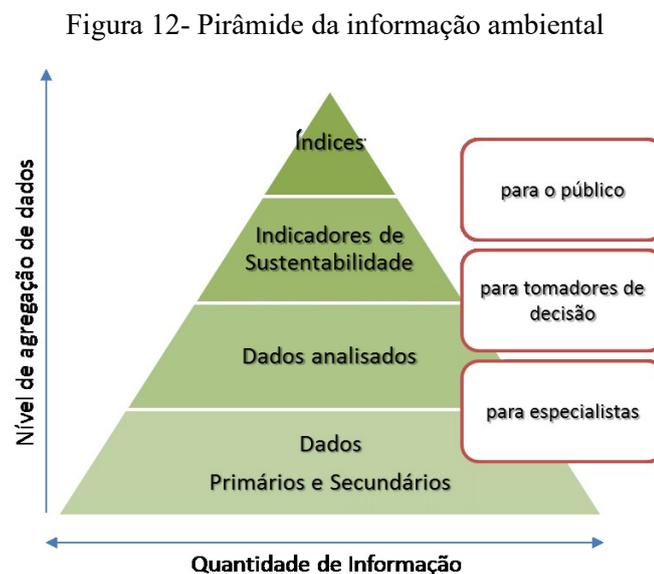
Sabe-se que a injeção de CO_2 em reservatórios de petróleo é uma prática comum, conhecida como recuperação avançada de petróleo, conduzida pela indústria de óleo e gás desde os anos 70. Porém, embora a *EOR* não tenha sido realizada inicialmente para benefícios ambientais, quando a matéria prima é o CO_2 proveniente da captura na atmosfera através da tecnologia *DAC*, por exemplo, reduz-se então a pegada de carbono do petróleo produzido.

3.4. Indicadores de avaliação de sustentabilidade

O termo indicador é originário do latim *indicare*, que significa divulgar ou apontar, para anunciar, estimar ou divulgar publicamente. Os indicadores comunicam informações sobre o progresso em direção a objetivos sociais, mas também podem expressar fenômenos ou tendências que possam ser detectáveis. Nesse sentido, os indicadores de sustentabilidade são

ferramentas usadas na avaliação da sustentabilidade, do desenvolvimento, bem como nos processos de educação e comunicação (HAMMOND *et al.*, 1995).

Apesar dos indicadores serem frequentemente apresentados em forma percentual ou gráfica, eles são distintos de estatísticas ou dados primários. De modo breve, podemos entender indicadores como uma lapidação de dados brutos em uma estrutura piramidal como representada na Figura 12.



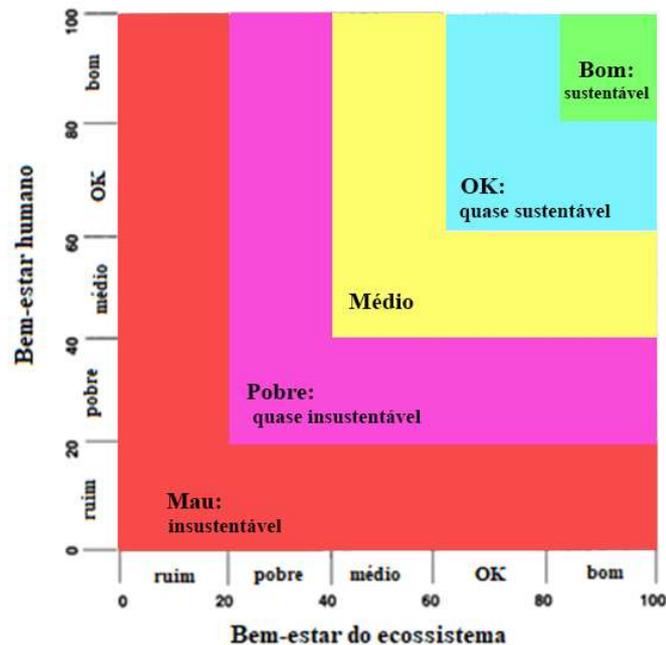
Fonte: Gomes (2011), adaptado de Hammond *et al.* (1995) e Emmert *et al.* (1996)

Os dados primários e secundários são advindos de fontes de informação direta, como análises laboratoriais, relatórios oficiais dos fabricantes, ensaios e coletas de campo, artigos científicos, patentes, etc, analisados por especialistas do tema em questão. Uma vez que estes dados brutos tenham sido interpretados e processados, obtém-se dados analisados. Estes são de interesse dos tomadores de decisão, devido a possibilidade de constituírem indicadores de sustentabilidade, ainda de caráter técnico, que, por sua vez, resultarão em índices de fácil compreensão pública, após uma nova avaliação.

As primeiras diretrizes sobre Indicadores de Avaliação de Sustentabilidade podem ser observadas no livro de Prescott-Allen “*Barometer of Sustainability*” (1997), ao descrever uma metodologia sistemática capaz de organizar e relacionar indicadores de bem-estar social e desenvolvimento sustentável. De acordo com o autor, não combinar indicadores traz um fluxo

confuso de dados e resultados inconclusivos sobre o progresso da sustentabilidade. Assim, o Barômetro da Sustentabilidade é uma ferramenta gráfica que analisa de forma qualitativa no cunho ambiental e social, conforme a Figura 13.

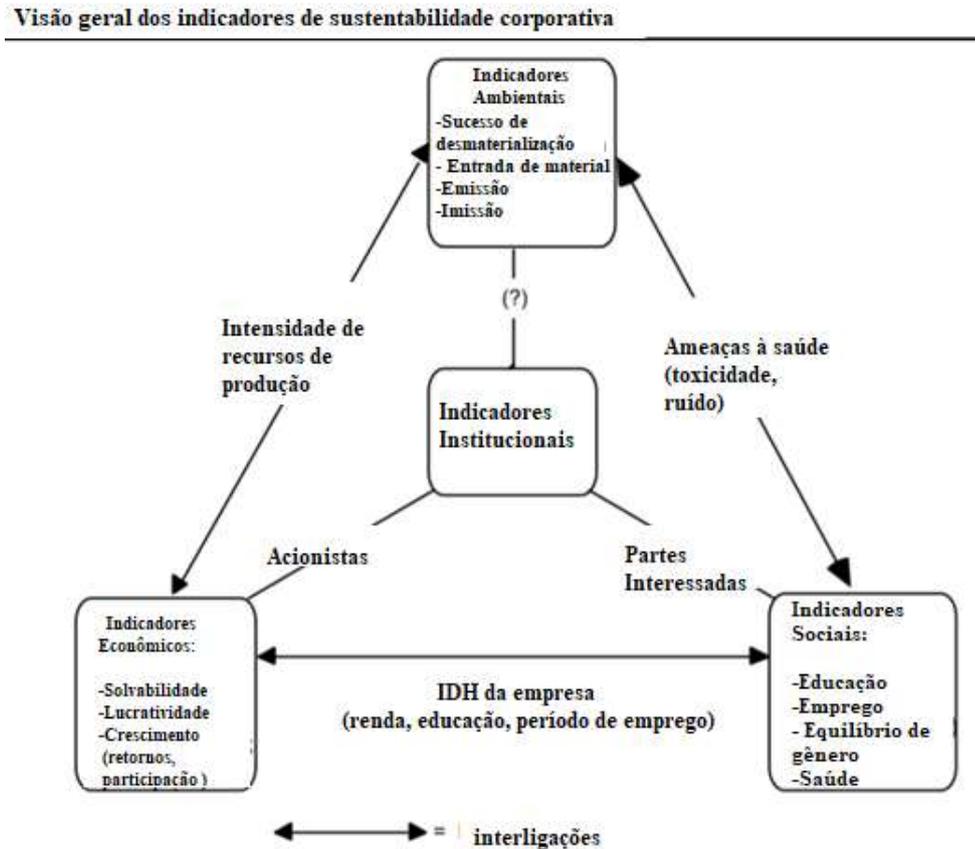
Figura 13- Barômetro da sustentabilidade



Fonte: Traduzido de Prescott-Allen, 1997

Em seguida, Spangenberg e Bonniot (1998) definiram que os critérios sociais, ambientais e econômicos devem ser tratados com importância igualitária e não desassociados. Através do sistema nomeado de “*interlinkage indicators*”, que analisa de forma macro as políticas integradas e a nível micro os indicadores semelhantes aos do Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), elaborado pelo Programa das Nações Unidas e Desenvolvimento (PNUD), foi construída a tríade que engloba as áreas econômica, social e ambiental descrita na Figura 14:

Figura 14- Interligação de indicadores



Fonte: Traduzido de Spangenberg e Bonniot, 1998

Logo, surgem avaliações de sustentabilidade e estabelecimento de indicadores para temas específicos, como em Parris (2001) que realiza um estudo voltado à agricultura. Nesse, fica demonstrado que a escolha metodológica pode proporcionar resultados mais assertivos, quando os indicadores utilizados pertencem a um nicho. Foram citados, como exemplo, os selecionados para uma avaliação de sistemas de cultivo: o controle de nutrientes do solo, impacto do uso de pesticidas, eficiência de irrigação, etc.

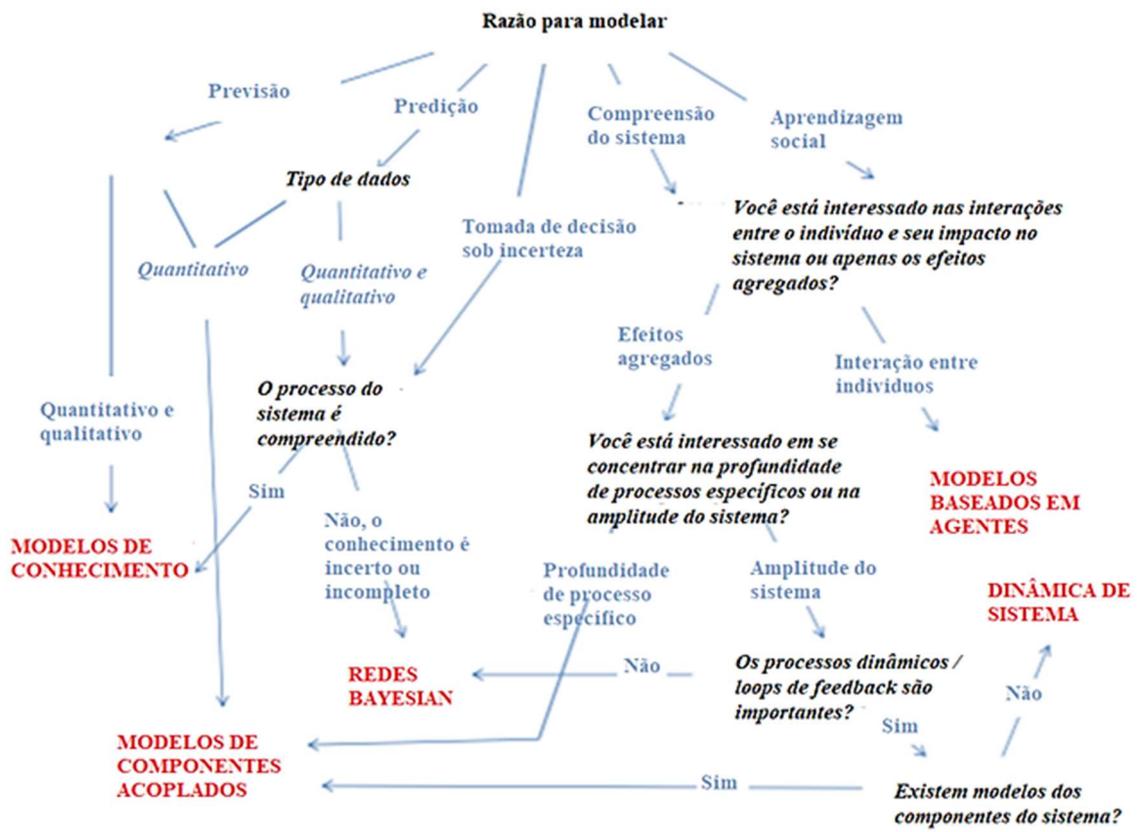
Lawrence *et al.* (2003) realizou a estruturação do Índice de Pobreza de Água (WPI) e classificaram países/comunidades através de fatores físicos e socioeconômicos associados ao tema de Escassez de Água. Nesse, foi utilizada a metodologia “*WPI Quadrant*”, que integra 5 indicadores (Recursos, Acesso capacidade, Uso e Meio Ambiente) de forma a ranquear os países e, assim, orientar a distribuição de recursos internacionais para combate à causa da pobreza hídrica.

Esty e Porter (2005) realizaram uma análise empírica sobre as políticas de sustentabilidade utilizada por diversos países, através da intersecção de variáveis como: PIB/pessoa, gastos

gerais do governo, investimento fixo bruto e índice regulatório ambiental. Nesse, os resultados mostram que os países que aplicaram uma regulamentação ambiental rigorosa tenderam a crescimentos econômicos expressivos. Os autores evidenciaram, portanto, a necessidade de fomento ao desenvolvimento “limpo”, do uso de modelos estatísticos/matemáticos robustos e de uma maior disponibilidade de dados ambientais, a fim de tratar problemas ambientais com evidências, objetividade e promover o desenvolvimento sustentável.

Ainda se tratando de robustez matemática, o apoio de *softwares* é enaltecido no trabalho de Letcher *et al.* (2013), pontuando a modelagem ambiental como “uma ferramenta útil para analisar alternativas com os *stakeholders*, avaliar e comunicar os resultados de forma transparente”. Ademais, a dinamicidade de dados do meio ambiente e a constante modificação dos ecossistemas podem ser previstas ou adaptadas pelos modelos matemáticos. O artigo analisou cinco ferramentas: a dinâmica de sistemas, as redes bayesianas, os modelos de componente acoplado, os modelos baseados em agentes e modelos baseados em conhecimento. O resultado foi estruturado em uma “árvore de decisão” (Figura 15), que orienta o usuário a definir qual modelo é mais adequado ao problema ambiental em questão.

Figura 15- Árvore de decisão para modelagem ambiental



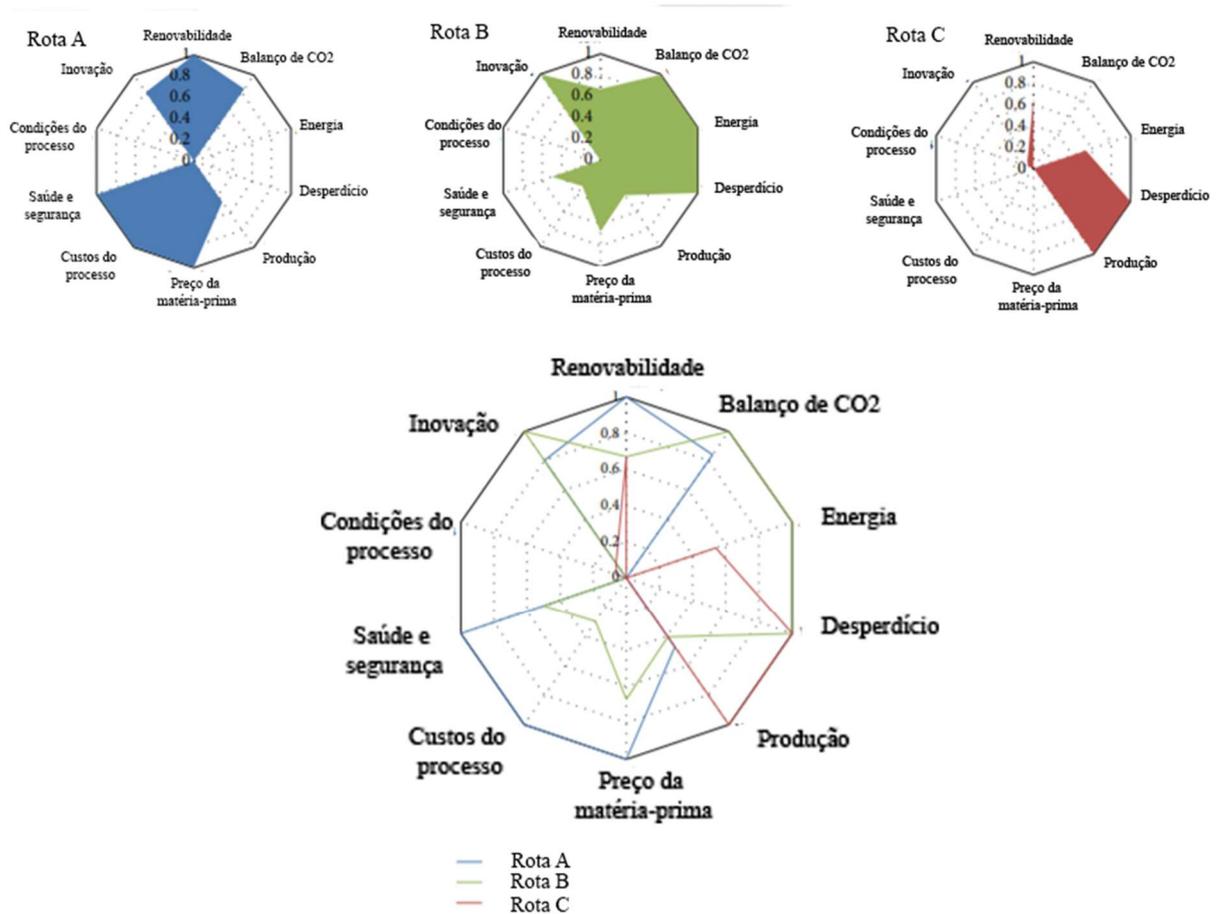
Fonte: Traduzido de Letcher *et al.*, 2013

Juwana *et al.* (2012) realizaram uma revisão da literatura perante a avaliação da sustentabilidade dos recursos hídricos baseada em indicadores, reunindo nessa as principais definições de desenvolvimento sustentável e conceitos mais específicos das últimas décadas. Assim, exploram os artigos e metodologias mais utilizadas, definindo os principais elementos que devem ser considerados para a análise de sustentabilidade. São estes: I) A seleção de componentes e indicadores; II) A obtenção de valores de subíndices; III) Obtenção de pesos para os indicadores; IV) Interação de componentes (critérios) e indicadores; V) Análise de robustez do índice e VI) A interpretação do valor final do índice. Apesar de ter sido uma revisão literária para a temática da água, as considerações servem como base para as demais avaliações de sustentabilidade.

Em outro contexto, observa-se no estudo de Saavalainen *et al.* (2015) uma avaliação das rotas de reações de um composto químico através da metodologia baseada em Multicritérios, utilizando indicadores sociais, econômicos e ambientais, a saber: reutilização da matéria-prima, intensidade de energia, geração de resíduos, balanço de CO₂, rendimento, preço da matéria-prima, custos do processo, questões de saúde e segurança da matéria-prima, condições do

processo e potencial de inovação. O desempenho foi avaliado entre 0 a +1, na escala de impactos negativo (0) a positivo (+1), conforme os resultados apresentados na Figura 16, que ilustram de forma didática os benefícios de cada processo para auxiliar a tomada de decisão entre as rotas químicas.

Figura 16- Análise Multicritérios para seleção de melhor rota



Fonte: Traduzido de Saavalainen *et al.*, 2015

Na pesquisa realizada por Melo (2021), foi realizada a avaliação qualitativa de sustentabilidade na produção do bioetanol, de forma comparativa entre a casca do coco e o bagaço da cana-de-açúcar. Os resultados obtidos através de 9 indicadores (emissão de CO₂, emissões não-GEE, uso de água e eficiência; mudança na renda; empregos no setor de bioenergia; incidência de doenças ocupacionais; produtividade; balanço energético e aumento do valor bruto) demonstraram uma maior sustentabilidade social para a casca do coco e maior sustentabilidade ambiental e econômica para o bagaço de cana. Portanto, a análise combinada através do processamento de dados, sinalizou a rota do bagaço como a mais sustentável.

Por outro lado, o trabalho de Leite *et al.* (2018) discutiu as vulnerabilidades dos indicadores de sustentabilidade. No estudo foram observadas fragilidades na concepção conceitual dos indicadores e critérios de escolha das variáveis, além de baixa relevância dos dados e clareza na integração dos pilares ambientais, sociais e econômicos. Consideraram, portanto, que algumas avaliações são “meras listas de dados e variáveis”, por serem iniciativas isoladas e restritas ao contexto local. Dessa forma, a crítica desperta a cautela em obter dados relevantes e analisar a sustentabilidade de forma sistêmica.

No que diz respeito ao tema de Captura e Armazenamento de Carbono (CCS), Stougie *et al.* (2018) realizaram uma avaliação econômica e ambiental da geração energética para fontes fósseis e fontes renováveis. Nesse foram utilizados o método de avaliação exergética, *Total Cumulative Exergy Loss* (TCExL), para a avaliação de sustentabilidade, o *ReCiPe endpoint indicator* e o indicador econômico *Present Worth Ratio*. Os resultados demonstraram que o sistema eólico *offshore* é o melhor no quesito exergético e ambiental, mas no âmbito econômico, a termoelétrica movida a biomassa ganhou destaque. Assim, analisando-se a sustentabilidade e os três pilares, o resultado das usinas termelétricas, com ou sem a tecnologia de CCS, e biomassa foram semelhantes, concluindo a necessidade de pesquisas mais aprofundadas sobre vantagens e desvantagens do CCS.

Wiesberg *et al.* (2019) realizaram a avaliação de sustentabilidade baseada na exergia entre a captura de CO₂ com armazenamento geológico frente ao processo com conversão para metanol. Afirmaram que para mitigar o impacto ambiental causado por gases de efeito estufa em grande escala, o armazenamento geológico é uma alternativa promissora, devido à eficiência do processo que pode se aproximar de 99%. Entretanto, o armazenamento geológico apresenta um baixo retorno econômico quando comparado ao processo de conversão em metanol, visto que este gera um produto de valor e compensa os grandes custos da captura. Assim, o artigo analisa duas rotas de transformação, uma direta e outra indireta, e as compara com o processo de armazenamento. Os resultados favoreceram a hidrogenação direta e a conversão indireta (por meio de bi-reforma do gás natural) para produção de gás de síntese, com eficiências exergéticas de 66,3% e 55,8%, respectivamente, enquanto que a captura e armazenamento de CO₂ obteve apenas 44,8%. Por fim, ressaltaram a dificuldade apresentada pelos processos de síntese em escala e a expansão do uso destas tecnologias, justificam a busca por outras alternativas.

Por último, Tang e You (2017) empregaram a metodologia MCDA na avaliação de incineradoras de resíduos sólidos urbanos, com e sem a tecnologia de captura de carbono. Os resultados obtidos mostraram que a aplicação de CCS reduziu os impactos ao ecossistema e à

saúde humana, mas aumentou o uso de recursos a um custo entre U\$ 33,45 e 45,98 por tonelada de CO₂ evitado. Logo, tal metodologia sistemática demonstrou capacidade de identificar a melhor opção, entre um conjunto de alternativas e orientar a tomada de decisão.

Em síntese, o Quadro 1 apresenta o estado da arte dos indicadores disposto na literatura, com destaque para os trabalhos de Choptiany e Pelot (2014) e Tang e You (2017).

Quadro 1- Estado da arte de indicadores de sustentabilidade

| ANO | AUTORES | TEMA/TÍTULO |
|------|---------------------------|---|
| 1997 | Prescott-Allen | “Barômetro da sustentabilidade”: medindo e comunicando o bem-estar e o desenvolvimento sustentável. |
| 1998 | Spangenberg e Bonniot | Indicadores de sustentabilidade: uma bússola no caminho para a sustentabilidade. |
| 2001 | Parris K | Elaboração de indicadores agrícolas específicos, no contexto do trabalho da OCDE sobre indicadores agroambientais. |
| 2003 | Lawrence <i>et al.</i> | O Índice de Pobreza de Água (WPI) e integra 5 indicadores (Recursos, Acesso, Capacidade, Uso e Meio Ambiente) ranqueando países quanto a causa da pobreza hídrica. |
| 2005 | Esty e Porter: | A análise empírica sobre as políticas de sustentabilidade utilizada por diversos países, através da intersecção de variáveis através de modelos estatísticos/matemáticos: PIB/pessoa, Gastos Gerais do Governo, Investimento Fixo Bruto e Índice Regulatório Ambiental. |
| 2012 | Juwana <i>et al.</i> | Define os principais elementos que devem ser considerados em uma análise de sustentabilidade: I) A seleção de componentes e indicadores; II) A obtenção de valores de subíndices; III) Obtenção de pesos para os indicadores; IV) Interação de componentes (critérios) e indicadores; V) Análise de robustez do índice e VI) A interpretação do valor final do índice |
| 2013 | Letcher <i>et al.</i> | Modelagem matemática em cinco ferramentas, orientando a escolha do usuário através da “árvore de decisão” |
| 2014 | Choptiany e Pelot | Desenvolveram um modelo de avaliação de sustentabilidade e risco usando uma abordagem multicritérios (MCDA) para tecnologia de CCS |
| 2015 | Saavalainen <i>et al.</i> | Avaliação das rotas de reações de um composto químico através da metodologia baseada em multicritérios, utilizando indicadores sociais, econômicos e ambientais. |
| 2017 | Tang e You | Aplicaram a metodologia MCDA para avaliar incineradoras de resíduos sólidos urbanos com e sem a tecnologia de captura de carbono. |
| 2018 | Stougie <i>et al</i> | Avaliação da sustentabilidade ambiental, econômica e exergética da geração de energia a partir de fontes de energia fóssil e renovável, comparando cenários com e sem tecnologias de CCS. |
| 2019 | Wiesberg <i>et al</i> | Desenvolveram a Avaliação de Sustentabilidade baseada na Exergia entre a Captura de CO ₂ com Armazenamento Geológico versus o processo com Conversão para metanol |
| 2021 | Melo, L. P | Realizou a avaliação qualitativa de sustentabilidade na produção do bioetanol, de forma comparativa entre a casca do coco e o bagaço da cana-de-açúcar. |

Fonte: Autor, 2023

3.5. Análise da Decisão Multicritérios (MCDA)

Os primeiros estudos envolvendo decisões por multicritérios, do inglês “*Multi-criteria Decision*” (MCD) datam da década de 70, com o trabalho de Seiford (1979) que enfatizou a capacidade de resolver problemas com mais de um critério e diversos parâmetros através da programação linear. Culminou em uma modelagem do problema e resultados mais realistas, além da visualização de interferências externas em um determinado problema e redução da margem de erros.

No mesmo ano, Zionts (1979) introduziu a metodologia denominada por “*Multi Criteria Decision Making*” (MCDM) ou Método de Decisão Multicritério, definida por ser capaz de resolver problemas com diversos objetivos conflitantes de maneira matemática. Para tal, utiliza uma estrutura baseada em 3 suposições:

- I. Existe um conjunto fixo de alternativas, no qual uma deve ser escolhida;
- II. Existe um tomador de decisão, que conhece as alternativas e escolhe uma delas;
- III. A alternativa selecionada é, em certo sentido, ótima ou a melhor opção.

Dessa forma, a natureza do problema deve ser descoberta e, nesse processo, várias alternativas são geradas, as quais são o resultado de sessões criativas e iterativas. Embora se tente considerar todas as alternativas, raramente há uma situação em que realmente todas sejam aplicáveis.

A rigor, a metodologia “*Multi-criteria decision analysis/aid*” (MCDA) se diferencia da MCDM pelo acréscimo do caráter subjetivo, sendo, portanto, uma técnica quali-quantitativa com abordagens exploratórias e modelos quantitativos estruturados com funções-objetivo e programação linear. Assim, a análise multicritério estuda formas de orientar o ser humano, enquanto decisor, a encontrar a solução ótima na presença de incertezas e conflitos de interesses. Normalmente, um único ponto de vista é insuficiente para incluir toda a informação necessária e todas as contradições inerentes ao problema. Logo, é clara a importância de haver vários critérios e mais de um tomador de decisão, os quais devem ser especialistas e conhecer profundamente o problema em questão (NORONHA, 2001 e PARREIRAS, 2006).

Dutra (2003) complementa, na mesma perspectiva, quando afirma que o MCDM consiste em alternativas bem definidas, rígidas e com única solução ótima para o processo, enquanto que a MCDA assume o aperfeiçoamento durante o processo e elenca possibilidades de soluções.

No quesito qualitativo, a abordagem exploratória e o *brainstorming* seguem os princípios introduzidos por Alex F. Osborn em 1953, definidos como uma técnica de resolução de problemas em grupo que envolve a contribuição espontânea de ideias de todos os membros do grupo e líderes, que posteriormente serão classificadas e selecionadas de acordo com sua viabilidade (BESANT, 2016).

Em termos quantitativos, tem-se a pesquisa operacional (PO), função-objetivo e programação linear. De acordo com Hillier e Lieberman (2013), a PO é aplicada para conduzir operações, englobando a coleta de dados, construção do modelo matemático que traduza a essência do problema e, por fim, experimentações para testar as hipóteses e por fim validar o modelo para o problema real.

Através do estudo de Vincke (1986), a MCDA foi classificada em três grupos: i) programação matemática multiobjetivo, que busca otimizar a função-objetivo e modelagem do problema para encontrar a melhor solução; ii) teoria da utilidade multi-atributo, que busca agregar diferentes critérios em uma única função-utilidade; iii) e os métodos sobre classificação, como o Processo Analítico Hierárquico (AHP), com o propósito de organizar os critérios em hierarquia definida pelos especialistas e grupo decisor (CAMPOS, 2001). As etapas da MCDA são:

- A. Estruturar o problema a ser resolvido;
- B. Modelar as possibilidades de solução;
- C. Agregar as equações;
- D. Fazer as recomendações e possíveis soluções.

Ressalta-se que a tomada de decisão (DM) não é unicamente racional, deve ser levado em consideração o contexto e demais fatores políticos, econômico, sociológico, cultural, fisiológico, de emergência e tempo, o tipo de decisão e considerações ambientais (GUITOUNI e MATERL, 1997).

Assim, a MCDA pode ser enquadrada em categorias:

- a) Compensatórios: quando a boa performance de um critério pode estar atrelada à má performance de outro menos importante;
- b) Não-compensatório: quando considera todos critérios importantes suficiente para não existir compensação;

- c) Parcialmente compensatório: é a categoria mais recorrente, quando existem algumas compensações entre os critérios, da forma mais sutil possível, para tornar exequível o método.

Tendo em vista as diretrizes reportadas, a metodologia selecionada neste trabalho pode ser considerada parcialmente compensatória e teve como base, o método de multicritérios validado e desenvolvido por Choptiany *et al.* (2014) para as tecnologias de Captura e Armazenamento de Carbono, com o objetivo de obter resultados assertivos para a temática desta pesquisa.

3.6. A MCDA na avaliação de tecnologias CCS

Choptiany *et al.* (2014) desenvolveram um modo de avaliação de sustentabilidade usando uma abordagem multicritérios (MCDA) para analisar indicadores relacionados à tecnologia de CCS, como: armazenamento de CO₂, custo de captura, redução do aquecimento global, dentre outros. Ele incorpora elementos de ACV, ACB, MCDA, incertezas de medidas, funções utilitárias, simulação de Monte-Carlo, dentre outros, para ranquear as alternativas e auxiliar tomadas de decisões.

A metodologia foi desenvolvida com o objetivo de ser flexível, de fácil uso para o decisor e passível de integrar eventuais alterações de dados. Para esse fim, segmentaram os indicadores em 4 subáreas (Ambiental, Social, Econômica e Engenharia), com critérios específicos para cada, vide Quadro 2.

Quadro 2- Critérios utilizados em estudos de tecnologias CCS

| Área | Critérios |
|------------|--|
| Ambiental | Potencial de Aquecimento Global (GWP), Eutrofização (EP) e Toxicidade Humana (HTP) |
| Social | Percepção pública da tecnologia de CCS, Conhecimento do que é o CCS, Impacto na saúde percebido |
| Econômica | Custo de captura, Custo de Transporte, Custo de Armazenamento |
| Engenharia | Potencial de Armazenamento, Receita (\$) proveniente da Recuperação de Petróleo Aprimorada (EOR) |

Fonte: Adaptado de Choptiany *et al.*, 2014

Para que os autores obtivessem os valores de entrada, foram selecionados cenários realistas de projetos em Alberta e Saskatchewan, ambos no Canadá, denominados Projeto A e Projeto B, respectivamente (Tabela 1). Em sequência, para definição dos valores dos critérios sociais, foram necessárias pesquisas de opinião públicas, para o Cenário A, e revisão da literatura, para o Cenário B. Assim, os parâmetros de cada projeto foram estruturados conforme a Tabela 2 e Tabela 3

Tabela 1- Parâmetros dos projetos A e B

| Parâmetros de Projeto | Projeto A | Projeto B |
|--|---------------------------------|---------------------------------|
| Tecnologia de Captura | Tecnologia de pós-combustão A | Tecnologia de pós-combustão B |
| Potência da Usina | 500 MW | 500 MW |
| Distância de transporte de CO ₂ | 50 km | 100 km |
| Tipo de armazenamento | Campo de petróleo depletado “A” | Campo de Petróleo depletado “B” |
| Configuração geográfica | Rural (Alberta) | Rural (Saskatchewan) |
| Vida útil do projeto | 40 anos | 40 anos |

Fonte: Adaptado de Choptiany *et al.*, 2014

Tabela 2- Base de dados do projeto A

| Área | Critérios | Valores dos critérios | Unidades |
|------------|--|-----------------------|--|
| Ambiental | Potencial de Aquecimento Global (GWP) | 0,159 | Redução % gCO ₂ -eqv/kWh |
| | Eutrofização (EP) | -0,127 | Redução % gPO ₄ ³⁻ -eqv/kWh |
| | Toxicidade Humana (HTP) | 0,018 | Redução % em anos perdidos |
| Social | Percepção pública da tecnologia de CCS | 0,520 | 0-1 |
| | Conhecimento do que é o CCS | 0,314 | 0-1 |
| | Impacto na Saúde percebido | 0,453 | 0-1 |
| Econômica | Custo de Captura | 85,54 | \$/tCO ₂ |
| | Custo de Transporte | 4,5 | \$/tCO ₂ |
| | Custo de Armazenamento | 8,15 | \$/tCO ₂ |
| Engenharia | Potencial de Armazenamento | 29 | Mt |
| | Receita proveniente da (EOR) | 32,57 | \$/tCO ₂ |

Fonte: Adaptado de Choptiany e Pelot, 2014

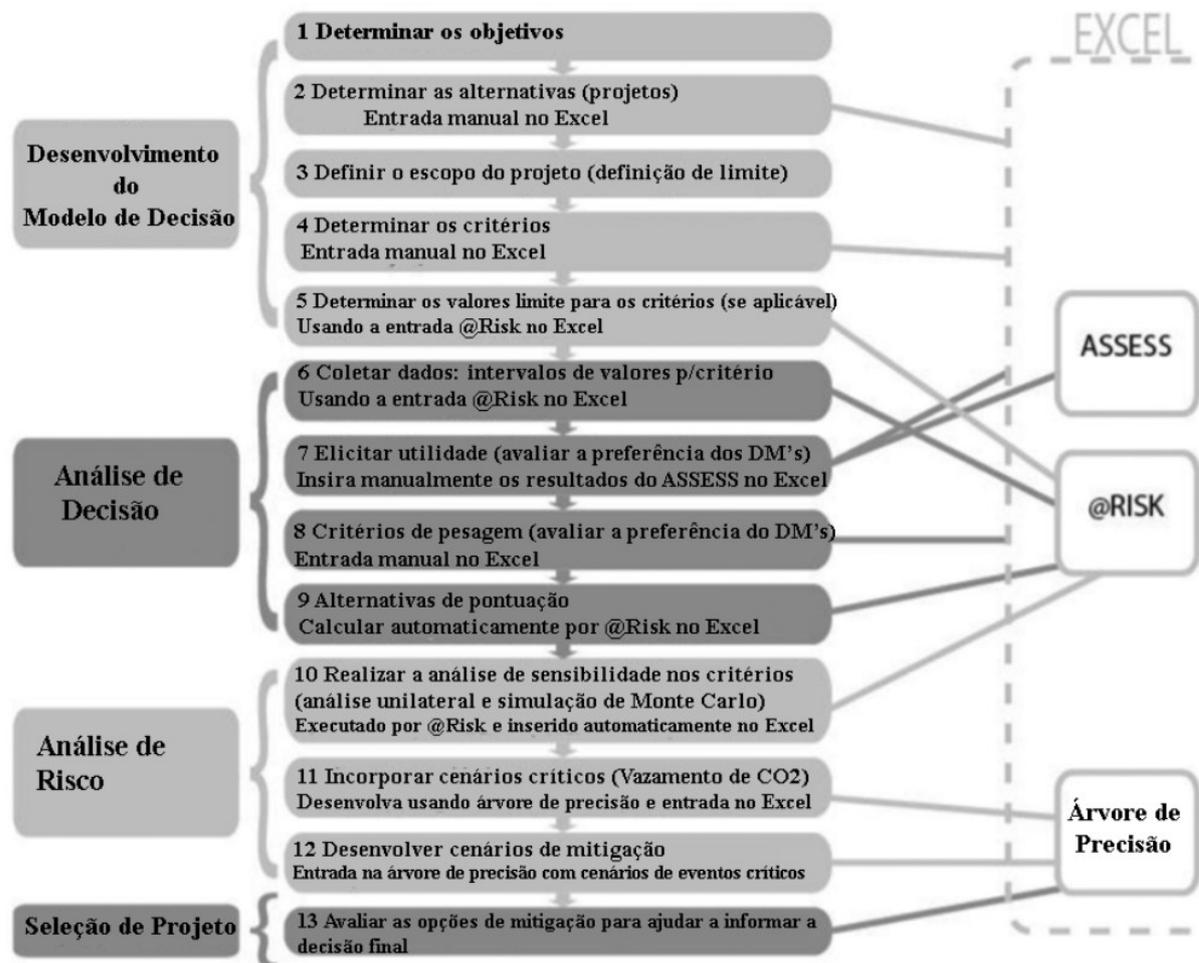
Tabela 3- Base de dados do Projeto B

| Área | Critérios | Valores dos critérios | Unidades |
|------------|--|-----------------------|--|
| Ambiental | Potencial de Aquecimento Global (GWP) | -0,043 | Redução % gCO ₂ -eqv/kWh |
| | Eutrofização (EP) | -0,498 | Redução % gPO ₄ ³⁻ -eqv/kWh |
| | Toxicidade Humana (HTP) | 0,503 | Redução % em anos perdidos |
| Social | Percepção pública da tecnologia de CCS | 0,448 | 0-1 |
| | Conhecimento do que é o CCS | 0,376 | 0-1 |
| | Impacto na Saúde percebido | 0,398 | 0-1 |
| Econômica | Custo de Captura | 70,82 | \$/tCO ₂ |
| | Custo de Transporte | 1,97 | \$/tCO ₂ |
| | Custo de Armazenamento | 5,67 | \$/tCO ₂ |
| Engenharia | Potencial de Armazenamento | 26 | Mt |
| | Receita proveniente da (EOR) | 37,91 | \$/tCO ₂ |

Fonte: Adaptado de Choptiany e Pelot, 2014

De posse dos critérios e valores de entrada, os mesmos autores executaram o modelo ora desenvolvido, o qual foi dividido em um total de 13 (treze) etapas distribuídas entre os 4 (quatro) estágios, ilustrados na Figura 17.

Figura 17- Estágios e etapas do MCDA para CCS



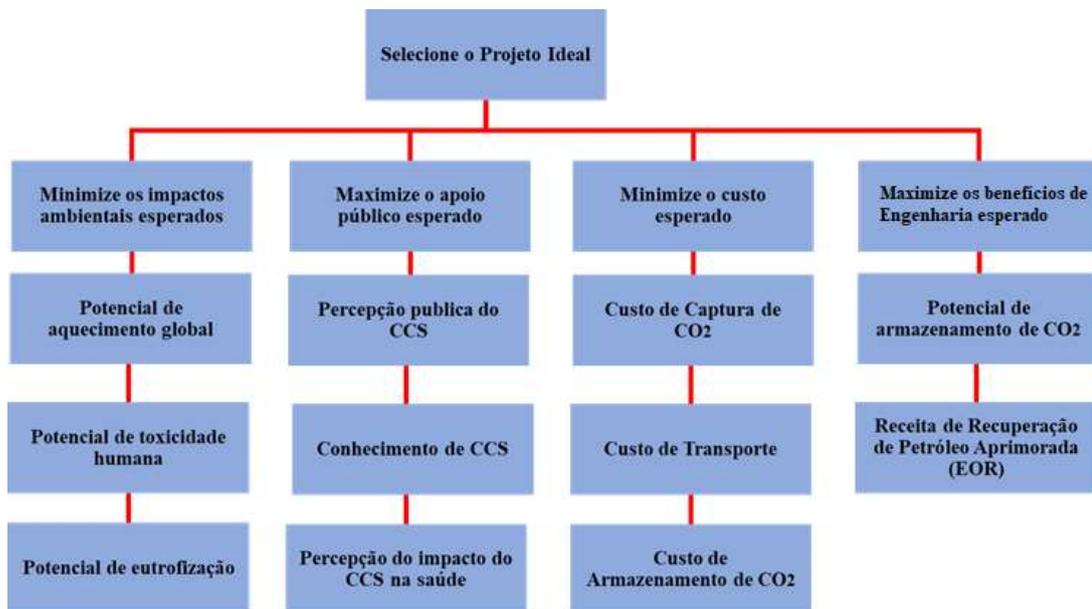
Fonte: Traduzido de Choptiany e Pelot, 2014

Os autores ressaltaram ainda que o modelo deve ser executado em ordem, de forma iterativa, ou seja, progredindo através de tentativas sucessivas de refinamento. Para tal, utilizaram 4 *softwares* integrados: *Excel*, *ASSESS*, *@Risk* e *Precision Tree*. O Excel foi a interface principal e a base do sistema de modelagem, que se integrou com as extensões *@Risk* (para determinar os limites e a sensibilidade dos critérios) e a *Precision Tree* (para incorporar eventos críticos e cenários de mitigação), enquanto que as funções utilitárias foram geradas pelo *ASSESS* e deveriam ser inseridas manualmente no sistema (CHOPTIANY e PELOT, 2014). A interface dos programas pode ser observada no ANEXO A.

Nesse viés, o Estágio 1 (Desenvolvimento do Modelo de Decisão) engloba 5 etapas: a 1ª e fundamental etapa é a definição do objetivo da avaliação, de forma acordada entre os especialistas e consultores do projeto, com auxílio da hierarquia estabelecida na Figura 18 -

nesse artigo, o objetivo foi “avaliar e escolher o melhor projeto de CCS dentre as opções”; a 2ª etapa organiza os dados obtidos dos cenários a serem modelados; na 3ª etapa o usuário deve determinar o escopo do projeto; na 4ª etapa determinar os critérios, juntamente com os *stakeholders*, e inserir manualmente estes valores no Excel; e por último, está a 5ª etapa, que é opcional e serve para delimitar os valores dos critérios utilizando o @RISK.

Figura 18- Hierarquia dos principais objetivos e subobjetivos para o estágio 1



Fonte: Adaptado de Choptiany e Pelot, 2014

Já no Estágio 2 (Análise de Decisão), a Etapa 6 consiste em coletar os dados e determinar o alcance para cada critério utilizando o @RISK. Na etapa seguinte (7ª), deve-se calcular as equações de utilidades utilizando o ASSES e inserir o resultado no Excel. Nas etapas 8 e 9 se estabelecem os pesos e são calculadas, através do @RISK, a pontuação das alternativas.

Por fim, os valores dos critérios selecionados pelos tomadores de decisão podem ser corrigidos pela curva de utilidade através da extensão ASSES. Assim, os resultados após as correções foram organizados pelos autores para cada projeto (A e B), vide Figura 19.

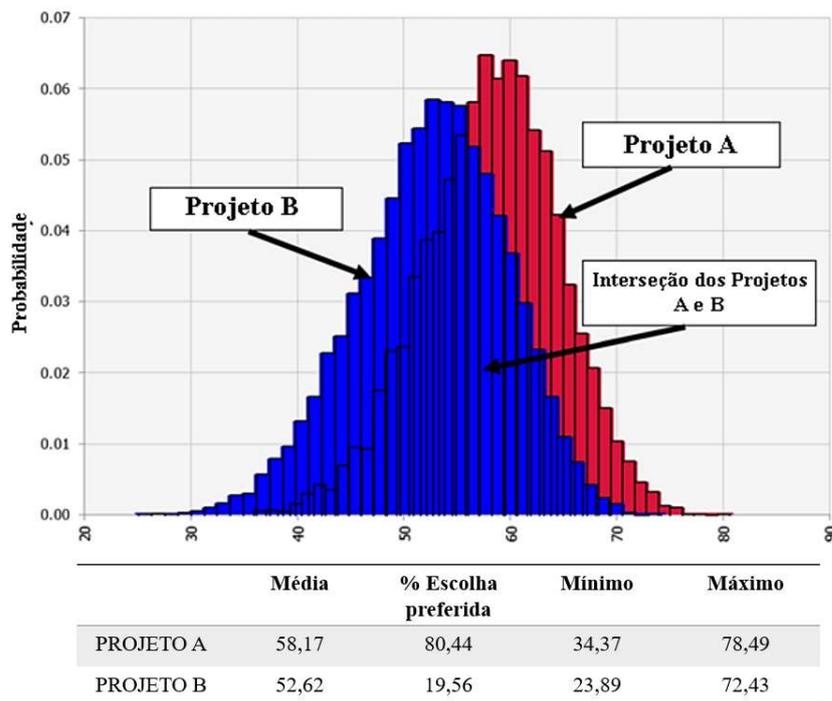
Figura 19- Resultados obtidos com a MCDA, para fins comparativos entre os projetos A e B, conforme estágio 2

| Projeto A | | | | | | | |
|-------------------|--|-----------------------|---|---------------|-------|---------|-----------|
| Área | Critérios | Valores dos critérios | Unidades | Eq.Utilidade | Pesos | Limites | Critérios |
| Ambiental | Potencial de Aquecimento Global (GWP)-A | 0,159 | Redução Percentual de gCO2- eqv/kWh | 0,428 | 20 | 0,5 | 8,57 |
| | Eutrofização (EP)-A | -0,127 | Redução Percentual de gPO43=eqv/kWh | 0,472 | 5 | 0 | 2,36 |
| | Toxicidade Humana (HTP)-A | 0,018 | Redução Percentual em anos de vidas perdidos | 0,363 | 5 | 0 | 1,82 |
| Social | Percepção pública da tecnologia de CCS-A | 0,52 | 0-1 | 0,763 | 25 | 0,02 | 19,06 |
| | Conhecimento do que é o CCS-A | 0,314 | 0-1 | 0,410 | 4 | 0,1 | 1,64 |
| | Impacto na saúde percebido-A | 0,453 | 0-1 | 0,773 | 5 | 0,05 | 3,86 |
| Econômica | Custo de captura-A | 85,54 | (EUR/t CO2) | 0,342 | 15 | 110 | 5,13 |
| | Custo de Transporte-A | 4,5 | (EUR/t CO2) | 0,393 | 3 | 7 | 1,18 |
| | Custo de Armazenamento-A | 8,15 | (EUR/t CO2) | 0,244 | 3 | 9 | 0,73 |
| Engenharia | Potencial de Armazenamento-A | 29 | Gt | 0,816 | 10 | 23 | 8,16 |
| | Receita \$ proveniente da Recuperação de Petróleo Aprimorada (EOR)-A | 32,57 | (EUR/t CO2) | 0,45 | 5,00 | 5,00 | 2,23 |
| | | | | | 100 | | 54,75 |
| Projeto B | | | | | | | |
| Área | Critérios | Valores dos critérios | Unidades | Eq. Utilidade | Pesos | Limites | Critérios |
| Ambiental | Potencial de Aquecimento Global (GWP) - B | -0,043 | Redução Percentual de gCO2- eqv/kWh | 0,309 | 20 | 0,5 | 6,17 |
| | Eutrofização (EP) | -0,498 | Redução Percentual de gPO43=eqv/kWh | 0,201 | 5 | 0 | 1,01 |
| | Toxicidade Humana (HTP) -B | 0,503 | Redução Percentual em anos de vidas perdidos | 0,881 | 5 | 0 | 4,41 |
| Social | Percepção pública da tecnologia de CCS, | 0,448 | 0-1 | 0,655 | 25 | 0,02 | 16,38 |
| | Conhecimento do que é o CCS -B | 0,376 | 0-1 | 0,591 | 4 | 0,1 | 2,36 |
| | Impacto na saúde percebido- B | 0,398 | 0-1 | 0,653 | 5 | 0,05 | 3,26 |
| Econômica | Custo de captura - B | 70,82 | (EUR/t CO2) | 0,838 | 15 | 110 | 12,58 |
| | Custo de Transporte -B | 1,97 | (EUR/t CO2) | 0,918 | 3 | 7 | 2,75 |
| | Custo de Armazenamento-B | 5,67 | (EUR/t CO2) | 0,765 | 3 | 9 | 2,30 |
| Engenharia | Potencial de Armazenamento -B | 26 | Gt | 0,239 | 10 | 23 | 2,39 |
| | Receita \$ proveniente da Recuperação de Petróleo Aprimorada (EOR)- B | 37,91 | (EUR/t CO2) | 0,69 | 5,00 | 5,00 | 3,45 |
| | | | | | 100 | | 57,22 |

Fonte: Adaptado de Choptiany e Pelot, 2014

Iniciando o Estágio 3 (Análise de Riscos) vem a Etapa 10, que busca analisar a sensibilidade dos critérios, fazendo uso da extensão *@RISK*. O Estágio 4 (Seleção de Projeto), de etapa única, busca avaliar as opções de mitigação e informar a maior pontuação obtida e qual é o cenário preferencial. O resultado, fruto da execução do modelo por Choptiany e Pelot (2014), foi revelado através da sobreposição dos gráficos na Figura 20.

Figura 20- Ilustração do resultado obtido com a MCDA aplicada aos projetos A e B



Fonte: Traduzido de Choptiany e Pelot, 2014

Em conclusão, a ferramenta *@RISK* como uma extensão não-inata ao Excel, faz uso intrínseco da simulação de Monte-Carlo traduzido na forma de planilhas, a fim de realizar simulações, previsões e otimizações. Tem importância por subsidiar a tomada de decisão a partir da geração de um cenário estatístico. Por exemplo, os autores demonstraram que o Projeto A seria o preferido, pois sua distribuição de probabilidade de pontuações é significativamente maior do que as pontuações do Projeto B, mesmo que os resultados dos somatórios da Figura 19 indique o oposto. Ademais, a chance do Projeto B pontuar mais do que o Projeto A foi de apenas 19,56%.

4. METODOLOGIA

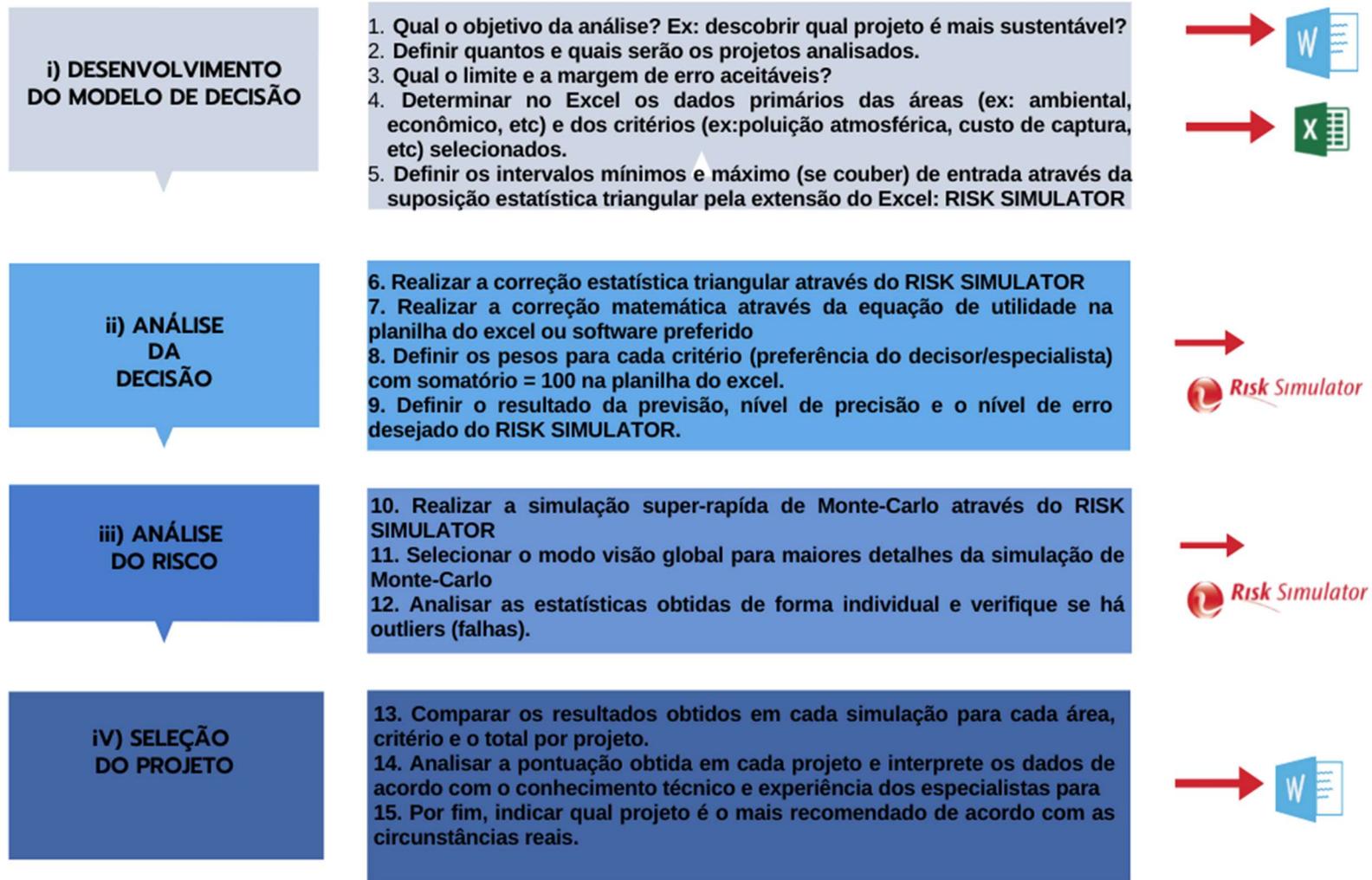
A pesquisa possui caráter exploratório e descritivo e consiste na construção de uma análise comparativa através de dados obtidos por revisão bibliográfica, patentes e dados de projeto fornecidos pela *Startup* DeCARB.

Partindo da caracterização das tecnologias CCS (item 3.3) de interesse desta dissertação, por suas particularidades técnicas e pela disponibilidade quali-quantitativa de dados e informações oficiais publicadas pelas empresas, esta seção inicia descrevendo a elucidação do método para avaliação da sustentabilidade (item 4.1), a MCDA e suas etapas. Na sequência, demonstra-se a validação da MCDA (item 4.2) e como se dará a aplicação ao estudo de caso, ou seja, a aplicação da MCDA à avaliação das tecnologias (item 4.3), a fim de viabilizar a interpretação dos resultados obtidos e a proposta de melhorias à tecnologia SiCSeGE da DeCARB. Por fim, aborda-se a definição dos indicadores de sustentabilidade (item 4.3.1) e a obtenção dos dados de entrada (item 4.3.2).

4.1. Metodologia para avaliação da sustentabilidade

Na metodologia de avaliação da sustentabilidade via MCDA foram definidos quatro estágios: i) Desenvolvimento do Modelo de Decisão, ii) Análise de Decisão, iii) Análise de Risco e iv) Seleção do Projeto. Para auxiliar a compreensão, as etapas foram estruturadas no fluxograma da Figura 21.

Figura 21- Etapas da metodologia MCDA



Isso significa que, para desenvolver o modelo decisório, inicialmente, se fez necessário determinar o objetivo esperado pelas partes interessadas (*stakeholders*). Em seguida, definir quais são as alternativas existentes de projetos e que dispõem de dados para comparação. Uma vez selecionados, devem ser estabelecidos o escopo do projeto de interesse a ser avaliado e sua tecnologia concorrente, através de parâmetros multicritérios que contemplem as diversas áreas: ambientais, sociais, econômicos e de engenharia.

Esclarecido isto, é necessário realizar a obtenção de dados, seja por revisão bibliográfica, testes laboratoriais, pesquisas de opinião pública ou patentes. Uma vez que os dados foram levantados, devem ser estabelecidos os limites admissíveis em cada critério e, assim, inserir esse banco de dados manualmente numa planilha do Excel, na coluna intitulada de “valores dos critérios”.

Em sequência, para realizar o estágio ii) Análise de Decisão, devem ser definidos os valores de entrada para cada valor de critério, através do *software* RISK Simulator, conforme explicitado em detalhe no APÊNDICE B. Ressalta-se que, no campo de mínimo e máximo, o usuário pode inserir de forma manual, se assim desejar, os valores mínimos e máximos de acordo com seus parâmetros.

Posteriormente, o usuário deve corrigir os valores dos critérios através das equações de utilidade desenvolvidas no estudo de Choptiany *et al.* (2014), de forma que uma nova coluna deve ser criada no Excel. Em seguida, os especialistas e tomadores de decisões (*decision makers*) devem ser consultados, para estabelecer os pesos dos critérios e assim inserir manualmente no Excel as preferências definidas.

Desta maneira, é possível gerar as alternativas de pontuação através da previsão do RISK Simulator, de acordo com o nível de precisão desejado e margem de erro aceitável. Por fim, deve ser executada a simulação, para que possa concluir a etapa iii) Análise de Risco.

Essas etapas devem ser reproduzidas para cada critério de forma manual ou através da função copiar e colar, disponível na barra de ferramentas da extensão do Excel. Uma vez que tenha sido realizada a análise de risco para todos os critérios, é possível comparar os resultados totais das alternativas elucidadas, dos projetos de interesse.

4.2. Validação da MCDA

Os *softwares* empregados por Choptiany *et al.* (2014) são aplicações comerciais, com licenças custosas, o que inviabilizaria o desenvolvimento da presente pesquisa empregando o ASSESS e @Risk. A alternativa utilizada aqui foi o uso de licença teste não-limitante, que disponibiliza todas as ferramentas, sobretudo o RISK Simulator. Contudo, sendo plataformas digitais distintas, se tornou necessário verificar a conformidade da substituição dos *softwares* de licença comercial pelo de licença livre, ou seja, reproduzir os resultados obtidos por aqueles pesquisadores à luz do RISK Simulator, em substituição à integração ASSESS e @Risk.

A fim de validar a metodologia explicitada no item 4.1, através dos *softwares* Excel e RISK Simulator, foram reproduzidos os dois cenários (A e B) expostos por Choptiany *et al.* (2014), adotando-se os mesmos critérios para comparação. Assim, os cenários foram baseados nos reservatórios de petróleo depletados em Alberta e Saskatchewan (Canadá), nomeados projeto A (Tabela 2) e projeto B (Tabela 3), respectivamente.

Figura 22- Dados para validação do Projeto A (Alberta)

| Área | Critérios | Valores dos critérios | Unidades | Eq.Utilidade | Pesos | Limites | Critérios |
|-------------------|---|-----------------------|---|--------------|-------|---------|-----------|
| Ambiental | Potencial de Aquecimento Global (GWP)-A | 0,159 | Redução Percentual de gCO ₂ - eqv/kWh | 0,428 | 20 | 0,5 | 8,57 |
| | Eutrofização (EP)-A | -0,127 | Redução Percentual de gPO ₄ -eqv/kWh | 0,472 | 5 | 0 | 2,36 |
| | Toxicidade Humana (HTP)-A | 0,018 | Redução Percentual em anos de vidas perdidos | 0,363 | 5 | 0 | 1,82 |
| Social | Percepção pública da tecnologia de CCS-A | 0,52 | 0-1 | 0,763 | 25 | 0,02 | 19,06 |
| | Conhecimento do que é o CCS-A | 0,314 | 0-1 | 0,410 | 4 | 0,1 | 1,64 |
| | Impacto na saúde percebido-A | 0,453 | 0-1 | 0,773 | 5 | 0,05 | 3,86 |
| Econômica | Custo de captura-A | 85,54 | (EUR/t CO ₂) | 0,342 | 15 | 110 | 5,13 |
| | Custo de Transporte-A | 4,5 | (EUR/t CO ₂) | 0,393 | 3 | 7 | 1,18 |
| | Custo de Armazenamento-A | 8,15 | (EUR/t CO ₂) | 0,244 | 3 | 9 | 0,73 |
| Engenharia | Potencial de Armazenamento-A | 29 | Gt | 0,816 | 10 | 23 | 8,16 |
| | Receita \$ proveniente da Recuperação de Petróleo Aprimorada (EOR)-A | 32,57 | (EUR/t CO ₂) | 0,45 | 5,00 | 5,00 | 2,23 |
| | | | | | 100 | | 54,75 |

Fonte: Autor, 2023

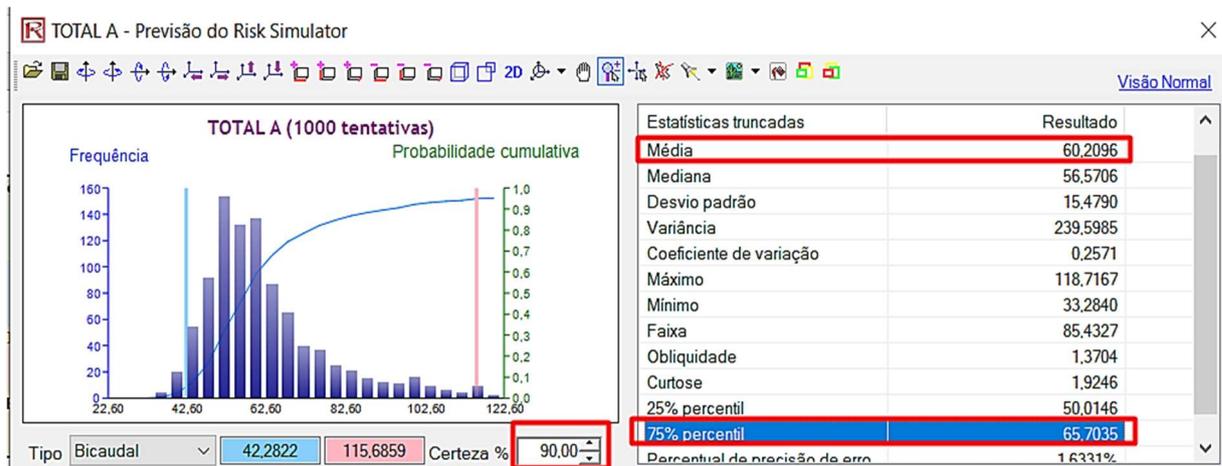
Figura 23- Dados para validação do Projeto B (Saskatchewan)

| Área | Critérios | Valores dos critérios | Unidades | Eq. Utilidade | Pesos | Limites | Critérios |
|-------------------|--|-----------------------|---|---------------|-------|---------|-----------|
| Ambiental | Potencial de Aquecimento Global (GWP) - B | -0,043 | Redução Percentual de gCO ₂ - eqv/kWh | 0,309 | 20 | 0,5 | 6,17 |
| | Eutrofização (EP) | -0,498 | Redução Percentual de gPO ₄ -eqv/kWh | 0,201 | 5 | 0 | 1,01 |
| | Toxicidade Humana (HTP) -B | 0,503 | Redução Percentual em anos de vidas perdidos | 0,881 | 5 | 0 | 4,41 |
| Social | Percepção pública da tecnologia de CCS, | 0,448 | 0-1 | 0,655 | 25 | 0,02 | 16,38 |
| | Conhecimento do que é o CCS -B | 0,376 | 0-1 | 0,591 | 4 | 0,1 | 2,36 |
| | Impacto na saúde percebido- B | 0,398 | 0-1 | 0,653 | 5 | 0,05 | 3,26 |
| Econômica | Custo de captura - B | 70,82 | (EUR/t CO ₂) | 0,838 | 15 | 110 | 12,58 |
| | Custo de Transporte -B | 1,97 | (EUR/t CO ₂) | 0,918 | 3 | 7 | 2,75 |
| | Custo de Armazenamento-B | 5,67 | (EUR/t CO ₂) | 0,765 | 3 | 9 | 2,30 |
| Engenharia | Potencial de Armazenamento -B | 26 | Gt | 0,239 | 10 | 23 | 2,39 |
| | Receita \$ proveniente da Recuperação de Petróleo Aprimorada (EOR)- B | 37,91 | (EUR/t CO ₂) | 0,69 | 5,00 | 5,00 | 3,45 |
| | | | | | 100 | | 57,22 |

Fonte: Autor, 2023

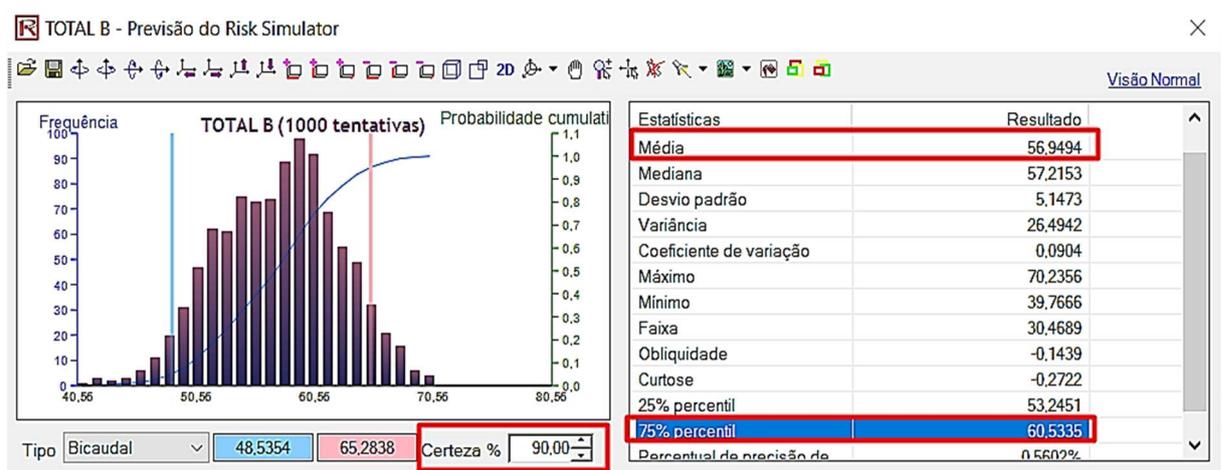
As pontuações totais do Projeto A (54,75 pontos) e do Projeto B (57,05 pontos) apresentaram um erro de 0,0183% e 0,297%, respectivamente, em relação às obtidas nos estudos de Choptiany *et al.* (2014) (conforme apresentou a Figura 19). Além disso, o RISK Simulator dispôs da análise de risco da simulação dos resultados, presente na Figura 23 e 24.

Figura 24- Tela de resultados da simulação do Projeto A



Fonte: Autor, 2023

Figura 25- Tela de resultados da simulação do Projeto B



Fonte: Autor, 2023

Tal qual em Choptiany *et al.* (2014), os resultados obtidos na distribuição de probabilidade - resultados acima de 75% de chance - e com uma certeza de 90%, demonstraram que o somatório dos critérios do projeto A (média 60,2096) é preferencial em relação ao B

(média 56,9494). Portanto, considera-se que a metodologia do presente trabalho foi validada com êxito.

4.3. Aplicação da MCDA à avaliação das tecnologias de interesse

No presente trabalho, é de interesse comparar a tecnologia SiCSeGE (descrita no item 3.3.1) com uma tecnologia diretamente concorrente e com propostas tecnológicas e mercadológicas semelhantes, a exemplo da Carbon Clean (item 3.3.2) e outra concorrente, porém de maior escala e princípio tecnológico distinto, a saber o projeto Direct Air Capture (DAC) da Carbon Engineering (item 3.3.3) para avaliação de sua sustentabilidade. Além disso, através de parâmetros multicritérios - que contemplem as diversas áreas ambientais, sociais, econômicos e de engenharia - identificar oportunidades de melhorias à tecnologia da DeCARB.

4.3.1. Definição de indicadores e obtenção dos dados

A obtenção de dados relativos às tecnologias, indicadores e métricas foi feita através de revisão da literatura disponível no portal da CAPES e contou com o apoio de dados de projetos, determinados através de experimentos realizados pela DeCARB no Laboratório de Tecnologias Ambientais-LATAM/DEAM/UFS.

Além disso, a definição dos indicadores ambientais, econômicos, sociais e de engenharia do presente estudo, foi fundamentada nos critérios e *review* desenvolvido por Choptiany, J. M. H.; Pelot, R. e Sherren, K. (2014), acerca do tema de Avaliação de Captura e Armazenamento de Carbono (CCS). Dessa forma, os indicadores selecionados foram os de maior recorrência dentre os artigos revisados, a saber: o potencial de aquecimento global (GWP), eutrofização (EP), toxicidade humana (HTP), percepção pública da tecnologia de CCS, conhecimento do que é o CCS, impacto percebido na saúde, custo de captura, custo de transporte, custo de armazenamento, potencial de armazenamento global e receita \$ proveniente da recuperação de petróleo aprimorada (EOR), conforme apresenta a Figura 26.

A primeira linha da Figura 26 representa a amostra pesquisada e relacionada ao tema de CCS, com um total de 41 artigos. Já a primeira coluna representa o número de artigos que citaram ou utilizaram os indicadores da referida linha. Ou seja, o critério ambiental “Emissões de CO2/GWP” foi encontrado em 26 dos 41 artigos, já o critério econômico “Armazenamento de EOR” foi encontrado em apenas 7 dos 41 artigos. Assim, o artigo de revisão realizado por Choptiany, J. M. H., Pelot, R. e Sherren, K. (2014) corrobora com a solidez da avaliação de sustentabilidade desta dissertação, uma vez que os índices selecionados estão baseados nos principais critérios empregados em periódicos mundiais.

Além do mais, fica notório a dificuldade em manipular dados sociais, uma vez que foi localizado apenas 1 (um) estudo que integrou os 3 pilares. Basicamente, o que a figura aponta é que alguns trabalhos tiveram vieses econômico-ambiental e econômico-social, em suma, a variável social não foi incluída concomitante ao pilar ambiental.

Tão somente, para corroborar com a literatura e essa escassez, o presente estudo buscou a obtenção dos indicadores sociais, realizou-se pesquisa de opinião pública através de formulário online com público alvo em maioria acadêmicos, profissionais da indústria, professores e servidores públicos. Onde foi definido o universo amostral de 169 respostas, tendo como princípio o que rege a Equação 7:

$$Tamanho\ da\ Amostra = \frac{\frac{z^2 \times p(1-p)}{e^2}}{1 + \left(\frac{z^2 \times p(1-p)}{e^2 N}\right)} \quad \text{Equação 7}$$

Onde,

N = tamanho da população

p= proporção que espera ser encontrada

e= margem de erro (%)

z = pontuação z, definido pelo número de desvios padrão que uma determinada proporção está longe da média. Para encontrar o valor exato, utilizou-se a *Tabela 4*

Tabela 4- Pontuação Z para definir o tamanho da amostra

| Nível de confiança desejado | Pontuação “z” |
|-----------------------------|---------------|
| 80% | 1.28 |
| 85% | 1.44 |
| 90% | 1.65 |
| 95% | 1.96 |
| 99% | 2.58 |

Fonte: Autor, 2023

Entretanto, mesmo disponibilizando o questionário do dia 03/08/2022 ao dia 08/11/2022, foram obtidas 128 respostas, resultando em um nível de confiança aproximado de 87% e com uma margem de erro de $\pm 5\%$.

A seleção de indicadores utilizou como base o *review* de 41 artigos realizado por Choptiany *et al.* (2014), o qual identificou os critérios mais comuns em pesquisas realizadas ao redor do mundo sobre o tema de Captura e Armazenamento de Carbono. Em seguida, realizou-se a seleção dos indicadores de interesse para o presente trabalho, como apresenta a Tabela 5.

Tabela 5- Critérios selecionados para o presente estudo

| Área | Critérios | Unidades |
|------------|--|---|
| Ambiental | Potencial de Aquecimento Global (GWP) | Redução Percentual de $\text{gCO}_2\text{-eq/kWh}$ |
| | Eutrofização (EP) | Redução Percentual de $\text{gPO}_4^{3-}\text{-eq/kWh}$ |
| | Toxicidade Humana (HTP) | Redução Percentual em anos de vidas perdidos |
| Social | Percepção pública da tecnologia de CCS | 0-1 |
| | Conhecimento do que é o CCS | 0-1 |
| | Impacto na saúde percebido | 0-1 |
| Econômica | Custo de captura | (EUR/t CO_2) |
| | Custo de Transporte | (EUR/t CO_2) |
| | Custo de Armazenamento | (EUR/t CO_2) |
| Engenharia | Potencial de Armazenamento Global | Gt |
| | Receita \$ proveniente da Recuperação de Petróleo Aprimorada (EOR) | (EUR/t CO_2) |

Fonte: Autor, 2023

Os dados das áreas ambiental, econômica e de engenharia foram obtidos através da revisão de literatura, do acesso as patentes de sigilo em parceria com a DeCARB, por meio dos sites oficiais e relatórios públicos da Carbon Engineering (CE) e Carbon Clean (CC), assim como foram realizadas pesquisas de opinião pública para a área social. Tais informações foram organizadas e inseridas manualmente no Excel, conforme a Tabela 6.

Seguindo a nomenclatura e definições da Figura 12- Pirâmide da informação ambiental, os dados primários foram obtidos através de: Rotmans e Elzen (1992), Cuéllar-Franca, R. M.,

e Azapagic, A. (2015), Canada Energy Regulator (2022), Carbon Engineering (2018), Carbon Clean Solutions (2017), DeCARB (2022) e demais, conforme detalhado no APÊNDICE A.

Tabela 6- Dados primários para as tecnologias de CCS

| Área | Dados Primários | UNIDADES | DeCARB (Brasil) | C.E. (Canadá) | C.C. (Índia) |
|------------|---|------------------------------------|--------------------|------------------|-----------------|
| | Capacidade de Captura de CO ₂ | (ton CO ₂ /ano.unidade) | 166.805 | 1.000.000 | 60.000 |
| Ambiental | Eficiência Ambiental (emissões mundiais CO ₂ /unidade) | % | 0,00045483 | 0,00272673 | 0,00016360 |
| | Eficiência de Sequestro (CO ₂ capturado/CO ₂ presente no ar ou exaustão) | % | 99 | 75 | 90 |
| | Taxa de melhora da qualidade do ar nacional | % | 0,034885 | 0,170984 | 0,00231 |
| Social | Qual seu nível de conhecimento sobre Captura de Carbono (CCS)? | und | 8,00 | 6,27 | 6,93 |
| | 1) Qual tipo de impacto você acredita que o uso dessa tecnologia pode gerar para o meio ambiente? | und | 7,60 | 7,27 | 7,73 |
| | 2) Qual tipo de impacto você acredita que o uso dessa Tecnologia pode gerar para a saúde do ser humano? | und | 7,60 | 7,33 | 7,27 |
| | 3) O quanto você acredita que esta Tecnologia pode melhorar a qualidade do ar? | und | 7,73 | 7,80 | 8,13 |
| | 4) O quanto você acha que esta Tecnologia é segura contra acidentes? | und | 7,67 | 6,60 | 7,07 |
| | 5) O quanto você confia nos cientistas/especialistas/engenheiros/responsáveis pelo desenvolvimento e pelos projetos desta Tecnologia? | und | 8,40 | 8,20 | 8,67 |
| Econômica | 6) Quanto você apoiaria os investimentos nesta Tecnologia? | und | 8,47 | 6,87 | 7,93 |
| | Custo por unidade | (EUR) | 576.923 | 155.192.300 | 2.856.300 |
| | Custo de Captura Anual | (EUR/ton CO ₂) | 3,46 | 155,19 | 47,61 |
| | Consumo energético | (Kwh/ton CO ₂) | 0,01 | 0,00 | -0,01 |
| | Custo necessário para zerar o CO ₂ no mundo (2022) | (Bilhão: 10 ⁹ EUR) | 126,84 | 5.691,52 | 1.745,87 |
| Engenharia | Potência | (kW) | 13.800 | 4.427 | 10.000 |
| | Consumo elétrico | (kWh) | 1.141,00 | -366,00 | -826,81 |
| | Unidades necessárias pra zerar o CO ₂ no mundo (2022) | und | 219.861,51 | 36.674,00 | 611.233,33 |

Fonte: Autor, 2023

Ressalta-se que, quanto aos indicadores sociais, foram utilizados os dados primários, obtidos pelo questionário veiculado através do aplicativo de formulários *Google Forms*. O questionário pode ser visualizado na íntegra no APÊNDICE C- Coleta de dados para a área social.

Dessa forma, os dados primários da Tabela 6 foram interpretados e analisados em correspondência à estrutura da MCDA, conforme exibe a Tabela 7.

Tabela 7- Dados analisados de todos os indicadores das tecnologias de CCS

| ÁREA | INDICADORES | UNIDADES | DeCARB (Brazil) | C.E. (Canadá) | C.C. (India) |
|------------|--|---|-----------------|---------------|--------------|
| Ambiental | GWP | Redução % gCO ₂ -eqv/kWh | 0,087 | -0,204918 | -0,1089 |
| | Eutrofização (EP) | Redução % gPO ₄ ³⁻ -eqv/kWh | -0,025 | 0,079 | 0,035 |
| | HTP | Redução % em anos perdidos | 0,03264 | 0,196 | 0,012 |
| Social | Conhecimento do que é o CCS | 0-1 | 8,00 | 6,27 | 6,93 |
| | Impactos percebidos para meio ambiente | 0-1 | 7,67 | 7,53 | 7,93 |
| | Impactos percebidos para saúde humana | 0-1 | 7,63 | 6,97 | 7,17 |
| Econômica | Custo de Captura Anual | (EUR/ton CO ₂) | 3,46 | 155,19 | 47,61 |
| | Custo Transporte | (EUR/ton CO ₂) | - | - | - |
| | Custo Armazenamento | (EUR/ton CO ₂) | - | - | - |
| Engenharia | Potencial de Armazenamento | Gt | 36,31 | 27,51 | 33,01 |
| | EOR | (EUR/ton CO ₂) | - | - | - |

Fonte: Autor, 2023

4.3.2. Entrada de dados no Excel

De posse dos dados necessários (apresentados no item 4.3.1 e Tabela 7), foi estruturada a entrada de dados para cada tecnologia, conforme as Figura 27, Figura 28 e Figura 29, para a DeCARB, C.E. e C.C., respectivamente.

Figura 27- Entrada de dados da tecnologia SiCSeGE (DeCARB) via RISK Simulator

| Área | Indicadores | Valores dos indicadores | Unidades |
|---------------------|--|-------------------------|--|
| Ambiental | Potencial de Aquecimento Global (GWP) - DeCARB | 0,0868 | Redução Percentual de gCO ₂ -eqv/kWh |
| | Eutrofização (EP)- DeCARB | -0,0254 | Redução Percentual de gPO ₄₃ -eqv/kWh |
| | Toxicidade Humana (HTP)- DeCARB | 0,03264 | Redução Percentual em anos de vidas perdidos |
| Social | Percepção pública da tecnologia de CCS- DeCARB | 0,85 | 0-1 |
| | Conhecimento do que é o CCS- DeCARB | 0,85 | 0-1 |
| | Impacto na saúde percebido- DeCARB | 0,80 | 0-1 |
| Econômica | Custo de captura- DeCARB | 3,46 | (EUR/t CO ₂) |
| | Custo de Transporte- DeCARB | 0 | (EUR/t CO ₂) |
| | Custo de Armazenamento- DeCARB | 0 | (EUR/t CO ₂) |
| Engenharia | Potencial de Armazenamento Global- DeCARB | 36,31 | Gt |
| | Receita \$ proveniente da Recuperação de Petróleo Aprimorada (EOR)- DeCARB | 0 | (EUR/t CO ₂) |
| TOTAL DeCARB | | 41,19 | |

Fonte: Autor, 2023

Figura 28- Entrada de dados da tecnologia DAC (Carbon Engineering) via RISK Simulator

| Área | Indicadores | Valores dos indicadores | Unidades |
|---------------------------------|--|-------------------------|--|
| Ambiental | Potencial de Aquecimento Global (GWP)- Carbon Eng | -0,2049 | Redução Percentual de gCO ₂ -eqv/kWh |
| | Eutrofização (EP)- Carbon Eng | 0,0792 | Redução Percentual de gPO ₄₃ -eqv/kWh |
| | Toxicidade Humana (HTP)- Carbon Eng | 0,19565 | Redução Percentual em anos de vidas perdidos |
| Social | Percepção pública da tecnologia de CCS- Carbon Eng | 0,79 | 0-1 |
| | Conhecimento do que é o CCS- Carbon Eng | 0,84 | 0-1 |
| | Impacto na saúde percebido- Carbon Eng | 0,75 | 0-1 |
| Econômica | Custo de captura- Carbon Eng | 155,19 | (EUR/t CO ₂) |
| | Custo de Transporte- Carbon Eng | 0 | (EUR/t CO ₂) |
| | Custo de Armazenamento- Carbon Eng | 0 | (EUR/t CO ₂) |
| Engenharia | Potencial de Armazenamento Global- Carbon Eng | 27,51 | Gt |
| | Receita \$ proveniente da Recuperação de Petróleo Aprimorada (EOR)- Carbon Eng | 0 | (EUR/t CO ₂) |
| TOTAL Carbon Engineering | | 184,84 | |

Fonte: Autor, 2023

Figura 29- Entrada de dados da tecnologia *CDRMAX (Carbon Clean)* via RISK Simulator

| Área | Indicadores | Valores dos indicadores | Unidades |
|---------------------------|--|-------------------------|--|
| Ambiental | Potencial de Aquecimento Global (GWP)- Carbon Clean | -0,1089 | Redução Percentual de gCO2-eqv/kWh |
| | Eutrofização (EP)- Carbon Clean | 0,0351 | Redução Percentual de gPO43-eqv/kWh |
| | Toxicidade Humana (HTP)- Carbon Clean | 0,01174 | Redução Percentual em anos de vidas perdidos |
| Social | Percepção pública da tecnologia de CCS- Carbon Clean | 0,81 | 0-1 |
| | Conhecimento do que é o CCS- Carbon Clean | 0,83 | 0-1 |
| | Impacto na saúde percebido- Carbon Clean | 0,74 | 0-1 |
| Econômica | Custo de captura- Carbon Clean | 47,61 | (EUR/t CO2) |
| | Custo de Transporte- Carbon Clean | 0 | (EUR/t CO2) |
| | Custo de Armazenamento- Carbon Clean | 0 | (EUR/t CO2) |
| Engenharia | Potencial de Armazenamento Global-Carbon Clean | 33,01 | Gt |
| | Receita \$ proveniente da Recuperação de Petróleo Aprimorada (EOR)- Carbon Clean | 0 | (EUR/t CO2) |
| TOTAL Carbon Clean | | 82,75 | |

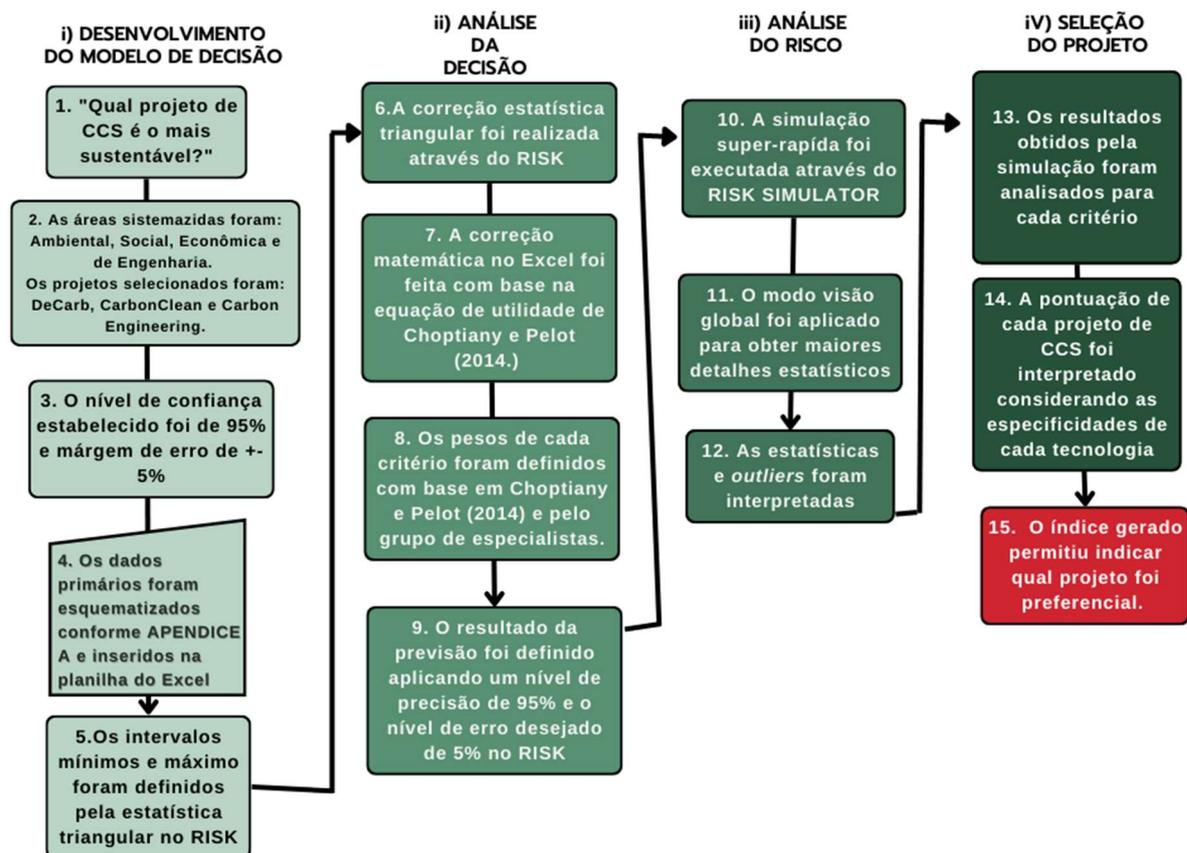
Fonte: Autor, 2023

Assim, uma vez padronizadas as tabelas de entrada de dados, viabilizou-se a geração de resultados e a execução do modelo MCDA desenvolvido para tecnologias CCS.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados neste capítulo foram obtidos conforme a sucessão de etapas percorrida no fluxograma (Figura 30).

Figura 30- Fluxograma para avaliação da sustentabilidade das tecnologias CCS



Fonte: Autor, 2023

5.1. Avaliação da sustentabilidade das tecnologias CCS

De posse das informações necessárias, foram então estruturadas as planilhas no Excel e RISK Simulator com o conjunto de dados de cada tecnologia e, assim, geradas as primeiras avaliações de sustentabilidade. Estas são apresentadas nas Figura 31, Figura 32 e Figura 33, para a DeCARB, C.E. e C.C., respectivamente.

Figura 31- Avaliação da sustentabilidade da tecnologia SicSeGE-DeCARB

| Área | Indicadores | Valores dos indicadores | Unidades | Eq.Utilidade | Pesos | Limites | Crítérios |
|---------------------|--|-------------------------|--|--------------|-------|---------|--------------|
| Ambiental | Potencial de Aquecimento Global (GWP) - DeCARB | 0,0868 | Redução Percentual de gCO ₂ -eqv/kWh | 0,384 | 20 | 0,5 | 7,68 |
| | Eutrofização (EP)- DeCARB | -0,0254 | Redução Percentual de gPO ₄₃ -eqv/kWh | 0,552 | 5 | 0 | 2,76 |
| | Toxicidade Humana (HTP)- DeCARB | 0,03264 | Redução Percentual em anos de vidas perdidos | 0,377 | 5 | 0 | 1,89 |
| Social | Percepção pública da tecnologia de CCS- DeCARB | 0,85 | 0-1 | 1,160 | 25 | 0,02 | 29,01 |
| | Conhecimento do que é o CCS- DeCARB | 0,85 | 0-1 | 2,631 | 4 | 0,1 | 10,52 |
| | Impacto na saúde percebido- DeCARB | 0,80 | 0-1 | 1,202 | 5 | 0,05 | 6,01 |
| Econômica | Custo de captura- DeCARB | 3,46 | (EUR/t CO ₂) | 2,332 | 15 | 110 | 34,99 |
| | Custo de Transporte- DeCARB | 0 | (EUR/t CO ₂) | 1,231 | 3 | 7 | 3,69 |
| | Custo de Armazenamento- DeCARB | 0 | (EUR/t CO ₂) | 1,335 | 3 | 9 | 4,01 |
| Engenharia | Potencial de Armazenamento Global- DeCARB | 36,31 | Gt | 0,638 | 10 | 23 | 6,38 |
| | Receita \$ proveniente da Recuperação de Petróleo Aprimorada (EOR)- DeCARB | 0 | (EUR/t CO ₂) | -2,935 | 5 | 5 | -14,68 |
| TOTAL DeCARB | | 41,19 | | | | | 92,25 |

Fonte: Autor, 2023

Figura 32- Avaliação da sustentabilidade da tecnologia *Direct Air Capture*-Carbon Engineering

| Área | Indicadores | Valores dos indicadores | Unidades | Eq.Utilidade | Pesos | Limites | Crítérios |
|---------------------------------|--|-------------------------|--|--------------|-------|---------|--------------|
| Ambiental | Potencial de Aquecimento Global (GWP)- Carbon Eng | -0,2049 | Redução Percentual de gCO ₂ -eqv/kWh | 0,222 | 20 | 0,5 | 4,44 |
| | Eutrofização (EP)- Carbon Eng | 0,0792 | Redução Percentual de gPO ₄₃ -eqv/kWh | 0,636 | 5 | 0 | 3,18 |
| | Toxicidade Humana (HTP)- Carbon Eng | 0,19565 | Redução Percentual em anos de vidas perdidos | 0,540 | 5 | 0 | 2,70 |
| Social | Percepção pública da tecnologia de CCS- Carbon Eng | 0,79 | 0-1 | 1,098 | 25 | 0,02 | 27,45 |
| | Conhecimento do que é o CCS- Carbon Eng | 0,84 | 0-1 | 2,572 | 4 | 0,1 | 10,29 |
| | Impacto na saúde percebido- Carbon Eng | 0,75 | 0-1 | 1,165 | 5 | 0,05 | 5,82 |
| Econômica | Custo de captura- Carbon Eng | 155,19 | (EUR/t CO ₂) | 1,774 | 15 | 110 | 26,60 |
| | Custo de Transporte- Carbon Eng | 0 | (EUR/t CO ₂) | 1,231 | 3 | 7 | 3,69 |
| | Custo de Armazenamento- Carbon Eng | 0 | (EUR/t CO ₂) | 1,335 | 3 | 9 | 4,01 |
| Engenharia | Potencial de Armazenamento Global- Carbon Eng | 27,51 | Gt | 0,298 | 10 | 23 | 2,98 |
| | Receita \$ proveniente da Recuperação de Petróleo Aprimorada (EOR)- Carbon Eng | 0 | (EUR/t CO ₂) | -2,935 | 5 | 5 | -14,68 |
| TOTAL Carbon Engineering | | 184,84 | | | | | 76,49 |

Fonte: Autor, 2023

Figura 33- Avaliação da sustentabilidade da tecnologia *CDRMAX*- Carbon Clean

| Área | Indicadores | Valores dos indicadores | Unidades | Eq.Utilidade | Pesos | Limites | Crítérios |
|---------------------------|--|-------------------------|--|--------------|-------|---------|--------------|
| Ambiental | Potencial de Aquecimento Global (GWP)- Carbon Clean | -0,1089 | Redução Percentual de gCO ₂ -eqv/kWh | 0,272 | 20 | 0,5 | 5,45 |
| | Eutrofização (EP)- Carbon Clean | 0,0351 | Redução Percentual de gPO ₄₃ -eqv/kWh | 0,600 | 5 | 0 | 3,00 |
| | Toxicidade Humana (HTP)- Carbon Clean | 0,01174 | Redução Percentual em anos de vidas perdidos | 0,357 | 5 | 0 | 1,79 |
| Social | Percepção pública da tecnologia de CCS- Carbon Clean | 0,81 | 0-1 | 1,119 | 25 | 0,02 | 27,98 |
| | Conhecimento do que é o CCS- Carbon Clean | 0,83 | 0-1 | 2,515 | 4 | 0,1 | 10,06 |
| | Impacto na saúde percebido- Carbon Clean | 0,74 | 0-1 | 1,156 | 5 | 0,05 | 5,78 |
| Econômica | Custo de captura- Carbon Clean | 47,61 | (EUR/t CO ₂) | 1,783 | 15 | 110 | 26,74 |
| | Custo de Transporte- Carbon Clean | 0 | (EUR/t CO ₂) | 1,231 | 3 | 7 | 3,69 |
| | Custo de Armazenamento- Carbon Clean | 0 | (EUR/t CO ₂) | 1,335 | 3 | 9 | 4,01 |
| Engenharia | Potencial de Armazenamento Global-Carbon Clean | 33,01 | Gt | 0,511 | 10 | 23 | 5,11 |
| | Receita \$ proveniente da Recuperação de Petróleo Aprimorada (EOR)- Carbon Clean | 0 | (EUR/t CO ₂) | -2,935 | 5 | 5 | -14,68 |
| TOTAL Carbon Clean | | 82,75 | | | | | 78,94 |

Fonte: Autor, 2023

Observa-se que neste primeiro momento, um resultado preliminar de sustentabilidade, fornecido através do somatório dos critérios, indicou que a tecnologia desenvolvida pela DeCARB (92,25 pontos) foi superior ao ser comparada com a da Carbon Engineering (76,49 pontos) e Carbon Clean (78,94 pontos). Após realizar a simulação de Monte-Carlo através da previsão do RISK Simulator, observou-se comportamento ilustrado na Figura 34.

Figura 34- Comparativo da MCDA entre as tecnologias DeCARB, C.E e C.C vide RISK Simulator



A tecnologia SiCSeGE (com média de 87,95 pontos e 75% de chance de pontuar acima de 93,44 pontos) ainda se manteve preferencial em relação à DAC (média de 68,64 pontos e 75% de chance de pontuar 73,73 pontos) e à CDRMax (média de 73,66 pontos e 75% percentil de 78,78 pontos). O que pode ser interpretado através deste resultado é que a tecnologia da DeCARB foi mais consistente nos indicadores definidos e avaliados nesta análise multicritério e, portanto, classificada como a tecnologia mais sustentável.

Além disso, nesta avaliação global das tecnologias, também fica evidente a importância da utilização do método para uma análise assertiva dos indicadores, em virtude de que, mesmo com dados otimizados e organizados nas Tabela 6 e Tabela 7, poderia ser imprecisa a sua livre interpretação, comprometendo a tomada de decisão pela tecnologia mais sustentável, haja vista a variedade das áreas consideradas.

5.2. Oportunidades de melhoria para a tecnologia SiCSeGE (DeCARB)

Avaliando individualmente cada uma das quatro (4) áreas, torna-se possível compreender os pontos fortes e fracos de cada tecnologia conforme os indicadores considerados. Por conseguinte, neste item, são verificadas oportunidades de melhoria para a tecnologia brasileira SiCSeGE (DeCARB).

A. Área Ambiental:

Na análise detalhada da área ambiental analisou-se o indicador “potencial de aquecimento global”, de unidade de medida em gCO₂ eqv/kwh. A partir dos dados primários (Tabela 6), destacam-se os seguintes indicadores:

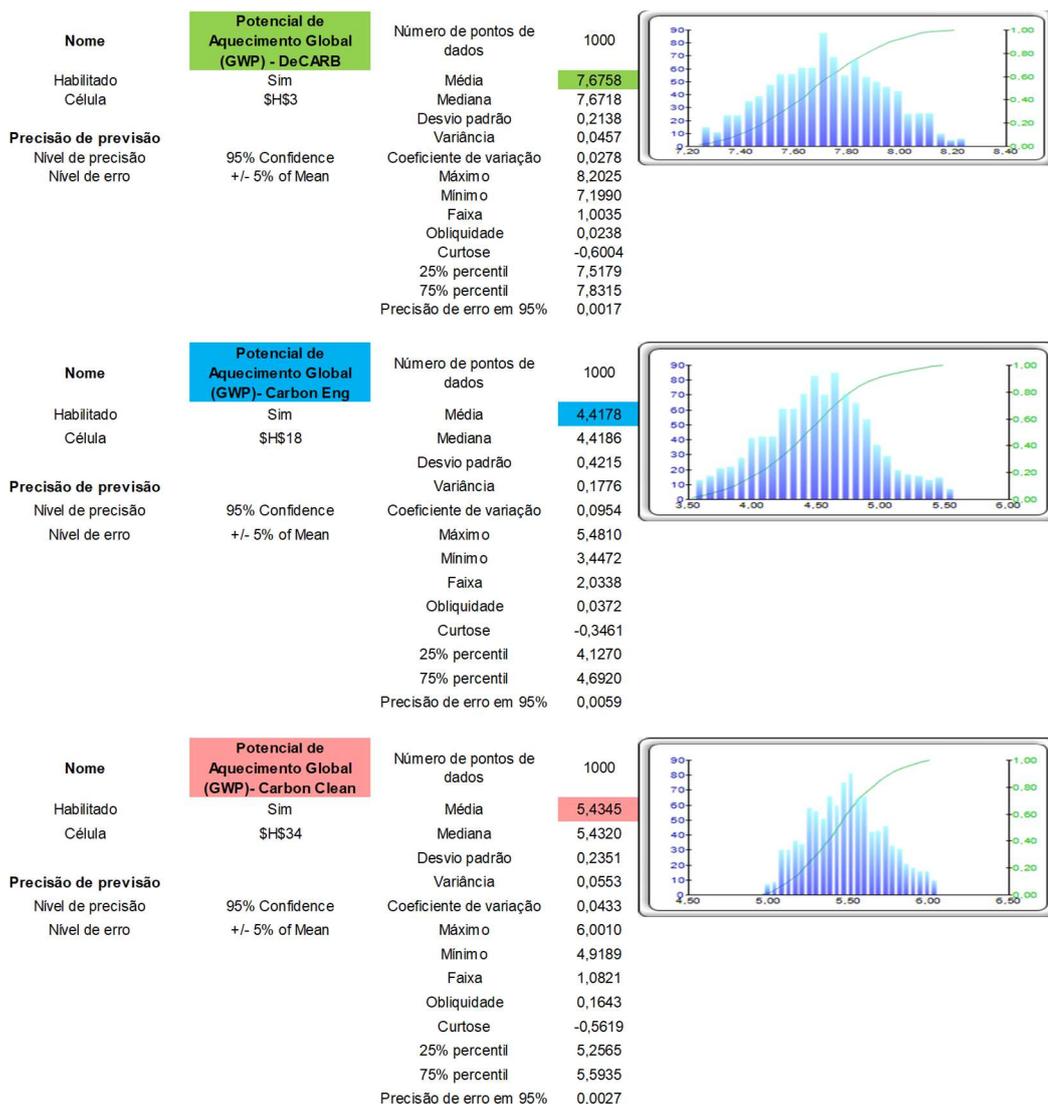
- Capacidade de Captura de CO₂
 - DeCARB (Brazil): 166.805 ton CO₂/ano.unidade
 - Carbon Engineering (Canadá): 1.000.000 ton CO₂/ano.unidade
 - Carbon Clean (India): 60.000 ton CO₂/ano.unidade

onde, o termo “unidade” refere-se a um protótipo, modelo ou planta industrial.
- Consumo elétrico
 - DeCARB (Brazil): 1.141,00 kWh/unidade

- Carbon Engineering (Canadá): 366,00 kWh/ ton CO₂ . unidade
- Carbon Clean (India): 826,81 kWh/unidade

Ou seja, seria necessário realizar a razão entre estes dados para definir qual das três tecnologias possuem um maior GWP. Diante disso, com auxílio do *software* RISK Simulator, foi possível constatar que a tecnologia da DeCARB foi superior em 73,61% com relação à tecnologia da C.E. e 41,35% em comparação à desenvolvida pela C.C., como exibe a Figura 35. A interpretação desse resultado indica uma melhor eficiência da tecnologia ao possibilitar uma significativa redução percentual de CO₂/kwh, ressalta-se o contraponto da tecnologia C.E provocado pelo denominador “ton CO₂” o qual compromete sua pontuação neste critério.

Figura 35- Comparativo do indicador GWP (gCO₂ eqv/kwh)



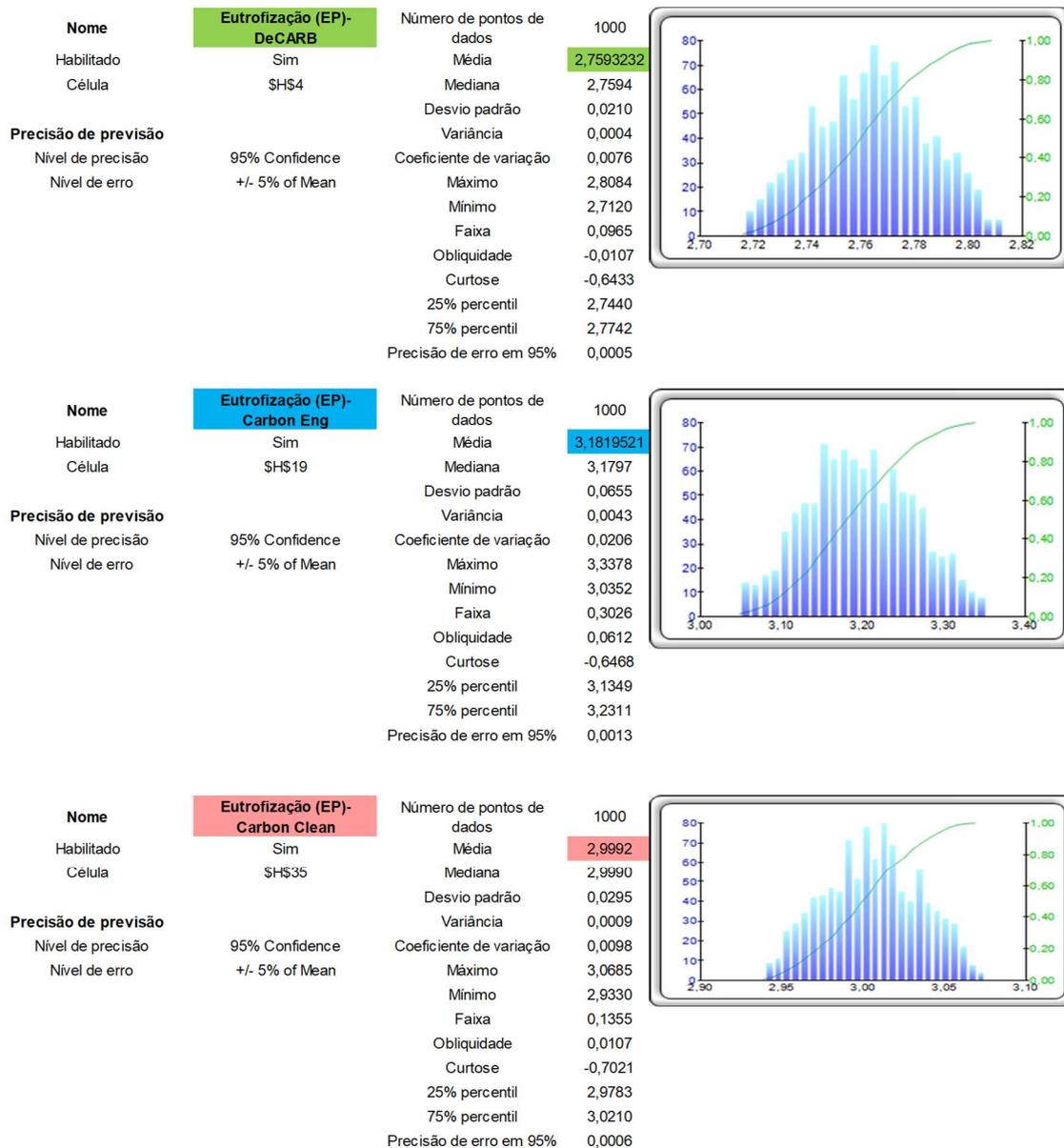
Fonte: Autor, 2023

Em seguida, avaliando individualmente o indicador “Eutrofização (EP)” com unidade g $\text{PO}_4^{3-}/\text{kWh}$, tem-se os seguintes dados analisados (Tabela 7):

- DeCARB (Brazil): -0,025% g $\text{PO}_4^{3-}/\text{kWh}$
- Carbon Engineering (Canadá): 0,079% g $\text{PO}_4^{3-}/\text{kWh}$
- Carbon Clean (India): 0,035% g $\text{PO}_4^{3-}/\text{kWh}$

Para um melhor entendimento desta análise, esclarece-se que o indicador de eutrofização está relacionado com o fosfato, uma vez que esse processo é causado pelo aumento da concentração de nutrientes, especialmente o fósforo e nitrogênio, que induz o crescimento excessivo de algas nos ecossistemas aquáticos. Esse desequilíbrio resulta em níveis baixíssimos de oxigênio dissolvido (OD), causando a morte de diversas espécies vegetais e animais (BARRETO, 2013).

Isto posto, a simulação realizada pelo RISK (Figura 36) indica que a CE foi superior em 15,63% em comparação com a DeCARB e 6,68% superior frente à CC. Infere-se portanto, que este resultado se deve ao fato da C.E possuir tecnologia de captura atmosférica e, portanto, uma maior capacidade de absorção e redução de g PO_4^{3-} eqv. Ou seja, desconsiderando os fatores energéticos e econômicos, a captura da C.E seria uma ótima alternativa.

Figura 36- Comparativo Eutrofização (g PO₄³⁻/kwh)

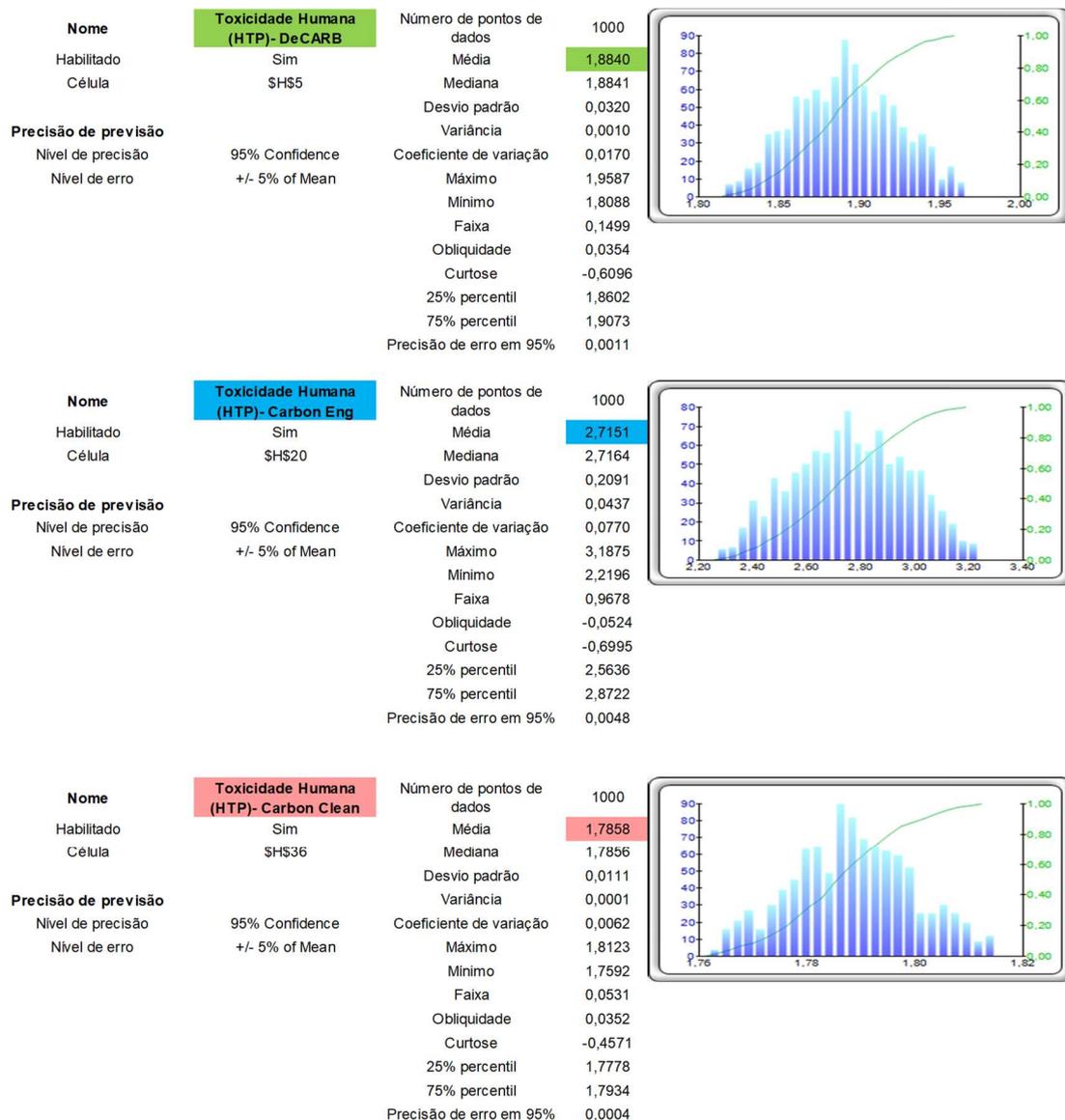
Fonte: Autor, 2023

Por fim, quanto ao indicador ambiental de Toxicidade Humana (HTP), que representa o percentual de anos de vida perdidos, é inerente trazer (Tabela 7):

- DeCARB (Brazil): 0,03264%
- Carbon Engineering (Canadá): 0,196%
- Carbon Clean (India): 0,012%

Efetuada a simulação (Figura 29), obteve-se uma pontuação média de 1,884 para a DeCARB, de 2,715 para a Carbon Engineering e de 1,786 para a Carbon Clean, ou seja: a DeCARB foi inferior em 30,67% com relação a C.E e superior em 5,49% com relação a C.C. A elevada pontuação da Carbon Engineering neste indicador ocorre em virtude da proporção de suas instalações e captura atmosférica, conforme apresentado na sua caracterização, o que conferiu uma primazia frente as demais. Assim, entende-se que a DeCARB segue em um bom direcionamento neste quesito, pois ao ser comparada com a tecnologia da Carbon Clean, que representaria sua concorrente direta pela tipologia de captura e *layout*, sinalizou uma vantagem, mesmo que pequena.

Figura 37- Comparativo HTP (% anos de vida perdido)



Fonte: Autor, 2023

B. Área social:

No âmbito social, para compreensão dos indicadores Percepção pública das tecnologias, Conhecimento do que é o CCS e Impactos percebidos na saúde humana, mencionam-se as seguintes informações apresentadas na Tabela 7.

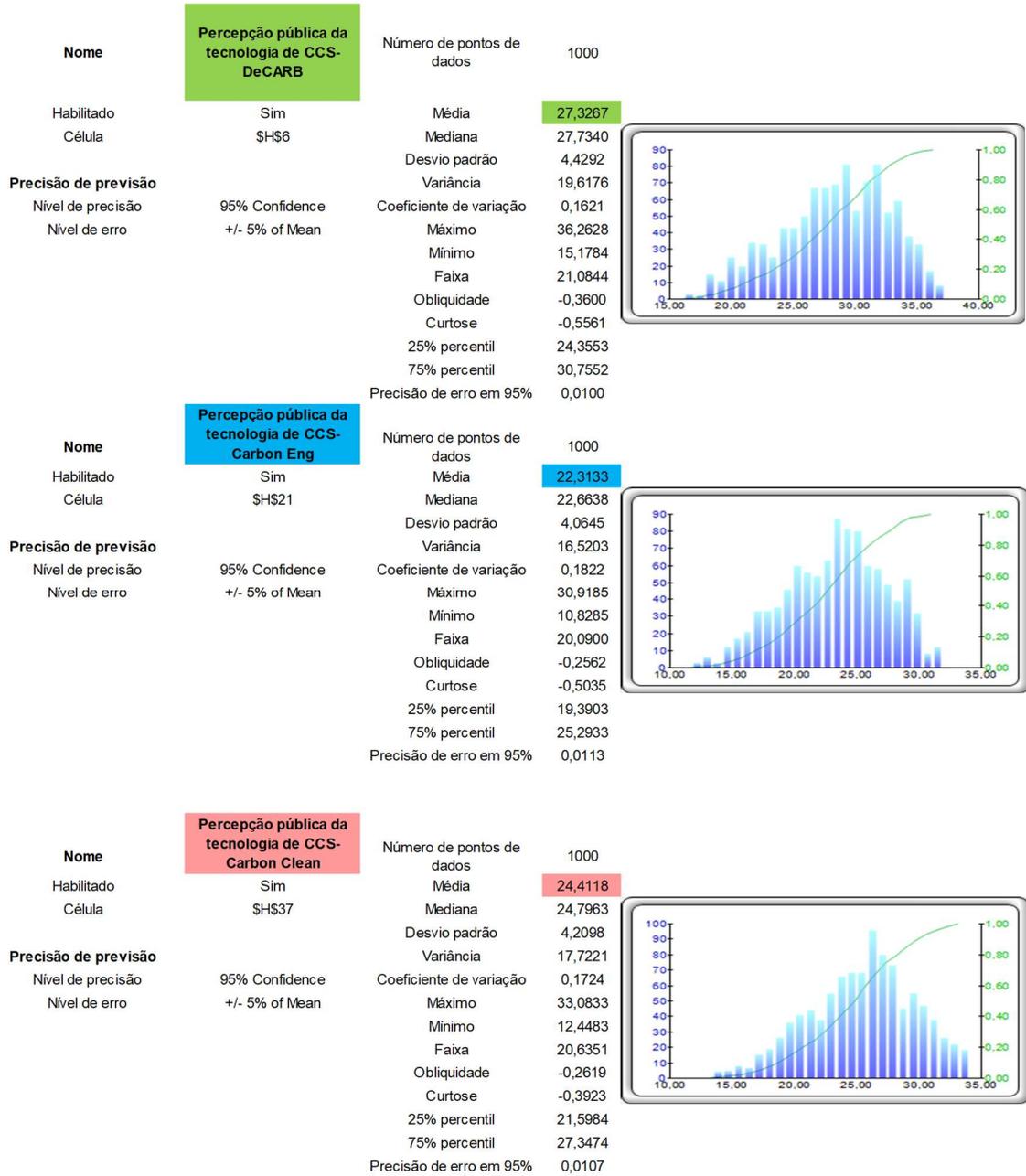
- Conhecimento do que é o CCS:
 - DeCARB (Brazil): 8,00
 - Carbon Engineering (Canadá): 6,27
 - Carbon Clean (India): 6,93

- Impactos percebidos para meio ambiente:
 - DeCARB (Brazil): 7,67
 - Carbon Engineering (Canadá): 7,53
 - Carbon Clean (India): 7,93

- Impactos percebidos para saúde humana:
 - DeCARB (Brazil): 7,63
 - Carbon Engineering (Canadá): 6,97
 - Carbon Clean (India): 7,17

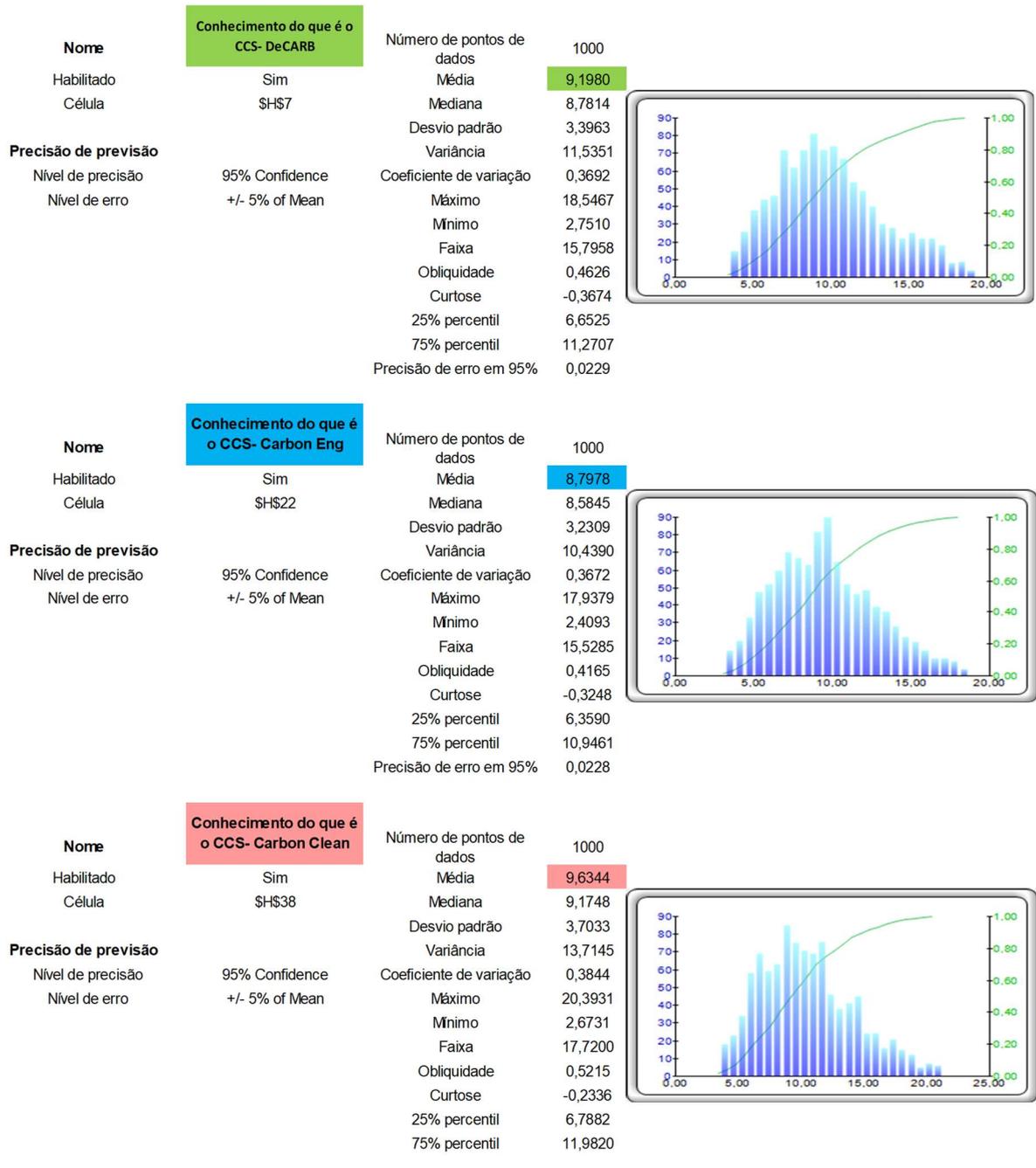
Pelo exposto, observou-se que a tecnologia da SiCSeGE (DeCARB) foi ligeiramente melhor compreendida, quando comparada com as demais, vide simulações na Figura 38, Figura 39 e Figura 40, respeitando-se os respectivos desvios padrões. Entretanto, como a C.C e a C.E apresentaram uma boa percepção de impactos ambientais e sociais, basicamente empatados quando observados os desvios padrões, é proposto, nesse sentido, intensificar a divulgação da tecnologia desenvolvida pela DeCARB, bem como seu desempenho e suas estratégias de ESG, a fim de construir uma vantagem competitiva significativa.

Figura 38- Comparativo do indicador social: percepção pública das tecnologias



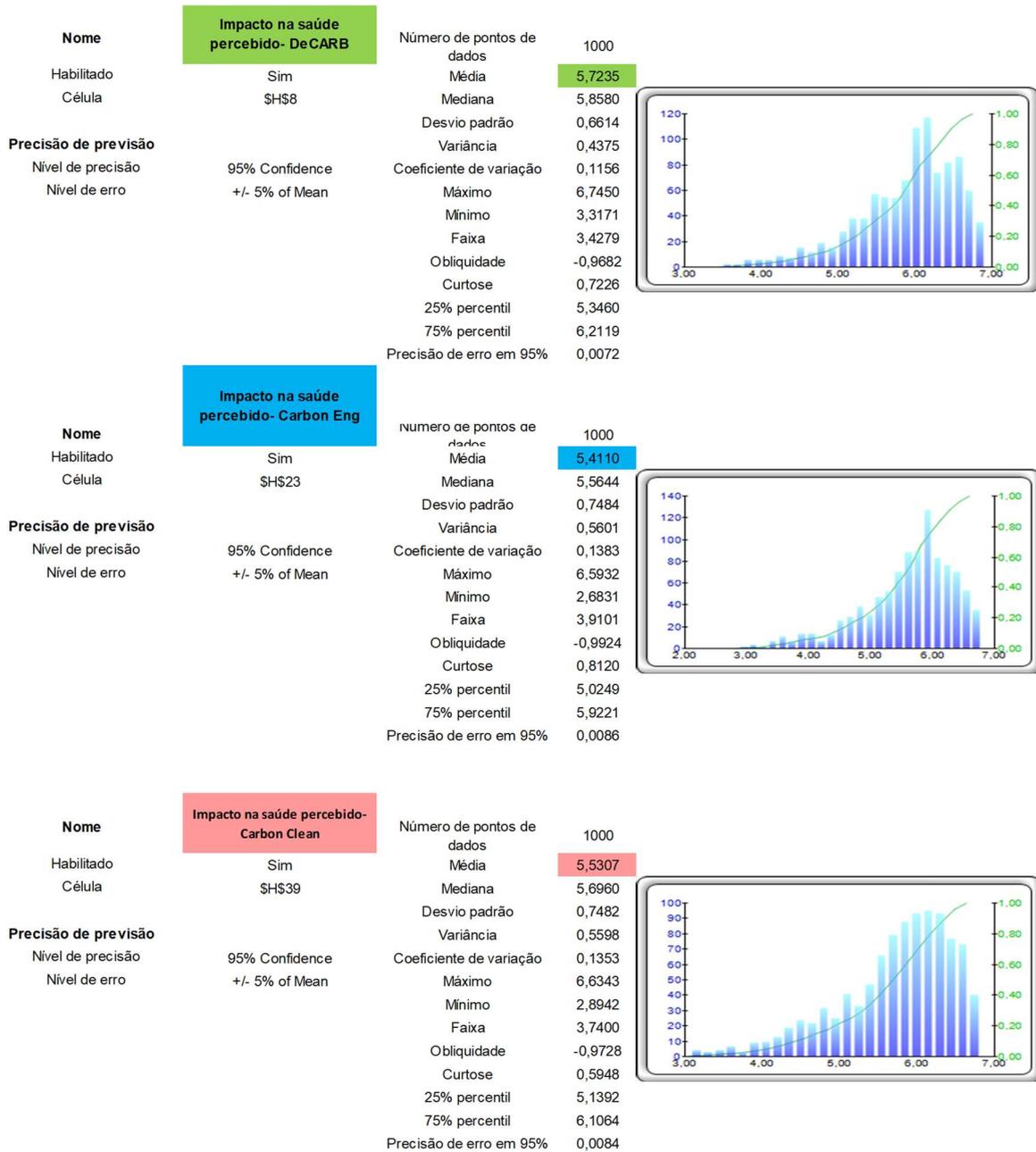
Fonte: Autor, 2023

Figura 39- Comparativo do indicador social: conhecimento do que é o CCS



Fonte: Autor, 2023

Figura 40- Comparativo do indicador social: Impacto percebido na saúde humana



Fonte: Autor, 2023

C. Área econômica:

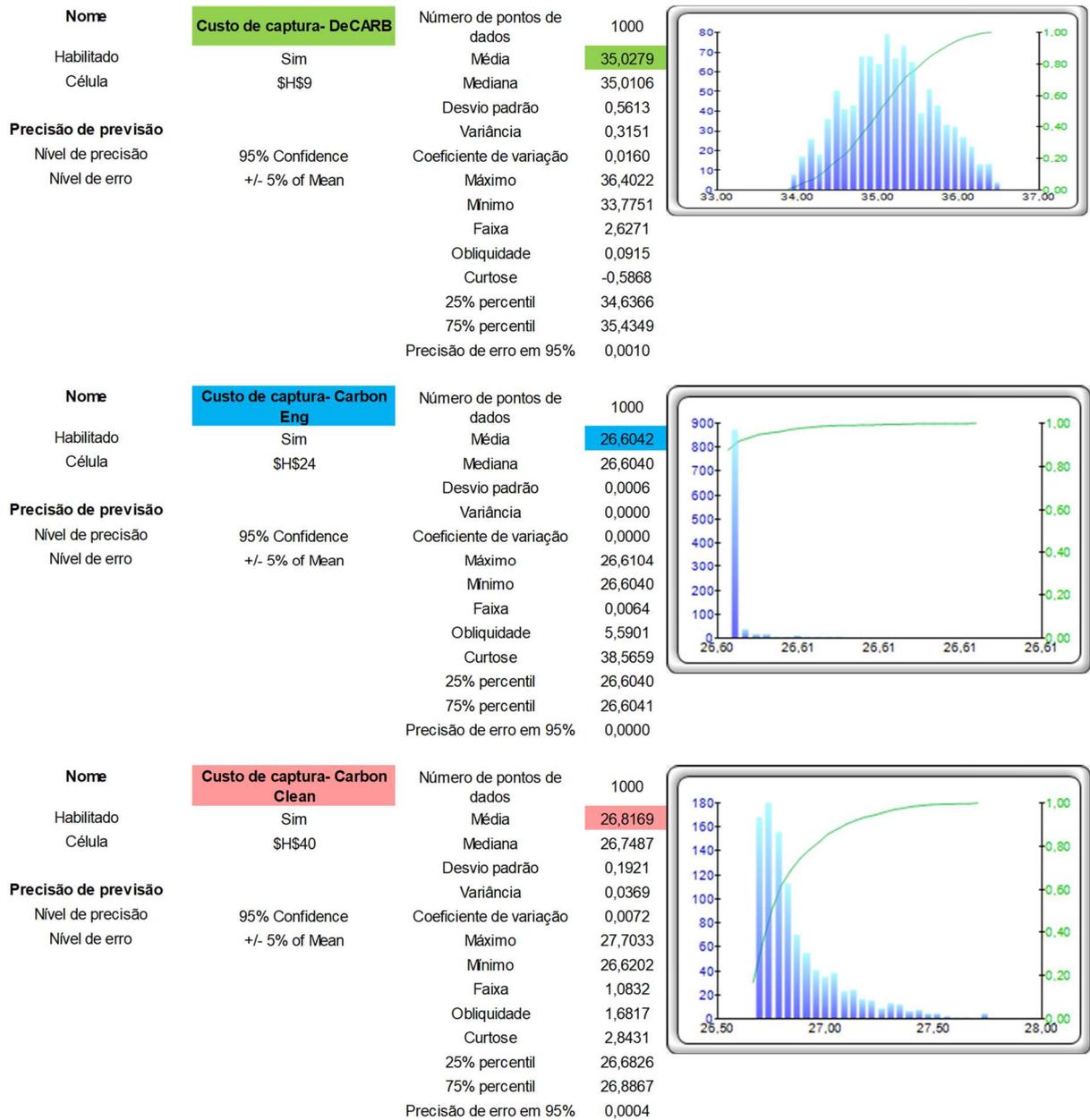
Este foi um área determinante para a pontuação total da tecnologia SiCSeGE ser superior à *DAC* e *CDRMax*, conforme ilustra a simulação da Figura 41, pois resta evidente que o custo de captura da tecnologia DeCARB é inferior à *DAC* e *CDRMax*.

- CCS Custo por unidade:
 - DeCARB (Brazil): 576.923 EUR/unidade
 - Carbon Engineering (Canadá): 155.192.300 EUR/unidade
 - Carbon Clean (India): 2.856.300 EUR/unidade

- Custo de Captura Anual:
 - DeCARB (Brazil): 3,46 EUR/ton CO₂.unidade
 - Carbon Engineering (Canadá): 155,19 EUR/ton CO₂.unidade
 - Carbon Clean (India): 47,61 EUR/ton CO₂.unidade

onde, o termo “unidade” refere-se a um protótipo, modelo ou planta industrial.

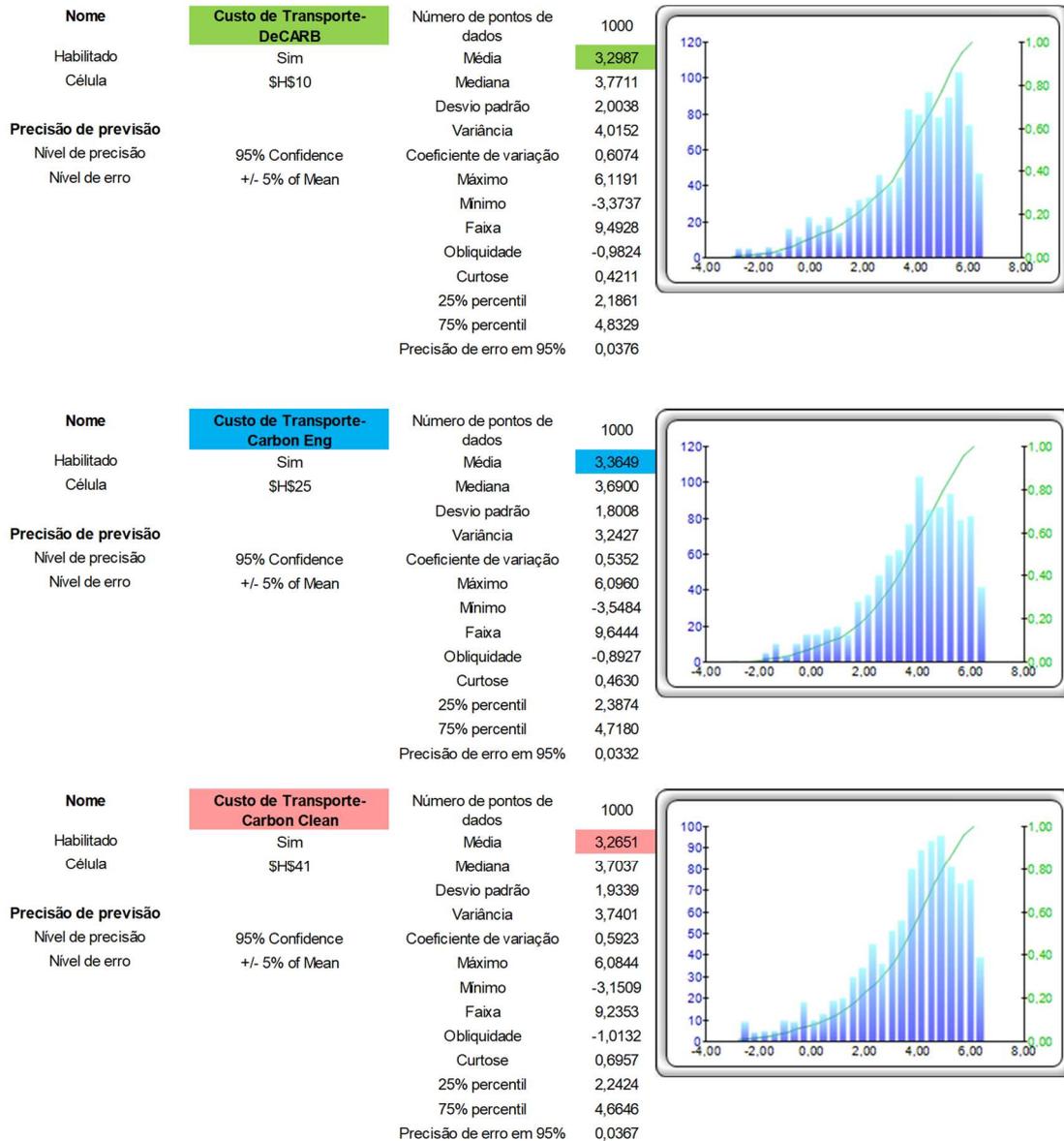
Figura 41- Comparativo do indicador econômico: custo de captura



Fonte: Autor, 2023

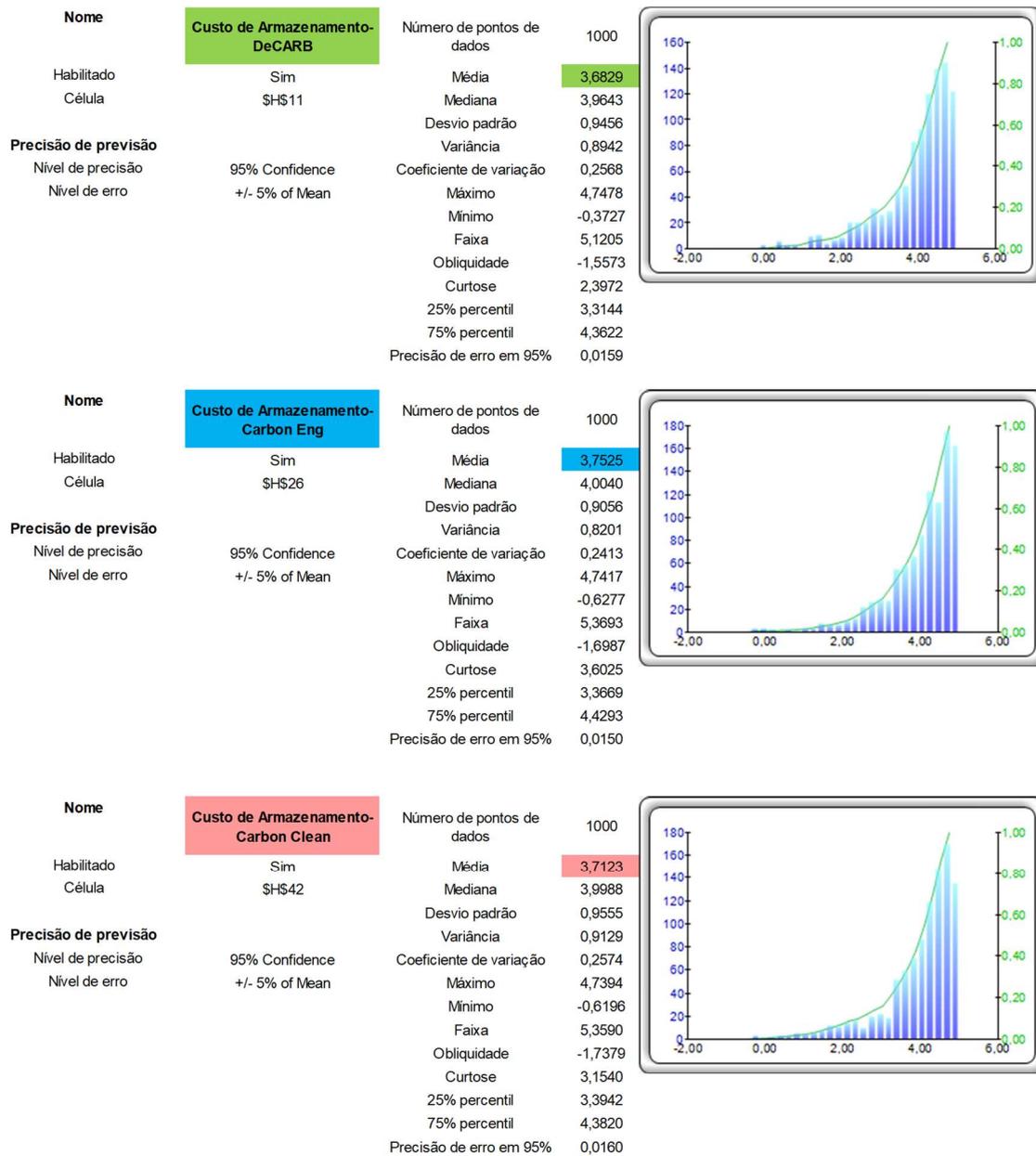
Com relação aos indicadores de custo de transporte e de armazenamento, não houve diferença significativa entre as pontuações, visto que as três tecnologias apresentaram valores unificados ao custo de captura, sem a discriminação para as duas outras etapas, conforme exibem as Figura 42 e Figura 43.

Figura 42- Comparativo do indicador econômico: custo de transporte



Fonte: Autor, 2023

Figura 43- Comparativo do indicador econômico: custo de armazenamento



Fonte: Autor, 2023

D. Área de Engenharia:

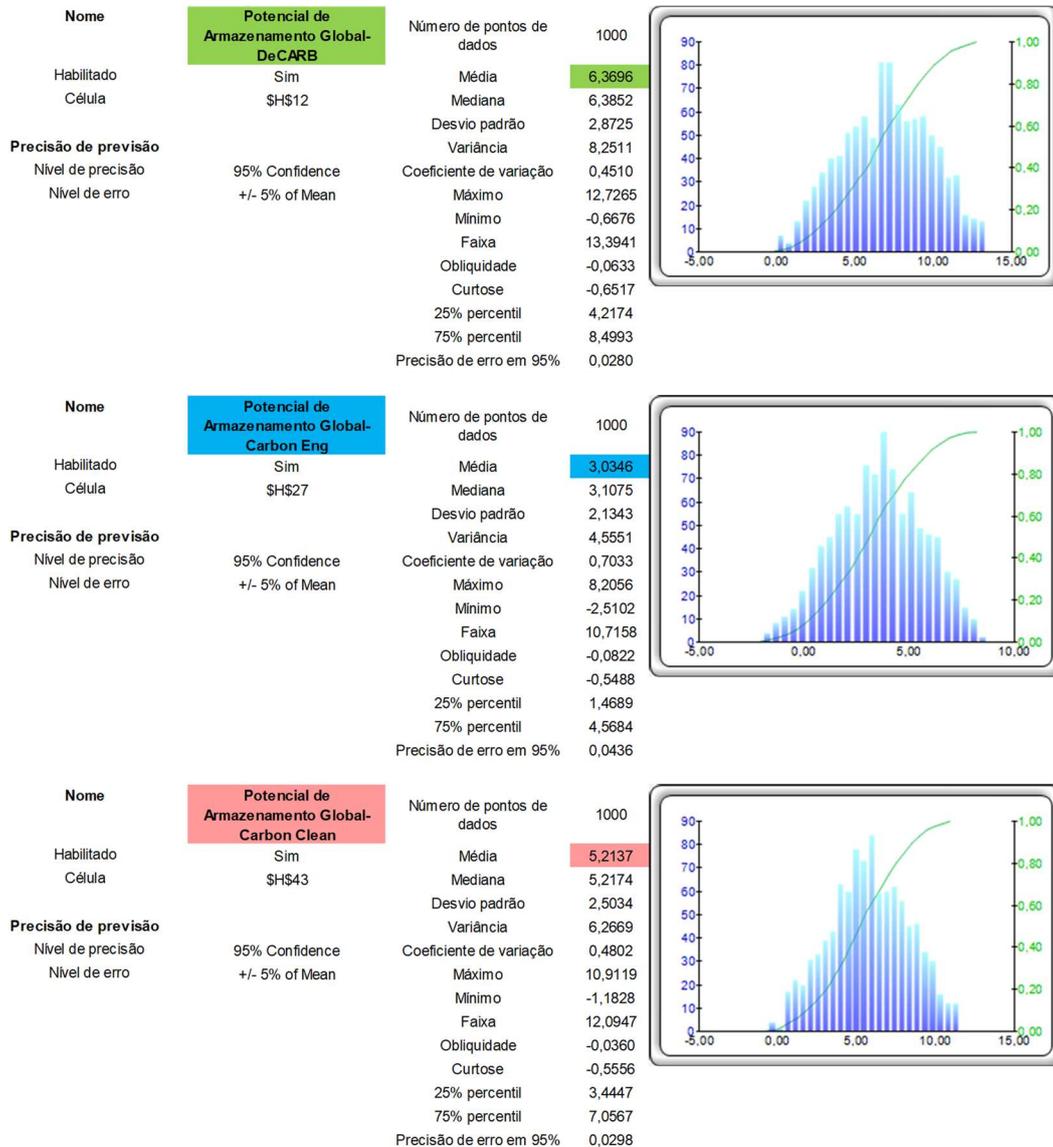
Por fim, na área de engenharia, percebeu-se que a tecnologia da DeCARB tem um maior potencial de armazenamento global de CO₂, possivelmente devido à facilidade de execução e comercialização da tecnologia, ao custo mais acessível e às dimensões compactas dos equipamentos, conferindo, portanto, uma maior capacidade de difusão e, assim, de captura de CO₂ (Figura 44).

- Potência:
 - DeCARB (Brazil): 13.800 kW
 - Carbon Engineering (Canadá): 4.427 kW
 - Carbon Clean (India): 10.000 kW

- Consumo elétrico
 - DeCARB (Brazil): 1.141,00 kWh
 - Carbon Engineering (Canadá): -366,00 kWh
 - Carbon Clean (India): -826,81 kWh

- Unidades necessárias para zerar o CO₂ no mundo (2022):
 - DeCARB (Brazil): 219.861,51 und
 - Carbon Engineering (Canadá): 36.674,00 und
 - Carbon Clean (India): 611.233,33 und

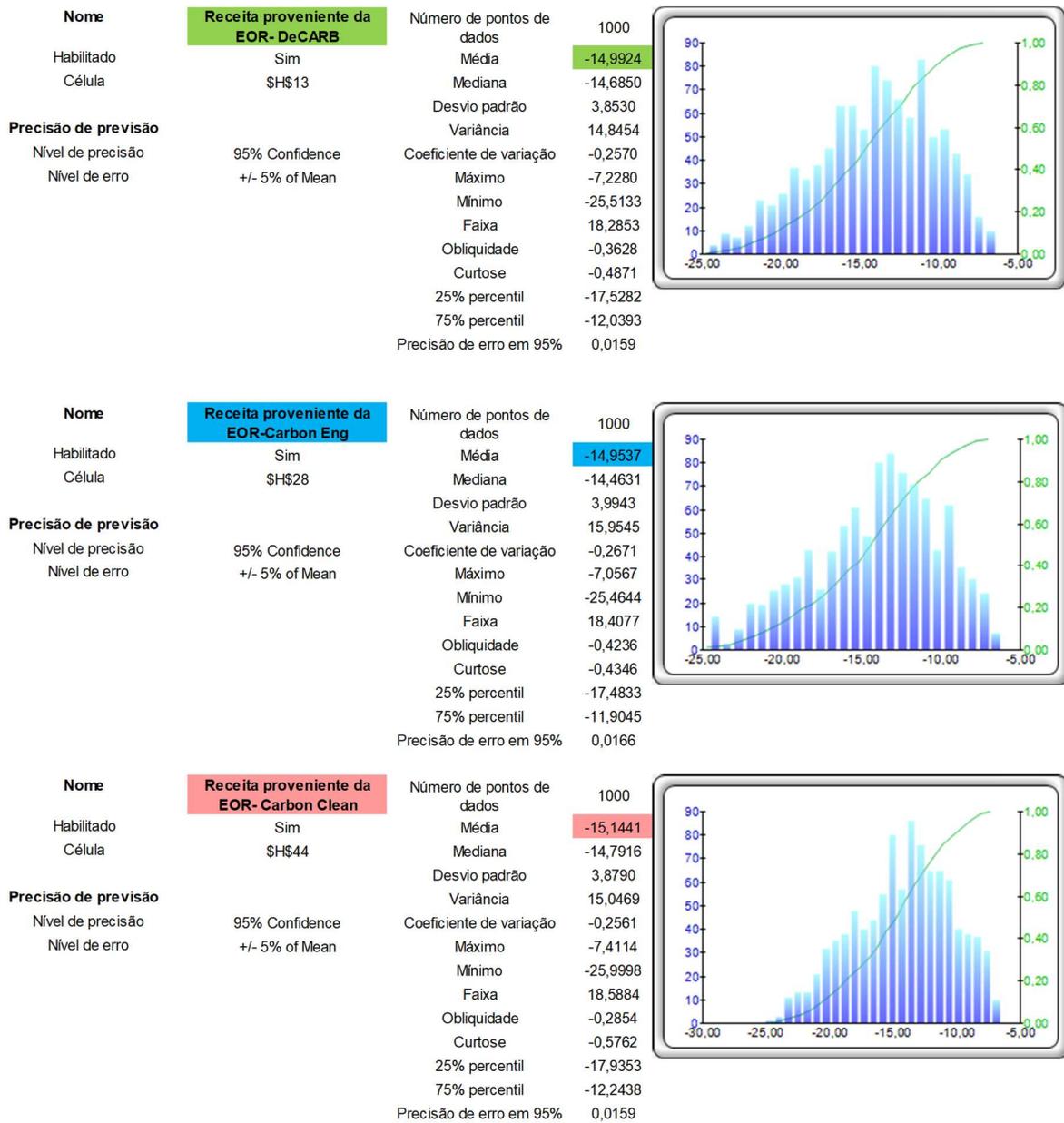
Figura 44- Comparativo do indicador “Potencial de Armazenamento” das tecnologias



Fonte: Autor, 2023

Com relação ao indicador “Recuperação de Petróleo Aprimorada (EOR)”, nenhuma tecnologia apresentou dados relacionados ao benefício proveniente da EOR, vide Figura 45. Portanto, ao desconsiderar os dados de entrada deste indicador, a pontuação foi negativa para todas as tecnologias. Nesse sentido, foi identificada uma oportunidade de melhoria competitiva para a DeCARB, em caso da mesma decida por ampliar as possibilidades de aplicação/reuso do CO₂.

Figura 45- Comparativo do indicador “Recuperação de Petróleo Aprimorada EOR”



Fonte: Autor, 2023

Em síntese, e por fim, todas as sugestões e melhorias propostas neste trabalho à DeCARB e tecnologia SiCSeGE foram estruturadas na Tabela 8.

Tabela 8- Síntese de melhorias e oportunidades para a tecnologia SiCSeGE e (DeCARB)

| ÁREA | INDICADORES | UNIDADES | PONTUAÇÃO MÉDIA DOS INDICADORES | | | RAZÃO % | | PROPOSTAS DE MELHORIAS PARA A DECARB |
|-----------|--|---|---------------------------------|-------|-------|----------------|---------------|--|
| | | | DeCARB | C.E. | C.C. | DeCARB/C.E (%) | DeCARB/CC (%) | |
| Ambiental | Potencial de Aquecimento Global (GWP) | Redução Percentual de gCO ₂ -eqv/kWh | 7,68 | 4,42 | 5,43 | 174% | 141% | Devido ao bom desempenho, é indicado manter os esforços em P&D para ampliar essa vantagem competitiva. Observou-se uma desvantagem em razão do denominador kWh. Orienta-se que sejam feitas pesquisas para reduzir o consumo elétrico da SiCSeGE. Neste ponto, é notório que a pontuação da C.E se beneficiou pela sua dimensão e capacidade de captura de 1.000.000 ton/CO₂.und Os princípios de CCUS e estratégias de ESG da DeCARB demonstraram ter sido bem recebidos pelo público. Com destaque para o biocarvão produzido através da casca do coco e sem uso de H₂O no processo produtivo. De acordo com os desvios padrões e margem de erro, tecnicamente estes indicadores foram empatados. Entretanto, faz-se a recomendação de ampliar o investimento em divulgação da tecnologia SiCSeGE. |
| | Eutrofização (EP) | Redução Percentual de g PO ₄ ³⁻ eqv/kWh | 2,76 | 3,18 | 2,99 | 87% | 92% | |
| | Toxicidade Humana (HTP) | Redução Percentual em anos de vidas perdidos | 1,88 | 2,71 | 1,79 | 69% | 105% | |
| Social | Percepção pública da tecnologia de CCS | 0-1 | 27,32 | 22,32 | 24,42 | 122% | 112% | |
| | Conhecimento do que é o CCS | 0-1 | 9,19 | 8,79 | 9,64 | 105% | 95% | |
| | Impacto na saúde percebido | 0-1 | 5,72 | 5,41 | 5,53 | 106% | 103% | |

(continuação)

| ÁREA | INDICADORES | UNIDADES | PONTUAÇÃO MÉDIA DOS INDICADORES | | | RAZÃO % | | PROPOSTAS DE MELHORIAS PARA A DECARB |
|------------|-----------------------------------|--------------------------|---------------------------------|--------|--------|----------------|---------------|---|
| | | | DeCARB | C.E. | C.C. | DeCARB/C.E (%) | DeCARB/CC (%) | |
| Econômica | Custo de captura | (EUR/t CO ₂) | 35,03 | 26,6 | 26,82 | 132% | 131% | Orienta-se expandir a busca por parceiros comerciais e investidores, para reduzir ainda mais o custo da SiCSeGE e ampliar esta primordial vantagem competitiva. |
| | Custo de Transporte | (EUR/t CO ₂) | 3,29 | 3,36 | 3,27 | 98% | 101% | O custo de transporte e armazenamento foi englobado no custo de captura. Uma vez que as empresas não distinguiram o investimento por etapa. |
| | Custo de Armazenamento | (EUR/t CO ₂) | 3,69 | 3,75 | 3,72 | 98% | 99% | Em razão da facilidade de execução e comercialização da tecnologia, pelo baixo custo e dimensões dos equipamentos, conferindo, portanto, uma maior capacidade de difusão e, assim, de captura de CO ₂ mundial |
| Engenharia | Potencial de Armazenamento Global | Gt | 6,37 | 3,04 | 5,22 | 210% | 122% | Nenhuma tecnologia utilizou do beneficiamento de EOR, portanto os indicadores foram negativo pela oportunidade não aproveitada. |
| | Receita proveniente da EOR | (EUR/t CO ₂) | -14,99 | -14,95 | -15,15 | 100% | 99% | |

Fonte: Autor, 2023.

6. CONCLUSÕES

A celeridade com que as mudanças climáticas vêm ocorrendo demanda esforços articulados entre nações e investidores, a fim de conter o aumento da temperatura do planeta em até 2 °C. Das publicações a respeito, tem sido notória a necessidade de uma ferramenta que ofereça suporte para frear este avanço, e foi com esse propósito que surgiram as tecnologias de captura de CO₂.

Em virtude dos diversos formatos e possibilidades que caracterizam essa tecnologia, destaca-se a contribuição da academia para auxiliar o público alvo na tomada de decisão entre soluções de captura de CO₂ e armazenamento. Essa orientação foi feita aqui através da metodologia de análise de decisão multicritérios (MCDA), a qual é amplamente utilizada e teve sua eficiência validada neste trabalho, sendo capaz de analisar de forma integrada as áreas ambiental, social, econômica e de engenharia para três tecnologias de captura de carbono.

As empresas estudadas nesta dissertação foram a DeCARB (Brasil), Carbon Engineering (Canadá) e Carbon Clean (Índia). Sendo assim, estas foram submetidas a uma sistemática de avaliação de sustentabilidade, através de indicadores, empregando a MCDA para identificação da tecnologia mais sustentável e o *software* RISK Simulator para realização das simulações.

A saber, numa análise comparativa entre a tecnologia da DeCARB e da C.E foi obtido um desempenho superior nos indicadores: GWP (174%), Percepção pública (122%), Conhecimento do CCS (105%), Impacto na Saúde Percebido (106%), Custo de Captura (132%) e Potencial de Armazenamento (210%). Enquanto que, ao comparar DeCarb e C.C, o desempenho foi superior para os indicadores: GWP (141%), Toxicidade Humana (105%), Percepção publica (112%), Impacto na Saúde Percebido (103%), Custo de Captura (131%) e Potencial de Armazenamento (122%).

Isto posto, foi possível verificar oportunidades de melhoria à DeCARB considerando todos os indicadores submetidos à avaliação, sobretudo aos que a mesma apresentou baixo desempenho na análise comparativa.

Por fim, destaca-se a contribuição dos resultados gerados nesta pesquisa, tais quais: a análise simultânea de multicritérios para três tecnologias CCS para fins de uma avaliação de sustentabilidade; a estruturação e o aperfeiçoamento de uma base de dados inerente às tecnologias CCS, até então desconexa; a adaptação e validação de uma metodologia flexível e exequível para orientação de solução ótima entre tecnologias, na presença de múltiplas variáveis. Outrossim, cita-se a sua contribuição acadêmica em disponibilizar na literatura um

trabalho com possibilidade de integrar problemas contemporâneos e nortear decisões que envolvam múltiplos critérios em diversas temáticas, além da captura de carbono. Em conclusão, como complemento à essa pesquisa e ampliação dos resultados produzidos, são feitas as seguintes sugestões:

- ✓ Ampliar o universo amostral de tecnologias, abrangendo todas as tipologias: pós-combustão, pré-combustão e oxi-combustão;
- ✓ Diversificar e expandir os critérios analisados através da MCDA;
- ✓ Prospectar o fornecimento de dados operacionais oficiais de cada empresa, para uma análise mais robusta.

7. REFERÊNCIAS

- ALVES, José Eustáquio Diniz. Os 70 anos da ONU e a agenda global para o segundo quinquênio (2015-2030) do século XXI. **Revista Brasileira de estudos de população**, v. 32, p. 587-598, 2015.
- ARTAXO, PAULO (2014). **DOSSIE CLIMA** - Revista USP, São Paulo, n. 103, p. 8-12, 2014. Acesso em: <https://www.revistas.usp.br/revusp/article/download/99191/97658/172672>
- BARRETO, Luciano et al. Eutrofização em rios brasileiros. **Enciclopédia biosfera**, v. 9, n. 16, 2013.
- BESANT, Hanisha. **The journey of brainstorming**. **Journal of Transformational Innovation**, v. 2, n. 1, p. 1-7, 2016.
- CARBON CLEAN, Carbon Clean Solutions Limited 2022. **Carbon Clean: modular systems**. Disponível em: <https://www.carbonclean.com/modular-carbon-capture-systems>. Acesso em: Julho 2022.
- CARBON ENGINEERING, Carbon Engineering Ltd., Copyright 2022. **Carbon Engineering: Our Technology**. Disponível em: <https://carbonengineering.com/our-technology/>. Acesso em: Julho 2022.
- CHOPTIANY, John Michael Humphries; PELOT, Ron; SHERREN, Kate. An interdisciplinary perspective on carbon capture and storage assessment methods. **Journal of Industrial Ecology**, v. 18, n. 3, p. 445-458, 2014.
- CHOPTIANY, John Michael Humphries; PELOT, Ronald. A multicriteria decision analysis model and risk assessment framework for carbon capture and storage. **Risk analysis**, v. 34, n. 9, p. 1720-1737, 2014.
- CORSTEN, M., Ramírez, A., SHEN, L., KOORNNEEF, J., e FAAIJ, A. Environmental impact assessment of CCS chains—lessons learned and limitations from LCA literature. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 13, p. 59-71, 2013.
- DECARB, DeCARB Captura de Carbono, Copyright 2022. **DeCarb: Projetos**. Disponível em: <https://www.decarb.eco.br/projetos/>. Acesso em: Agosto 2022.

DE JESUS, Cheyenne Oliveira. **Revisão sistemática da literatura: uma análise de tecnologias ccs utilizando a ferramenta StArt**. Monografia de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Sergipe – Engenharia Sanitária e Ambiental (DEAM), 2022.

DUTRA, Ademar *et al.* **Metodologia para avaliar e aperfeiçoar o desempenho organizacional: incorporando a dimensão integrativa à MCDA construtivista-sistêmico-sinérgica**. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2003.

ENSSLIN, Leonardo; NETO, Gilberto Montibeller; NORONHA, Sandro MacDonald. **Apoio à decisão: metodologias para estruturação de problemas e avaliação multicritério de alternativas**. Insular, 2001.

ESTY, Daniel C.; PORTER, Michael E. National environmental performance: an empirical analysis of policy results and determinants. **Environment and development economics**, v. 10, n. 4, p. 391-434, 2005.

FERNANDEZ, Eva Sanchez *et al.* Impacts of geological store uncertainties on the design and operation of flexible CCS offshore pipeline infrastructure. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 52, p. 139-154, 2016.

GIBBINS, Jon; CHALMERS, Hannah. Carbon capture and storage. **Energy policy**, v. 36, n. 12, p. 4317-4322, 2008.

HAMMOND, Allen L.; WORLD RESOURCES INSTITUTE. **Environmental indicators: a systematic approach to measuring and reporting on environmental policy performance in the context of sustainable development**. Washington, DC: World Resources Institute, 1995.

HARDING R. **Environmental decision making**. 1st ed. Sydney: The Federation Press; 2002

HASZELDINE, R. Stuart *et al.* Negative emissions technologies and carbon capture and storage to achieve the Paris Agreement commitments. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 376, n. 2119, p. 20160447, 2018.

HILLIER, Frederick S.; LIEBERMAN, Gerald J. **Introdução à pesquisa operacional**. McGraw Hill Brasil, 2013.

HUMPHRIES CHOPTIANY, John Michael; PELOT, Ronald. A multicriteria decision analysis model and risk assessment framework for carbon capture and storage. **Risk analysis**, v. 34, n. 9, p. 1720-1737, 2014.

IISD - International Institute for Sustainable Development. **Bellagio Principles**, Winnipeg, IISDnet, 2000. Disponível em: <http://www.iisd.org/measure/principles/progress/bellagio.asp>

JUWANA, Iwan; MUTTIL, Nitin; PERERA, B. J. C. Indicator-based water sustainability assessment—A review. **Science of the total environment**, v. 438, p. 357-371, 2012.

KANNICHE, Mohamed *et al.* Pre-combustion, post-combustion and oxy-combustion in thermal power plant for CO₂ capture. **Applied Thermal Engineering**, v. 30, n. 1, p. 53-62, 2010.

KELLY, Rebecca A. *et al.* Selecting among five common modelling approaches for integrated environmental assessment and management. **Environmental modelling e software**, v. 47, p. 159-181, 2013.

KONG, Ha-Sung; KIM, Byoung-Ju; KANG, Kwang-Sun. Synthesis of CaCO₃-SiO₂ composite using CO₂ for fire retardant. **Materials Letters**, v. 238, p. 278-280, 2019.

KYOTO, **Kyoto Protocol** (1998). Disponível em <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>. Acesso em 20 de nov de 2021.

LAWRENCE, PETER e MEIGH, JEREMY e SULLIVAN, CAROLINE. **The Water Poverty Index: an International Comparison**. Keele Economics Research Papers. 19. Keele, Staffordshire, UK: Department of Economics, Keele University, 2002.

LEITE, D., SANTOS, L., LIMA, R., ASSUNÇÃO, S. e RIBEIRO, A. (2018) - **Equívocos indicadores sustentabilidade**. **Revista Educação Ambiental em Ação** ISSN 1678-0701 · Volume XXI, Número 64 Junho/2018. Disponível em <https://www.revistaea.org/artigo.php?idartigo=3210> Acesso em 13 de novembro de 2022.

LI, Qi *et al.* Application of a health, safety, and environmental screening and ranking framework to the Shenhua CCS project. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 17, p. 504-514, 2013.

LUCQUIAUD e WILKINSON (2021) - **CCSx: Climate Change: Carbon Capture and Storage**. EDX The University of Edinburgh Course. Disponível em <

<https://www.edx.org/course/climate-change-carbon-capture-and-storage>> Acesso em 13 de novembro de 2022.

LUCQUIAUD, Mathieu; GIBBINS, Jon. On the integration of CO₂ capture with coal-fired power plants: A methodology to assess and optimise solvent-based post-combustion capture systems. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 89, n. 9, p. 1553-1571, 2011.

MANKINS, J. C. **Technology Readiness Levels**. A White Paper. April 6, 1995. Advanced Concepts Office. Office of Space Access and Technology. NASA. Disponível em: <http://www.artemisinnovation.com/images/TRL_White_Paper_2004-Edited.pdf>.

MAZENGARB, MICHAEL. **Chevron concedes CCS failures at Gorgon, seeks deal with WA regulators**. Renew Economy, Australia, 19 July 2021. Disponível em: <<https://reneweconomy.com.au/chevron-concedes-ccs-failures-at-gorgon-seeks-deal-with-wa-regulators/>>. Acesso em: 15 de nov. de 2021.

MELO, LARISSA P. **Avaliação Qualitativa da Sustentabilidade na Produção do Bioetanol: Um caso comparativo entre a casca do coco e o bagaço da Cana-De-Açúcar**. 2021. 207 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências Ambientais) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Sergipe, 2021.

NATURAL RESOURCERS LEADERSHIP INSTITUTE. **Multi-Criteria Decision Analysis Spreadsheet**, 2011. Disponível em: <<https://projects.ncsu.edu/nrli/decision-making/MCDA.php>>. Acesso em: 15 de nov. de 2021.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS, **“Passo importante, mas não o suficiente, afirma Guterres sobre acordo da COP26”**, Acesso em 05 de Maio de 2022, disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2021/11/1770432>

ONU, Organização das Nações Unidas, **Padrões climáticos erráticos afetam mais de 2 milhões de pessoas em Corredor Seco da América Central**. [S. l.], 11 ago. 2019. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2019/08/1683101>. Acesso em: 6 jan. 2022.

PARALISADE. **Tutorial do @RISK** – Início Rápido, 2020. Disponível em: <<https://www.palisade-br.com/QuickStart/RISK/>> Acesso em: 20 de nov. de 2021.

PARRIS, Kevin. Agricultural landscape indicators in the context of the OECD work on agri-environmental indicators. **Agricultural impacts on landscapes**, p. 10, 2002.

PRESCOTT-ALLEN R, Nature IufCo, Resources N. **Barometer of sustainability: measuring and communicating wellbeing and sustainable development**. IUCN, International Union for Conservation of Nature and Natural Resources; 1997.

RAHMAN, N. K.; KAMARUDDIN, A. H.; UZIR, M. H. Continuous biosynthesis of farnesyl laurate in packed bed reactor: Optimization using response surface methodology. **Journal of Applied Sciences**, v. 10, n. 12, p. 1110, 2010.

ROBBINS, Anthony. How to understand the results of the climate change summit: Conference of Parties21 (COP21) Paris 2015. **Journal of public health policy**, v. 37, n. 2, p. 129-132, 2016.

SAAVALAINEN, Paula *et al.* Sustainability assessment of chemical processes: evaluation of three synthesis routes of DMC. **Journal of Chemistry**, v. 2015, 2015.

SCHIVLEY e NOLL (2017) **Climate change and life events** <https://climate-life-events.herokuapp.com/>

SCOTTISH CARBON CAPTURE e STORAGE, **Carbon Capture and Storage WorldWide Map**, Acesso em 15 de Nov 2021, disponível em: www.sccs.org.uk/map

SEIFORD, L.; YU, Po-Lung. Potential solutions of lineares systems: The multi-criteria multiple constraint levels program. **Journal of Mathematical Analysis and Applications**, v. 69, n. 2, p. 283-303, 1979.

SINGH, Bhawna; STRØMMAN, Anders H.; HERTWICH, Edgar G. Comparative life cycle environmental assessment of CCS technologies. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 5, n. 4, p. 911-921, 2011.

SPANGENBERG, Joachim H.; BONNIOT, Odile. **Sustainability indicators: a compass on the road towards sustainability**. Wuppertal Papers, 1998.

STOUGIE, Lydia *et al.* Environmental, economic and exergetic sustainability assessment of power generation from fossil and renewable energy sources. **International Journal of Energy Research**, v. 42, n. 9, p. 2916-2926, 2018.

TACHINSKI, Camila Gaspodini *et al.* **Obtenção de gás de síntese a partir da reforma a seco de metano e dióxido de carbono utilizando catalisador de níquel liofilizado**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Florianópolis, 2018.

TANG, Yuting; YOU, Fengqi. Multicriteria environmental and economic analysis of municipal solid waste incineration power plant with carbon capture and separation from the life-cycle perspective. **ACS Sustainable Chemistry e Engineering**, v. 6, n. 1, p. 937-956, 2018.

TROULLAKI, Katerina; ROZAKIS, Stelios; KOSTAKIS, Vasilis. Bridging barriers in sustainability research: A review from sustainability science to life cycle sustainability assessment. **Ecological Economics**, v. 184, p. 107007, 2021.

UNDP, United Nations Development Programme (2015), **What are the Sustainable Development Goals?** Disponível em <<https://www.undp.org/sustainable-development-goals>>. Acesso em Maio de 2022.

VEIGA, José Eli da. Indicadores de sustentabilidade. **Estudos avançados**, v. 24, p. 39-52, 2010.

WANG, Jiamin *et al.* Changing lengths of the four seasons by global warming. **Geophysical Research Letters**, v. 48, n. 6, p. e2020GL091753, 2021.

WIESBERG, Igor Lapenda *et al.* Carbon dioxide management via exergy-based sustainability assessment: Carbon Capture and Storage versus conversion to methanol. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 112, p. 720-732, 2019.

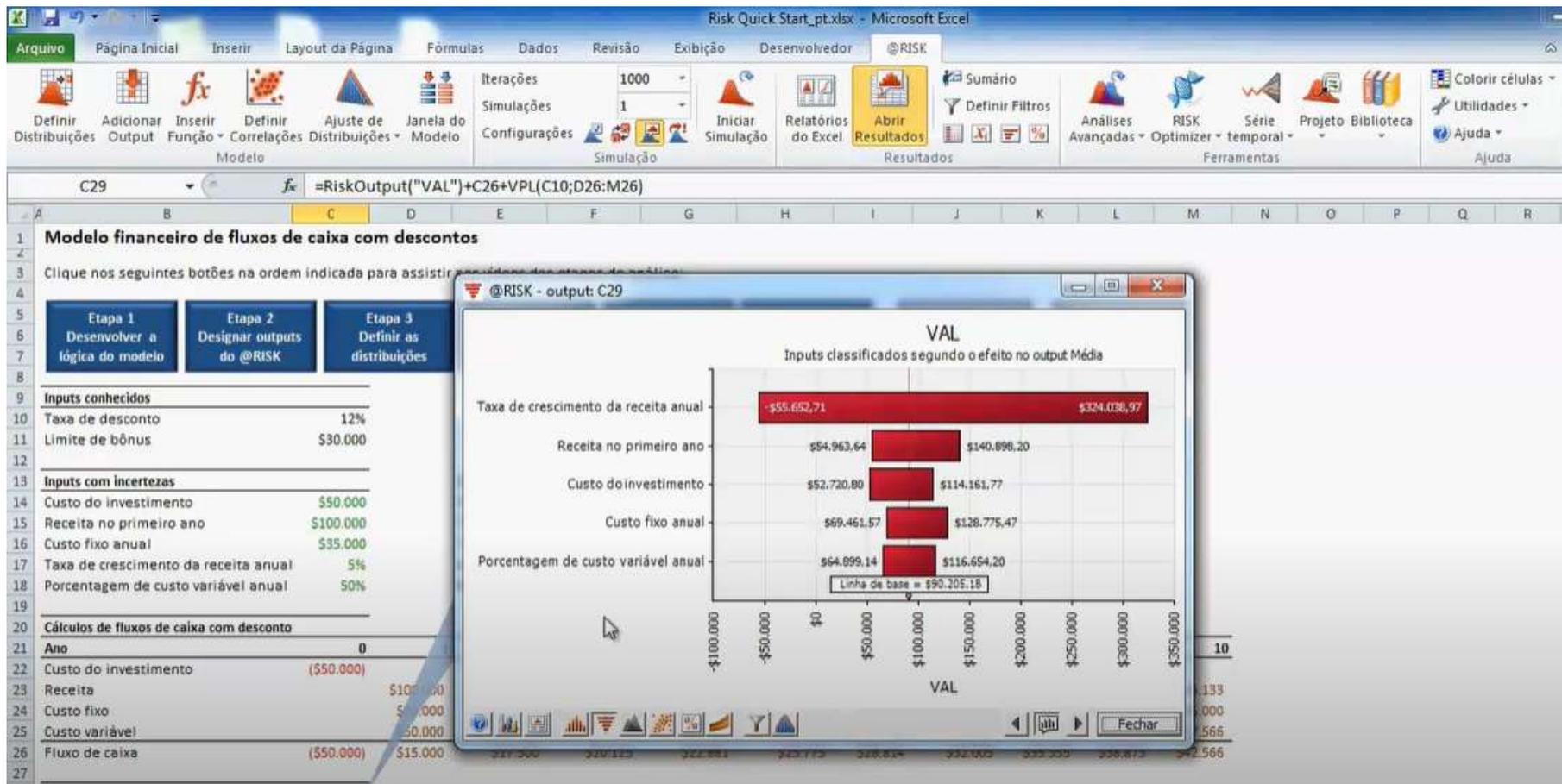
WHITEMARTINS, **Usos do Gás Dióxido de Carbono (CO₂) e do Dióxido de Carbono Líquido pela Indústria.** Praixair – Disponível em: <<https://www.praxair.com.br/gases/buy-liquid-or-compressed-carbon-dioxide-gas>> Acesso em Janeiro de 2023.

ZAPP, Petra *et al.* Overall environmental impacts of CCS technologies—A life cycle approach. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 8, p. 12-21, 2012.

ZIONTS, Stanley. MCDM—If not a roman numeral, then what? **Interfaces**, v. 9, n. 4, p. 94-101, 1979.

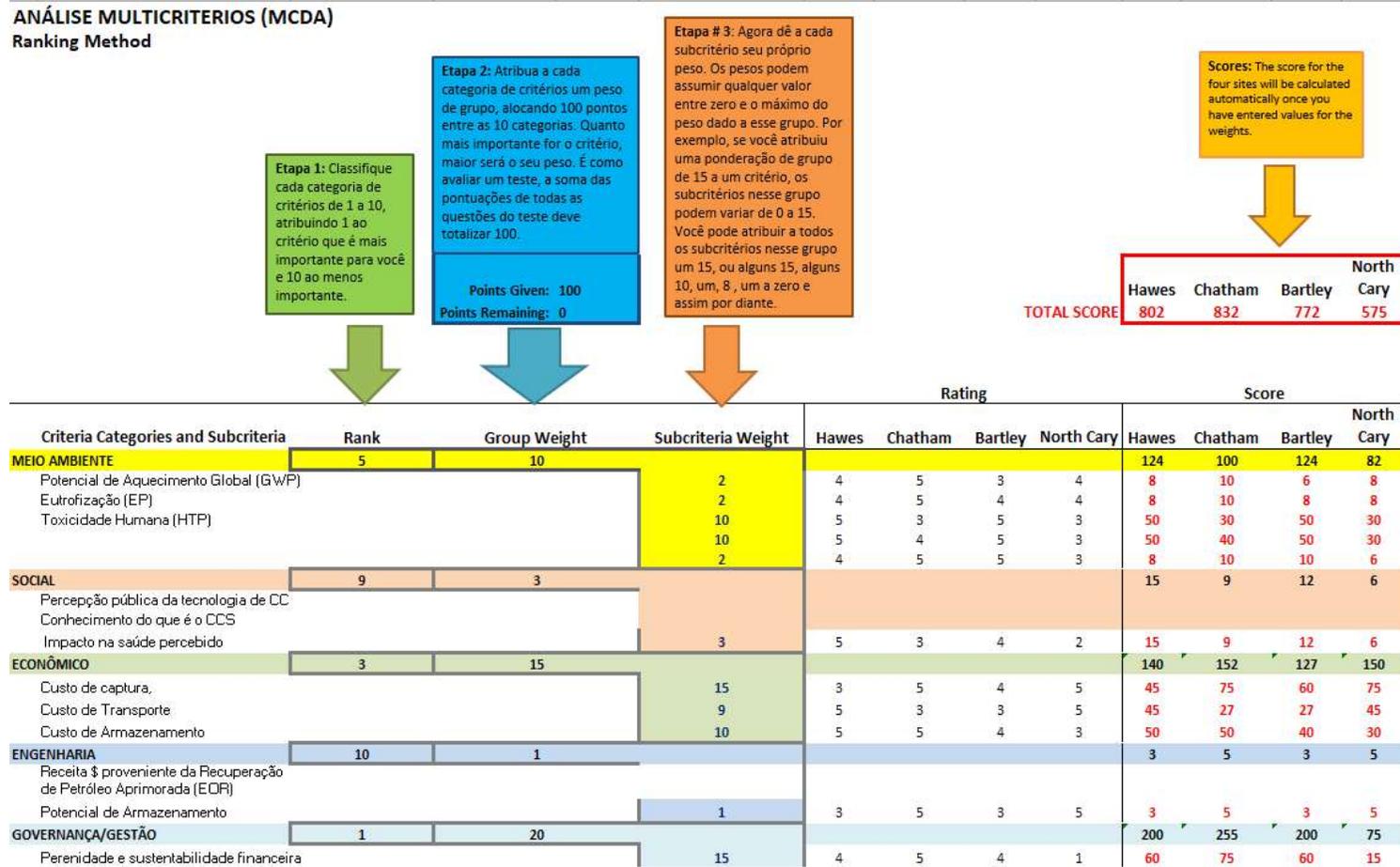
ANEXO

Figura 46- Interface do software @RISK integrado com Excel



Fonte: PARALISADE, 2016

Figura 47- Ferramenta de MCDA-Excel adaptada do NRLI



Fonte: Adaptada do *Natural Resources Leadership Institute*, 2011

APÊNDICE A- Dados primários e secundários das tecnologias selecionadas para MCDA

Tabela 9- Dados primários e secundários da MCDA

| DADOS | UNIDADE | VALOR | FONTES E DESCRIÇÃO |
|--|---|-----------|---|
| DeCARB (Brazil) | Custo EURO/unidade | € 576.923 | Site oficial da tecnologia: www.decarb.eco.br/ Valor obtido através da Patente INPI BR 10 2020 019620 0 |
| | Capacidade captura (tonCO2.ano/unidade) | 166.805 | Valor obtido através da Patente INPI BR 10 2020 019620 0 |
| | Potência (kw) | 13.800 | Valor obtido através da Patente INPI BR 10 2020 019620 0 |
| | Consumo elétrico (kWh) | 1.141 | Valor obtido através da Patente INPI BR 10 2020 019620 0. É positivo por ser energia gerada e não consumida. |
| | Toxicidade Humana HTP (Redução Percentual em anos de vidas perdidos) | 0,03264 | Relação obtida nos dados do projeto A e B de Choptiany Já que o HTP dos projetos que capturavam 92.000 ton CO2/ano= 0,0018 |
| | Eutrofização EP (Redução Percentual de gPO43–eqv/kWh) | -0,025% | X toneladas de co2 por ano da "Y" HTP Valor calculado através do valor médio de -29% de redução percentual, obtida nos relatórios de Choptiany para os projetos A e B, divididos pelo consumo elétrico (kWh). |
| CARBON CLEAN (Chennai in India) | Custo EURO/unidade | 2.856.300 | Site oficial da tecnologia www.carbonclean.com PATENTE AUSTRALIANA AU 2004227918 B2 Valor obtido em: EDIE. In: In action: the world's first fully commercial carbon capture and utilisation plant. [S. 1.], 14 jan. 2021. Disponível em: https://www.edie.net/partner-content/in-action-the-worlds-first-fully-commercial-carbon-capture-and-utilisation-plant/ . Acesso em: 24 set. 2022. |
| | Capacidade captura (tonCO2.ano/unidade) | 60.000 | Valor obtido em: https://www.veolia.com/sites/g/files/dvc4206/files/document/2017/03/PR-Partnership-CCSL-Veolia-290317.pdf |
| | Potência (kw) | 10.000 | Valor obtido em: CARBON CLEAN.Technology to achieve 'net zero'. Disponível em: /www.carbonclean.com/ . Acesso em: 24 set. 2022. |

| | | | |
|--|---|---------------|--|
| | Consumo elétrico (kWh) | -826,81 | Valor calculado, por falta de informação disponível, considerando a razão de $h=0,0827$ dos dados laboratoriais da DeCarb e relação potência/consumo elétrico através da conversão de KW pra kwh através da calculadora: https://www.rapidtables.com/calc/electric/watt-to-kwh-calculator.html |
| | | | Valor negativo por ser energia consumida |
| | Custo EURO/unidade | € 155.192.300 | Site oficial da tecnologia www.carbonengineering.com CARBON ENGINEERING. OUR TECHNOLOGY. Disponível em: carbonengineering.com/ Acesso em: 24 set. 2022. |
| Carbon Engineering (Canadá) | Capacidade captura (ton CO2/ano.unidade) | 1.000.000 | Dados relativos à capacidade de captura, e consumo elétrico foram obtidos em: KEITH, David W. <i>et al.</i> A process for capturing CO2 from the atmosphere. Joule, v. 2, n. 8, p. 1573-1594, 2018. Disponível em |
| | Potência (kw) | 4.427 | Disponível em |
| | Consumo elétrico (kWh) | -366,00 | https://www.cell.com/joule/fulltext/S2542-4351(18)30225-3 Acesso em: 24 set. 2022. |
| | | | Valor relativo à potência (kw) foi calculado, por falta de informação disponível, considerando a razão de $h=0,0827$ dos dados laboratoriais da DeCARB e relação potência/consumo elétrico através da conversão de kWh pra kW através da calculadora: https://www.rapidtables.com/calc/electric/watt-to-kwh-calculator.html |
| | | | Valor negativo por ser energia consumida |
| Projeto A Choptiany (Alberta, Canadá) | Potencial de Aquecimento Global GWP (Redução % de gCO2-eqv/kWh) | 0,159 | Valores de GWP, EP e HTP obtidos em: |
| | Eutrofização EP (Redução % gPO43-eqv/kWh) | -0,127 | CHOPTIANY, John Michael Humphries; PELOT, Ron; SHERREN, Kate. An interdisciplinary perspective on carbon capture and storage assessment methods. Journal of Industrial Ecology, v. 18, n. 3, p. 445-458, 2014. |
| | Toxicidade Humana HTP (Redução % em anos de vidas perdidos) | 0,018 | |

| | | | |
|--|---|--------|--|
| | Consumo elétrico (kWh) | 94,34 | <p>Calculado pelo produto da redução percentual (15%) multiplicado pelo GWP obtido em Choptiany e Pelot, 2014 de 0,159. Conforme o relatório da CER-REC que descreve a redução percentual “A intensidade de gases de efeito estufa da rede elétrica de Saskatchewan, medida como os GEEs emitidos na geração de energia elétrica da província, foi de 660 gramas de CO₂e por quilowatt-hora (g de CO₂e/kWh) de eletricidade gerada em 2019.</p> <p>Esta é uma redução de 15% do nível de 2005 da província de 780 g de CO₂e/kWh. A média nacional em 2019 foi de 120 g de CO₂e/kWh (Figura 8).” Disponível em: https://www.cer-rec.gc.ca/en/data-analysis/energy-markets/provincial-territorial-energy-profiles/provincial-territorial-energy-profiles-saskatchewan.html Acesso em: 24 set. 2022.</p> |
| | % REDUCAO PO4 3- | -11,98 | <p>Razão para a redução foi obtida em: Cuéllar-Franca, R. M., & Azapagic, A. (2015). Carbon capture, storage and utilisation technologies: A critical analysis and comparison of their life cycle environmental impacts. <i>Journal of CO₂ Utilization</i>, 9, 82–102. doi:10.1016/j.jcou.2014.12.001 10.1016/j.jcou.2014.12.001</p> |
| | ton co2 capturado por ano | 92.000 | <p>Disponível em: https://www.cer-rec.gc.ca/en/data-analysis/energy-markets/provincial-territorial-energy-profiles/provincial-territorial-energy-profiles-saskatchewan.html Acesso em: 24 set.</p> |
| Projeto B Choptiany (Saskatchewan, Canadá) | Potencial de Aquecimento Global GWP (Redução Percentual de gCO ₂ -eqv/kWh) | -0,043 | <p>Valores de GWP, EP e HTP obtidos em: CHOPTIANY, John Michael Humphries; PELOT, Ron; SHERREN, Kate. An interdisciplinary perspective on carbon capture and storage assessment methods. <i>Journal of Industrial Ecology</i>, v. 18, n. 3, p. 445-458, 2014.</p> |
| | Eutrofização EP (Redução Percentual de gPO ₄₃ -eqv/kWh) | -0,498 | |
| | Toxicidade Humana HTP (Redução Percentual em anos de vidas perdidos) | 0,503 | |

| | | |
|---------------------------|-------------|--|
| Consumo elétrico (kWh) | 348,8372093 | Razão para o consumo foi obtido em: Cuéllar-Franca, R. M., & Azapagic, A. (2015). Carbon capture, storage and utilisation technologies: A critical analysis and comparison of their life cycle environmental impacts. <i>Journal of CO2 Utilization</i> , 9, 82–102. doi:10.1016/j.jcou.2014.12.001 10.1016/j.jcou.2014.12.001 |
| % REDUCAO PO4 3- | -46,97634 | Disponível em: https://www.cer-rec.gc.ca/en/data-analysis/energy-markets/provincial-territorial-energy-profiles/provincial-territorial-energy-profiles-saskatchewan.html Acesso em: 24 set. |
| ton co2 capturado por ano | 92.000 | Disponível em: https://www.cer-rec.gc.ca/en/data-analysis/energy-markets/provincial-territorial-energy-profiles/provincial-territorial-energy-profiles-saskatchewan.html Acesso em: 24 set. 2022 |

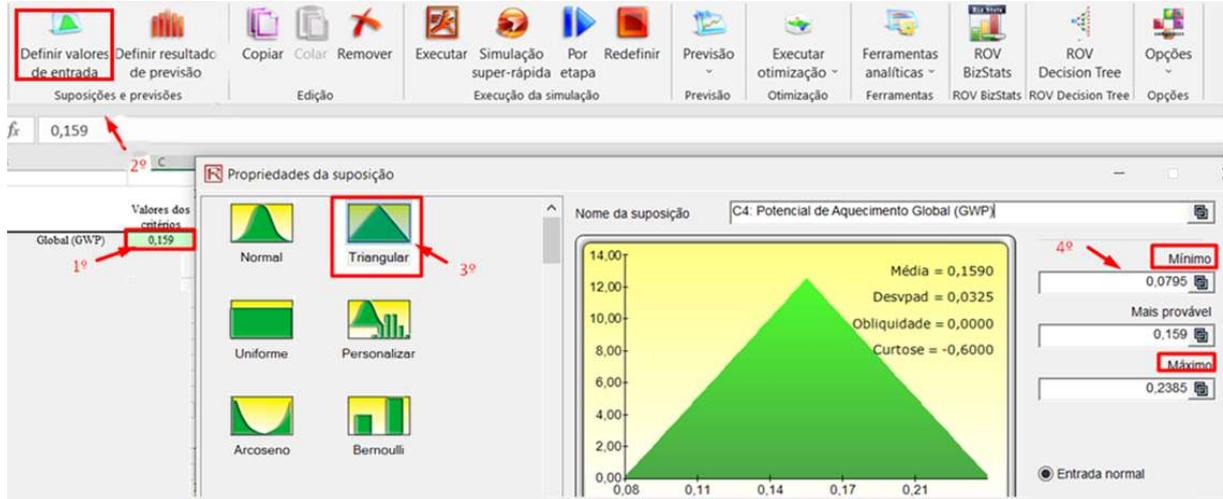
EMISSÃO ton CO2 (2021-2022)

| | | | |
|------------------------------------|-------------|----------------|---|
| Emissão mundial | ton CO2/ano | 36.674.000.000 | WPR, CO2 Emissions by country, disponível em: |
| Brazil (DeCARB) | ton CO2/ano | 478.150.000 | https://worldpopulationreview.com/country-rankings/co2-emissions-by-country . |
| Canada (Carbon Engineering) | ton CO2/ano | 584.850.000 | Acesso em: 26 set 2022. |
| Índia (Carbon Clean) | ton CO2/ano | 2.597.360.000 | |

Fonte: Autor, 2023

APÊNDICE B- Roteiro detalhado de execução da MCDA no Excel

Figura 48- Definindo valores de entrada dos critérios com a extensão RISK Simulator



Fonte: Autor, 2023

Figura 49- Desenvolvimento do Modelo de Decisão

| Área | Crítérios | Valores dos critérios | Unidades |
|---------------|--|-----------------------|--|
| Meio Ambiente | Potencial de Aquecimento Global (GWP) | 0,159 | Redução Percentual de gCO2-eqv/kWh |
| | Eutrofização (EP) | -0,127 | Redução Percentual de gPO43-eqv/kWh |
| | Toxicidade Humana (HTP) | 0,018 | Redução Percentual em anos de vidas perdidos |
| Social | Percepção pública da tecnologia de CCS | 0,52 | 0-1 |
| | Conhecimento do que é o CCS | 0,314 | 0-1 |
| | Impacto na saúde percebido | 0,453 | 0-1 |
| Econômico | Custo de captura | 85,54 | (EUR/t CO2) |
| | Custo de Transporte | 4,5 | (EUR/t CO2) |
| | Custo de Armazenamento | 8,15 | (EUR/t CO2) |
| Engenharia | Potencial de Armazenamento | 29 | Gt |
| | Receita \$ proveniente da Recuperação de Petróleo Aprimorada (EOR) | 32,57 | (EUR/t CO2) |

Fonte: Autor, 2023

Figura 50- Correção matemática dos valores dos critérios

| Projeto A | | | | |
|---------------|--|-----------------------|--|--------------|
| Área | Critérios | Valores dos critérios | Unidades | Eq.Utilidade |
| Meio Ambiente | Potencial de Aquecimento Global (GWP) | 0,159 | Redução Percentual de gCO2-eqv/kWh | 0,428 |
| | Eutrofização (EP) | -0,127 | Redução Percentual de gPO43-eqv/kWh | 0,472 |
| | Toxicidade Humana (HTP) | 0,018 | Redução Percentual em anos de vidas perdidos | 0,363 |
| Social | Percepção pública da tecnologia de CCS | 0,52 | 0-1 | 0,763 |
| | Conhecimento do que é o CCS | 0,314 | 0-1 | 0,410 |
| Econômico | Impacto na saúde percebido | 0,453 | 0-1 | 0,773 |
| | Custo de captura | 85,54 | (EUR/t CO2) | 0,342 |
| | Custo de Transporte | 4,5 | (EUR/t CO2) | 0,393 |
| Engenharia | Custo de Armazenamento | 8,15 | (EUR/t CO2) | 0,244 |
| | Potencial de Armazenamento | 29 | Gt | 0,816 |
| | Receita \$ proveniente da Recuperação de Petróleo Aprimorada (EOR) | 32,57 | (EUR/t CO2) | 0,446 |

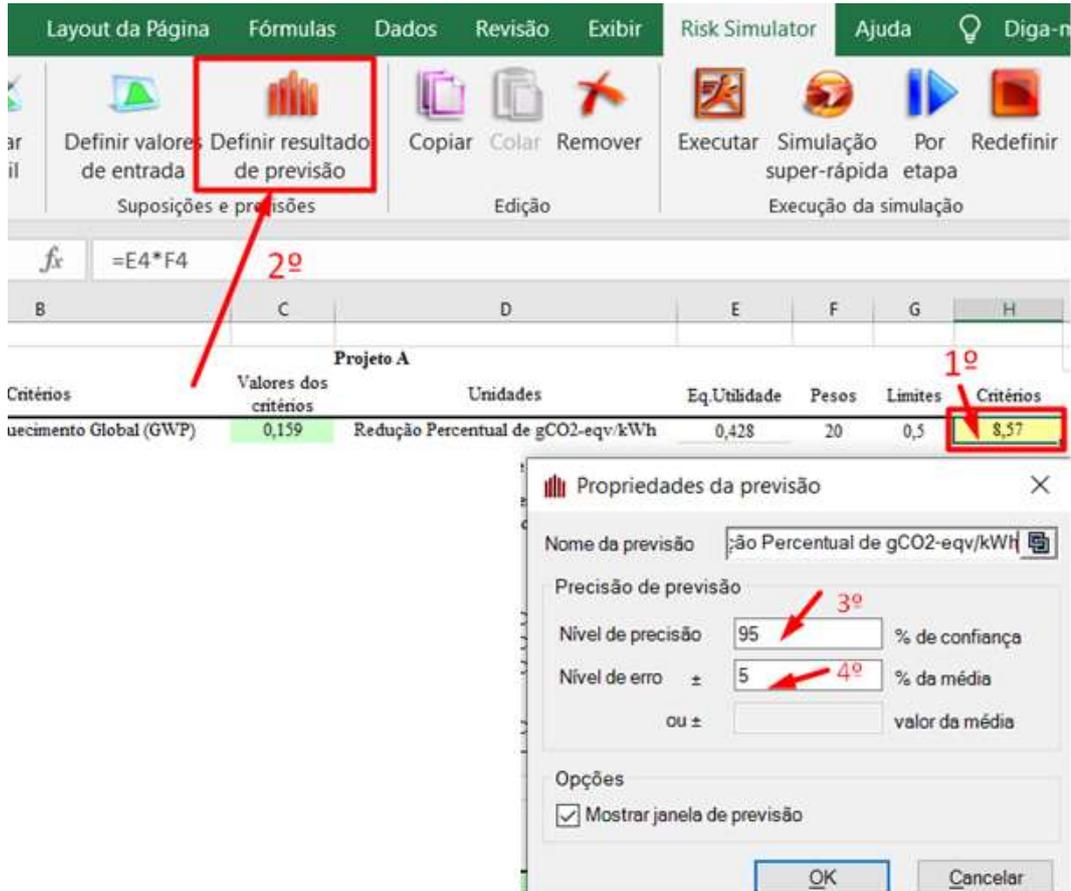
Fonte: Autor, 2023

Figura 51- Pesos estabelecidos pelos tomadores de decisões (DM's)

| Projeto A | | | | |
|-----------------------|--|--------------|------------|--|
| Valores dos critérios | Unidades | Eq.Utilidade | Pesos | |
| 0,159 | Redução Percentual de gCO2-eqv/kWh | 0,428 | 20 | |
| -0,127 | Redução Percentual de gPO43-eqv/kWh | 0,472 | 5 | |
| 0,018 | Redução Percentual em anos de vidas perdidos | 0,363 | 5 | |
| 0,52 | 0-1 | 0,763 | 25 | |
| 0,314 | 0-1 | 0,410 | 4 | |
| 0,453 | 0-1 | 0,773 | 5 | |
| 85,54 | (EUR/t CO2) | 0,342 | 15 | |
| 4,5 | (EUR/t CO2) | 0,393 | 3 | |
| 8,15 | (EUR/t CO2) | 0,244 | 3 | |
| 29 | Gt | 0,816 | 10 | |
| 32,57 | (EUR/t CO2) | 0,446 | 5 | |
| TOTAL | | | 100 | |

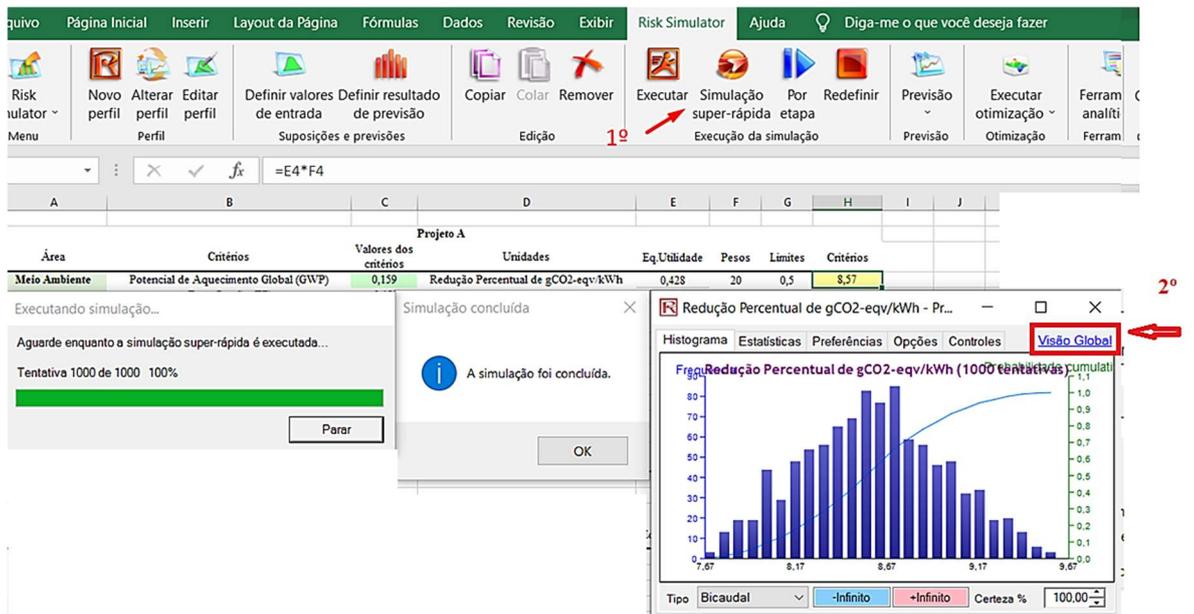
Fonte: Autor, 2023

Figura 52- Definir a previsão de pontuação



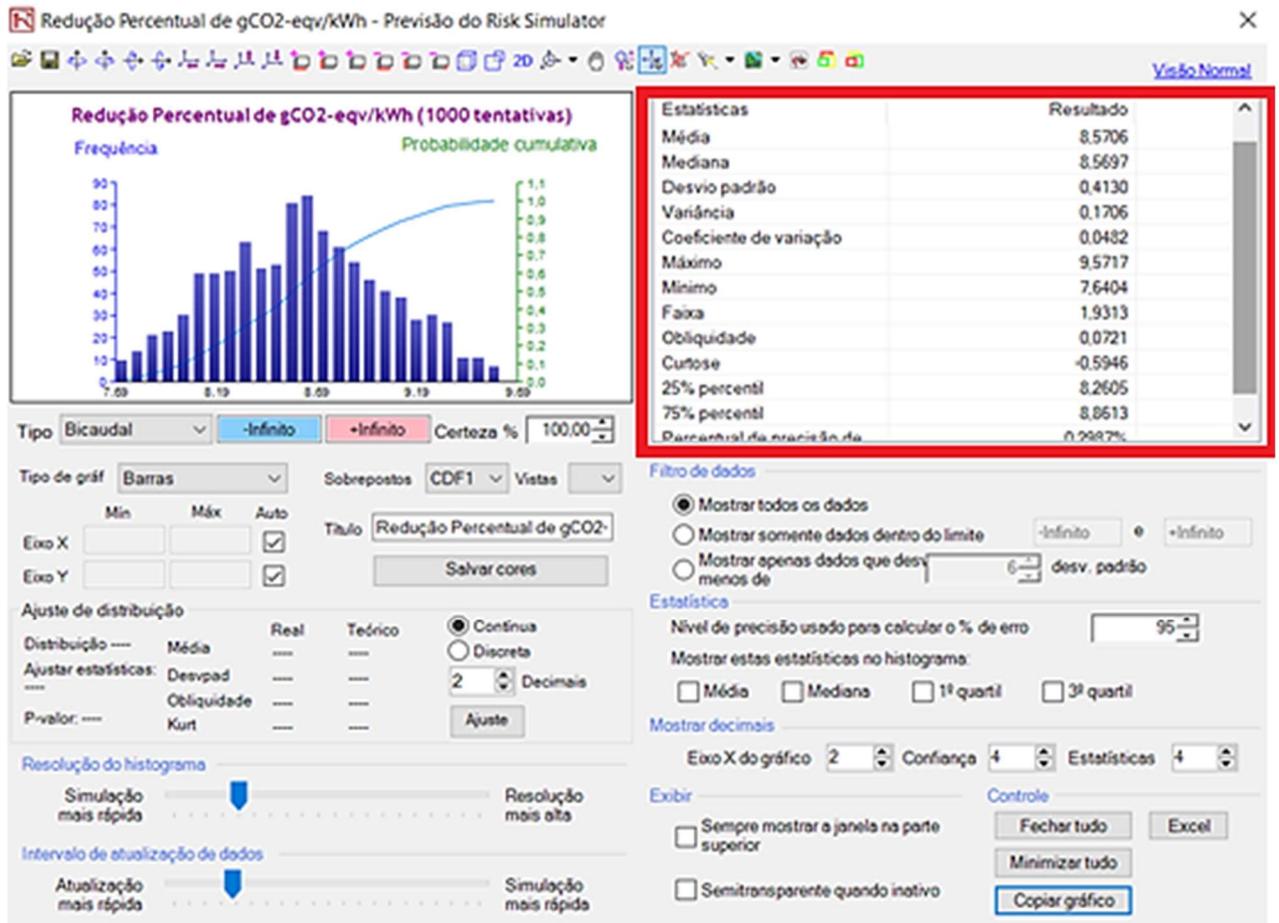
Fonte: Autor, 2023

Figura 53- Execução da análise de risco



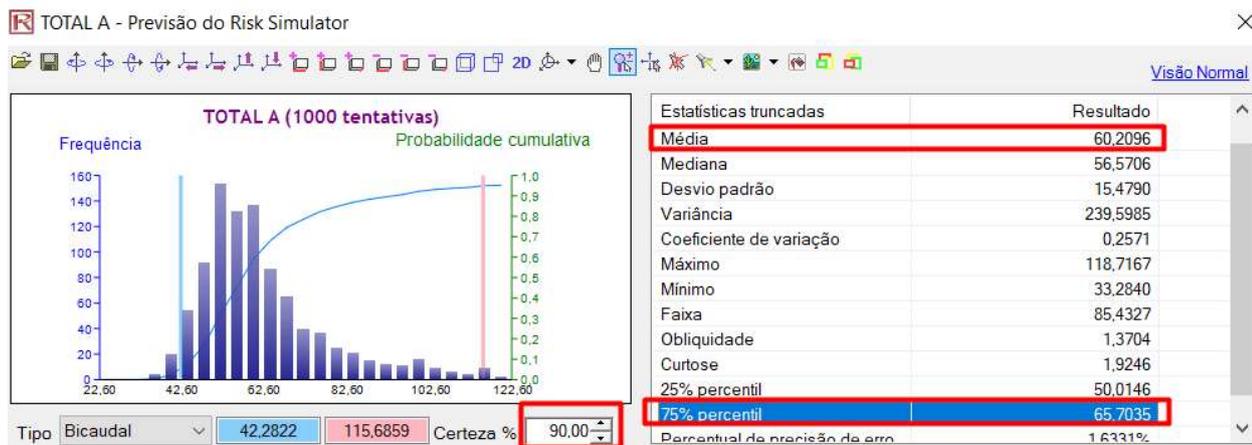
Fonte: Autor, 2023

Figura 54- Resultados da simulação de risco para um critério



Fonte: Autor, 2023

Figura 55- Resultado da previsão total do Projeto A da simulação de Monte-Carlo



Fonte: Autor, 2023

APÊNDICE C- Coleta de dados para a área social

Figura 56- Questionário realizado para coleta dos dados

10/03/2023, 11:04 Captura de Carbono (CO2)



Captura de Carbono (CO2)

Agradecemos sua participação! Este questionário compõe uma etapa da Dissertação de Mestrado do PPGECIA (UFS) em Engenharia e Ciências Ambientais, realizado através de parceria com a startup DeCARE.

O objetivo deste é compreender seus conhecimentos e posicionamento perante o tema de Captura de Carbono

RESPONSÁVEIS PELA PESQUISA:
Arthur Esteves da Costa Mothé Barreto (Mestrando PPGECIA-UFS)
<http://lattes.cnpq.br/3317703725275286>
Dra. Inaura Carolina Carneiro da Rocha (PPGECIA-UFS)
<http://lattes.cnpq.br/6671079822775858>
Dr. Flávio Pietrobon Costa (PPGMSB-UNES)
<http://lattes.cnpq.br/2383628271548614>
Dr. José Jailton Marques (PPGECIA-UFS)
<http://lattes.cnpq.br/0327054232898199>

✉ arthurmotheufs@gmail.com (não compartilhado) Alternar conta

🔒 *Obrigatório

https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSdg9BUV0o46pZPn4_FGqY1cyj2P9W8Lb8b4-rYwtdOC5Nq/viewform 1/5

10/03/2023, 11:04 Captura de Carbono (CO2)

Gostaríamos de saber um pouco sobre você. Qual sua área de atuação? *

Estudante de graduação
 Pesquisador/Acadêmico
 Trabalho em Indústria
 Trabalho em Empresa Privada
 Outro: _____

Aqui está um vídeo para introduzir o tema do nosso questionário. Recomendamos assistir, a duração é de apenas 1 minuto!



https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSdg9BUV0o46pZPn4_FGqY1cyj2P9W8Lb8b4-rYwtdOC5Nq/viewform 2/5

10/03/2023, 11:04 Captura de Carbono (CO2)

Qual seu nível de conhecimento sobre Captura de Carbono (CCS) ? *

Pouco conhecimento

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

Muito conhecimento

https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSdg9BUV0o46pZPn4_FGqY1cyj2P9W8Lb8b4-rYwtdOC5Nq/viewform

10/03/2023, 11:04 Captura de Carbono (CO2)

Qual seu nível de conhecimento sobre Aquecimento Global e Efeito Estufa? *

Pouco conhecimento

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

Muito conhecimento

Progresso: Página 1 de 5

[Próxima](#) [Limpar formulário](#)

Nunca envie senhas pelo Formulários Google.
Este conteúdo não foi criado nem aprovado pelo Google. [Denunciar abuso](#) · [Termos de Serviço](#) · [Política de Privacidade](#)

Google Formulários

2023, 11:04

Captura de Carbono (CO2)



Captura de Carbono (CO2)

✉ arthurmotheufs@gmail.com (não compartilhado) Alternar conta



*Obrigatório

TECNOLOGIA 1 (DAC: Captura Direta da Atmosfera)

A Tecnologia 1 faz a Captura de Carbono (CCS) "puxando" o ar atmosférico e, em seguida, através de uma série de reações químicas, extrai 75% do dióxido de carbono (CO2) enquanto devolve o restante do ar ao meio ambiente. Isso é o que as plantas e as árvores fazem todos os dias enquanto fotossintetizam, exceto que a Tecnologia 1 faz isso muito mais rápido e entrega o dióxido de carbono em uma forma pura e compactada que pode ser armazenada no subsolo ou reutilizada.

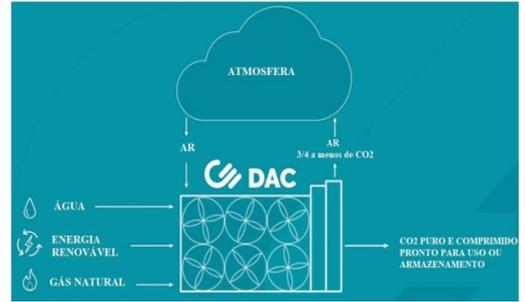
Fonte: <https://carbonengineering.com/our-technology/>

docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSdgB9UV0o46pZPo4_FGqqYlcyjx2P9W8Lb8hb4-YWdtQCSNq/formResponse

1/8

10/03/2023, 11:04

Captura de Carbono (CO2)



1) Qual tipo de impacto você acredita que o uso dessa Tecnologia 1 pode gerar para o MEIO AMBIENTE? *

Impacto NEGATIVO

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10

Impacto POSITIVO

https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSdgB9UV0o46pZPo4_FGqqYlcyjx2P9W8Lb8hb4-YWdtQCSNq/formResponse

2023, 11:04

Captura de Carbono (CO2)

2) Qual tipo de impacto você acredita que o uso dessa Tecnologia 1 pode gerar para a SAÚDE DO SER HUMANO? *

Impacto NEGATIVO

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10

Impacto POSITIVO

docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSdgB9UV0o46pZPo4_FGqqYlcyjx2P9W8Lb8hb4-YWdtQCSNq/formResponse

10/03/2023, 11:04

Captura de Carbono (CO2)

3) O quanto você acredita que esta Tecnologia 1 pode melhorar a qualidade do ar? *

Pouca melhoria

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10

Muita melhoria

https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSdgB9UV0o46pZPo4_FGqqYlcyjx2P9W8Lb8hb4-YWdtQCSNq/formResponse

10/03/2023, 11:04 Captura de Carbono (CO2)

4) O quanto você acha que esta Tecnologia 1 é segura contra acidentes? *

Pouco segura

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

Muito segura



https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSdgB9UV0o46zP04_FGqY1cyjx2P9W8Lb8b4-FYWdtQCSNQ/form/Response 5/8

10/03/2023, 11:04 Captura de Carbono (CO2)

5) O quanto você confia nos cientistas/especialistas/engenheiros/responsáveis * pelo desenvolvimento e pelos projetos desta Tecnologia 1?

Pouca confiança

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

Muita confiança



https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSdgB9UV0o46zP04_FGqY1cyjx2P9W8Lb8b4-FYWdtQCSNQ/form/Response 6/8

10/03/2023, 11:04 Captura de Carbono (CO2)

6) Quanto você apoiaria os investimentos nesta Tecnologia 1? *

Não apoiaria

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

Apoiaria muito

 Página 2 de 5

[Voltar](#) [Próxima](#) [Limpar formulário](#)

Nunca envie senhas pelo Formulários Google.

Este conteúdo não foi criado nem aprovado pelo Google. [Denunciar abuso](#) · [Termos de Serviço](#) · [Política de Privacidade](#)

Google Formulários

10/03/2023, 11:04 Captura de Carbono (CO2)

10/03/2023, 11:04 Captura de Carbono (CO2)

Captura de Carbono (CO2)

arthurmotheufs@gmail.com (não compartilhado) [Alternar conta](#)

*Obrigatório

TECNOLOGIA 2 (CC)

A Tecnologia 2 captura dióxido de carbono (CO2) dos gases de combustão industriais ou gases de escape emitidos por usinas de energia, caldeiras, fornos e instalações químicas. Pode ser usada com gases de origem que contenham concentrações de CO2 entre 3% e 25% em volume. A tecnologia 3 produz CO2 com purezas que variam de 95% a 99%, que pode ser vendido, reutilizado ou armazenado. A tecnologia 3 utiliza solvente químico, equipamentos de processo e integração avançada de calor para reduzir significativamente os custos operacionais e de capital.

Fonte: <https://www.carbonclean.com/technology-licence?hslLang=en>

18

10/03/2023, 11:04 Captura de Carbono (CO2)

1) Qual tipo de impacto você acredita que o uso dessa Tecnologia 2 pode gerar para o MEIO AMBIENTE? *

Impacto NEGATIVO

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

Impacto POSITIVO

28

10/03/2023, 11:04 Captura de Carbono (CO2)

2) Qual tipo de impacto você acredita que o uso dessa Tecnologia 2 pode gerar para a SAÚDE DO SER HUMANO? *

Impacto NEGATIVO

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

Impacto POSITIVO

10/03/2023, 11:04 Captura de Carbono (CO2)

3) O quanto você acredita que esta Tecnologia 2 pode melhorar a qualidade do ar? *

Pouca melhoria

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

Muita melhoria

10/03/2023, 11:04 Captura de Carbono (CO2)

4) O quanto você acha que esta Tecnologia 2 é segura contra acidentes? *

Pouco segura

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

Muito segura

https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSdg8UUVCo46pZP04_FGq11cyj2P9W8Lb8b4-y1WtQCSNQ/formResponse 5/8

10/03/2023, 11:04 Captura de Carbono (CO2)

5) O quanto você confia nos cientistas/especialistas/engenheiros/responsáveis * pelo desenvolvimento e pelos projetos desta Tecnologia 2?

Pouca confiança

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

Muita confiança

https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSdg8UUVCo46pZP04_FGq11cyj2P9W8Lb8b4-y1WtQCSNQ/formResponse

10/03/2023, 11:04 Captura de Carbono (CO2)

6) Quanto você apoiaria os investimentos nesta Tecnologia 2? *

Não apoiaria

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

Apoiaria muito

Página 3 de 5

[Voltar](#) [Próxima](#) [Limpar formulário](#)

Nunca envie senhas pelo Formulários Google.

Este conteúdo não foi criado nem aprovado pelo Google. [Denunciar abuso](#) · [Termos de Serviço](#) · [Política de Privacidade](#)

Google Formulários

10/03/2023, 11:04 Captura de Carbono (CO2)

10/03/2023, 11:05

Captura de Carbono (CO2)



Captura de Carbono (CO2)

arthurmotheufs@gmail.com (não compartilhado) Alternar conta



*Obrigatório

TECNOLOGIA 3 (Captura Direta na Tubulação Industrial)

A Tecnologia 3 faz a captura de 98,9% do CO2 presente no gás de saída das tubulações industriais com pureza de 99%. Permite que os gases que foram capturados possam ser reutilizados em processos industriais, comercializados ou sequestrados. A Tecnologia 3 faz uso de resíduos vegetais na fabricação do material

(adsorvente) de captura do CO2, reduzindo a quantidade desses resíduos nos aterros sanitários. Não há consumo de água no processo de fabricação do adsorvente.

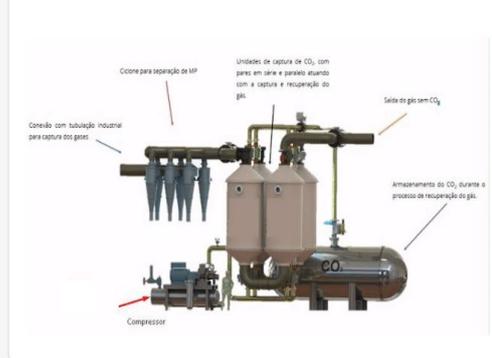
Fonte: <https://www.decarb.eco.br/>

https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSdg99UVCo46pZPo4_FGqY1cyjx2P9W8Lb8hb4-YWdIQCSNqIform/Response

1/8

10/03/2023, 11:05

Captura de Carbono (CO2)



1) Qual tipo de impacto você acredita que o uso dessa Tecnologia 3 pode gerar para o MEIO AMBIENTE? *

Impacto NEGATIVO

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10

Impacto POSITIVO

https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSdg99UVCo46pZPo4_FGqY1cyjx2P9W8Lb8hb4-YWdIQCSNqIform/Response

2/8

10/03/2023, 11:05

Captura de Carbono (CO2)

2) Qual tipo de impacto você acredita que o uso dessa Tecnologia 3 pode gerar para a SAÚDE DO SER HUMANO? *

Impacto NEGATIVO

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10

Impacto POSITIVO

https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSdg99UVCo46pZPo4_FGqY1cyjx2P9W8Lb8hb4-YWdIQCSNqIform/Response

10/03/2023, 11:05

Captura de Carbono (CO2)

3) O quanto você acredita que esta Tecnologia 3 pode melhorar a qualidade do ar? *

Pouca melhoria

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10

Muita melhoria

https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSdg99UVCo46pZPo4_FGqY1cyjx2P9W8Lb8hb4-YWdIQCSNqIform/Response

10/03/2023, 11:05 Captura de Carbono (CO2)

4) O quanto você acha que esta Tecnologia 3 é segura contra acidentes? *

Pouco segura

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

Muito segura

https://docs.google.com/forms/d/1FAIpQLSdg9B9UVCo46pZPo4_FGqqY1cyj2P9W8Lb8h64-YW8QCSNqIform/Response

5/8

10/03/2023, 11:05 Captura de Carbono (CO2)

5) O quanto você confia nos cientistas/especialistas/engenheiros/responsáveis * pelo desenvolvimento e pelos projetos desta Tecnologia 3?

Pouca confiança

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

Muita confiança

https://docs.google.com/forms/d/1FAIpQLSdg9B9UVCo46pZPo4_FGqqY1cyj2P9W8Lb8h64-YW8QCSNqIform/Response

6/8

10/03/2023, 11:05 Captura de Carbono (CO2)

6) Quanto você apoiaria os investimentos nesta Tecnologia 3? *

Não apoiaria

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

Apoiaria muito

Página 4 de 5

[Voltar](#) [Próxima](#) [Limpar formulário](#)

Nunca envie senhas pelo Formulários Google.

[Este conteúdo não foi criado nem aprovado pelo Google. Denunciar abuso - Termos de Serviço - Política de Privacidade](#)

Google Formulários

10/03/2023, 11:05 Captura de Carbono (CO2)

10/03/2023, 11:11

Captura de Carbono (CO2)



Captura de Carbono (CO2)

arthurmotheufs@gmail.com (não compartilhado) [Alternar conta](#)



*Obrigatório

Qual das tecnologias apresentadas (1,2,3) você considera como a de menor impacto ambiental, maior efetividade e segurança? *

- Tecnologia 1
- Tecnologia 2
- Tecnologia 3

10/03/2023, 11:11

Captura de Carbono (CO2)

Das tecnologias apresentadas *

- 1: atua após o CO2 ter sido emitido
- 2: captura o CO2 direto das tubulações
- 3: captura o CO2 direto das tubulações e usa material reciclado no processo.

Pontue a relevância de cada uma delas (1-5)

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Tecnologia 1 | <input type="checkbox"/> |
| Tecnologia 2 | <input type="checkbox"/> |
| Tecnologia 3 | <input type="checkbox"/> |

Algum feedback? Obrigado!

Sua resposta

Página 5 de 5

[Voltar](#)

[Enviar](#)

[Limpar formulário](#)

Nunca envie senhas pelo Formulários Google.

Este conteúdo não foi criado nem aprovado pelo Google. [Denunciar abuso](#) - [Termos de Serviço](#) - [Política de Privacidade](#)

Google Formulários

Figura 57- Resultados da pesquisa de opinião pública via questionário: dados brutos

| DADOS BRUTOS - QUESTIONÁRIO PERCEPÇÃO PÚBLICA DO CCS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|------------------|-----------------------------|---------------------------------|----------------------------|--------|--------|--------|--------|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| PERFIL DO PARTICIPANTE | | | TECNOLOGIA 1 (DAC- CARBON ENG.) | | | | | | TECNOLOGIA 2 (CYCLONE CARBON CLEAN) | | | | | | TECNOLOGIA 3 (SiCSeGe DeCARB) | | | | | | | |
| CONTAGEM | Data/hora | Área atuação | Conhecimento CCS? | Conhecimento Aquec Global? | PERG 1 | PERG 2 | PERG 3 | PERG 4 | PERG 5 | PERG 6 | PERG 1 | PERG 2 | PERG 3 | PERG 4 | PERG 5 | PERG 6 | PERG 1 | PERG 2 | PERG 3 | PERG 4 | PERG 5 | PERG 6 |
| 1º | 03/08/2022 12:15 | Pesquisador/Acadêmico | 9 | 9 | 8 | 7 | 4 | 9 | 9 | 7 | 8 | 3 | 3 | 6 | 8 | 6 | 7 | 7 | 3 | 8 | 9 | 9 |
| 2º | 08/08/2022 14:49 | Empresa Pública | 5 | 8 | 5 | 8 | 8 | 5 | 9 | 8 | 7 | 8 | 8 | 5 | 9 | 9 | 10 | 10 | 10 | 8 | 9 | 10 |
| 3º | 08/08/2022 14:53 | Pesquisador/Acadêmico | 6 | 9 | 4 | 4 | 8 | 5 | 9 | 3 | 7 | 7 | 9 | 5 | 9 | 7 | 9 | 9 | 5 | 9 | 9 | |
| 4º | 08/08/2022 21:05 | Estudante de graduação | 8 | 8 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 7 | 8 | 9 | 9 | 9 | 9 | 7 | 7 | 7 | 7 | 8 | 8 |
| 5º | 09/08/2022 06:42 | Estudante de graduação | 9 | 10 | 10 | 10 | 9 | 9 | 8 | 9 | 10 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 8 | 8 | 8 | 9 | 9 |
| 6º | 09/08/2022 06:56 | Estudante de graduação | 5 | 7 | 5 | 7 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 10 |
| 7º | 09/08/2022 09:04 | Estudante de graduação | 7 | 9 | 9 | 9 | 10 | 7 | 9 | 10 | 9 | 8 | 10 | 10 | 10 | 9 | 10 | 10 | 10 | 10 | 9 | 10 |
| 8º | 09/08/2022 09:25 | Estudante de graduação | 7 | 7 | 8 | 9 | 9 | 8 | 9 | 5 | 9 | 9 | 9 | 9 | 8 | 5 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 5 |
| 9º | 09/08/2022 15:06 | Estudante de graduação | 8 | 10 | 10 | 10 | 10 | 8 | 9 | 8 | 10 | 10 | 10 | 9 | 10 | 10 | 10 | 9 | 8 | 10 | 9 | 8 |
| 10º | 09/08/2022 16:04 | Estudante de graduação | 6 | 6 | 7 | 4 | 8 | 3 | 8 | 4 | 10 | 8 | 9 | 7 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 9 | 10 | 10 |
| 11º | 09/08/2022 19:18 | Estudante de graduação | 5 | 6 | 10 | 10 | 10 | 7 | 9 | 10 | 9 | 8 | 10 | 6 | 10 | 10 | 6 | 7 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 12º | 09/08/2022 19:54 | Pesquisador/Acadêmico | 9 | 9 | 4 | 3 | 7 | 6 | 8 | 9 | 4 | 4 | 8 | 8 | 9 | 8 | 3 | 3 | 7 | 9 | 9 | 9 |
| 13º | 10/08/2022 06:21 | Estudante de graduação | 8 | 8 | 7 | 6 | 5 | 5 | 5 | 3 | 8 | 7 | 8 | 5 | 7 | 9 | 7 | 7 | 7 | 5 | 5 | 7 |
| 14º | 10/08/2022 14:22 | Estudante de graduação | 9 | 9 | 5 | 5 | 6 | 5 | 8 | 4 | 5 | 6 | 6 | 5 | 8 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 8 | 4 |
| 15º | 11/08/2022 10:21 | Estudante de graduação | 7 | 9 | 8 | 9 | 9 | 8 | 9 | 9 | 8 | 9 | 9 | 8 | 9 | 9 | 8 | 9 | 9 | 8 | 9 | 9 |
| 16º | 09/09/2022 09:45 | Trabalho em Empresa Privada | 9 | 10 | 7 | 8 | 9 | 5 | 7 | 6 | 7 | 7 | 6 | 6 | 8 | 5 | 7 | 7 | 6 | 6 | 5 | 6 |
| 17º | 09/09/2022 09:57 | Trabalho em Empresa Privada | 1 | 4 | 10 | 10 | 10 | 10 | 8 | 10 | 9 | 9 | 9 | 8 | 9 | 8 | 10 | 10 | 10 | 9 | 9 | 10 |
| 18º | 09/09/2022 12:00 | Trabalho em Empresa Privada | 8 | 9 | 4 | 4 | 3 | 7 | 8 | 2 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 10 | 9 | 7 | 8 | 7 | 8 | 10 |
| 19º | 09/09/2022 12:13 | Pesquisador/Acadêmico | 5 | 7 | 9 | 9 | 9 | 7 | 7 | 8 | 9 | 8 | 9 | 9 | 9 | 10 | 9 | 9 | 8 | 9 | 9 | 10 |
| 20º | 21/09/2022 10:44 | Pós graduado | 1 | 7 | 6 | 8 | 7 | 5 | 6 | 7 | 7 | 7 | 8 | 6 | 7 | 8 | 7 | 8 | 7 | 6 | 8 | 8 |
| 21º | 28/09/2022 12:08 | Trabalho em Indústria | 3 | 8 | 8 | 8 | 9 | 6 | 9 | 9 | 8 | 8 | 9 | 8 | 9 | 9 | 10 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 |
| 22º | 29/09/2022 08:24 | Trabalho em Empresa Privada | 6 | 9 | 10 | 10 | 10 | 6 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 6 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 8 | 10 | 10 |
| 23º | 29/09/2022 08:30 | Estudante de graduação | 6 | 8 | 10 | 10 | 10 | 5 | 10 | 10 | 9 | 5 | 5 | 7 | 8 | 7 | 10 | 10 | 10 | 7 | 10 | 10 |
| 24º | 29/09/2022 08:31 | Estudante de graduação | 1 | 8 | 10 | 10 | 10 | 7 | 7 | 9 | 10 | 10 | 10 | 8 | 8 | 9 | 10 | 10 | 10 | 8 | 8 | 9 |
| 25º | 29/09/2022 08:37 | Estudante de graduação | 7 | 7 | 8 | 8 | 8 | 5 | 6 | 7 | 8 | 8 | 7 | 6 | 7 | 7 | 5 | 8 | 8 | 4 | 5 | 6 |
| 26º | 29/09/2022 08:39 | Estudante de graduação | 4 | 7 | 9 | 10 | 10 | 7 | 10 | 10 | 9 | 10 | 10 | 7 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 27º | 29/09/2022 08:39 | Trabalho em Empresa Privada | 3 | 7 | 9 | 10 | 10 | 8 | 10 | 10 | 8 | 9 | 10 | 8 | 10 | 8 | 10 | 9 | 10 | 9 | 10 | 10 |
| 28º | 29/09/2022 08:41 | Trabalho em Indústria | 7 | 10 | 9 | 10 | 10 | 8 | 10 | 10 | 8 | 10 | 10 | 9 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 29º | 29/09/2022 08:41 | Estudante de graduação | 3 | 6 | 7 | 9 | 8 | 7 | 10 | 6 | 9 | 9 | 8 | 6 | 10 | 6 | 7 | 8 | 8 | 6 | 10 | 6 |
| 30º | 29/09/2022 08:54 | Estudante de graduação | 4 | 9 | 8 | 10 | 9 | 8 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 9 | 9 | 9 | 9 | 10 | 10 |
| 31º | 29/09/2022 08:58 | Estudante de graduação | 8 | 10 | 9 | 10 | 10 | 8 | 9 | 9 | 9 | 9 | 10 | 8 | 9 | 9 | 10 | 10 | 10 | 10 | 9 | 10 |
| 32º | 29/09/2022 09:17 | Estudante de graduação | 6 | 7 | 9 | 9 | 9 | 7 | 9 | 9 | 9 | 10 | 9 | 7 | 9 | 9 | 9 | 10 | 9 | 7 | 10 | 9 |
| 33º | 29/09/2022 09:34 | Pesquisador/Acadêmico | 5 | 5 | 8 | 7 | 8 | 7 | 10 | 9 | 7 | 6 | 7 | 5 | 10 | 8 | 8 | 7 | 8 | 6 | 9 | 8 |
| 34º | 29/09/2022 09:51 | Trabalho em Empresa Privada | 8 | 10 | 8 | 7 | 10 | 8 | 10 | 10 | 10 | 9 | 9 | 7 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 8 | 10 | 10 |
| 35º | 29/09/2022 09:53 | Trabalho em Empresa Privada | 8 | 10 | 10 | 10 | 10 | 7 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 7 | 10 | 7 | 10 | 10 | 10 | 8 | 10 | 10 |
| 36º | 29/09/2022 10:17 | Pesquisador/Acadêmico | 4 | 4 | 8 | 8 | 9 | 6 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 6 | 8 | 8 | 8 | 9 | 9 | 8 | 8 | 9 |
| 37º | 29/09/2022 10:24 | Trabalho em Empresa Privada | 4 | 9 | 8 | 9 | 10 | 6 | 10 | 10 | 9 | 6 | 9 | 4 | 10 | 8 | 10 | 9 | 10 | 8 | 10 | 9 |
| 38º | 29/09/2022 10:25 | Estudante de graduação | 8 | 9 | 10 | 9 | 9 | 6 | 9 | 9 | 9 | 8 | 8 | 6 | 9 | 9 | 9 | 6 | 10 | 6 | 9 | 10 |
| 39º | 29/09/2022 10:52 | Técnico Universitário | 5 | 7 | 10 | 8 | 8 | 8 | 9 | 10 | 9 | 10 | 10 | 8 | 9 | 10 | 10 | 10 | 10 | 8 | 9 | 10 |
| 40º | 29/09/2022 11:05 | Estudante de graduação | 5 | 6 | 7 | 7 | 9 | 7 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 7 | 9 | 9 | 8 | 8 | 8 | 8 | 9 | 9 |

DADOS BRUTOS - QUESTIONÁRIO PERCEPÇÃO PÚBLICA DO CCS

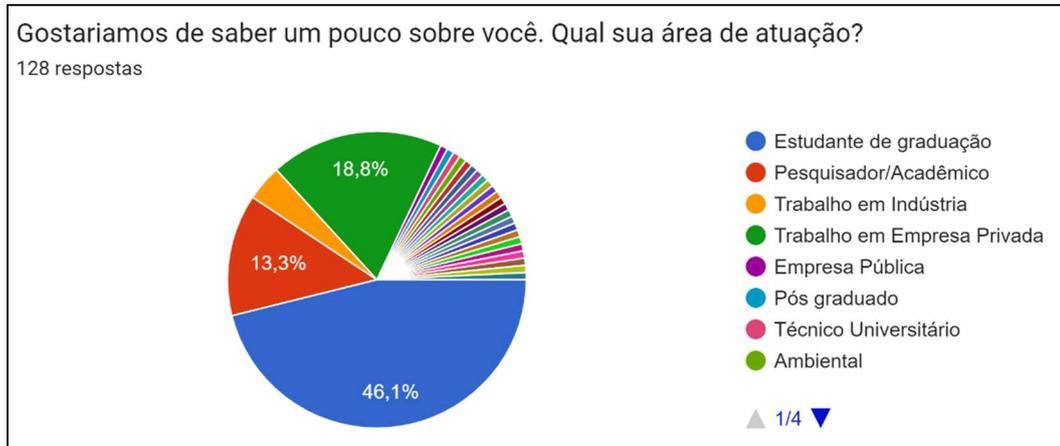
| CONTAGEM | Data/hora | PERFIL DO PARTICIPANTE Área atuação | CCS? | Aquec Global? | TECNOLOGIA 1 (DAC- CARBON ENG.) | | | | | | TECNOLOGIA 2 (CYCLONE CARBON CLEAN) | | | | | | TECNOLOGIA 3 (SICSeGE DeCARB) | | | | | |
|----------|------------------|--|------|---------------|---------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | | | | PERG 1 | PERG 2 | PERG 3 | PERG 4 | PERG 5 | PERG 6 | PERG 1 | PERG 2 | PERG 3 | PERG 4 | PERG 5 | PERG 6 | PERG 1 | PERG 2 | PERG 3 | PERG 4 | PERG 5 | PERG 6 |
| 41º | 29/09/2022 11:06 | Trabalho em Empresa Privada | 8 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 8 | 8 | 7 | 7 | 7 | 8 | 9 | 7 | 9 | 9 | 9 | 9 |
| 42º | 29/09/2022 11:08 | Estudante de graduação Trabalho em Empresa | 10 | 10 | 1 | 1 | 10 | 10 | 10 | 10 | 6 | 7 | 7 | 9 | 10 | 10 | 7 | 6 | 9 | 8 | 10 | 10 |
| 43º | 29/09/2022 11:31 | Privada | 8 | 8 | 8 | 7 | 8 | 5 | 7 | 7 | 9 | 9 | 9 | 6 | 8 | 9 | 10 | 9 | 10 | 7 | 8 | 10 |
| 44º | 29/09/2022 15:01 | Ambiental | 6 | 9 | 10 | 9 | 10 | 8 | 7 | 10 | 10 | 10 | 8 | 5 | 6 | 6 | 10 | 9 | 9 | 8 | 8 | 8 |
| 45º | 29/09/2022 15:08 | Pesquisador/Acadêmico | 7 | 7 | 9 | 9 | 9 | 7 | 7 | 8 | 8 | 8 | 8 | 7 | 7 | 9 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 9 |
| 46º | 29/09/2022 15:14 | Estudante de graduação | 8 | 10 | 7 | 9 | 9 | 10 | 10 | 10 | 9 | 8 | 7 | 7 | 8 | 8 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 10 |
| 47º | 29/09/2022 16:21 | Pesquisador/Acadêmico | 9 | 9 | 8 | 9 | 9 | 9 | 9 | 8 | 8 | 7 | 8 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 8 | 7 | 8 |
| 48º | 29/09/2022 18:19 | Estudante de graduação | 5 | 7 | 4 | 4 | 5 | 4 | 5 | 4 | 3 | 4 | 3 | 4 | 4 | 4 | 8 | 7 | 7 | 8 | 7 | 8 |
| 49º | 29/09/2022 19:17 | Estudante de graduação Trabalho em Empresa | 3 | 7 | 9 | 9 | 9 | 8 | 8 | 7 | 9 | 9 | 9 | 8 | 8 | 6 | 8 | 8 | 9 | 7 | 8 | 7 |
| 50º | 29/09/2022 19:31 | Privada | 5 | 10 | 10 | 10 | 10 | 9 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 8 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 51º | 29/09/2022 19:37 | Pós graduação | 6 | 8 | 7 | 9 | 8 | 7 | 7 | 7 | 10 | 8 | 8 | 8 | 7 | 7 | 8 | 9 | 7 | 9 | 7 | 8 |
| 52º | 29/09/2022 20:01 | Estudante de graduação | 5 | 7 | 7 | 7 | 7 | 5 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 9 | 9 | 9 | 5 | 7 | 8 |
| 53º | 29/09/2022 20:05 | Estudante de graduação | 7 | 10 | 6 | 8 | 10 | 3 | 6 | 10 | 6 | 7 | 7 | 1 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 6 | 7 | 7 |
| 54º | 29/09/2022 20:08 | Estudante de graduação | 6 | 7 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 7 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 55º | 29/09/2022 21:26 | Estudante de graduação | 7 | 8 | 4 | 8 | 8 | 5 | 8 | 8 | 6 | 8 | 7 | 7 | 7 | 9 | 3 | 4 | 7 | 8 | 8 | 7 |
| 56º | 30/09/2022 00:04 | Estudante de graduação Micro empreendedor | 8 | 10 | 10 | 10 | 10 | 9 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 8 | 10 | 10 | 6 | 8 | 10 | 7 | 9 | 10 |
| 57º | 30/09/2022 05:56 | individual ambiental | 7 | 8 | 8 | 10 | 9 | 8 | 9 | 10 | 7 | 9 | 9 | 7 | 9 | 9 | 9 | 10 | 10 | 9 | 10 | 10 |
| 58º | 30/09/2022 06:47 | Estudante de graduação | 3 | 10 | 8 | 8 | 10 | 6 | 10 | 10 | 8 | 10 | 10 | 5 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 59º | 30/09/2022 12:07 | Estudante de graduação | 4 | 9 | 10 | 10 | 10 | 7 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 7 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 7 | 10 | 10 |
| 60º | 30/09/2022 12:54 | Estudante de graduação | 4 | 9 | 7 | 5 | 6 | 8 | 8 | 6 | 8 | 6 | 8 | 7 | 8 | 8 | 10 | 8 | 9 | 10 | 9 | 10 |
| 61º | 30/09/2022 19:31 | Estudante de graduação | 2 | 5 | 5 | 5 | 3 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 9 | 6 | 5 | 6 | 6 | 6 | 9 | 5 |
| 62º | 02/10/2022 12:31 | Consultor | 3 | 9 | 9 | 10 | 8 | 7 | 8 | 10 | 8 | 9 | 9 | 6 | 8 | 10 | 10 | 10 | 10 | 9 | 8 | 10 |
| 63º | 03/10/2022 13:06 | Estudante de graduação | 7 | 9 | 6 | 5 | 9 | 6 | 9 | 8 | 3 | 7 | 8 | 3 | 8 | 7 | 5 | 5 | 5 | 5 | 8 | 7 |
| 64º | 03/10/2022 16:51 | Professora | 7 | 10 | 8 | 9 | 8 | 5 | 6 | 7 | 9 | 8 | 7 | 5 | 6 | 7 | 9 | 8 | 8 | 5 | 6 | 7 |
| 65º | 04/10/2022 10:15 | Estudante de graduação | 5 | 7 | 7 | 8 | 8 | 4 | 8 | 8 | 9 | 9 | 9 | 5 | 8 | 8 | 10 | 10 | 10 | 6 | 9 | 9 |
| 66º | 04/10/2022 18:07 | Estudante de graduação Trabalho em Empresa | 3 | 6 | 10 | 10 | 8 | 7 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 6 | 10 | 10 | 10 | 10 | 8 | 5 | 10 | 10 |
| 67º | 04/10/2022 19:08 | Privada | 10 | 10 | 2 | 5 | 5 | 1 | 6 | 1 | 2 | 3 | 2 | 1 | 5 | 1 | 3 | 4 | 3 | 2 | 5 | 1 |
| 68º | 04/10/2022 19:13 | Pesquisador/Acadêmico | 7 | 10 | 9 | 9 | 10 | 8 | 10 | 9 | 9 | 9 | 9 | 10 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 8 |
| 69º | 04/10/2022 19:19 | Trabalho em escola pública | 1 | 7 | 10 | 10 | 10 | 9 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 70º | 04/10/2022 19:25 | Pesquisador/Acadêmico | 5 | 10 | 7 | 7 | 8 | 8 | 8 | 7 | 8 | 8 | 8 | 8 | 9 | 9 | 7 | 7 | 7 | 8 | 8 | 8 |
| 71º | 04/10/2022 19:34 | Estudante de graduação | 3 | 3 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 72º | 04/10/2022 19:49 | Estudante de graduação | 4 | 5 | 8 | 9 | 10 | 8 | 9 | 8 | 9 | 9 | 8 | 8 | 9 | 9 | 8 | 8 | 7 | 9 | 8 | 9 |
| 73º | 04/10/2022 20:21 | Estudante de graduação | 6 | 7 | 9 | 9 | 8 | 7 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 8 | 8 | 10 | 10 | 10 | 9 | 8 | 9 | 10 |
| 74º | 04/10/2022 21:16 | Pesquisador/Acadêmico | 6 | 8 | 10 | 10 | 10 | 8 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 8 | 9 | 8 | 9 | 9 | 9 | 8 | 8 | 9 |
| 75º | 04/10/2022 21:28 | Estudante de graduação | 5 | 8 | 8 | 9 | 8 | 6 | 8 | 9 | 9 | 9 | 9 | 6 | 7 | 8 | 9 | 8 | 8 | 6 | 7 | 7 |
| 76º | 06/10/2022 14:18 | Estudante de graduação | 5 | 6 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 9 | 9 | 10 | 8 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 77º | 06/10/2022 14:20 | Estudante de graduação | 5 | 7 | 6 | 8 | 6 | 8 | 10 | 10 | 8 | 8 | 7 | 8 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 78º | 06/10/2022 14:20 | Estudante de graduação | 5 | 7 | 6 | 8 | 6 | 8 | 10 | 10 | 8 | 8 | 7 | 8 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 79º | 07/10/2022 21:30 | Mestrando | 5 | 8 | 8 | 8 | 9 | 7 | 9 | 9 | 7 | 7 | 8 | 8 | 9 | 8 | 9 | 9 | 9 | 7 | 9 | 9 |
| 80º | 13/10/2022 15:49 | Pesquisador/Acadêmico | 6 | 8 | 7 | 7 | 7 | 5 | 5 | 5 | 7 | 7 | 7 | 6 | 6 | 6 | 10 | 9 | 10 | 8 | 10 | 10 |
| 81º | 13/10/2022 16:05 | Estudante de graduação | 7 | 7 | 8 | 8 | 8 | 7 | 8 | 8 | 8 | 7 | 8 | 5 | 7 | 8 | 8 | 8 | 8 | 6 | 8 | 8 |
| 82º | 13/10/2022 16:07 | Letras Trabalho em Empresa | 5 | 5 | 9 | 9 | 10 | 9 | 10 | 10 | 10 | 9 | 9 | 10 | 10 | 10 | 9 | 9 | 9 | 9 | 10 | 10 |
| 83º | 13/10/2022 16:28 | Privada Trabalho em Empresa | 7 | 7 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 84º | 13/10/2022 17:06 | Privada | 1 | 4 | 8 | 8 | 8 | 4 | 6 | 7 | 7 | 5 | 8 | 6 | 6 | 6 | 7 | 7 | 7 | 8 | 7 | 7 |
| 85º | 13/10/2022 18:24 | Estudante de graduação | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 9 | 9 | 9 | 10 | 9 | 9 | 9 | 9 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 86º | 13/10/2022 18:34 | Estudante de graduação | 3 | 8 | 10 | 9 | 8 | 9 | 10 | 10 | 8 | 8 | 7 | 8 | 10 | 9 | 10 | 10 | 10 | 9 | 10 | 10 |
| 87º | 13/10/2022 18:35 | Estudante de graduação | 7 | 8 | 10 | 10 | 10 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 8 | 10 | 8 | 7 | 10 | 9 | 8 | 8 | 7 | 10 |
| 88º | 13/10/2022 18:40 | Estudante de graduação | 4 | 8 | 9 | 10 | 10 | 8 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 7 | 8 | 8 | 9 | 9 | 9 | 8 | 9 | 8 |
| 89º | 13/10/2022 18:41 | Estudante de graduação | 2 | 7 | 9 | 8 | 6 | 4 | 5 | 8 | 10 | 7 | 7 | 10 | 8 | 10 | 10 | 9 | 10 | 8 | 10 | 10 |
| 90º | 13/10/2022 18:42 | Estudante de graduação | 4 | 9 | 10 | 10 | 10 | 7 | 10 | 10 | 9 | 10 | 10 | 8 | 9 | 10 | 10 | 10 | 10 | 6 | 10 | 10 |

DADOS BRUTOS - QUESTIONÁRIO PERCEPÇÃO PÚBLICA DO CCS

| PERFIL DO PARTICIPANTE | | | TECNOLOGIA 1 (DAC- CARBON ENG.) | | | | | | TECNOLOGIA 2 (CYCLONE CARBON CLEAN) | | | | | | TECNOLOGIA 3 (SICSeGE DeCARB) | | | | | | | | |
|------------------------|------------------|--|---------------------------------|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----|
| CONTAGEM | Data/hora | Área atuação | Conhecimento CCS? | Conhecimento Aquec Global? | PERG 1 | PERG 2 | PERG 3 | PERG 4 | PERG 5 | PERG 6 | PERG 1 | PERG 2 | PERG 3 | PERG 4 | PERG 5 | PERG 6 | PERG 1 | PERG 2 | PERG 3 | PERG 4 | PERG 5 | PERG 6 | |
| 91º | 13/10/2022 18:43 | Estudante de graduação | 2 | 7 | 8 | 8 | 6 | 8 | 8 | 6 | 6 | 7 | 6 | 5 | 8 | 5 | 9 | 8 | 9 | 6 | 8 | 8 | 8 |
| 92º | 13/10/2022 19:26 | Estudante de graduação | 2 | 8 | 9 | 9 | 10 | 8 | 9 | 10 | 9 | 8 | 10 | 7 | 8 | 8 | 10 | 9 | 10 | 9 | 9 | 10 | 10 |
| 93º | 13/10/2022 19:33 | concurseira | 7 | 9 | 7 | 9 | 7 | 7 | 7 | 5 | 6 | 6 | 6 | 4 | 6 | 5 | 6 | 5 | 8 | 5 | 5 | 4 | 4 |
| 94º | 13/10/2022 20:21 | Trabalho em Empresa Privada | 6 | 6 | 9 | 9 | 9 | 8 | 10 | 10 | 8 | 8 | 9 | 8 | 10 | 9 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 95º | 13/10/2022 20:27 | Trabalho em Empresa Privada | 7 | 8 | 8 | 8 | 9 | 7 | 8 | 10 | 8 | 8 | 9 | 8 | 8 | 10 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 10 |
| 96º | 13/10/2022 20:37 | Trabalho em Indústria | 7 | 10 | 9 | 10 | 9 | 6 | 7 | 10 | 10 | 10 | 10 | 7 | 7 | 10 | 10 | 10 | 10 | 9 | 9 | 10 | 10 |
| 97º | 13/10/2022 21:33 | Servidor publico | 2 | 9 | 9 | 9 | 8 | 5 | 5 | 7 | 8 | 6 | 8 | 7 | 7 | 8 | 9 | 9 | 9 | 8 | 8 | 9 | 9 |
| 98º | 13/10/2022 22:13 | Trabalho em Empresa Privada | 4 | 7 | 8 | 8 | 8 | 7 | 9 | 10 | 7 | 7 | 7 | 8 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 10 | 10 | 10 |
| 99º | 14/10/2022 01:05 | Advogada | 4 | 6 | 9 | 9 | 9 | 9 | 10 | 10 | 9 | 9 | 9 | 9 | 8 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 100º | 14/10/2022 06:04 | Pesquisador/Acadêmico | 8 | 9 | 5 | 9 | 9 | 6 | 8 | 6 | 8 | 9 | 9 | 7 | 8 | 9 | 10 | 9 | 10 | 9 | 9 | 9 | 9 |
| 101º | 14/10/2022 07:00 | Pesquisador/Acadêmico | 8 | 8 | 9 | 9 | 9 | 8 | 10 | 10 | 8 | 8 | 9 | 7 | 10 | 10 | 9 | 9 | 9 | 8 | 10 | 10 | 10 |
| 102º | 14/10/2022 07:22 | Pesquisador/Acadêmico | 8 | 8 | 9 | 10 | 10 | 8 | 10 | 10 | 8 | 10 | 9 | 8 | 10 | 9 | 9 | 10 | 10 | 8 | 10 | 10 | 10 |
| 103º | 14/10/2022 08:39 | Pesquisador/Acadêmico | 7 | 7 | 3 | 6 | 7 | 7 | 10 | 10 | 7 | 7 | 8 | 7 | 10 | 10 | 3 | 4 | 5 | 8 | 10 | 10 | 10 |
| 104º | 16/10/2022 19:24 | Estudante de graduação | 7 | 8 | 8 | 8 | 9 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 6 | 6 | 7 | 5 | 9 | 9 | 9 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| 105º | 16/10/2022 22:18 | Estudante de graduação | 1 | 7 | 2 | 3 | 5 | 3 | 5 | 5 | 3 | 3 | 7 | 3 | 7 | 7 | 2 | 1 | 8 | 5 | 8 | 8 | 8 |
| 106º | 17/10/2022 12:16 | Estudante de graduação | 3 | 7 | 9 | 9 | 7 | 7 | 9 | 10 | 9 | 9 | 7 | 5 | 9 | 8 | 10 | 10 | 8 | 8 | 9 | 8 | 8 |
| 107º | 18/10/2022 10:05 | Estudante de graduação | 1 | 8 | 10 | 10 | 10 | 8 | 8 | 8 | 10 | 10 | 10 | 8 | 8 | 8 | 10 | 10 | 10 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| 108º | 18/10/2022 10:34 | Estudante de graduação | 5 | 8 | 10 | 1 | 10 | 1 | 10 | 10 | 1 | 10 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 10 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| 109º | 19/10/2022 07:09 | Sou eng.ambiental mas não atuante ainda | 4 | 7 | 8 | 8 | 8 | 7 | 8 | 8 | 4 | 5 | 3 | 5 | 5 | 4 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 |
| 110º | 21/10/2022 16:30 | Trabalho em Empresa Privada | 3 | 7 | 8 | 8 | 10 | 8 | 8 | 10 | 6 | 6 | 6 | 7 | 7 | 7 | 10 | 10 | 10 | 8 | 9 | 10 | 10 |
| 111º | 24/10/2022 14:56 | Pesquisador/Acadêmico | 10 | 10 | 7 | 7 | 7 | 7 | 9 | 8 | 10 | 9 | 10 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 112º | 25/10/2022 10:28 | Trabalho em Empresa Privada | 5 | 6 | 9 | 9 | 9 | 8 | 7 | 9 | 8 | 8 | 8 | 7 | 7 | 7 | 8 | 8 | 8 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| 113º | 25/10/2022 13:16 | Trabalho em Empresa Privada | 7 | 8 | 9 | 9 | 9 | 8 | 9 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 7 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| 114º | 25/10/2022 16:52 | Consultor | 8 | 8 | 10 | 9 | 9 | 9 | 10 | 10 | 10 | 10 | 9 | 9 | 10 | 10 | 9 | 10 | 10 | 8 | 10 | 10 | 10 |
| 115º | 25/10/2022 18:18 | Trabalho em Empresa Privada | 3 | 6 | 8 | 9 | 8 | 9 | 10 | 9 | 9 | 9 | 8 | 9 | 10 | 9 | 9 | 10 | 8 | 9 | 10 | 10 | 10 |
| 116º | 25/10/2022 19:37 | Órgão Público | 7 | 7 | 6 | 7 | 6 | 5 | 4 | 4 | 7 | 7 | 5 | 4 | 4 | 4 | 6 | 6 | 6 | 5 | 4 | 4 | 4 |
| 117º | 25/10/2022 20:41 | Trabalho em Indústria | 7 | 7 | 3 | 3 | 7 | 8 | 7 | 6 | 3 | 3 | 8 | 7 | 7 | 7 | 2 | 3 | 8 | 7 | 8 | 8 | 8 |
| 118º | 25/10/2022 20:50 | Trabalho em Empresa Privada | 7 | 8 | 3 | 3 | 9 | 4 | 3 | 10 | 10 | 10 | 9 | 9 | 9 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 119º | 25/10/2022 21:14 | Estudante de graduação | 2 | 5 | 7 | 2 | 5 | 6 | 7 | 3 | 10 | 5 | 7 | 3 | 10 | 4 | 5 | 10 | 7 | 10 | 4 | 3 | 3 |
| 120º | 25/10/2022 22:01 | Trabalho em Empresa Privada | 6 | 8 | 5 | 4 | 8 | 6 | 9 | 5 | 9 | 8 | 5 | 3 | 6 | 5 | 4 | 4 | 6 | 8 | 9 | 7 | 7 |
| 121º | 25/10/2022 22:05 | Coordenador NIT UFBA / Fundador de Venture Builder | 9 | 9 | 7 | 8 | 7 | 7 | 6 | 4 | 9 | 9 | 9 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 122º | 25/10/2022 23:03 | Trabalho em Empresa Privada | 10 | 10 | 7 | 8 | 8 | 3 | 10 | 10 | 6 | 6 | 4 | 5 | 5 | 7 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 123º | 26/10/2022 05:49 | Aposentado | 4 | 6 | 10 | 10 | 9 | 7 | 8 | 9 | 7 | 7 | 7 | 6 | 8 | 6 | 8 | 8 | 8 | 7 | 8 | 8 | 8 |
| 124º | 26/10/2022 08:05 | Estudante de graduação | 4 | 4 | 3 | 9 | 8 | 4 | 4 | 4 | 4 | 8 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 8 | 9 | 4 | 4 | 5 | 5 |
| 125º | 26/10/2022 08:29 | Consultoria na área regulatória | 4 | 8 | 10 | 10 | 8 | 5 | 10 | 10 | 6 | 7 | 8 | 8 | 10 | 9 | 8 | 8 | 8 | 8 | 10 | 10 | 10 |
| 126º | 26/10/2022 11:44 | Advogado autônomo | 5 | 4 | 9 | 8 | 7 | 7 | 7 | 7 | 8 | 8 | 8 | 9 | 6 | 8 | 7 | 7 | 9 | 9 | 8 | 8 | 8 |
| 127º | 26/10/2022 11:53 | Trabalho em Indústria | 9 | 9 | 10 | 10 | 10 | 6 | 5 | 10 | 9 | 8 | 9 | 9 | 8 | 6 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 128º | 26/10/2022 15:51 | Aposentada | 3 | 4 | 6 | 6 | 9 | 4 | 9 | 8 | 8 | 8 | 9 | 8 | 9 | 8 | 8 | 8 | 9 | 8 | 9 | 8 | 8 |
| 129º | 08/11/2022 17:07 | Administrador | 3 | 6 | 10 | 5 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| MÉDIA | | | 5,60 | 7,75 | 7,81 | 8,02 | 8,44 | 6,81 | 8,26 | 8,17 | 7,96 | 7,95 | 8,03 | 6,91 | 8,25 | 8,02 | 8,30 | 8,37 | 8,57 | 7,80 | 8,53 | 8,64 | |

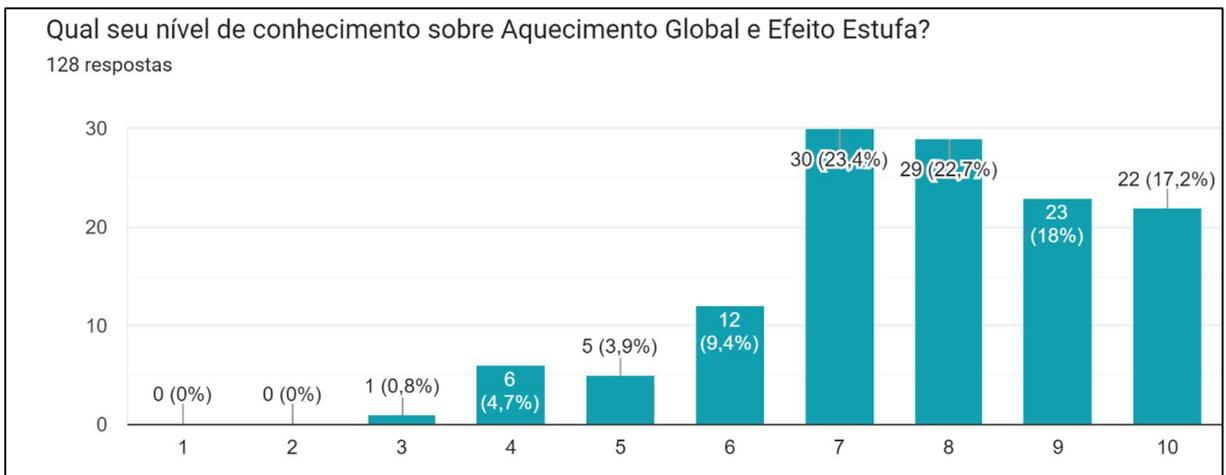
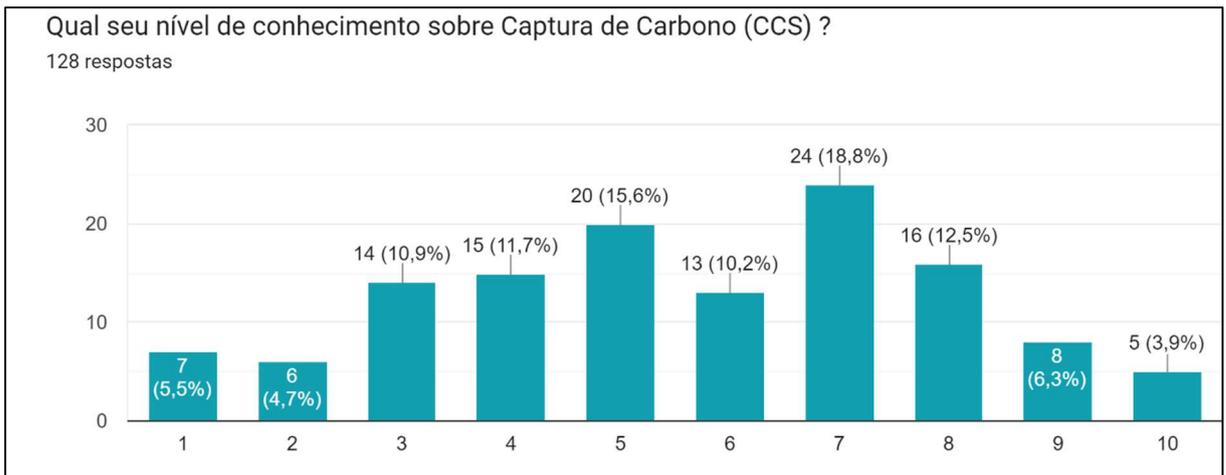
Fonte: Autor, 2023

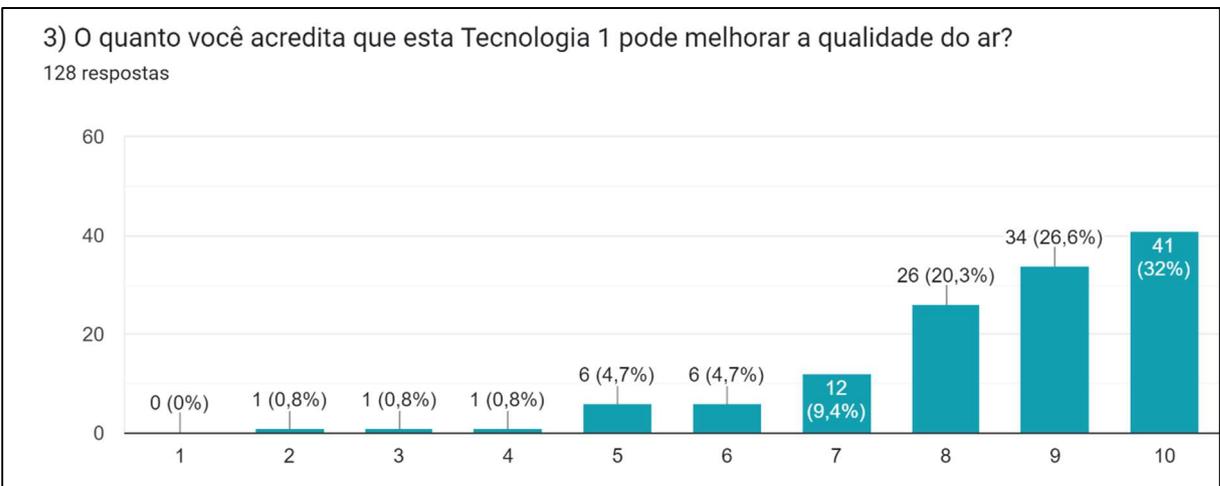
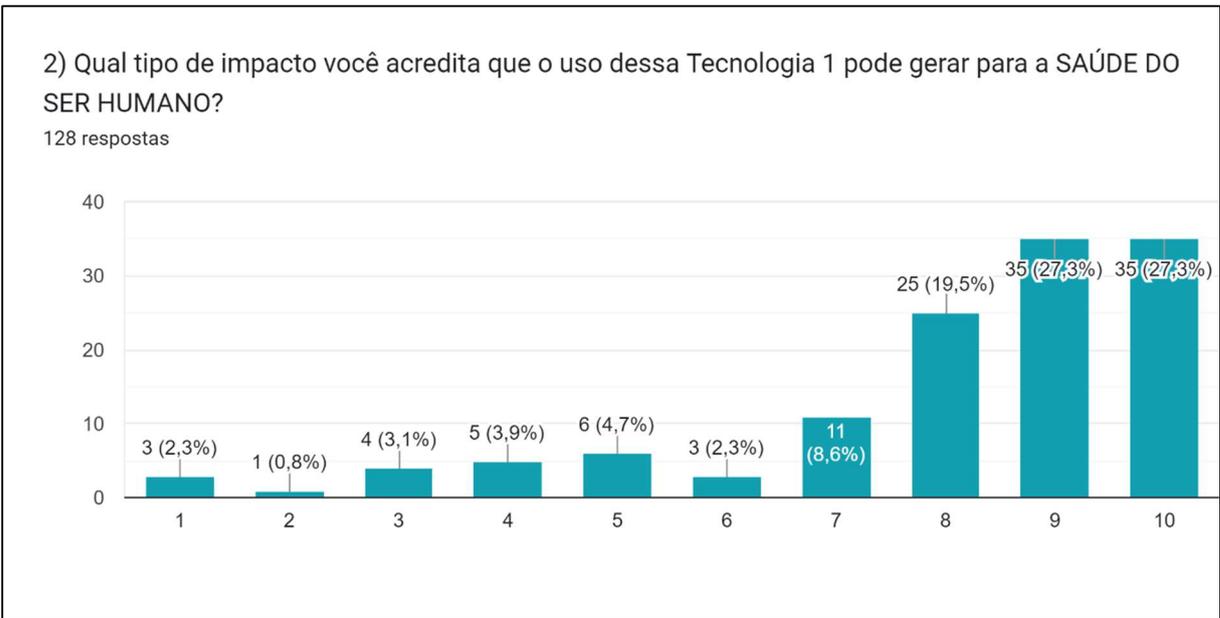
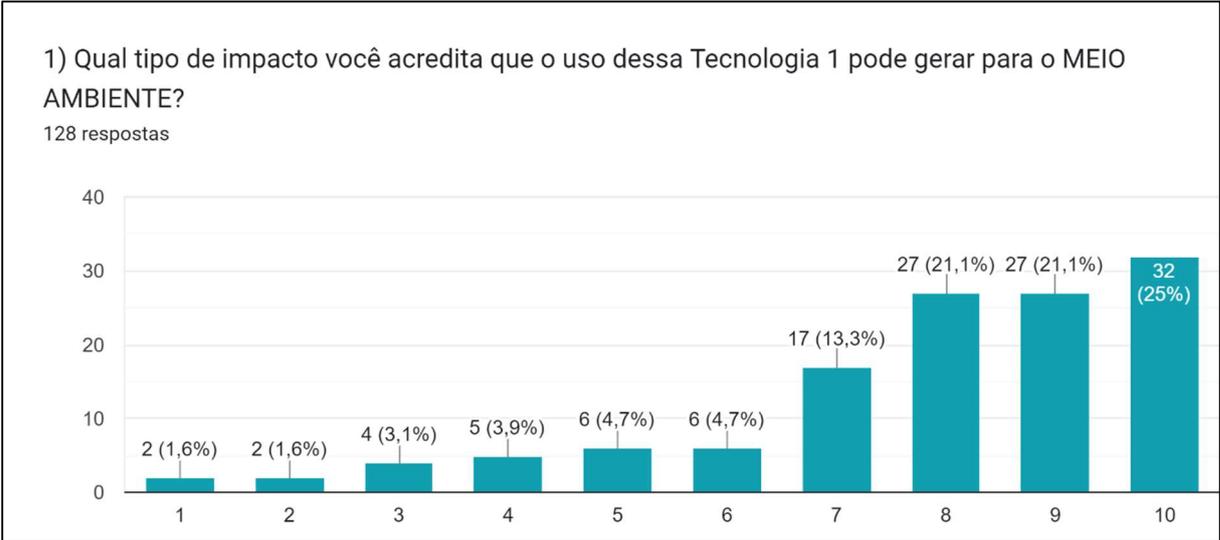
Figura 58- Público amostral do questionário social



Fonte: Google Forms, 2022

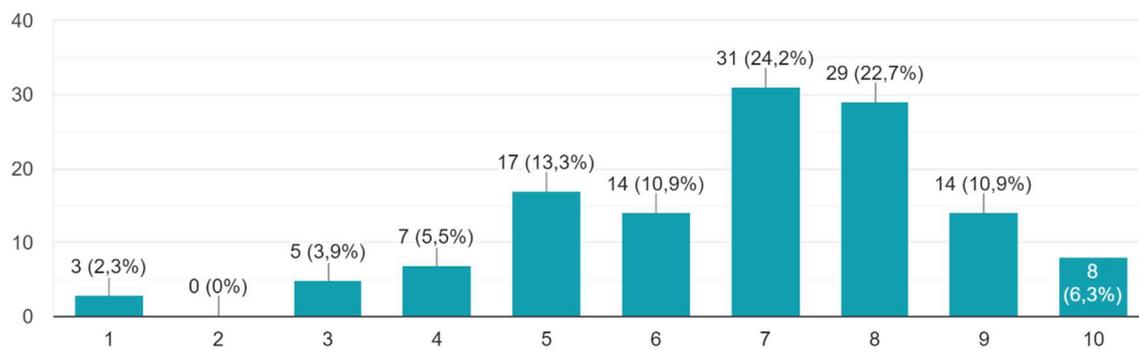
Figura 59- Gráficos gerados para cada pergunta do questionário social via Google Forms





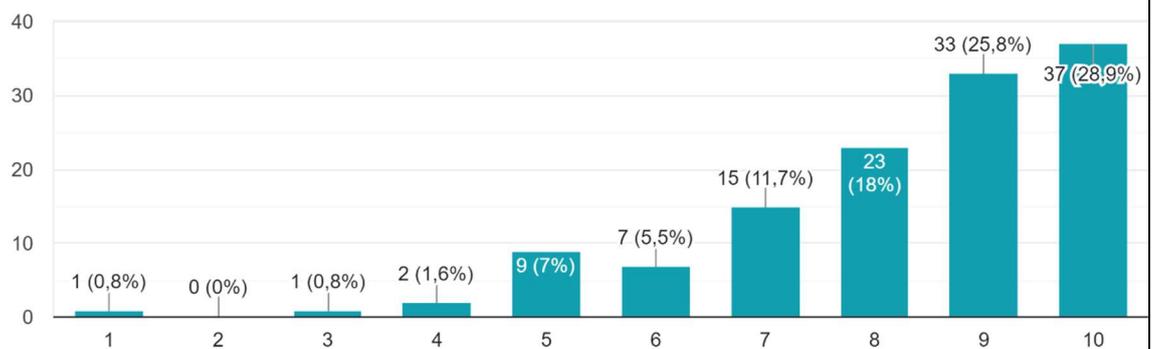
4) O quanto você acha que esta Tecnologia 1 é segura contra acidentes?

128 respostas



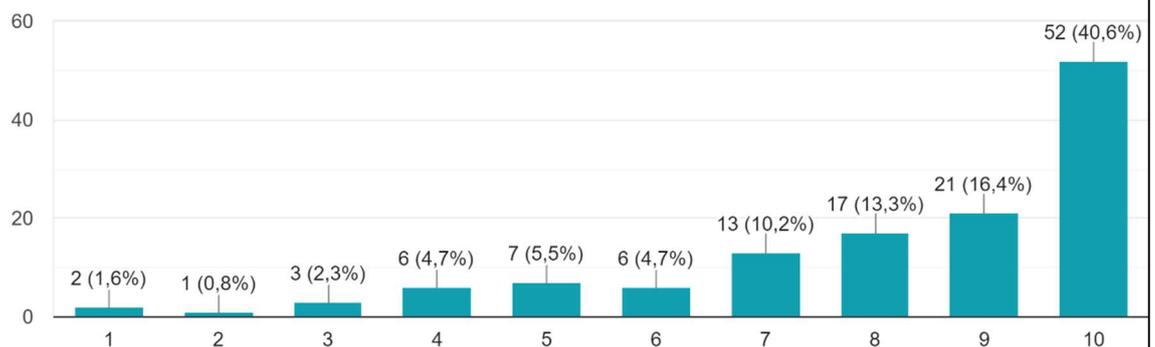
5) O quanto você confia nos cientistas/especialistas/engenheiros/responsáveis pelo desenvolvimento e pelos projetos desta Tecnologia 1?

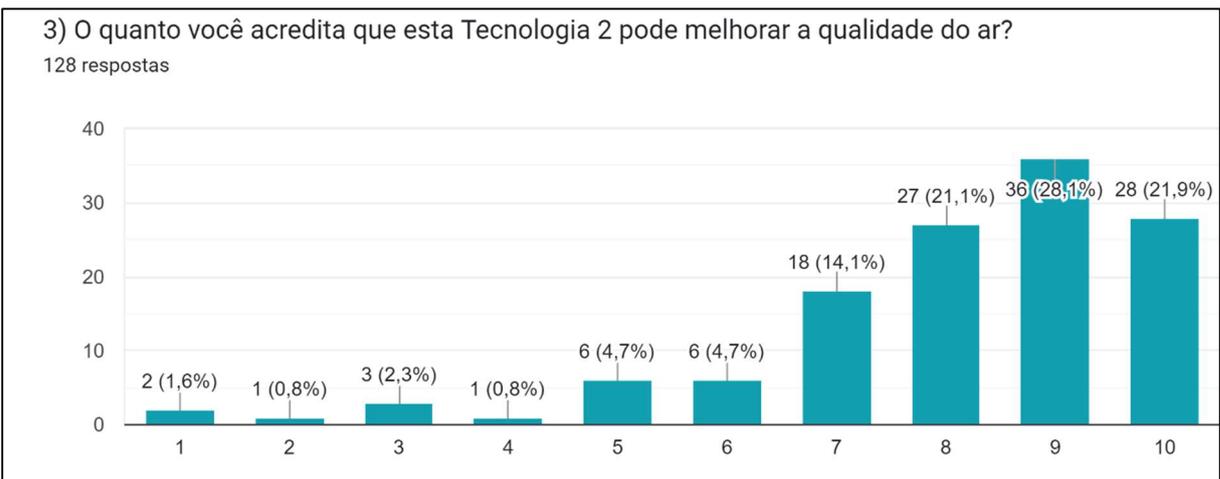
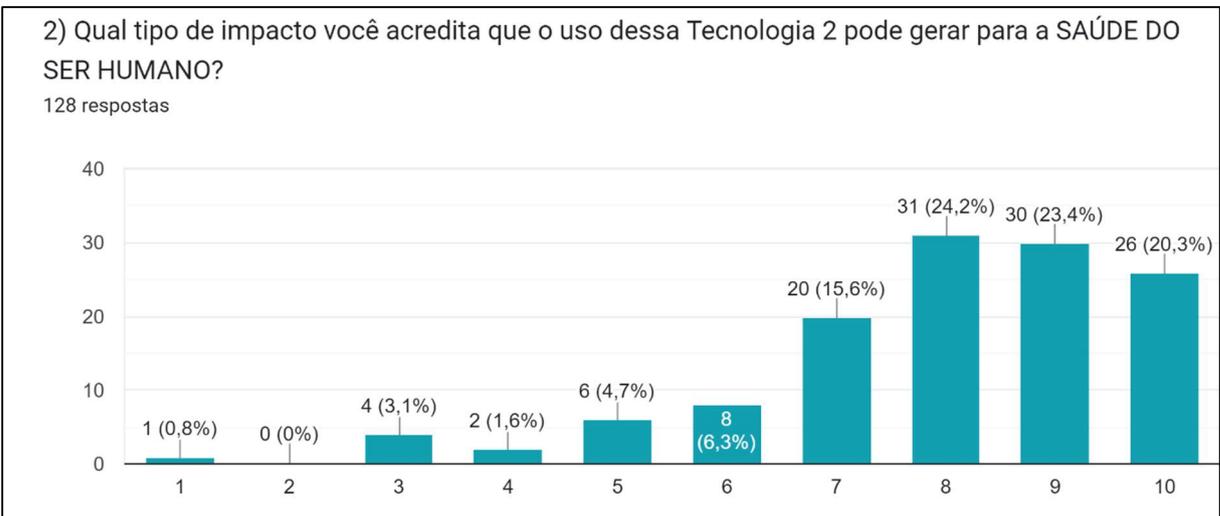
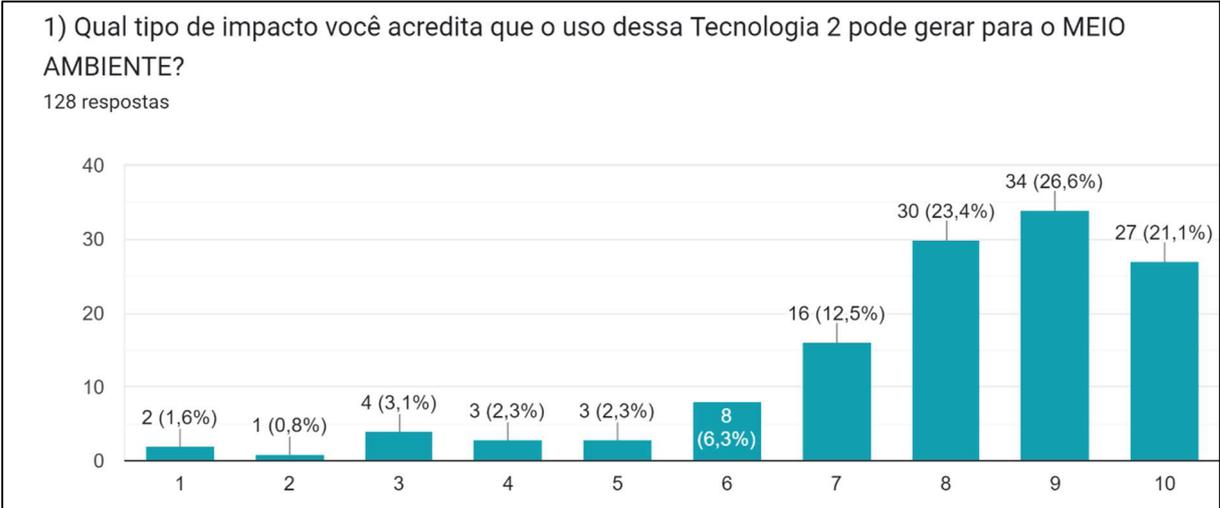
128 respostas

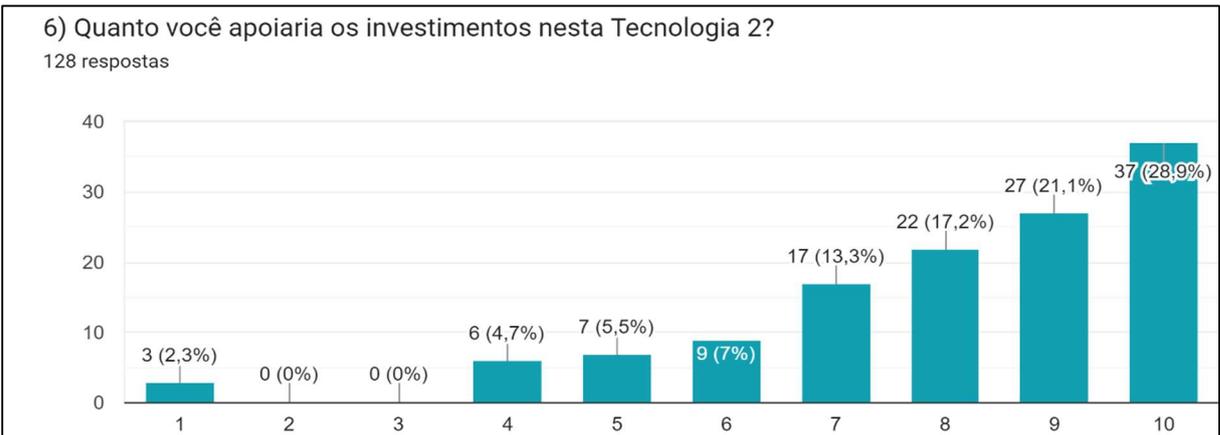
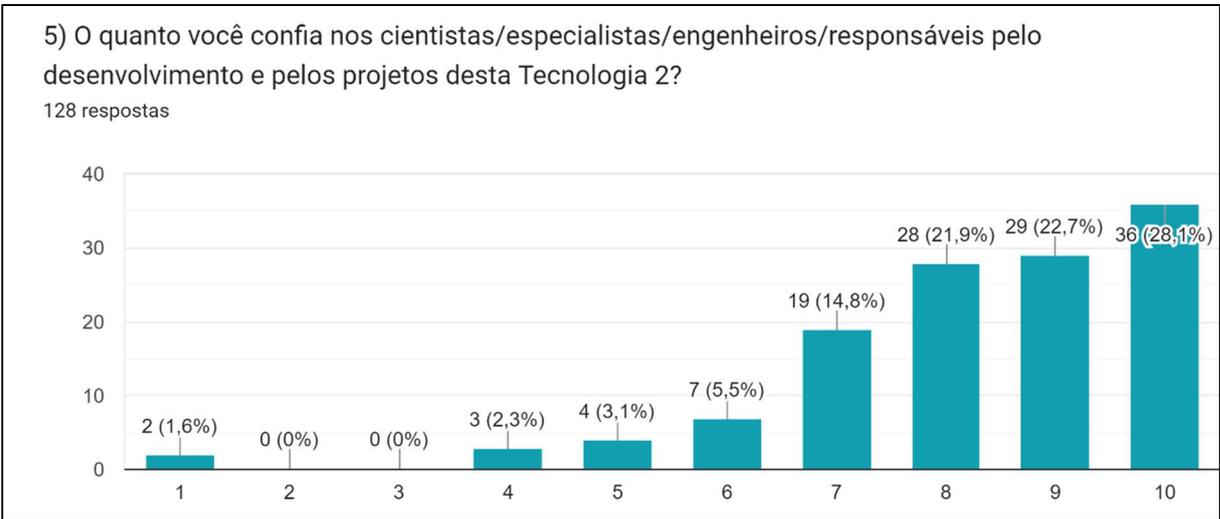
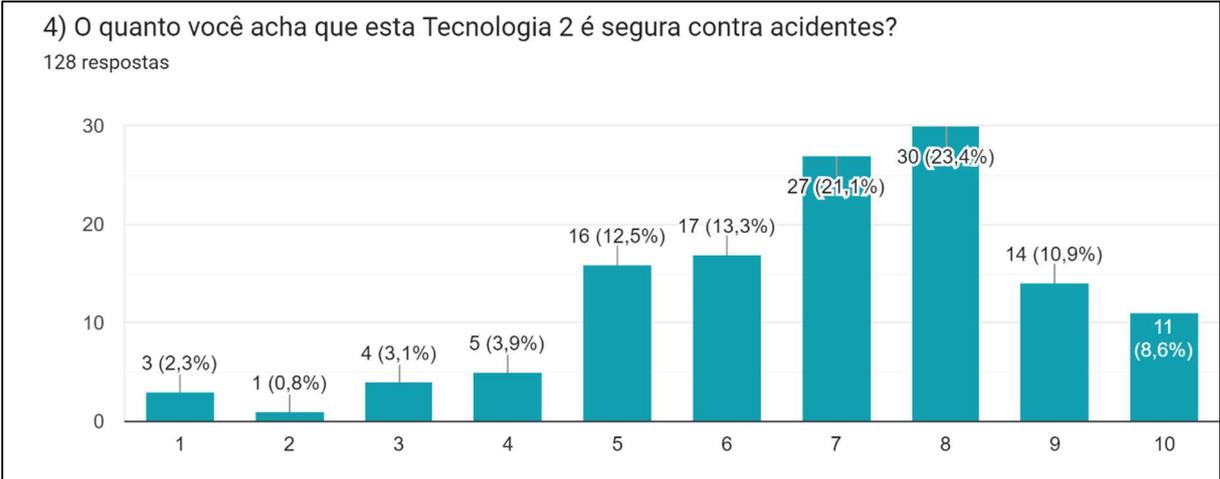


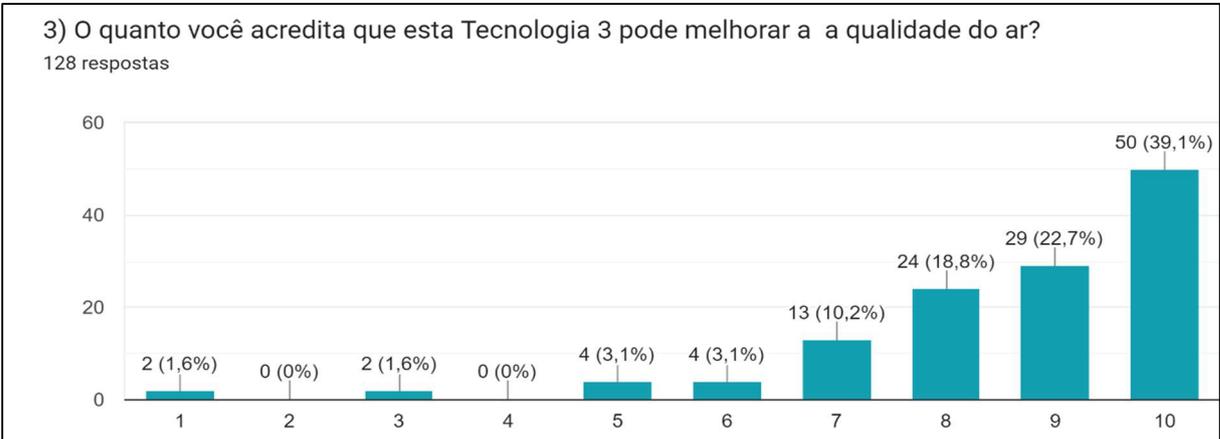
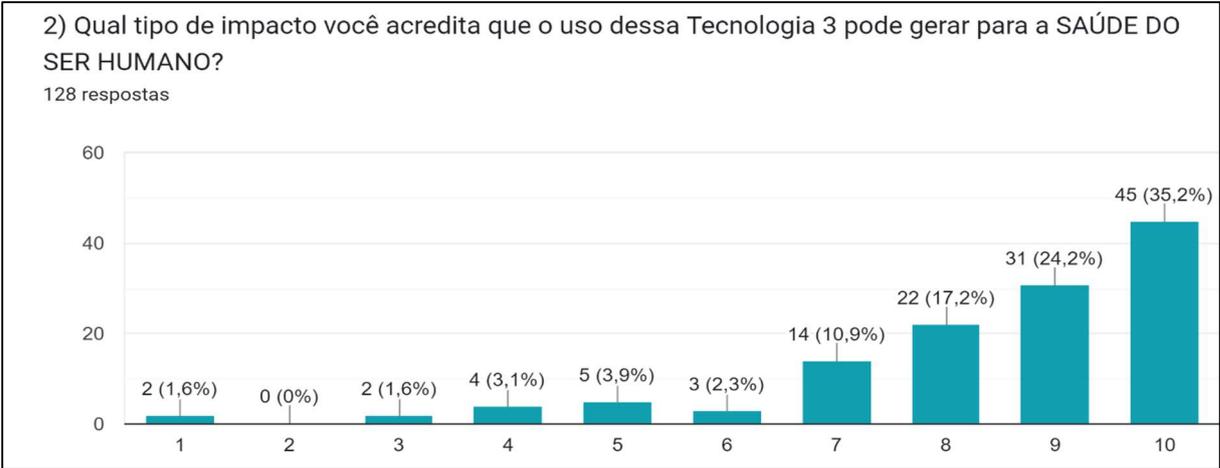
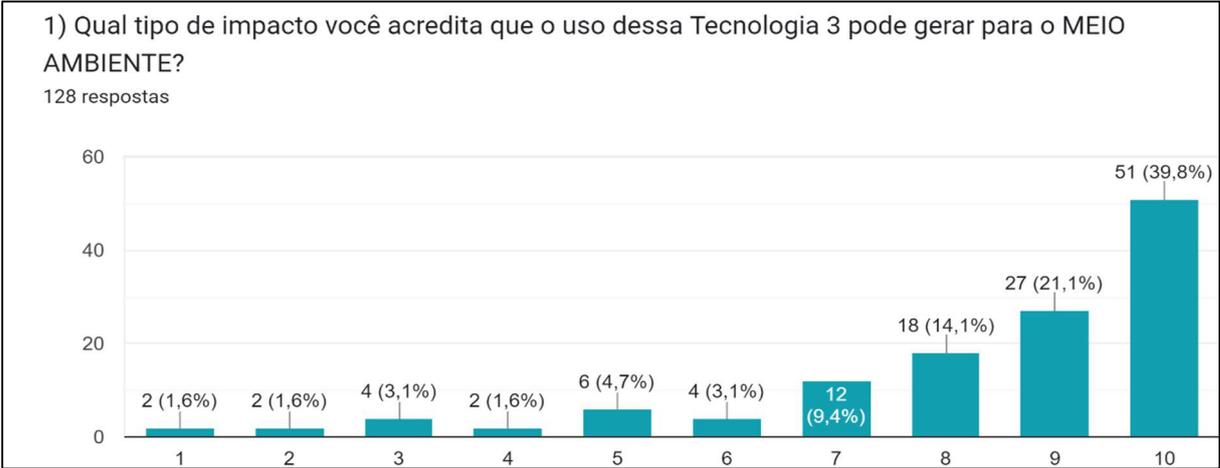
6) Quanto você apoiaria os investimentos nesta Tecnologia 1?

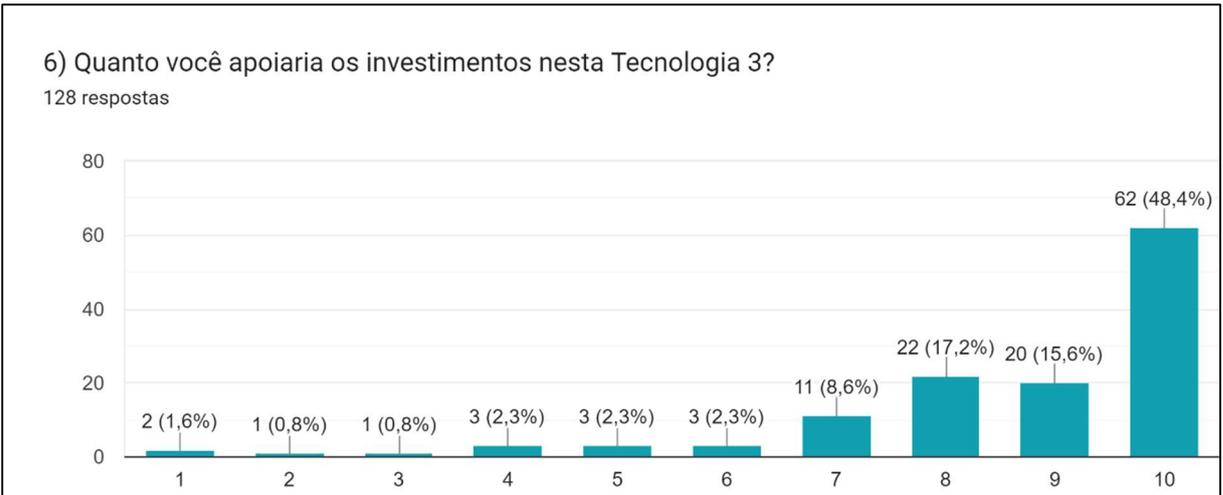
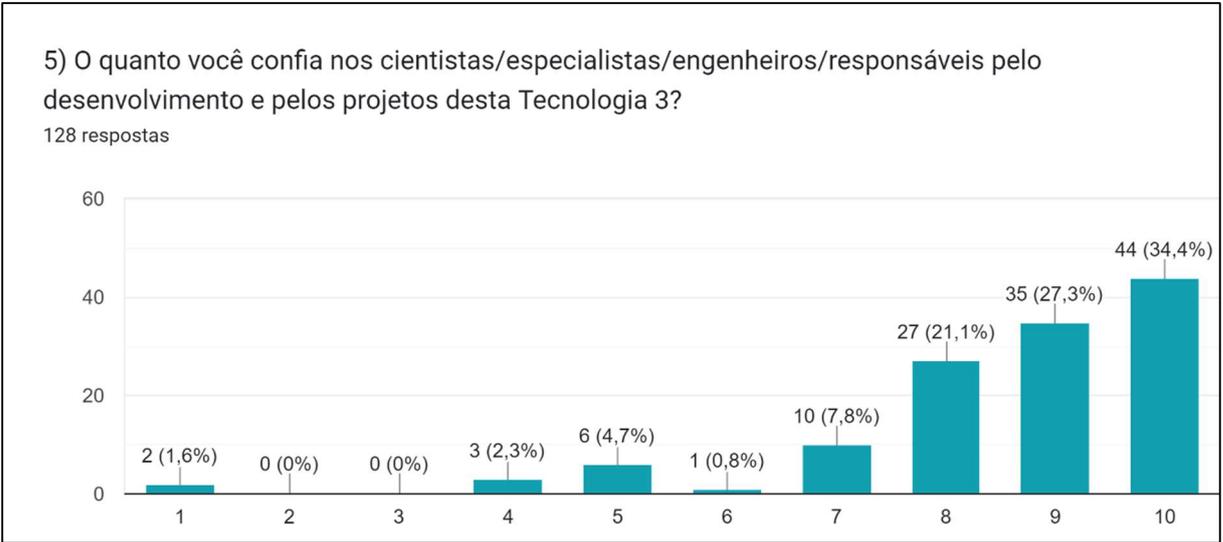
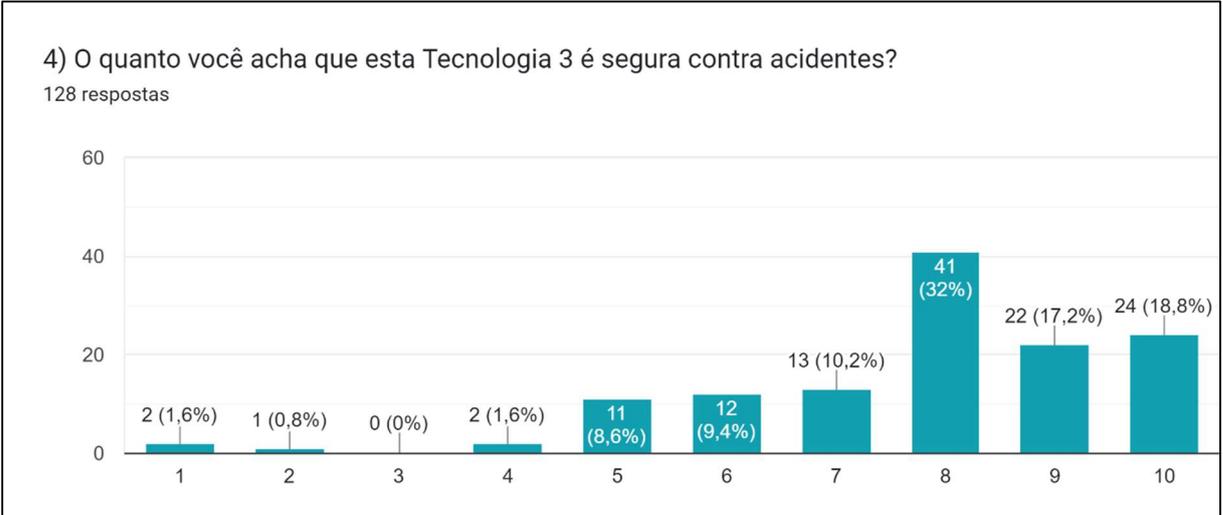
128 respostas





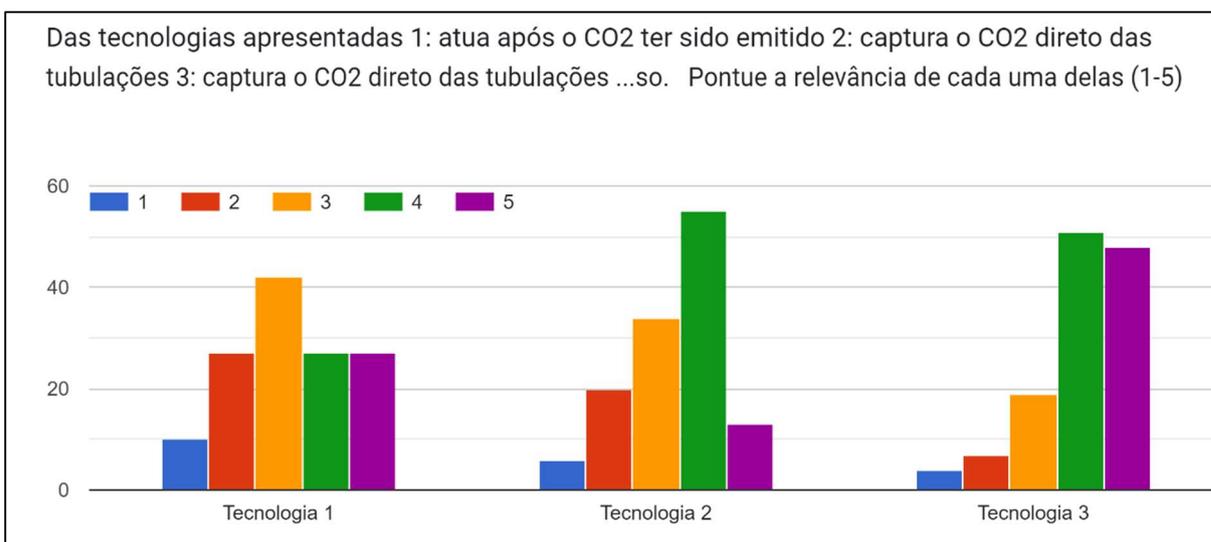






Fonte: Google Forms, 2022

Figura 60- Gráficos das perguntas para percepção pública das tecnologias CCS



Fonte: Google Forms, 2022