



UFBA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA INDUSTRIAL - PEI

MESTRADO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL

MAÍSA MATOS PARAGUASSÚ

PROPOSTA DE METODOLOGIA QUALITATIVA
PARA AVALIAÇÃO DE RISCOS NO
ARMAZENAMENTO GEOLÓGICO DE CO₂:
UM ESTUDO DE CASO ILUSTRATIVO DO CAMPO
FAZENDA MAMOEIRO NA BACIA DO RECÔNCAVO



SALVADOR
2012

MAÍSA MATOS PARAGUASSÚ

**PROPOSTA DE METODOLOGIA QUALITATIVA PARA AVALIAÇÃO
DE RISCOS NO ARMAZENAMENTO GEOLÓGICO DE CO₂:
UM ESTUDO DE CASO ILUSTRATIVO DO CAMPO FAZENDA MAMOEIRO NA
BACIA DO RECÔNCAVO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial da Universidade Federal da Bahia como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Industrial.

Orientadores:
Prof. Dr. José Célio Silveira Andrade
Prof. Dr. Paulo Sérgio de Mello Vieira Rocha

Salvador
2012

Ficha catalográfica elaborada pela
Biblioteca Universitária Bernadete Sinay Neves - Escola Politécnica - UFBA

P222 Paraguassú, Maísa Matos

Proposta de Metodologia Qualitativa para Avaliação de Riscos no Armazenamento Geológico de CO₂: Um Estudo de Caso Ilustrativo do Campo Fazenda Mamoeiro na Bacia do Recôncavo / Maísa Matos Paraguassú. – Salvador, 2012.

178 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. José Célio Silveira Andrade

Co-orientador: Prof. Dr. Paulo Sérgio de Mello Vieira Rocha

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, 2012.

1. Química atmosférica. 2. Compostos carbonílicos - Reservatórios. 3. Meio ambiente - Carbono. I. Andrade, José Célio Silveira. II. Rocha, Paulo Sérgio de Mello Vieira. III. Título.

CDD: 504.3

A

Minha mãe Moacira Matos, grande incentivadora da busca pelo conhecimento;

Paulo Souza e Osvaldo Andrade por toda a ajuda oferecida para a conquista desta etapa da minha vida;

Meus orientadores e amigos, Célio Andrade, Paulo Rocha e George Câmara, pelos ensinamentos que contribuíram significativamente para minha formação pessoal e profissional.

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores Célio Andrade e Paulo Rocha, por toda a confiança e credibilidade depositadas, pelo incentivo, orientação e pelos ensinamentos ao longo desta jornada, os quais foram imprescindíveis para a materialização deste trabalho.

Ao meu amigo George Câmara, obrigada pela oportunidade proporcionada em desenvolver este trabalho, pela confiança, por todo apoio técnico científico e pelas grandes contribuições.

A Luís Felipe Nascimento pela oportunidade proporcionada para o desenvolvimento deste trabalho no Rio Grande do Sul (UFRGS), pela recepção e por todo apoio.

A João Marcelo Ketzer, Clarissa Melo, Roberto Heemann, Gesiane Sbrissa, Felipe Vecchia, Thalisson Rocha e a toda Família CEPAC (PUC-RS) pela recepção, por compartilhar experiências e pelo apoio incondicional que contribuíram significativamente para os resultados e consolidação da presente pesquisa. Muito obrigada!

A Martinho D'Abbadia e Carmo Covas pelas contribuições realizadas para o desenvolvimento deste trabalho que foram de suma importância para o desenvolvimento da Metodologia proposta AR-CO2 mesmo quando estava em fase inicial.

A Osvaldo Andrade e Paulo Souza por toda a ajuda incentivadora e apoio oferecidos durante esta jornada. Por todas as discussões técnicas e sugestões que contribuíram notavelmente para a execução deste trabalho.

A Luiz Medeiros Júnior, Roberto Câmara, Guilherme Vieira e Mauro pelas contribuições e disponibilização das informações técnicas e demais dados do Campo Fazenda Mamoeiro e do Projeto Campo Escola ANP/UFBA, os quais foram indispensáveis para aplicação da metodologia proposta AR-CO2 em Estudo de Caso.

A Luiz Eraldo Araújo Ferreira e Rodolfo Dino por aceitarem participar da banca examinadora e pelas contribuições valiosas realizadas para o presente trabalho.

A Ana Cristina Telésforo e ao Grupo de pesquisa “Governança Ambiental Global, MDL e Mercado de Carbono” pelo apoio técnico.

A Laís Andrade pelo apoio na edição das figuras.

Aos amigos e amigas do mestrado Cássia Ribeiro, Filipe Freitas, Márcio Martins, Marcos Narciso, Milene Eloy, Raony Fontes, Reiner Requião, Roberta Alves e Robson Wilson, pelo apoio e amizade que foram essenciais nesses dois anos.

A todos os meus amigos que sempre estiveram presentes aconselhando e incentivando com carinho e dedicação e que, direta ou indiretamente, contribuíram para a execução desta dissertação de mestrado.

À FAPESB pelo fomento à pesquisa e pela concessão da bolsa de mestrado.

RESUMO

PARAGUASSÚ, Maísa Matos. **Proposta de Metodologia Qualitativa para Avaliação de Riscos no Armazenamento Geológico de CO₂**: Um Estudo de Caso Ilustrativo do Campo Fazenda Mamoeiro na Bacia do Recôncavo. 2012. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial, Universidade Federal da Bahia, UFBA, Salvador, Brasil, 2012.

Estudos científicos tem apontado o aumento das emissões antropogênicas de gases de efeito estufa (GEE) como um dos principais responsáveis pelo aquecimento global e mudanças climáticas, os quais já são observados pelo Homem. Neste contexto, a tecnologia de Captura e Armazenamento do Dióxido de Carbono em Reservatórios Geológicos (CCGS) tem sido destaque como uma das principais soluções no combate a este problema. Devido às suas características e da necessidade de garantir um armazenamento de CO₂ seguro, a análise de risco apresenta-se como uma ferramenta para identificar os principais cenários de risco e o conhecimento destes pode oferecer maior confiança e credibilidade aos projetos de CCGS. Assim, visando contribuir com uma ferramenta que possibilite uma melhor compreensão dos riscos de fuga de CO₂ no armazenamento, esse trabalho tem como objetivo apresentar uma metodologia qualitativa para avaliação de riscos do CO₂ armazenado apoiada em metodologias disponíveis na literatura. A análise comparativa entre as principais metodologias existentes e os aspectos que influenciam na estimativa de risco balizou o desenvolvimento da Metodologia AR-CO₂, sendo identificadas as características e lacunas mais significativas das metodologias estudadas. A metodologia AR-CO₂ foi aplicada em um estudo de caso ilustrativo do Campo Fazenda Mamoeiro, situado na Bacia do Recôncavo. A partir do estudo de caso realizado identificou-se que a região apresenta risco predominantemente baixo. Com a aplicação da Metodologia AR-CO₂ conclui-se que a metodologia proposta apresenta a vantagem de ser flexível, robusta, abrangente, sistemática, de baixo custo e de fácil uso para estimativa qualitativa do risco.

Palavras-chave: Avaliação de Risco. Armazenamento Geológico de CO₂. CCS. Bacia do Recôncavo.

ABSTRACT

PARAGUASSÚ, Maísa Matos. **Method proposed for qualitative risks assessment for the carbon dioxide geological storage:** A Case Study of the Fazenda Mamoeiro Field situated in Reconcavo Basin. 2012. 178 p. Thesis (Master of Industrial Engineering) - Pos-Graduation Program in Industrial Engineering, Federal University of Bahia, UFBA, Salvador, Brazil, 2012.

Scientific studies have indicated the increase of anthropogenic emissions of greenhouse gases (GHGs) as a main contributor to global warming and climate change, which has already been observed by mankind. Carbon Capture and Geological Storage (CCGS) technology has been identified as one of the main ways to combat this problem. Due to the characteristics and the need to ensure a safe storage of CO₂, a method for risk analysis is presented as a tool to identify the main risk scenarios, and the knowledge of these can provide greater confidence and credibility to the CCGS projects. Thus, aiming to contribute with a tool which enables a better understanding of the risks involved in the escape of CO₂, the purpose of this work is to present a qualitative method for risk assessment for Geological Storage (GS) based on the methodologies available in the literature. Comparative analysis between the existing methodologies and the main aspects that influence the risk estimate guided in the development of Method CO₂-RA, which identified the most significant features and gaps in the studied methodologies. The Method CO₂-RA was applied in an illustrative case study of Fazenda Mamoeiro Field, located in the Reconcavo Basin. From the study it was identified that this region is predominantly low-risk. The application of the Method AR-CO₂ allowed us to conclude that the proposed methodology has the advantage of being adaptive, robust, comprehensive, systematic, low cost and easy-to-use for qualitative estimation of risk.

Key-words: Risk Assessment. CO₂ Geological Storage. CCS. Reconcavo Basin.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS	PÁGINAS
FIGURA 1 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DA TECNOLOGIA CCGS.	14
FIGURA 2 - AS SETE CUNHAS DE PACALA E SOCOLOW.	21
FIGURA 3 - EMISSÕES GLOBAIS DE GEE EM 2004.	22
FIGURA 4 - EMISSÕES DE CO ₂ POR SETOR NO MUNDO.	23
FIGURA 5 - EMISSÕES BRASILEIRAS DE CO ₂ POR SETOR EM 1990 E 2005.....	24
FIGURA 6 - IMPACTOS À SAÚDE HUMANA EM DECORRÊNCIA DA EXPOSIÇÃO AO CO ₂	25
FIGURA 7 - TECNOLOGIAS DE CAPTURA DE CO ₂	28
FIGURA 8 - OPÇÕES PARA ARMAZENAMENTO GEOLÓGICO DE CO ₂	31
FIGURA 9 - CENTROS DE EXCELÊNCIA EM CAPTURA, TRANSPORTE, ARMAZENAMENTO GEOLÓGICO E MONITORAMENTO.	34
FIGURA 10 - DENSIDADE DE EMISSÕES BRASILEIRAS DE CO ₂ (CEPAC/PUCRS).	35
FIGURA 11 - CAPACIDADE TEÓRICA DE ARMAZENAMENTO DE CO ₂ EM CAMPOS BRASILEIROS DE ÓLEO E GÁS.	36
FIGURA 12 - MOLHABILIDADE DO SISTEMA ÓLEO-ÁGUA-ROCHA.	46
FIGURA 13 - VARIAÇÃO DA DENSIDADE DE CO ₂ EM FUNÇÃO DA PRESSÃO E TEMPERATURA.	47
FIGURA 14 - DENSIDADE DO CO ₂ VS. PROFUNDIDADE DO LOCAL DE ARMAZENAMENTO.	48
FIGURA 15 - MECANISMOS DE CONFINAMENTO E SEGURANÇA NO ARMAZENAMENTO DE CO ₂	51
FIGURA 16 - ARMADILHAS ESTRUTURAIS: ANTICLINAL (ESQUERDA), FALHAS (MEIO) E DOMOS DE SAL (DIREITA).	51
FIGURA 17 - POTENCIAIS FONTES, MECANISMOS E CAMINHOS DE MIGRAÇÃO DE CO ₂ E POTENCIAIS IMPACTOS E MEIOS DE EXPOSIÇÃO.	56
FIGURA 18 - POSSÍVEIS CAMINHOS DE VAZAMENTO AO LONGO DO POÇO.	58
FIGURA 19 - POTENCIAIS CAMINHOS DE VAZAMENTO DE CO ₂ NO SISTEMA GEOLÓGICO.	60
FIGURA 20 - FREQUÊNCIA ANUAL DE VAZAMENTO ATRAVÉS DO RESERVATÓRIO DE CO ₂	65
FIGURA 21 - PROBABILIDADE CUMULATIVA DE VAZAMENTO ATRAVÉS DO RESERVATÓRIO DE CO ₂	66
FIGURA 22 - DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE PARA TAXA INICIAL DE VAZAMENTO DE CO ₂	66
FIGURA 23 - DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE PARA QUANTIDADES LIBERADAS DE CO ₂	67
FIGURA 24 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO MOSTRANDO A RELAÇÃO ENTRE ANÁLISE, AVALIAÇÃO E GERENCIAMENTO DE RISCO.	70
FIGURA 25 - RISCO POTENCIAL DURANTE AS FASES DE PROJETOS DE CGS.	72
FIGURA 26 - REDUÇÃO SISTEMÁTICA DA INCERTEZA DURANTE AS FASES DE VIDA DO PROJETO.	73
FIGURA 27 - INFLUÊNCIA DA INCERTEZA NA ESTIMATIVA DO RISCO.	73
FIGURA 28 - PONTOS QUE PODEM SER MONITORADOS DURANTE AS FASES DO PROJETO DE CGS.	77
FIGURA 29 - MODELO CONCEITUAL VEF.	81
FIGURA 30 - ETAPAS DA ANÁLISE SWIFT.	82
FIGURA 31 - MOSAR: ETAPAS A E B.	83
FIGURA 32 - ANÁLISE FEP.	85
FIGURA 33 - ESTRUTURA SIMPLIFICADA DA ANÁLISE CASSIF.	86
FIGURA 34 - BARREIRAS GEOLÓGICAS E OS RESPECTIVOS ATRIBUTOS ANALISADOS PELA METODOLOGIA SRF.	88
FIGURA 35 - ETAPAS DA METODOLOGIA MCA.	90
FIGURA 36 - PROCEDIMENTO METODOLÓGICO ADOTADO PARA ELABORAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.	95
FIGURA 37 - MODELO CONCEITUAL DA METODOLOGIA AR-CO ₂	110
FIGURA 38 - DESENHO ESQUEMÁTICO DO POÇO EM FAZENDA MAMOEIRO.	114
FIGURA 39 - INSTALAÇÕES DO POÇO EM FAZENDA MAMOEIRO.	115
FIGURA 40 - SEÇÃO GEOLÓGICA DO CAMPO FAZENDA MAMOEIRO.	118
FIGURA 41 - LOCALIZAÇÃO DO POÇO DO CAMPO FAZENDA MAMOEIRO E POPULAÇÃO VIZINHA.	122

FIGURA 42 - CAMPOS FAZENDA MAMOEIRO, RIACHO SESMARIA E CARACATU.....	123
FIGURA 43 - VENTO PREDOMINANTE PARA A REGIÃO DA FAZENDA MAMOEIRO.	124
FIGURA 44 - INCERTEZA MÉDIA DAS CATEGORIAS DE FREQUÊNCIA DE OCORRÊNCIA DOS CENÁRIOS DE RISCO DO CAMPO FAZENDA MAMOEIRO POR COMPARTIMENTOS DE ANÁLISE: POÇO, FALHAS E SELO.	131
FIGURA 45 - INCERTEZA MÉDIA DOS CENÁRIOS DE RISCO DO CAMPO FAZENDA MAMOEIRO POR CATEGORIAS DE SEVERIDADE.	134
FIGURA 46 - CLASSIFICAÇÃO DOS CENÁRIOS DE RISCOS DO CAMPO FAZENDA MAMOEIRO POR CATEGORIAS DE IMPACTO.....	138
FIGURA 47 - INCERTEZA MÉDIA DOS CENÁRIOS DE RISCOS DO CAMPO FAZENDA MAMOEIRO POR CATEGORIAS DE IMPACTO.....	139

QUADROS	PÁGINAS
QUADRO 1 - VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS DIFERENTES TIPOS DE ARMAZENAMENTO GEOLÓGICO.	31
QUADRO 2 - CARACTERÍSTICAS DA ROCHA SELO E MECANISMOS DE ARMADILHAS DE PROJETOS DE CGS E OCORRÊNCIA NATURAL DE CO ₂	49
QUADRO 3 - SEGURANÇA E CENÁRIOS DE FRATURAS AO LONGO DO TEMPO.	53
QUADRO 4 - OPÇÕES DE REMEDIAÇÃO PARA VAZAMENTO A PARTIR DA FORMAÇÃO DE ARMAZENAMENTO.....	61
QUADRO 5 - CATEGORIAS DE CONSEQUÊNCIA.....	68
QUADRO 6 - EXEMPLOS DE CONSEQUÊNCIA PARA RÁPIDA CLASSIFICAÇÃO DE RISCO.	69
QUADRO 7 - MATRIZ DE RISCO PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA INJEÇÃO DE CO ₂ EM BURACICA.	74
QUADRO 8 - MATRIZ DE RISCO PARA AVALIAÇÃO DE RISCO NA BACIA DE ILLINOIS.....	75
QUADRO 9 - PROGRAMA DE MONITORAMENTO PARA AS FASES DO PROJETO DE ARMAZENAMENTO.	76
QUADRO 10 - TÉCNICAS DIRETAS E INDIRETAS USADAS PARA MONITORAR PROJETOS DE ARMAZENAMENTO.	78
QUADRO 11 - METODOLOGIAS QUALITATIVAS DE ANÁLISE DE RISCO DE PROJETOS DE CGS.	80
QUADRO 12 - QUADRO-SÍNTESE COMPARATIVO DAS METODOLOGIAS DE ANÁLISES DE RISCO EM PROJETOS DE CGS.	91
QUADRO 13 - REFERENCIAL PARA O DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA AR-CO ₂	97
QUADRO 14 - INFORMAÇÕES NECESSÁRIAS PARA A REALIZAÇÃO DA METODOLOGIA AR-CO ₂	102
QUADRO 15 - PLANILHA UTILIZADA NA AVALIAÇÃO DE RISCOS DE CO ₂ ARMAZENADO (AR-CO ₂).....	104
QUADRO 16- EXEMPLO DE CATEGORIAS DE FREQUÊNCIAS PARA A METODOLOGIA AR-CO ₂	106
QUADRO 17 - EXEMPLOS DE CATEGORIAS DE SEVERIDADE PARA A METODOLOGIA AR-CO ₂	107
QUADRO 18 - EXEMPLO DE MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO DE RISCO PARA A METODOLOGIA AR-CO ₂	108
QUADRO 19 - INTEGRANTES QUE CONTRIBUÍRAM PARA A ANÁLISE DO CAMPO FAZENDA MAMOEIRO.	126
QUADRO 20 - EVENTOS INICIADORES MAPEADOS PARA ESTUDO DO CAMPO FAZENDA MAMOEIRO.	128
QUADRO 21 - CENÁRIOS DE RISCO AO MEIO AMBIENTE.....	135
QUADRO 22 - CENÁRIOS DE RISCO A PESSOAS.....	136
QUADRO 23 - CENÁRIOS DE RISCO À IMAGEM.	136
QUADRO 24 - CENÁRIOS DE RISCO A INSTALAÇÕES.....	136
QUADRO 25 - CENÁRIOS DE RISCO FINANCEIRO.	137

LISTA DE TABELAS

TABELAS	PÁGINAS
TABELA 1 - COMPOSIÇÃO MÉDIA DO AR SECO NO NÍVEL DO MAR.....	18
TABELA 2- GEE EM CO ₂ EQ.....	22
TABELA 3 - CLASSIFICAÇÃO DE ESTABILIDADE ATMOSFÉRICA.....	27
TABELA 4 - VALORES TÍPICOS DE COMPRIMENTO DE RUGOSIDADE DE SUPERFÍCIE.....	27
TABELA 5 - ESTIMATIVA DA CAPACIDADE GLOBAL DE RESERVATÓRIOS DE CO ₂	32
TABELA 6 - LIMITES DA COMPOSIÇÃO DA CORRENTE DE CO ₂	55
TABELA 7 - CLASSES DE CIMENTOS E AS SUAS RESPECTIVAS CONDIÇÕES DE USO.	57
TABELA 8 - TAXAS DE VAZAMENTO DE CO ₂	64
TABELA 9 - EXEMPLOS DE CLASSIFICAÇÃO QUALITATIVA DE FREQUÊNCIA PARA OS EVENTOS E PROBABILIDADE PARA AS CARACTERÍSTICAS E PROCESSOS.....	68
TABELA 10 - CARACTERÍSTICAS DAS FORMAÇÕES DO CAMPO FAZENDA MAMOEIRO.....	115
TABELA 11 - CARACTERÍSTICAS GERAIS E DA ROCHA DA FORMAÇÃO ÁGUA GRANDE.....	116
TABELA 12 - CARACTERÍSTICAS DO ÓLEO E DO GÁS DA FORMAÇÃO ÁGUA GRANDE.	116
TABELA 13 - CRITÉRIOS PARA SELEÇÃO DE RESERVATÓRIOS DE ÓLEO COM POTENCIAL PARA APLICAÇÃO DE CO ₂	120
TABELA 14 - CARACTERIZAÇÃO TÍPICA DA ÁGUA DE PRODUÇÃO.	121
TABELA 15 - RUGOSIDADE DO SOLO E DADOS METEOROLÓGICOS ADOTADOS PARA A REGIÃO DO CAMPO FAZENDA MAMOEIRO.....	124
TABELA 16 - CLASSIFICAÇÃO DOS CENÁRIOS DE RISCO DO CAMPO FAZENDA MAMOEIRO POR CATEGORIA DE FREQUÊNCIA.	129
TABELA 17 - INCERTEZA MÉDIA DOS CENÁRIOS DE RISCO DO CAMPO FAZENDA MAMOEIRO POR CATEGORIAS DE FREQUÊNCIA.	131
TABELA 18 - CLASSIFICAÇÃO DOS CENÁRIOS DE RISCO DO CAMPO FAZENDA MAMOEIRO POR CATEGORIAS DE SEVERIDADE.	133
TABELA 19 - INCERTEZA MÉDIA DOS CENÁRIOS DE RISCO DO CAMPO FAZENDA MAMOEIRO POR CATEGORIAS DE SEVERIDADE.	134
TABELA 20 – CLASSIFICAÇÃO DOS CENÁRIOS DE RISCO DO CAMPO FAZENDA MAMOEIRO POR CATEGORIAS DE IMPACTO.	137
TABELA 21 - INCERTEZA MÉDIA DOS CENÁRIOS DE RISCO DO CAMPO FAZENDA MAMOEIRO POR CATEGORIAS DE IMPACTO.....	138
TABELA 22 - REDUÇÃO DA INCERTEZA DOS CENÁRIOS DE RISCO DO CAMPO FAZENDA MAMOEIRO POR CATEGORIAS DE FREQUÊNCIA E SEVERIDADE.....	140

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALARP	As Low As Reasonably Practicable
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
APP	Análise Preliminar de Perigos
CASSIF	Carbon Storage Scenario Identification Framework
CCS	Carbon Capture and Storage
CEPAC	Centro de Excelência em Pesquisa sobre Armazenamento de Carbono
CEPRAM	Conselho Estadual do Meio Ambiente
CGS	Carbon Geological Storage
CO ₂	Dióxido de Carbono
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CQNUMC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima
CSLF	Carbon Sequestration Leadership Forum
DNV	Det Norske Veritas
EGR	Enhance Gas Recovery
EOR	Enhance Oil Recovery
EPA	Environmental Protection Agency
FEP	Features, Events and Processes
FEPAM	Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler
GEE	Gases de Efeito Estufa
HAZOP	HAZard and OPerability Study
HSE	Health Service Executive
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA	International Energy Agency
IEAGHG	International Energy Agency Greenhouse Gas R&D Programme
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
MCA	Multi-Criteria Assessment
MCTI	Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação
MDL	Mecanismos de Desenvolvimento Limpo
MME	Ministério de Minas e Energia
MOSAR	Méthode Organisée et Systémique d'Analyse de Risques
NETL	National Energy Technology Laboratory
PCE	Projeto Campo Escola
PLAMA	Planejamento e Meio Ambiente
SEI	Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia
SRF	Screening and Ranking Framework
SWIFT	Structured What-if Technique
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
VEF	Vulnerability Evaluation Framework
WRI	World Resources Institute

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1. JUSTIFICATIVA.....	16
1.2. OBJETIVO.....	16
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	17
2. CO₂ E A TECNOLOGIA DE CAPTURA E ARMAZENAMENTO GEOLÓGICO DE CARBONO	18
2.1. CO ₂ : CARACTERÍSTICAS E IMPACTOS SOBRE A SSMA.....	18
2.1.1. Composição do Ar Atmosférico e Definição de CO ₂	18
2.1.2. Emissões de CO ₂	20
2.1.3. Impactos Ocasionalmente por Vazamento de CO ₂	25
2.1.4. Estabilidade Atmosférica e Rugosidade de Superfície.....	26
2.2. TECNOLOGIA DE CAPTURA E ARMAZENAMENTO GEOLÓGICO DE CARBONO.....	28
2.2.1. Captura ou Separação de CO ₂	28
2.2.2. Transporte e Armazenamento de CO ₂	30
2.3. MERCADO DE CARBONO E ASPECTOS LEGAIS E REGULATÓRIOS.....	32
2.3.1. Projetos de CCGS no Mundo e no Brasil.....	32
2.3.2. Mercado de Carbono.....	37
2.3.3. Leis e Aspectos Regulatórios.....	38
3. ARMAZENAMENTO GEOLÓGICO DE CARBONO (CGS).....	41
3.1. PROJETOS DE CGS.....	41
3.1.1. Ciclo de Vida.....	41
3.1.2. Avaliação do Local para Armazenamento.....	42
3.2. SISTEMA DE ARMAZENAMENTO.....	44
3.2.1. Rocha Reservatório.....	45
3.2.2. Rocha Selo.....	49
3.3. PROCESSOS QUE AFETAM O CGS.....	50
3.3.1. Mecanismos de Confinamento.....	50
3.3.2. Processos Geomecânicos e Geoquímicos.....	52
3.3.3. Presença de Impurezas.....	54
3.4. CAMINHOS DE VAZAMENTO.....	55
3.4.1. Poços Injetores.....	57
3.4.2. Formação Geológica.....	59
4. ANÁLISE E GERENCIAMENTO DE RISCO EM PROJETOS DE CGS.....	62
4.1. OCORRÊNCIA DE VAZAMENTO DE CO ₂ E MAGNITUDE DO SEU IMPACTO.....	62
4.1.1. Ocorrência de Vazamento de CO ₂	62
4.1.2. Magnitude do Impacto de Vazamento de CO ₂	68
4.2. ANÁLISE E GERENCIAMENTO DE RISCO.....	70

4.2.1.	Risco e Incerteza	71
4.2.2.	Matriz de Risco	74
4.2.3.	Monitoramento de CO₂	75
4.3.	METODOLOGIA QUALITATIVA DE ANÁLISE DE RISCO	79
4.3.1.	Principais Aspectos que Influenciam na Estimativa de Risco	79
4.3.2.	Metodologias Analisadas	80
4.3.6.	Análise Comparativa	91
5.	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	93
5.1.	<i>ELABORAÇÃO DA DISSERTAÇÃO</i>	93
5.2.	<i>METODOLOGIA AR-CO₂ PROPOSTA</i>	96
5.3.	<i>APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA EM ESTUDO DE CASO ILUSTRATIVO</i>	99
6.	METODOLOGIA QUALITATIVA PARA AVALIAÇÃO DE RISCOS DE CO₂ ARMAZENADO (AR-CO₂)	100
6.1.	<i>DADOS NECESSÁRIOS</i>	101
6.2.	<i>EXECUÇÃO DA ANÁLISE AR-CO₂</i>	102
6.3.	<i>ESTRUTURA DA METODOLOGIA AR-CO₂</i>	103
6.4.	<i>CATEGORIAS CONSIDERADAS NA METODOLOGIA AR-CO₂</i>	105
7.	ESTUDO DE CASO ILUSTRATIVO DO CAMPO FAZENDA MAMOEIRO	111
7.1.	<i>PROJETO CAMPO ESCOLA</i>	111
7.2.	<i>OBJETIVO E ESCOPO DO ESTUDO</i>	111
7.3.	<i>PREMISSAS E RESTRIÇÕES ADOTADAS</i>	112
7.4.	<i>CARACTERIZAÇÃO DAS INSTALAÇÕES ANALISADAS</i>	113
7.4.1.	Infraestrutura e Histórico de Exploração e Produção	114
7.4.2.	Caracterização Geológica e Física do Reservatório	116
7.4.3.	Seção Geológica	117
7.4.4.	Potencial do Reservatório para Injeção de CO₂ para EOR	119
7.5.	<i>CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO</i>	121
7.5.1.	Características do Fluido de Injeção	121
7.5.2.	Localização Geográfica	122
7.5.3.	Dados Meteorológicos	123
7.5.4.	Distribuição Populacional e Aspecto Econômico	125
7.5.5.	Caracterização Ambiental: Recurso Hídrico e Meio Biótico	125
8.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	126
8.1.	<i>CENÁRIOS DE RISCOS ANALISADOS</i>	127
8.1.1.	Aspectos Gerais	127
8.1.2.	Frequência dos Cenários	129

8.1.3.	Severidade dos Cenários	132
8.2.	<i>CENÁRIOS POR CATEGORIA DE RISCOS</i>	135
8.2.1.	Estatística dos Cenários de Riscos	135
8.2.2.	Considerações Finais, Medidas e Observações	139
9.	CONCLUSÕES, LIMITAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.	141
9.1.	<i>O ARMAZENAMENTO DE CARBONO</i>	141
9.2.	<i>CAMPO FAZENDA MAMOEIRO</i>	142
9.3.	<i>A METODOLOGIA AR-CO2</i>	142
9.4.	<i>LIMITAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</i>	144
	REFERÊNCIAS	146
	APÊNDICES	158
	ANEXOS	171

1. INTRODUÇÃO

Em meados do século XVIII, iniciou-se na Inglaterra a mecanização industrial, principalmente do setor têxtil, desviando o acúmulo de capitais da atividade comercial para o setor de produção. A esse processo de transformações deu-se o nome de Revolução Industrial. Por volta de 1860, a Revolução Industrial foi impulsionada por inovações técnicas, dentre elas: o processo Bessemer de transformação do ferro em aço; o dínamo, que possibilitou a substituição do vapor pela eletricidade como força motriz das maquinofaturas e o motor a combustão interna de Nikolaus Otto, que introduziu o uso do petróleo (VICENTINO, 1997).

Nos últimos anos, a temperatura média do planeta vem aumentando em virtude da crescente concentração de alguns gases na atmosfera que apresentam a característica de reter calor, sendo eles chamados de Gases de Efeito Estufa (GEE). Acredita-se que o aumento das emissões de GEE na atmosfera da Terra é resultante do crescimento econômico e demográfico pós Revolução Industrial, em que houve uma intensificação da utilização de combustíveis fósseis como carvão mineral, petróleo e gás natural além do desmatamento do planeta (GRAU NETO, 2007). Assim, desde a Revolução Industrial, os combustíveis fósseis são utilizados como fonte de energia, contribuindo para o aumento da concentração de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera.

O interesse e a preocupação da sociedade com a mudança do clima foram despertados após evidências científicas que indicavam as emissões de GEE como principais responsáveis. A partir de então, o tema foi colocado em destaque passando a ser tratado com maior veemência culminando em conferências e tratados, como a Rio-92 e o Protocolo de Quioto em 1997. Entre as soluções apresentadas para o aquecimento global estão projetos que estimulam a produção de energia limpa e projetos que consistem na remoção de carbono da atmosfera. Como a economia mundial é ainda alimentada pelo consumo de combustíveis fósseis, os estudos tecnológicos para mitigação dos GEE como, por exemplo, o sequestro de carbono são atrativos e necessários (GRAU NETO, 2007; RAVAGNANI, 2007).

O sequestro direto de carbono ou tecnologia de Captura e Armazenamento de Carbono (*Carbon Capture and Storage - CCS*) é uma tecnologia que desperta o interesse, sendo definido pelo IPCC (2005) como um processo que consiste na separação de CO₂, emitido por fontes estacionárias, relacionadas com a produção de energia e também de plantas industriais, o transporte do CO₂ e seu armazenamento de forma segura a longo prazo, isolando-o da atmosfera. O armazenamento pode ser em formações geológicas, oceano, carbonato mineral ou para uso em processos industriais (Figura 1). Como o foco deste trabalho é o

armazenamento geológico, ao se referir a projetos que englobam todas as etapas da tecnologia será utilizado o termo CCGS (*Carbon Capture and Geological Storage*), se somente armazenamento CGS (*Carbon Geological Storage*).

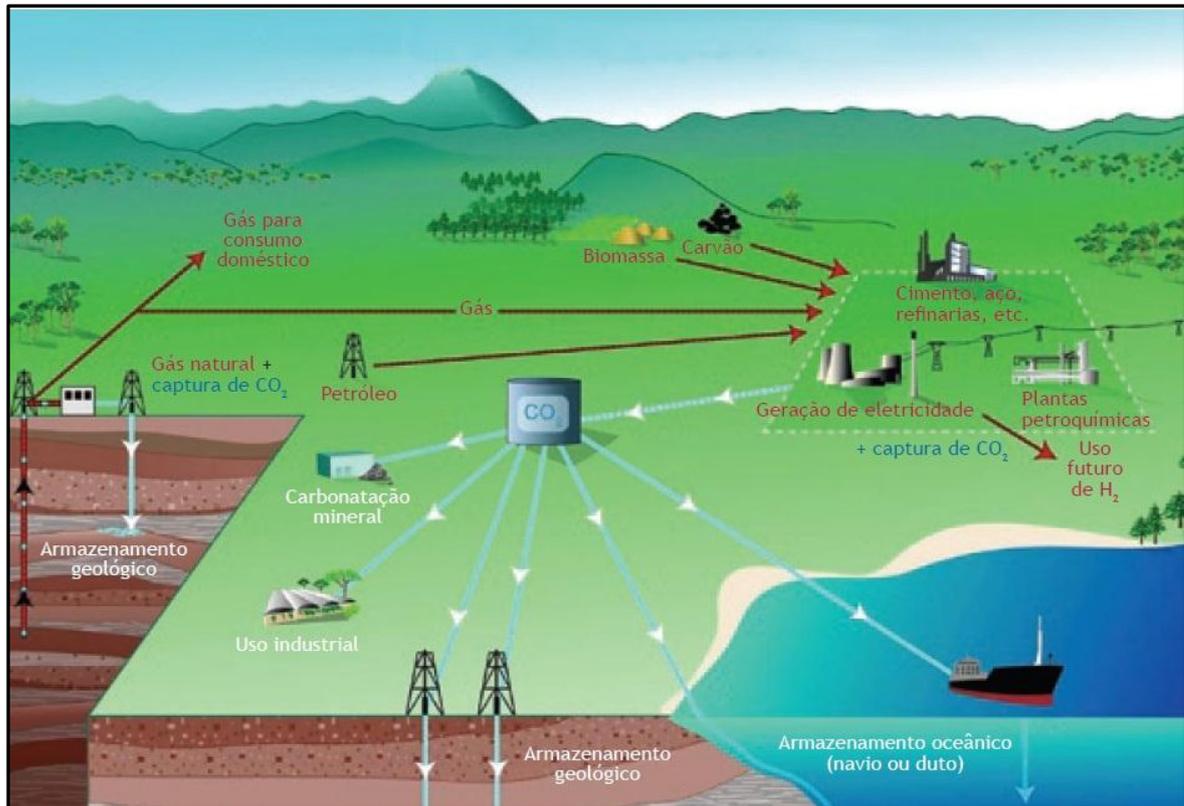


Figura 1 - Diagrama esquemático da Tecnologia CCGS.

Fonte: IPCC (2005). Nota: Traduzido por Bioenergia (2011)

Os projetos de CCGS visam, então, a redução das emissões de GEE, entretanto um vazamento imprevisto do CO₂ armazenado tanto para a atmosfera quanto na subsuperfície, resultariam em consequências indesejáveis para a saúde, segurança e meio ambiente (SSMA), levando à redução dos benefícios ambientais propostos por esta tecnologia.

Ressalta-se que há definições específicas para os termos: migração, vazamento e fuga de CO₂. Stenhouse, Gale e Zhou (2009) definem a migração como sendo o movimento de CO₂ em geral (em qualquer direção) a partir do reservatório de armazenamento, enquanto que o vazamento é específico para o movimento ascendente do CO₂ em direção à superfície e ao ambiente próximo à superfície, onde os principais impactos ambientais são esperados de ocorrer. A fuga se refere à perda ou retorno de CO₂ para a atmosfera. Neste trabalho, vazamento, migração e fuga são utilizados com o mesmo conceito, referindo ao movimento de CO₂ que tem potencial de impactar negativamente sobre a SSMA, tanto para a superfície e atmosfera quanto subsuperfície.

Devido às características distintas envolvidas no processo CCGS e da necessidade de garantia à SSMA, a análise de risco apresenta-se como uma potencial ferramenta para identificar os principais cenários de risco assim como as possíveis causas que podem levar a um evento perigoso, como o próprio vazamento de CO₂ e os impactos em decorrência deste. Esse conhecimento oferece maior confiabilidade e credibilidade aos projetos de CCGS. De acordo Morgado e Esteves (2010), os riscos envolvidos nos projetos de CCGS são muitos e de alta complexidade, pois existem riscos tecnológicos e naturais o que impede a aplicação de um gerenciamento de risco clássico baseado em procedimentos administrativos e controles operacionais como ocorre comumente em uma planta industrial.

Como descrito, as etapas que envolvem o processo CCGS vão desde a captura de CO₂ de uma fonte de emissão antropogênica, seguida da separação, desidratação, compressão, transporte, injeção, armazenamento e monitoramento do CO₂ estocado. De uma maneira geral, as etapas que seguem até o armazenamento são etapas em que os riscos envolvidos podem ser tratados de forma similar às aplicadas na indústria de processo, pois neste contexto também estão envolvidos equipamentos de processo e tubulações, ou seja, os riscos envolvidos são operacionais e já há metodologias de análise de risco consagradas. Já em relação ao armazenamento, como se trata de um sistema natural e inerentemente heterogêneo e complexo, além da presença de incertezas envolvidas, a análise do risco demanda mais recursos. Para Benson (2005a), a avaliação de risco da estrutura do armazenamento geológico e as suas consequências é de suma importância para garantir a sua segurança e efetividade. Profundidade e rigor científico são essenciais para assegurar a tomada de decisão e a transparência de todos os aspectos do processo de avaliação de risco pode ser também necessária para a aceitação pública.

Compreender o quanto o confinamento é confiável é importante não só para a análise de viabilidade dessa tecnologia como para compor as informações que serão disponibilizadas ao público em geral. Assim, desde que a tecnologia CCGS foi proposta como uma opção de mitigação para reduzir as emissões antropogênicas de CO₂, esforços tem sido despendidos para estudar os potenciais riscos associados ao armazenamento em longo prazo. Entretanto, o que se tem visto, de acordo com Condor *et al.* (2011), é a adaptação de metodologias de análise de risco da indústria de processo e, em alguns casos, que apresentam ainda lacunas para a avaliação de risco e avaliação da incerteza para os projetos de armazenamento de CO₂.

Devido à importância de se compreender quais os riscos de fuga envolvidos no armazenamento de CO₂, este trabalho desenvolveu uma metodologia qualitativa para avaliação do risco de fuga do CO₂ armazenado apoiada em metodologias disponíveis na

literatura e a aplicou em um estudo de caso ilustrativo do Campo Fazenda Mamoeiro na Bacia do Recôncavo.

1.1. JUSTIFICATIVA

A partir do estudo sobre as principais metodologias qualitativas de análise de risco existentes para projetos de CGS verificou-se que estas metodologias apresentam importantes aspectos complementares e com base neste estudo assim como informações advindas de relatórios técnicos e normas de análise e gerenciamento de risco, detectou-se que há espaço para apresentar uma metodologia de fácil uso, aplicável para locais pouco ou bem conhecidos, e que possibilite identificar sistematicamente as principais causas que possam levar a impactos em virtude de vazamento de CO₂. Neste sentido, há espaço para uma metodologia que apresente características, tais como: praticidade, operacionalização, abrangência e transparência, o que justifica este projeto que é apresentar uma proposta de metodologia para avaliação de riscos associados ao armazenamento de CO₂. Ressalta-se que conhecer e compreender os riscos de fuga envolvidos será mais uma alternativa para dar subsídios na análise de viabilidade dessa tecnologia assim como para compor as informações que serão expostas aos *stakeholders*, agentes reguladores e ao público em geral.

1.2. OBJETIVO

O principal objetivo deste trabalho é apresentar uma proposta de metodologia qualitativa de análise de risco de CO₂ armazenado. Para que este objetivo seja alcançado, fez-se necessário: levantar as principais metodologias de análise de risco existentes na literatura, mapear as principais causas a que levam ao vazamento de CO₂ e os fatores que afetam a integridade do sistema de armazenamento, além de aplicar a metodologia desenvolvida em um campo típico da Bacia do Recôncavo, por meio de um estudo de caso ilustrativo no Campo Fazenda Mamoeiro, levando-se em conta algumas considerações e premissas adotadas.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está estruturada em nove capítulos.

O primeiro capítulo é composto pela introdução, as justificativas a que levaram à execução deste trabalho e o objetivo propriamente dito.

No segundo capítulo, são apresentadas as características do CO₂ e informações sobre as etapas das tecnologias envolvidas na captura e armazenamento geológico de CO₂. Nesta etapa, são descritos os impactos associados ao CO₂ e os aspectos técnicos relacionados às fases de captura de CO₂, transporte e armazenamento assim como o contexto da tecnologia dentro do mercado de carbono e aspectos regulatórios.

O capítulo 3 descreve as características inerentes ao armazenamento geológico como a apresentação do ciclo de vida de projetos de CGS, os potenciais caminhos de migração e como os locais podem ser avaliados.

No quarto capítulo, são apresentados os conceitos de análise e gerenciamento de risco e as principais metodologias de análise de risco para o processo de armazenagem de CO₂.

No quinto capítulo, é apresentado o procedimento metodológico adotado para alcançar o objetivo da presente pesquisa.

Os capítulos 6 e 7 constam da apresentação da metodologia qualitativa proposta para Avaliação de Risco de CO₂ armazenado em formações geológicas (denominada AR-CO₂) e a aplicação desta em estudo de caso, respectivamente.

No oitavo capítulo são apresentadas as discussões e os resultados obtidos com a aplicação da Metodologia AR-CO₂. Por fim, no nono capítulo são apresentadas as conclusões da pesquisa e as sugestões para trabalhos futuros.

2. CO₂ E A TECNOLOGIA DE CAPTURA E ARMAZENAMENTO GEOLÓGICO DE CARBONO

Neste capítulo são apresentados: o panorama das emissões de carbono e aquecimento global, as etapas da Tecnologia CCGS e como esta tecnologia está inserida no contexto do mercado de carbono, aspectos legais e regulatórios.

2.1. CO₂: CARACTERÍSTICAS E IMPACTOS SOBRE A SSMA

Nesta seção são apresentadas as características do CO₂, o panorama das emissões e a contribuição dos GEE para o aquecimento global, assim como os impactos relacionados às questões ambientais e de segurança.

2.1.1. Composição do Ar Atmosférico e Definição de CO₂

Sob as condições de pressão e temperatura ambiente, o CO₂ é um gás mais pesado que o ar, inodoro, incolor, não inflamável e de sabor ácido. Juntamente com outros gases, o CO₂ compõe o ar atmosférico conforme apresentados na Tabela 1. A composição apresentada nesta Tabela representa a concentração média dos gases presentes no ar sem que eles tenham sofrido alguma alteração através de fontes antropogênicas e naturais.

Tabela 1 - Composição média do ar seco no nível do mar.

Substâncias	Concentração em ppm	Concentração em µg/m ³
Nitrogênio (N ₂)	780.840,00	8,95 x 10 ⁸
Oxigênio (O ₂)	209.460,00	2,74 x 10 ⁸
Argônio (Ar)	9.340,00	1,52 x 10 ⁷
Dióxido de Carbono (CO ₂)	315,00	5,67 x 10 ⁵
Neônio (Ne)	18,00	1,49 x 10 ⁴
Hélio (He)	5,20	8,50 x 10 ²
Metano (CH ₄)	1,20	7,87 x 10 ²
Criptônio (Kr)	1,10	3,43 x 10 ³
Óxido de Nitrogênio (N ₂ O)	0,50	9,00 x 10 ²
Hidrogênio (H ₂)	0,50	4,13 x 10 ¹
Xenônio (Xe)	0,08	4,29 x 10 ²

Fonte: Maioli e Nascimento (2005).

Apesar de fazer parte do ar atmosférico, substâncias em concentrações acima dos valores médios podem ser nocivas à saúde humana assim como para o meio ambiente, passando a ser denominada como poluentes do ar. Segundo Maioli e Nascimento (2005), os

poluentes atmosféricos são classificados quanto à estabilidade química (instáveis e estáveis) e quanto ao grupo de compostos químicos a que o contaminante pertence. Os compostos quimicamente instáveis podem sofrer mudanças na sua composição decorrentes de interações com outros compostos após lançados na atmosfera, como por exemplo: o dióxido de enxofre (SO_2) que interage com vapor d'água (H_2O) formando o ácido sulfúrico (H_2SO_4). Já os compostos quimicamente estáveis não sofrem alterações em sua composição química, a exemplo do CO_2 .

Manfredi (2004) reúne os poluentes do ar em três grupos (regulamentados, perigosos e designados), os quais são discutidos sob o ponto de vista do controle de qualidade:

O primeiro grupo de poluentes é o dos *regulamentados* (óxidos de enxofre, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, hidrocarbonetos, particulados, oxidantes fotoquímicos), englobando aqueles que podem causar dano à saúde pública e são provenientes de diversas fontes. As normas e os padrões de qualidade do ar foram instituídos para controlá-los, enquanto as fontes existentes são monitoradas com o propósito de mantê-los dentro dos limites legais. O segundo grupo, o dos *perigosos* (mercúrio, amianto, cloreto de vinila, berílio), é onde ficam os poluentes capazes de aumentar a taxa de mortalidade ou a incidência de doenças graves. Não são seguidos dados epidemiológicos ou toxicológicos para sua limitação regulamentar, mas são estabelecidos limites baixos, de forma a oferecer ampla margem de segurança. No terceiro grupo, o dos poluentes *designados* (compostos sulfurados de fábricas de celulose, fluoretos e fosfatos de fábricas de alumínio, ácido sulfúrico de fábricas de ácidos), são classificados os que não são cobertos pela legislação genérica, nem considerados perigosos, mas apenas escolhidos para controle de tipos determinados de fontes. Além dos citados, muitos outros poluentes são encontrados na atmosfera, como os pesticidas e os solventes de tintas, lançados propositalmente, e outros provenientes de vazamentos não desejados, como gás cloro numa fábrica de soda cáustica, ou amônia num frigorífico (MANFREDI, 2004, p.65).

Além de poluir, alguns gases como os GEE tem a característica de reter calor na atmosfera. Parte do calor irradiado pela superfície terrestre fica retida na atmosfera, mantendo a temperatura em nível ótimo para a existência da vida no planeta. Sem esses gases, o calor se dissiparia mais rapidamente da atmosfera para o espaço e o planeta seria cerca de 30 °C mais frio. A temperatura média que é de 15 °C seria de -15 °C sem o efeito estufa. Este é o chamado efeito estufa e, portanto, é um fenômeno natural e fundamental para a manutenção do clima e da vida na Terra (IBGE, 2010; MCTI, 2009). Após evidências científicas que indicavam as emissões de GEE como um dos principais responsáveis pelas mudanças climáticas, foram propostas algumas medidas para solucionar o problema e, dentre as soluções apresentadas está a tecnologia de armazenamento de dióxido de carbono.

A definição do CO_2 e o processo pelo qual o CO_2 é armazenado desempenha papel fundamental para determinar o tipo e a jurisdição dos regulamentos abrangendo as atividades

de armazenamento de carbono. O CO₂ armazenado, em geral, tem sido classificado como um produto industrial, às vezes referenciado como um recurso ou como um resíduo ou poluente. Esta distinção é importante porque os projetos estão sujeitos a regulamentações ambientais com nível de rigor diferenciado, por exemplo, os projetos industriais estão sujeitos a regulamentações ambientais (sanções) menos rigorosas que os projetos de disposição de resíduos (IEA; SOLOMON *et al.*, 2007).

As impurezas presentes na corrente de CO₂, por exemplo, SO_x, NO_x, H₂S, também devem ser consideradas porque além de afetar os processos de engenharia (captura, transporte e injeção), a capacidade e os mecanismos de armazenamento geológico de CO₂ podem demandar nova classificação impondo exigências diferentes para injeção e disposição do fluido, anteriormente considerado como puro (SOLOMON *et al.*, 2007)

A classificação depende do quadro regulatório adotado em cada país, por exemplo, para o projeto In Salah na Argélia e o Projeto RECOPOL na Polônia, o CO₂ é definido como um produto industrial. Para o Projeto Gorgon na Austrália, o CO₂ que será injetado é tido como um subproduto das operações de processamento do gás. O projeto Sleipner na Noruega classifica como *commodity*, mas há controvérsias devido ao armazenamento em longo prazo e o Projeto CO₂SINK na Alemanha não especifica se o CO₂ injetado é *commodity* ou resíduo industrial (IEA, 2007).

A classificação e definição do CO₂ são informações relevantes para a avaliação do risco dos projetos de armazenamento. No caso de risco financeiro, por exemplo, se o fluido é classificado como *commodity* será diferente quando classificado como resíduo industrial. As medidas preventivas e mitigadoras também serão propostas de acordo com esta classificação. No caso do risco a pessoas, ao meio ambiente e até mesmo à integridade do sistema de armazenamento, a presença de impurezas na corrente de CO₂ levará a impactos diferentes quando comparado com uma corrente pura.

2.1.2. Emissões de CO₂

Os gases considerados como GEE “naturais” são: o vapor d’água (H₂O), o dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) e ozônio (O₃). Além destes, há os gases de efeito estufa anteriormente inexistentes, compostos químicos produzidos pelo homem, como clorofluorcarbonos (CFCs), hidrofluorcarbonos (HFCs), hidrofluorclorocarbonos (HCFCs), perfluorcarbonos (PFCs) e hexafluoreto de enxofre (SF₆) (MCTI, 2009; EPA, 2011).

Segundo Pacala e Socolow (2004), as emissões de carbono mundiais chegarão a 14 GtC/ano¹ em 2054 e para mitigar o aumento dessas emissões eles apresentam sete medidas, também conhecidas como cunhas para mitigação das alterações climáticas. Como pode observar na Figura 2, as emissões de CO₂ em 2004 foram estimados em cerca de 7 GtC/ano e seguindo uma trajetória, denominada BAU (*business as usual*), resultaria em uma taxa de emissões de cerca de 14 GtC/ano em 2054 proveniente do aumento em cerca de 1,5%/ano.

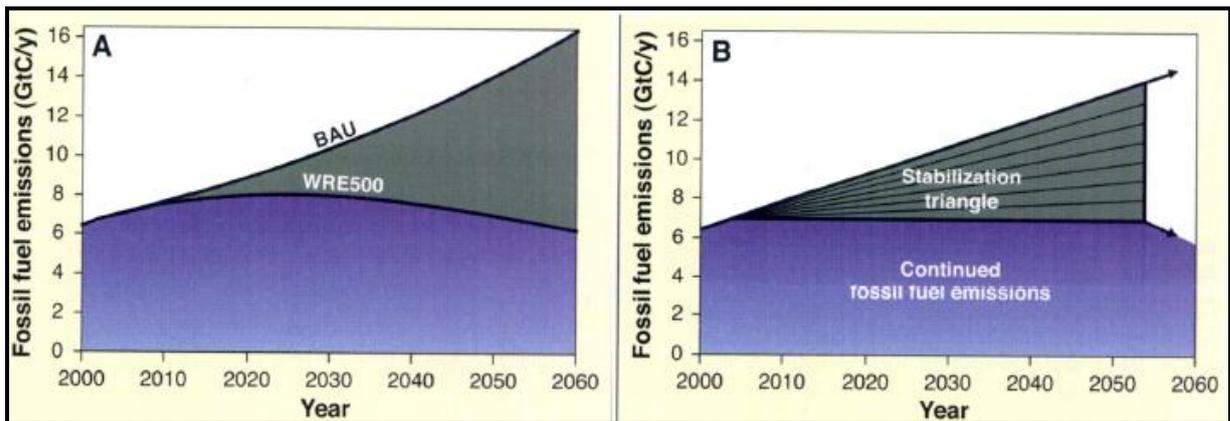


Figura 2 - As sete cunhas de Pacala e Socolow.

Fonte: Pacala e Socolow (2004).

A redução dessas emissões é idealizada em 50 anos como um triângulo perfeito ou também chamado triângulo de estabilização representado pela trajetória das emissões para 2004 e para 2054. O conceito do triângulo de estabilização, desenvolvido por Pacala e Socolow (2004), propunha que, se as tecnologias de redução de emissões de GEE fossem todas implementadas, seria possível estabilizar as emissões ao valor registrado para 2004, pois cada uma das cunhas representa uma redução de 1 GtC/ano em 2054. As cunhas estão divididas em dois grandes grupos: o primeiro refere-se ao grupo de processos que emitem menos ou não emitem carbono para a atmosfera, sendo as medidas: aumento da eficiência energética, utilização de energias renováveis, hidrogênio e energia nuclear e redução no teor de carbono nos combustíveis fósseis (carvão, óleo e gás); o segundo grupo corresponde à captura e armazenamento de CO₂ e deste faz parte as soluções tecnológicas de reflorestamento e captura e armazenamento de carbono.

As emissões globais de GEE em 2004 são apresentadas na Figura 3. Nesta Figura, os F-gases representam os HFCs, PFCs e SF₆.

¹ GtC = bilhões de toneladas de carbono por ano.

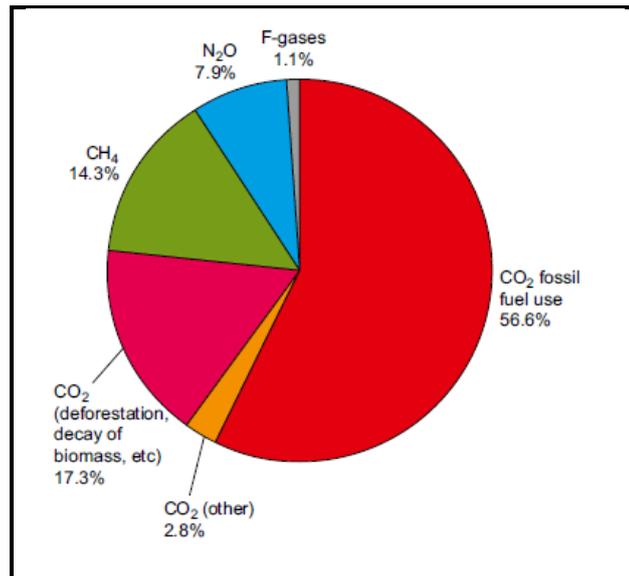


Figura 3 - Emissões Globais de GEE em 2004.

Fonte: IPCC (2007).

De acordo com o IPCC (2007), as emissões globais de GEE aumentaram em torno de 70% no período 1970 a 2004. No mesmo período (1970 a 2004), as emissões anuais de CO₂ aumentaram em torno de 80%, passando de 21 para 38 Gt, o que representou 77% do total das emissões antropogênicas de GEE em 2004. Esse crescimento representativo tem posicionado o CO₂ como o GEE mais importante.

Os outros GEE podem ser contabilizados e expressos em valores equivalentes a CO₂. A contabilidade da massa de cada GEE lançada na atmosfera pode ser feita a partir das métricas GWP (Potencial de Aquecimento Global, do inglês *Global Warming Potential*) e GTP (Potencial de Temperatura Global, do inglês *Global Temperature Potential*). Para fins informativos, os valores adotados por cada métrica são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2- GEE em CO₂eq.

GEE	GWP-100	GTP-100	GEE	GWP-100	GTP-100
CO ₂	1	1	HFC ₁₄₃	3.800	4.288
CH ₄	21	5	HFC ₁₅₂	140	0,1
N ₂ O	310	270	CF ₄	6.500	10.052
HFC ₁₂₅	2.800	1.113	C ₂ F ₆	9.200	22.468
HFC ₁₃₄	1.300	55	SF ₆	23.900	40.935

Fonte: MCTI (2009).

Ressalta-se que nenhuma destas opções foi adotada no Inventário Brasileiro por considerarem que estas métricas não representam adequadamente a contribuição relativa dos diferentes GEE à mudança do clima, além disso, propiciaria políticas de mitigação

inadequadas uma vez a GWP, por exemplo, enfatiza a importância de GEE de curto tempo de permanência no ar atmosférico (MCTI, 2009).

De acordo com a Figura 4, os cinco setores que mais contribuem para as emissões de CO₂ provenientes da queima de combustíveis fósseis são: geração de eletricidade e calor, transporte, indústria, residência e outros. De acordo com os estudos do IEA (2011), a geração de energia elétrica e calor é responsável por 41%, maior parcela das emissões de CO₂ em todo o mundo. Os outros serviços, os quais representam 10% das emissões de CO₂ incluem: serviços público/comercial, agricultura/silvicultura, pesca, indústrias de energia diferente da elétrica e geração de calor, e as outras emissões não especificadas (IEA, 2011).

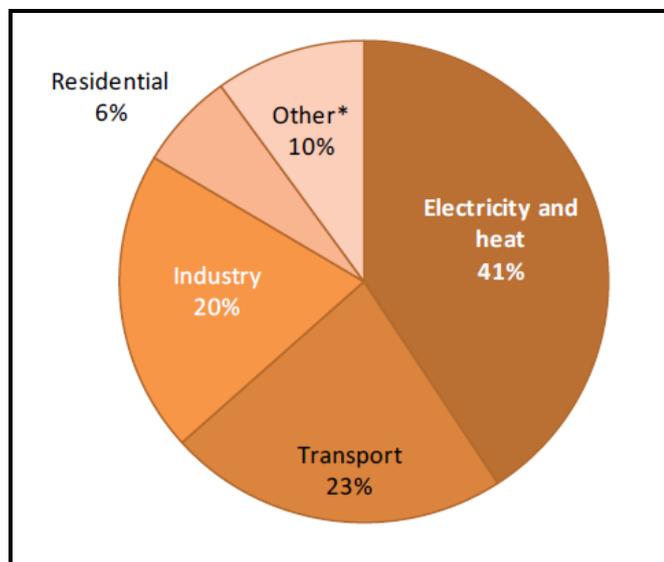


Figura 4 - Emissões de CO₂ por setor no mundo.
Fonte: IEA (2011).

No Brasil, a maior parcela das emissões líquidas totais é proveniente da mudança do uso da terra, estando na quase totalidade desse setor o desmatamento de florestas para uso agropecuário. Diferentemente dos países industrializados em que o uso energético de combustíveis fósseis é a principal fonte de emissão de CO₂, isso porque o Brasil possui elevada participação de energia renovável na sua matriz energética.

A estimativa das emissões brasileiras foi realizada para os gases: CO₂, CH₄, N₂O, SF₆, HFCs e PFCs. Os gases CFCs e os HCFCs, que destroem a camada de ozônio, não foram incluídos no inventário, pois já são controlados pelo Protocolo de Montreal. No ano de 2005, as emissões antrópicas líquidas de GEE no Brasil foram estimadas em 1.637.905 Gg² de CO₂; 18.107 Gg de CH₄; 546 Gg de N₂O; 2,83 Gg de SF₆, HFCs e PFCs. Estes valores mostram a

² Gg = mil toneladas.

grande contribuição do CO₂, em torno de 98,87%, em relação aos outros gases como CH₄, N₂O, os quais correspondem a 1,09% e 0,03% respectivamente. A estimativa de emissões brasileiras de CO₂ por setor é apresentada na Figura 5 e como pode ser observado, houve um aumento em torno de 61% das emissões de CO₂ de 1990 para 2005, passando de 991.731 Gg para 1.637.905 Gg (MCTI, 2009).

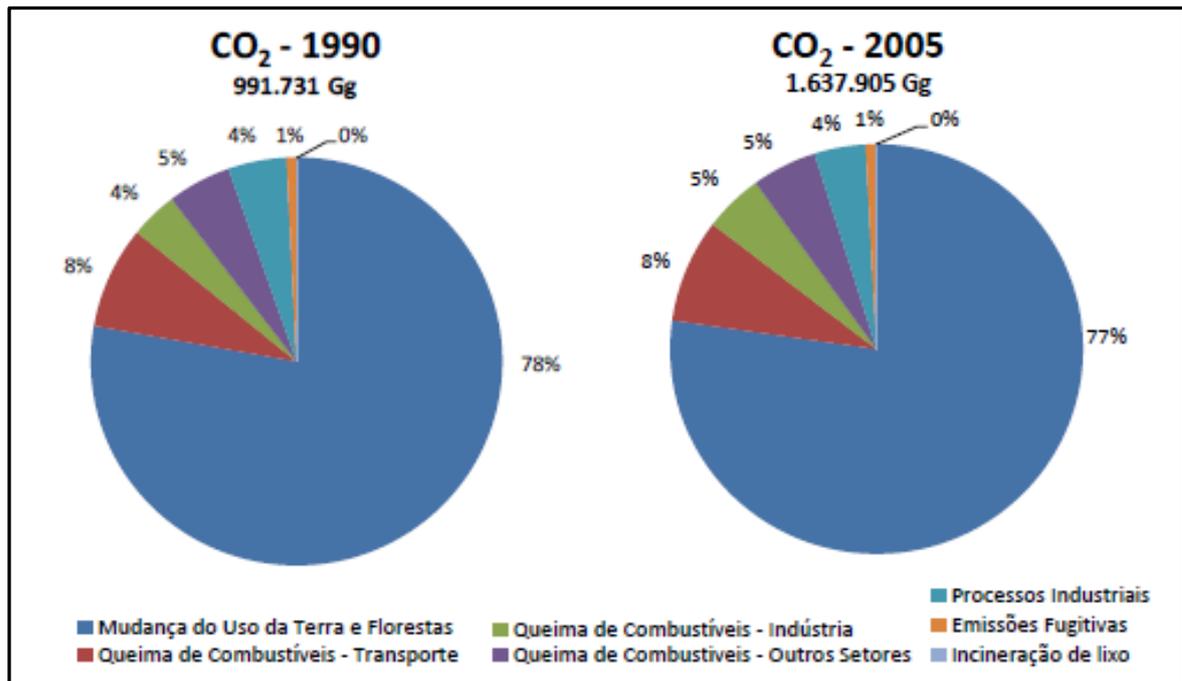


Figura 5 - Emissões brasileiras de CO₂ por setor em 1990 e 2005.

Fonte: MCTI (2009).

O Brasil apresenta um cenário particular quando comparado aos outros países, pois a matriz energética é predominantemente limpa e renovável, sendo a principal fonte de emissão de GEE o setor “Mudança no uso da terra e florestas”. Entretanto, segundo Cunha *et al.* (2009) a situação pode sofrer alterações, por exemplo, no perfil hídrico brasileiro em função das mudanças climáticas, além disso há os impactos em decorrência da exploração das jazidas do pré-sal.

Morgado e Esteves (2010) antecipam dois impactos devido às recentes descobertas de reservas de petróleo do pré-sal: o primeiro está associado ao aumento de CO₂ devido à queima deste combustível para gerar energia e; segundo, é devido a presença do CO₂ associado ao gás natural superior em cerca de 10%, o qual deverá ser removido para que atenda os requisitos necessários para enquadramento na especificação da ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis). Os autores estimam que as reservas do pré-sal possuem

concentração de CO₂ duas a três vezes superior à dos demais reservatórios o que pode representar o potencial de emissão total de 3 Gt durante a sua exploração.

2.1.3. Impactos Ocasionados por Vazamento de CO₂

Os grandes impactos ambientais, decorrentes de vazamentos indesejáveis de CO₂, são classificados por Wilson, Johnson e Keith (2003) em duas categorias: risco global e risco local. O risco global envolve a liberação de CO₂ para a atmosfera, contribuindo para a mudança climática, já os riscos locais envolvem os riscos à SSMA e dependem da topografia da região, do volume e da vazão de CO₂ e de alguma forma afetam aos seres humanos e outras espécies vivas, ecossistemas, águas subterrâneas, mobilização de minerais ou contaminantes, efeitos de deslocamento geológico como soerguimento e indução de atividade sísmica.

Os impactos do CO₂ à saúde humana em decorrência do tempo de exposição do indivíduo e da concentração do gás na atmosfera são apresentados na Figura 6.

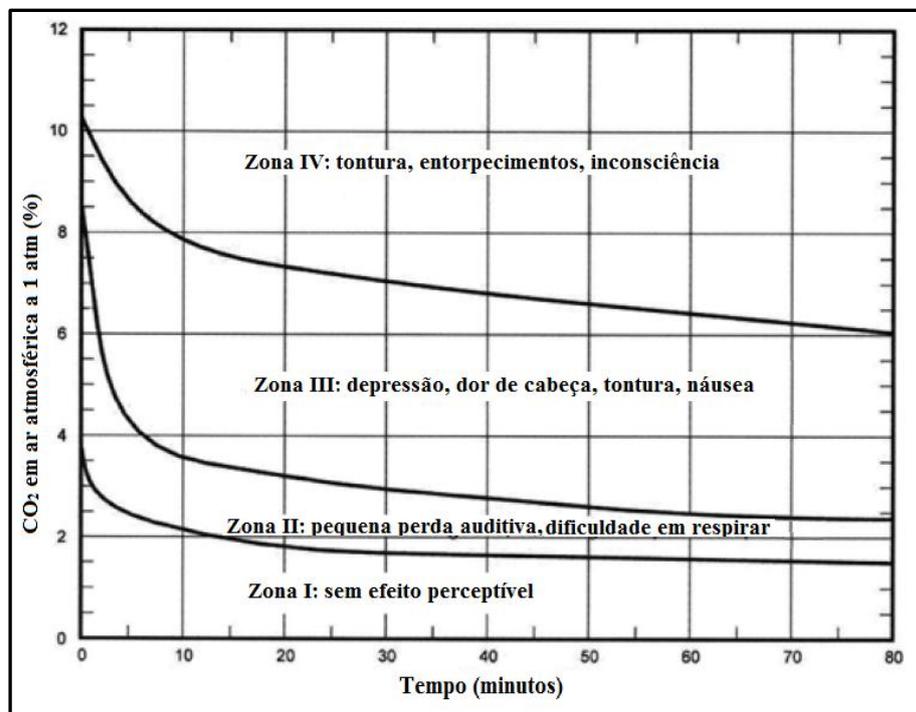


Figura 6 - Impactos à saúde humana em decorrência da exposição ao CO₂.
Fonte: IPCC (2005). Nota: Traduzido pela autora.

Os principais impactos do CO₂ à saúde humana se devem à sua concentração no ar atmosférico, ao tempo de exposição do indivíduo e à sensibilidade deste indivíduo

(CAAMAÑO, 2008). Segundo Manfredi (2004), o efeito maléfico do CO₂ ao homem e animais ocorre quando o gás é acumulado em ambiente fechado. De acordo com Benson (2005b), uma vez que o CO₂ é mais denso que o ar, as situações de perigo depende do CO₂ acumulado em lugares de baixa altitude e confinado em lugares de difícil ventilação.

No Brasil, por exemplo, para um período de 48 horas semanais, a concentração máxima de CO₂ permitida no ambiente de trabalho é de 3.900 ppm, conforme imposição da Norma Regulamentadora NR 15 em seu Anexo 11 (CÂMARA, 2009). Segundo Caamaño (2008), nos Estados Unidos, os valores de alarme para a evacuação imediata de todo o pessoal em espaços confinados são de 40.000 ppm enquanto os valores limites de exposição por 8 h na União Europeia (UE) é de 5.000 ppm (0,5%).

Dessa forma, há uma preocupação quanto à necessidade de se manter o CO₂ confinado na formação geológica impedindo que o gás contribua para o aumento das concentrações atmosféricas de CO₂ e o aquecimento global assim como a necessidade de se evitar impactos prejudiciais à SSMA.

2.1.4. Estabilidade Atmosférica e Rugosidade de Superfície

Como visto, os efeitos causados pelo CO₂ às pessoas e ao meio ambiente depende além do tempo de exposição do indivíduo da sua sensibilidade e da concentração presente no meio. No caso do ar atmosférico, a concentração será influenciada pela dispersão da nuvem do CO₂ e essa dispersão dependerá da fisiografia local, das condições do vento como velocidade e direção, rugosidade da superfície, estabilidade atmosférica, entre outros.

A estabilidade atmosférica influencia a dispersão da nuvem de gás, embora não tão direto quanto à velocidade e direção do vento. Uma atmosfera estável com pouca turbulência, a nuvem tenderá a percorrer uma determinada distância sem dispersar, diferentemente do comportamento de uma atmosfera turbulenta em que a dispersão da nuvem ocorrerá numa velocidade maior. Conforme tabela 3, a atmosfera durante o dia é tendenciosamente mais instável que a noite.

Segundo Moreira, Tirabassi e Moraes (2008), a interação do campo de vento com o solo e do aquecimento do mesmo, devido ao sol ou de seu resfriamento durante a noite por irradiação terrestre, produz um movimento caótico do ar conhecido como turbulência atmosférica que é responsável pela dispersão na atmosfera. As classes de estabilidade podem ser calculadas com técnicas semi-empíricas utilizando, como exemplo, o método de Pasquill, baseados em observações meteorológicas simples (Tabela 3).

Tabela 3 - Classificação de estabilidade atmosférica.

Insolação durante dia / Condições noturnas		Velocidade do vento no solo				
		< 2	> 2 e < 3	> 3 e < 5	> 5 e < 6	≥6
Dia	Insolação Forte	A	A-B	B	C	C
Dia	Insolação Moderada	A-B	B	B-C	C-D	D
Dia	Insolação Fraca	B	C	C	D	D
Dia ou Noite	Céu Aberto	D	D	D	D	D
Noite	Cobertura Sutil ≥ 0,5	-	E	D	D	D
Noite	Cobertura Sutil ≤ 0,4	-	F	E	D	D

A - fortemente instável;

C - fracamente instável;

E - fracamente estável;

B - instável;

D - neutra;

F – estável

Fonte: Moreira, Tirabassi e Moraes (apud PASQUILL e SMITH, 1983).

A velocidade dos ventos é influenciada diretamente pela rugosidade da superfície (Z_0) da região. Nas camadas mais baixas a velocidade do vento é afetada pela fricção com a superfície terrestre, em geral, quanto maior a rugosidade do terreno maior o abrandamento do vento. Os obstáculos presentes no solo da região onde poderão ocorrer dispersões de nuvens de gás influenciam o perfil de velocidade do vento e conseqüentemente afeta o comportamento das nuvens de gás (BURTON *et al.*, 2001). A Tabela 4, a seguir, apresenta os valores típicos de rugosidade de acordo com as características da superfície e obstáculos presentes.

Tabela 4 - Valores típicos de comprimento de rugosidade de superfície.

Classificação	Descrição	Z_0 (m)
Altamente Urbana	Centros de cidades com altas construções, muito acidentado ou áreas montanhosas.	3 – 10
Área Urbana	Centros de cidades, aldeias, região bastante arborizada.	1 – 3
Área Residencial	Área com muitas construções baixas, área arborizada, área industrial sem grandes obstáculos.	1
Grandes Refinarias	Colunas de destilação e outros equipamentos grandes	1
Pequenas Refinarias	Pequenos equipamentos sobre grande área	0,5
Terras Cultivadas	Área aberta em crescimento, casas dispersas.	0,3
Terra Plana	Poucas árvores, longas planícies de gramíneas.	0,1
Mar Aberto	Grandes extensões de água.	0,001
Mar	Mar aberto calmo, coberto de neve plana, terra rolando.	0,0001

Fonte: AICHE/CCPS (2000). Nota: Traduzido pela autora.

2.2. TECNOLOGIA DE CAPTURA E ARMAZENAMENTO GEOLÓGICO DE CARBONO

A importância da utilização da tecnologia CCGS em larga escala é significativa para a redução das emissões de CO₂, de acordo com os estudos feitos pela IEA (2008), tendo, por base, um horizonte até 2050, a adequada captura e armazenamento de CO₂ pode contribuir em torno de 14 a 19% do total das reduções de emissões de CO₂. O processo CCGS consiste das seguintes etapas: captura ou separação de CO₂, transporte e armazenamento, os quais são apresentados nesta seção.

2.2.1. Captura ou Separação de CO₂

A Figura 7 apresenta um diagrama esquemático com as principais tecnologias de captura e separação de carbono.

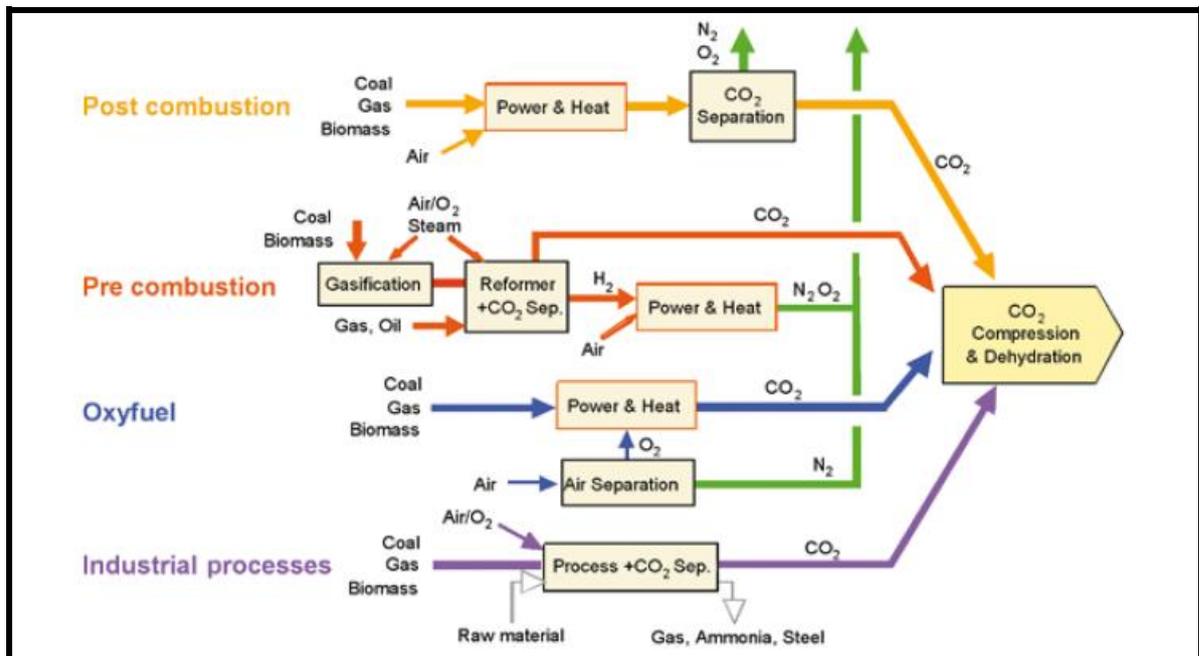


Figura 7 - Tecnologias de captura de CO₂.

Fonte: IPCC (2005).

Na primeira etapa, o CO₂ é capturado e separado das fontes emissoras, tais como: refinarias, campos de produção de óleo e gás, unidade de geração de energia como carvão, gás natural, óleo ou como subproduto de processos industriais tais como: produção de cimento, produção de amônia sintética, produção de hidrogênio e calcinação de calcário (GIBBINS; CHALMERS, 2008).

A mais adequada para as termelétricas é o sistema de pós-combustão, em que o gás de combustão capturado após a queima do combustível fóssil, quando passa pela chaminé industrial. A segunda, sistema de pré-combustão, o combustível fóssil é gaseificado antes de queimar, para que oxide, liberando uma mistura de CO e H₂O, a qual é manipulada para a formação de H₂ (usado como combustível) e CO₂. A terceira, oxi-combustão (ou *oxifuel*), consiste em realizar a queima do combustível fóssil com O₂ como comburente, em vez de ar, resultando em uma corrente de gás mais pura e que não requer a passagem por um sistema de purificação e por isso é o sistema mais delicado (BIOENERGIA, 2011).

Na tecnologia de pós-combustão, um estágio de processamento final é aplicado para remover CO₂ a partir dos produtos da combustão antes de serem jogados para a atmosfera. Os métodos comerciais mais avançados usam soluções de amina aquosas. O CO₂ é removido do gás residual pela amina em temperaturas relativamente baixas (50°C). O solvente é então regenerado para a reutilização por aquecimento (120°C), resfriado e reciclado continuamente. O CO₂ removido do solvente no processo de regeneração é seco, comprimido e transportado para o armazenamento geológico seguro (GIBBINS; CHALMERS, 2008).

Nos sistemas de captura do tipo pré-combustão, o combustível é gaseificado (parcialmente queimado ou reformado) com quantidades sub estequiométricas de oxigênio (geralmente, algum vapor) a pressões elevadas, tipicamente 30 a 70 atm, para dar uma mistura de “gás de síntese” predominantemente de CO e H₂ (GIBBINS; CHALMERS, 2008). O gás de síntese é então processado em reator WGS (*water gas-shift*), que converte o CO em CO₂ e aumenta a concentração de CO₂ e H₂ para cerca de 40% e 55%, respectivamente (BLOMEN; HENDRIKS; NEELE, 2009). O processo de separação geralmente é físico e usa-se um solvente. O CO₂ é dissolvido em maior pressão e, em seguida, liberado com pressão reduzida, podendo ser à pressão atmosférica já que nenhum calor é necessário para regenerar o solvente. Apesar dessa vantagem, que o torna como uma tecnologia em potencial para o futuro, o custo com investimentos é alto (OLAJIRE, 2010).

Na captura por combustão oxicom combustível, o combustível é queimado em oxigênio quase puro em vez de ar, o que resulta em alta concentração de CO₂ nos gases de combustão. A vantagem é que os gases de combustão tem uma concentração de mais de 80% de CO₂, portanto, apenas simples purificação de CO₂ faz-se necessário. Outra vantagem é que a formação de NO_x é suprimida e o volume do gás a ser tratado na planta de dessulfurização de gases de combustão é reduzida. Além disso, esse sistema baseia-se principalmente em processos de separação física para a produção de O₂ e captura de CO₂, evitando assim a utilização de um reagente ou solvente que contribuem para os custos operacionais além de

eliminar os resíduos sólidos ou líquidos, que podem causar danos ambientais. A principal desvantagem é que uma grande quantidade de oxigênio é necessária, que é caro, tanto em termos de custo de capital e consumo de energia (OLAJIRE, 2010).

2.2.2. Transporte e Armazenamento de CO₂

O CO₂ pode ser transportado até o local de armazenamento por dutos, navios ou caminhões. A escolha de como o CO₂ será transportado dependerá de cada projeto como, por exemplo, a distância da fonte de emissão e o local de armazenamento, a quantidade a ser transportada, entre outros.

Segundo Sasaki (2004), o transporte mais comum se dá via dutos, onde eficiência de transporte é elevada pela compressão do CO₂ até o seu estado supercrítico³ e tem sido considerada como o método mais eficiente quando a distância até o local de armazenamento não é grande, caso contrário o transporte por caminhões é preferível. Esta informação vai de encontro à apresentada pela Bioenergia (2011), pois nos Estados Unidos, por exemplo, já se transporta mais de 40 milhões de toneladas de CO₂ todo ano por tubulação com 2,5 mil km de distância. De acordo com o IEA (2008), para distâncias menores que 1.000 km, o transporte por dutos tem geralmente custo efetivo maior quando comparado com transporte marinho e por caminhão, tendo sido utilizados nos Estados Unidos por mais de duas décadas com histórico comprovado de segurança.

Em relação ao armazenamento geológico, conforme apresentado na Figura 8 pelo IPCC (2005), os potenciais reservatórios são: aquíferos salinos (*onshore* e *offshore*), reservatórios de gás e óleo e jazidas de carvão.

O armazenamento em campos de gás natural ou petróleo, em que não há mais extração dos combustíveis, consiste em injetar o CO₂ gasoso no subsolo e, devido à profundidade e aos mecanismos de confinamento, o fluido será mantido estocado. A recuperação avançada em campos antigos consiste em injetar CO₂ para melhorar a extração de petróleo, nos EUA são injetados entre 30 e 50 milhões de toneladas de CO₂ apenas para esse fim. O metano também pode ser recuperado a partir de reservas de carvão não lavráveis, neste caso, ao se injetar CO₂, por adsorção o CO₂ adere ao carvão poroso expulsando o metano. Já os aquíferos salinos, são camadas de rochas porosas com água em salmoura situadas abaixo da superfície terrestre e

³ Estado em que as densidades do gás e do líquido são as mesmas, sendo difícil distingui-los.

sem conexão com os lençóis de água potável, uma desvantagem é devido à profundidade, pois por serem muito profundos há menos informações (BIOENERGIA, 2011).

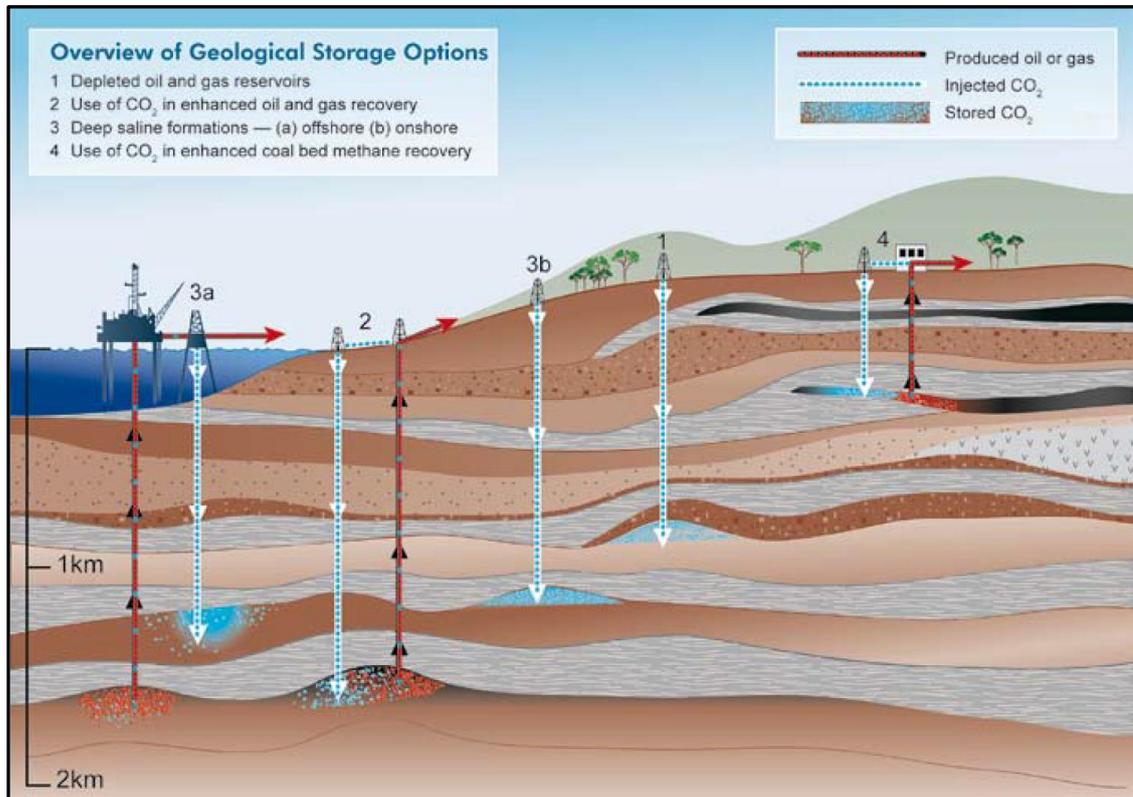


Figura 8 - Opções para armazenamento geológico de CO₂.

Fonte: IPCC (2005).

De acordo com Heyberg *et al.* (2005), para cada tipo de reservatório há vantagens e desvantagens conforme descrito no Quadro 1.

Tipo de reservatório	Capacidade de CO ₂ (Gt)	Vantagens	Desvantagens
Reservatório de hidrocarbonetos	930 Gt	Estrutura de confinamento impermeável para gases estáveis e de armazenamento bem conhecida. Viável economicamente através da técnica de recuperação avançada	Geralmente distante das fontes emissoras. Capacidade de armazenamento limitada
Aquífero Salino	400 – 10.000 Gt	Ampla distribuição geográfica e grande potencial de armazenamento. Água imprópria para o consumo.	Poucos dados conhecidos.
Camadas de carvão	40 Gt	Próximo das fontes emissoras. Potencial econômico através da recuperação de metano	Problemas de injeção devido a baixa permeabilidade do carvão. Capacidade de armazenamento limitada

Quadro 1 - Vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de armazenamento geológico.

Fonte: Heyberg *et al.* (2005). Nota: Traduzido pela autora.

A capacidade de armazenamento é um parâmetro crítico e que pode decidir se o armazenamento geológico de CO₂ pode efetivamente contribuir para resolver o problema do efeito estufa. Wildenborg *et al.* (2004) e Qi, Zhang e Su (2010) apresentam o cálculo da capacidade de armazenamento de CO₂. A estimativa da capacidade global de reservatórios de CO₂ é apresentada por Figueiredo (2007) na Tabela 5.

Tabela 5 - Estimativa da capacidade global de reservatórios de CO₂.

Opções de armazenamento	Estimativa de capacidade global		
	HERZOG E COLOMB	GALE	PARSON E KETH
Oceano	1.000 – 10.000+ GtC	-	-
Formações salinas	100 – 10.000 GtC	109 – 2.725 GtC	100 – 1.000 GtC
Reservatórios de gás e óleo depletados	100 – 1.000 GtC	251 GtC	200 – 500 GtC
Camadas de carvão	10 – 1.000 GtC	5,4 GtC	100 – 300 GtC
Terrestre	10 – 100 GtC	-	-
Utilização	Atualmente < 0,1 GtC/ano	-	-

Fonte: Figueiredo (2007). Nota: Traduzido pela autora.

2.3. MERCADO DE CARBONO E ASPECTOS LEGAIS E REGULATÓRIOS

Nesta seção são apresentados os principais projetos de CGS, os principais aspectos regulatórios desta tecnologia e o potencial para o mercado de carbono.

2.3.1. Projetos de CCGS no Mundo e no Brasil

Nesta seção são apresentados os principais projetos de CCGS no Mundo, o cenário para implantação no Brasil e quais os principais desafios dessa tecnologia.

2.3.1.1. Projetos de CCGS Mundo

O armazenamento de CO₂ em formações geológicas tem sido utilizado na prática desde 1970. De acordo com informações e experiência adquirida a partir de projetos para recuperação avançada de petróleo (EOR) e a partir de análogos industriais (incluindo projetos de gás natural e de injeção de gás ácido), o armazenamento de CO₂ em formações geológicas por longo período de tempo pode ser viável e seguro desde que os locais para armazenamento sejam bem selecionados, caracterizados e geridos (SOLOMON, 2007).

Atualmente, dentre os 275 projetos de CCGS, 101 são de escala comercial⁴ (WORLEYPARSONS, 2009). Dentre os projetos existentes, os que mais se destacam, devido, além do pioneirismo, à magnitude física e valor econômico são: Sleipner e Snøhvit na Noruega, In Salah na Argélia e Weyburn-Midale nos países Canadá e Estados Unidos (CUNHA *et al.*, 2009).

O projeto Sleipner, operado pela companhia norueguesa Statoil desde 1996 no Mar do Norte e tem capturado e armazenado mais de 10 milhões de toneladas de CO₂. O projeto *offshore* consiste na captura do CO₂ proveniente do gás produzido e injetado para armazenagem em aquífero salino. Além do primeiro projeto em escala industrial do mundo, a Statoil também opera o projeto Snøhvit (STATOIL, 2012).

O projeto In Salah na Argélia, tem sido operado desde 2004 pela iniciativa conjunta da British Petroleum (BP), Sonatrach e Statoil e, consiste na separação de CO₂ do gás natural e sua injeção na mesma formação salina em Krechba a 2 km abaixo da superfície do deserto do Sahara. Mais que 3 milhões de toneladas de CO₂ já foi armazenada seguramente e os operadores esperam estocar 17 milhões de toneladas nos próximos 20 anos (INSALAHCO₂, 2012).

O projeto Weyburn-Midale resultado de uma operação conjunta entre Canadá e Estados Unidos, onde o CO₂ é separado de uma termelétrica a carvão em Dakota do Norte (EUA) e é transportado por 300 km de dutos até o campo de Weyburn, no Canadá, onde é injetado para recuperação avançada com armazenamento geológico. Desde 2000, aproximadamente 2,7 milhões de toneladas de CO₂ por ano é estocada (CO₂CAPTUREPROJECT, 2012).

2.3.1.2. Projeto de CGS Brasil

No artigo sobre a condição atual do desenvolvimento da tecnologia de captura e armazenamento de carbono no Brasil, Beck *et al.* (2011) apresentam que o país tem experiência significativa para a implantação de projetos e que a Petrobras tem sido ativa no planejamento e desenvolvimento, com experiência na injeção de CO₂ em EOR, além de ter o

⁴ Os projetos de CCGS podem ser classificados em 4 categorias: laboratorial, piloto, demonstração e comercial. Os projeto em escala comercial são considerados àqueles que operam em mais de 1 milhão de toneladas de CO₂ por ano. A classificação de projetos de menores escalas se baseia na percentagem relativa da escala comercial. Assim, a escala comercial é tida como “escala” $\geq 100\%$ e os outros projetos são classificados como: demonstração $100\% >$ “escala” $\geq 10\%$, piloto $10\% >$ “escala” $\leq 5\%$ e de laboratório “escala” $< 5\%$ (WORLEYPARSONS, 2009).

apoio do CEPAC (Centro de Excelência em Pesquisa em Armazenamento de Carbono) e a BCA (Associação Brasileira de Carvão). Embora não tenha projetos em larga escala, há projetos piloto como o de Miranga (Petrobras) que compreende as fases EOR, reservatório de gás depletado e aquífero salino e o Projeto Carbometano de Porto Batista (CEPAC), desenvolvido com vista na produção de metano a partir de minas de carvão, aonde CO₂ será injetado no Campo Charqueadas. Segundo Lino (2005), desde 1991 a injeção de CO₂ vem sendo feita pela Petrobras nos campos de petróleo localizados na região do Recôncavo na Bahia (Buracica).

Segundo Cunha *et al.* (2009), o país conta com 22 centros de estudo e de excelência para as tecnologias CCGS, sendo que os maiores investimentos receberam maior incentivo após as descobertas do pré-sal, entretanto para a realização das atividades de CCGS em larga escala é necessário a criação de uma regulação. Alguns dos centros de estudos são apresentados por Ketzer e Cunha (2008) na Figura 9.

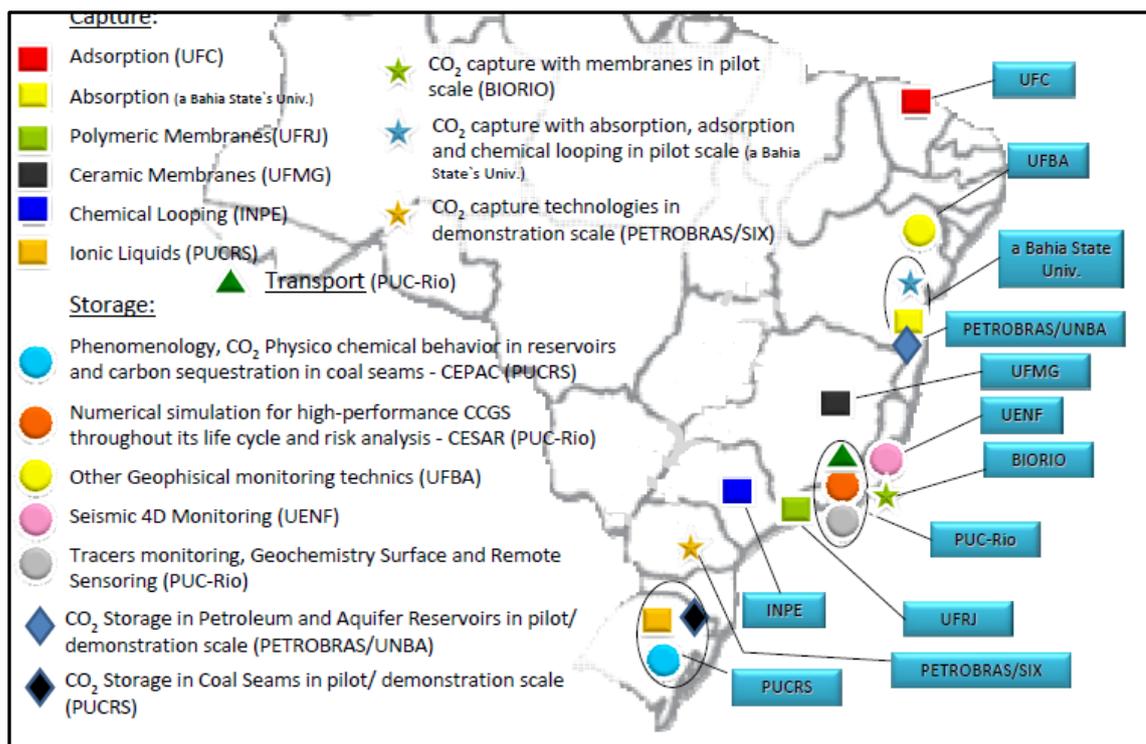


Figura 9 - Centros de excelência em captura, transporte, armazenamento geológico e monitoramento.

Fonte: Ketzer e Cunha (2008).

O país já conta também com um Mapa Brasileiro de Sequestro Geológico de Carbono – CARBMAP, desenvolvido pela PUCRS (CEPAC). A primeira fase do projeto (2006-2007) teve como objetivo criar um banco de dados com base na integração de informações socioeconômicas e aspectos, tendo como resultado: estimativas preliminares da capacidade de

armazenamento e mapas de fontes emissoras e reservatórios de CO₂. (Figuras 10 e 11). A segunda fase (2007-2008) foi marcada pelo aprimoramento quantitativo e qualitativo do SIG (Sistema de Informações Geográficas), que permitiu uma análise mais detalhada do potencial brasileiro para CCGS (MACHADO *et al.*, 2009). A densidade de emissões brasileiras de CO₂ por região é apresentada na Figura 10, sendo a região sudeste responsável por maior parte das emissões.

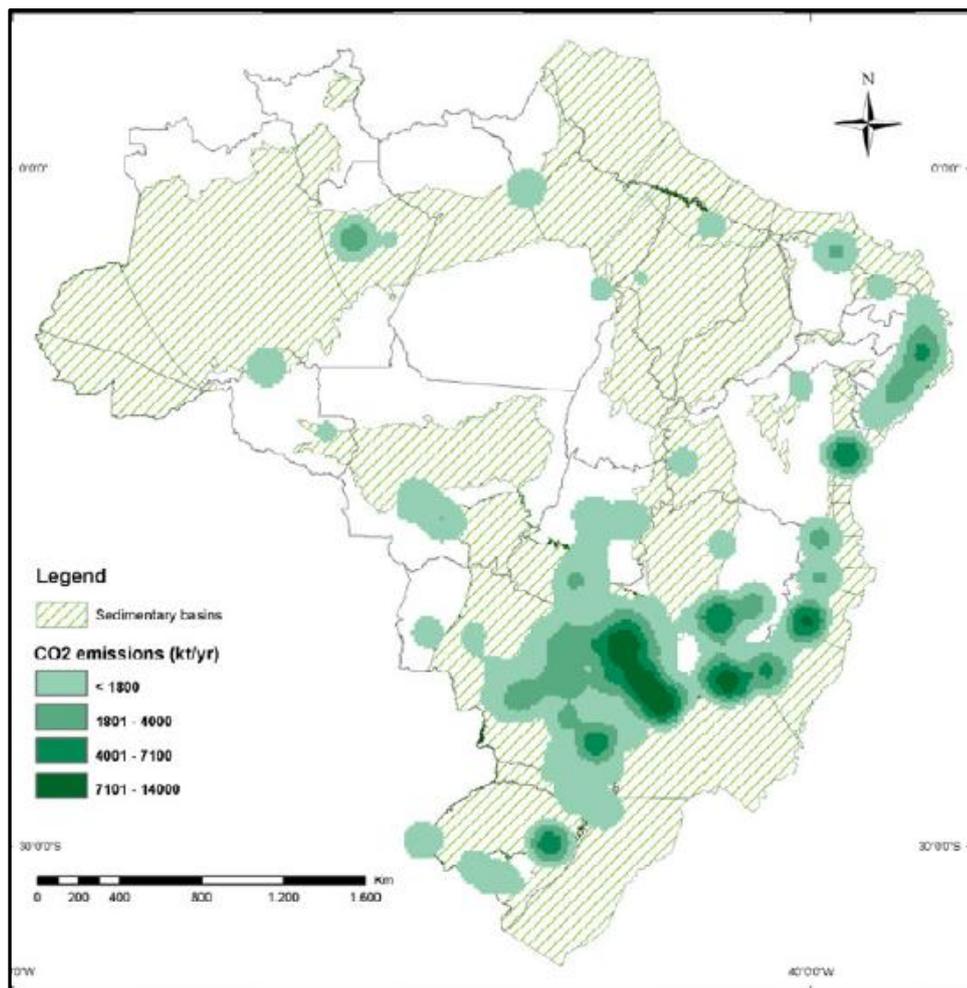


Figura 10 - Densidade de emissões brasileiras de CO₂ (CEPAC/PUCRS).
 Fonte: Rockett *et al.* (2011).

A partir da estimativa da capacidade teórica de armazenamento de CO₂ dos campos brasileiros de gás e óleo apresentada por Rockett *et al.* (2011) na Figura 11, verifica-se que o Brasil apresenta o potencial de armazenar 2,5 Gt de CO₂, o que faz do cenário brasileiro favorável para implantação de projetos de CCGS. Ressalta-se, no entanto, que há críticas e dúvidas quanto ao consenso dos valores estimados para a capacidade teórica de armazenamento de CO₂ em campos brasileiros.

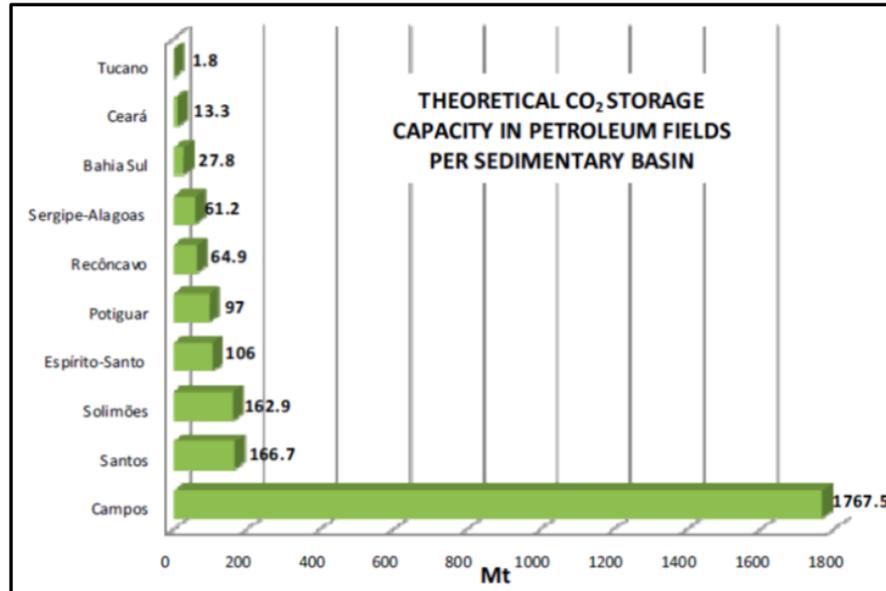


Figura 11 - Capacidade teórica de armazenamento de CO₂ em campos brasileiros de óleo e gás.
Fonte: Rockett *et al.* (2011).

2.3.1.3. Principais desafios dos projetos de CGS

Apesar dos benefícios, principalmente ambientais obtidos com projetos de CCGS, há ainda muitos obstáculos para a sua implantação. Benson (2004) aponta como os mais significativos: a) altos custos e consumo de energia na da captura e separação pela pós-combustão; b) alto custo de investimento e a falta de experiência no setor de geração elétrica com gaseificação; c) experiência limitada com o armazenamento geológico em larga escala, incluindo "provar" as estimativas de capacidade de armazenamento em formações de água salinas; d) incerteza sobre a aceitação pública quanto ao armazenamento de CO₂ em formações geológicas, incluindo a resistência a estes projetos baseados na preferência por eficiência energética e energias renováveis; e) falta de enquadramentos legais e regulamentares e; f) falta de recursos financeiros para apoiar projetos em larga escala.

Algumas das barreiras citadas por Benson (2004) também são apontados nos estudos realizados pela IEA (2008), as quais devem ser ultrapassadas para o desenvolvimento de projetos de CCGS em larga escala, sendo elas: barreiras legais e regulatórias, barreiras comerciais e financeiras, mecanismo internacional, barreiras técnicas e consciência pública.

Em relação ao Brasil, segundo Cunha *et al.* (2009), o país não dispõe de um intenso programa de financiamento para o desenvolvimento e implantação da tecnologia em larga escala e, ainda carece de um quadro político regulatório para as atividades, o que aumenta as dificuldades para implantação de projetos de CCGS. Ressalta-se que muitos países que investem na tecnologia, tem tratado com prioridade o estabelecimento do arcabouço político-

regulatório para a atividade, visto que compromete diretamente na ampliação de sua escala. Além desta, outras barreiras são apontadas: custo da captura, experiência com armazenamento em larga escala, infra-estrutura para transporte, aceitação pública, lacunas na regulamentação e mecanismo inadequados para financiamento. Diante destas as principais medidas propostas são: realização de projetos de demonstração, estabelecimento de quadros legais e regulatórios, desenvolver a conscientização do público e projetos de infraestrutura, dentre outros.

2.3.2. Mercado de Carbono

A partir do Protocolo de Quioto, estipularam-se metas para redução da emissão de gases do efeito estufa e, para isso, foram propostos alguns mecanismos de flexibilização para auxiliar os países a atingir suas metas de corte de emissão. A partir desses mecanismos de flexibilização, surge o mercado de carbono onde são negociados os direitos de emissão ou créditos de carbono. Dentre os mecanismos propostos está o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), em que os países desenvolvidos que possuem efetivas metas de redução da sua emissão, negociem reduções certificadas de emissão com países emergentes, os quais podem ser obtidos a partir da adoção de novas tecnologias produtivas. Como os outros dois mecanismos comerciais, Comércio de Emissões e Implementação Conjunta (*Emissions Trading* e *Joint Implementation*) estão relacionados à comercialização entre países desenvolvidos, o MDL é o que permite que países do Anexo I financiem projetos de redução ou comprem os volumes de redução de emissões resultantes de iniciativas desenvolvidas nos países emergentes, como é o caso do Brasil (MCTI, 2000; GRAU NETO, 2007).

Segundo Sabbag (2009), o Brasil propôs a criação do MDL, instrumento estabelecido no artigo 12 do Protocolo de Quioto, com o objetivo de promover atividades que mitiguem a mudança climática e gerem sustentabilidade a países emergentes e desde a entrada em vigor em 16 de fevereiro de 2005 o país tem participado ativamente no mercado global de créditos de carbono, sendo o terceiro país do mundo com mais atividades nos 150 projetos registradas perante o Conselho Executivo do MDL, o que corresponde a 10% do total mundial.

De acordo com estudos realizados pelo MCTI (2011), até 28 de fevereiro de 2011, do total de 2.874 projetos devidamente registrados no Conselho executivo do MDL, o Brasil continua ocupando o terceiro lugar com 188 projetos registrados, estando em segunda posição a Índia com 624 projetos e na liderança está a China com 1.243. O montante de projetos de MDL brasileiros representa 6% em relação ao total devidamente registrado no mundo, até o dia 31 de março de 2011.

A possibilidade de inclusão de projetos de CCGS como MDL foi discutida, inicialmente, na primeira sessão da Conferência das Partes do CQNUMC e a fim de considerar, cuidadosamente, as questões referentes à adoção do CCGS como MDL a decisão foi postergada até 2008 (CÂMARA, 2009). Somente na última Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (COP-17) ocorrida em novembro de 2011 em Durban, Sul da África, a tecnologia CCGS foi incluída no MDL. Assim, países emergentes podem agora ganhar créditos de redução certificada de emissões GEE para gases armazenados (UTZ, 2011).

Entretanto, o Grupo *Greenpeace International* ainda questiona quanto às preocupações legais, de segurança e meio ambiente para a inclusão da tecnologia e no MDL. Em seu relatório “Falsa esperança – Por que a captura e o armazenamento de carbono não salvarão o clima” publicado em 2008 criticam a tecnologia e argumentam que há mais gastos de energia e recursos com a sua utilização. Outro questionamento é quanto aos riscos provenientes de vazamento de CO₂, uma vez que a ocorrência deste evento impacta diretamente o meio ambiente, os investimentos realizados e as partes (GREENPEACE, 2008).

Segundo Hustad (2004) há uma relação entre o estabelecimento de projetos de CCGS como MDL, os preços de CO₂ praticados no mercado de carbono e o custo com o armazenamento. No estudo realizado por eles, os custos do armazenamento são comparados com os preços dos créditos e verificam que o armazenamento é viável para baixos custos de armazenamento (\$ 7-21/tCO₂) e altos preços dos créditos (\$ 10-35/tCO₂).

Em visita a duas empresas de consultoria de projetos GEE para os Mercados Internacionais dos Créditos de Carbono no Brasil, *Way Carbon* e *Sustainable Carbon*, verificou-se que atualmente não se tem notícias de projetos da tecnologia CCGS, entretanto é vista como uma tecnologia em potencial para ser aprovado e obter crédito de carbono (informação verbal).

2.3.3. Leis e Aspectos Regulatórios

Para Solomon *et al.* (2007), o sucesso da tecnologia CCGS como uma estratégia para mitigação de GEE depende do quadro regulamentar estabelecido para reger a sua implantação. Cunha *et al.* (2009) apontam o estabelecimento do arcabouço-regulatório como uma barreira para o desenvolvimento e para a implantação desta tecnologia em larga escala.

Segundo Carvalho (2010), o sistema de CCGS não é livre de riscos e para a implementação desta tecnologia em locais apropriados para armazenamento por centenas ou

milhares de anos faz-se necessário supervisionar e controlar os seus riscos para o meio-ambiente. O controle e a avaliação dos riscos inerentes ao processo são guiados por três critérios específicos: quantidade de CO₂ a ser injetada no reservatório, densidade e capacidade física para o armazenamento. Cada critério pode ter variações que devem ser objeto de constante análise e contenção por parte das instituições envolvidas e de autoridades estatais responsáveis com o objetivo de evitar o vazamento de CO₂. Nesse sentido, diante dos preceitos concernentes à responsabilidade ambiental do Estado tem-se que:

É patente a necessidade de um marco regulatório específico para a tecnologia de sequestro de dióxido de carbono e outras propostas a título de mecanismos de desenvolvimento limpo que sejam igualmente invasivas e, através de armazenamento de compostos químicos no subsolo, invadam a propriedade da União Federal e, em última análise, da sociedade brasileira. A preocupação com o nível nacional de emissões de CO₂ abre espaço para a recepção de diversas propostas e projetos transnacionais. Como arauto dos princípios insculpidos no texto constitucional, o Estado deve fazer uso de seu poder de polícia para impedir que iniciativas favoráveis à proteção ambiental terminem por causar acidentes irreparáveis a recursos naturais e a seres humanos. O desafio que se impõe é criar estruturas jurídicas que abracem confortavelmente projetos como o sequestro geológico de carbono, de forma a providenciar segurança e asserção de responsabilidade civil para entes públicos e privados na eventualidade de danos ao meio-ambiente (CARVALHO, 2010, p. 291).

As organizações e governos tem se antecipado quanto ao tema, a Noruega lidera as atividades em CGS tendo regulamentado a injeção de CO₂ através de emendas na legislação de petróleo. A Austrália é o país com mais destaque em Política e Regulação do CCGS, já tendo aprovado a legislação para o armazenamento *onshore* e *offshore*. Os Estados Unidos, por sua vez, através da sua legislação de Águas Potáveis estabeleceram o Programa UIC (*Underground Injection Control*) possibilitando o armazenamento geológico, ainda se aguarda a criação de uma legislação específica que possa resolver lacunas da regulação quanto ao vazamento, monitoramento e responsabilidade no longo prazo pelo CO₂ armazenado. Estes dois últimos, também tem sido um dos aspectos regulatórios ainda a se resolver no Canadá, uma vez que já é permitido o armazenamento, pois o país realizou emendas nas suas legislações de gás e petróleo (CUNHA *et al.*, 2009).

Para estabelecer um quadro internacionalmente aprovado para orientação na implantação da tecnologia de CCGS Solomon *et al.* (2007) ressalta que devem se levar em conta tanto os aspectos técnicos quanto às opções de armazenamento, incluindo: seleção do local de armazenamento, escala de operação, previsão de desempenho, avaliação de risco e da segurança, definição e classificação do CO₂, direitos de acesso à propriedade e à propriedade intelectual, requisitos de monitoramento e verificação, dentre outros.

Segundo estudos do IEA (2007), os países com indústrias estabelecidas com regimes regulamentares já desenvolvidas como a de óleo e gás pode servir de base para o desenvolvimento das estruturas jurídicas e regulamentares necessárias para o armazenamento de CO₂. Estratégia esta, que já tem sido usado para acelerar projetos de demonstração inicial de armazenamento de CO₂. Assim, a partir de uma análise do sistema regulatório do CGS em países desenvolvidos como Estados Unidos e a Austrália e o bloco econômico da UE e com base no arcabouço legal e regulatório da indústria do petróleo e gás existentes no Brasil, Câmara *et al.* (2010) apresentam uma proposta regulatória brasileira para o CGS e ressaltam que, atualmente, alguns testes em escala piloto para a utilização da tecnologia do CGS já vem sendo realizados. Iniciativa esta, impulsionada principalmente pela exploração e produção de petróleo e gás na camada do pré-sal no litoral brasileiro. Associado a este cenário, está a aprovação de uma metodologia de MDL junto a *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC) e que pode acelerar as decisões quanto ao estabelecimento do marco regulatório no Brasil para o CGS.

Dentre os pontos importantes a serem regulamentados, Câmara (2009) destaca: definição das etapas do projeto de CGS atividades e responsabilidades associadas a cada etapa, o direito a propriedade do CO₂ armazenado e a responsabilidade após o armazenamento, relação de cada etapa com as esferas governamentais, responsabilidade, ações e competências das autoridades competente e competente indicada. Dentro da discussão incluem especificação da substância a ser injetada, recolhimento de impostos e *royalties*, utilização de instrumentos econômicos/financeiros públicos, seleção do local para armazenamento e as questões técnicas devido às características do CO₂, responsabilidade dos concessionários, dentre outros.

Rocha (2011) também analisa alguns aspectos da legislação Brasileira existente e destaca alguns pontos que necessitam de reforma legislativa quando do início de atividades de CGS no Brasil. Os três aspectos tratados sob a ótica da estrutura normativa brasileira foram: direito de propriedade, direito de acesso e responsabilidade do armazenamento. Para estes, são propostas algumas modificações como, por exemplo: inclusão dos sítios passíveis de armazenamento geológico como propriedade distinta do solo, estabelecimento de lei específica para que os operadores possam exercer seu direito de acesso, reestruturação da ANP para abarcar também o armazenamento geológico e responsabilidade à empresa concessionária, enquanto operadora, pelos danos decorrentes da atividade de injeção e armazenamento.

3. ARMAZENAMENTO GEOLÓGICO DE CARBONO (CGS)

As bacias sedimentares são consideradas como adequadas para o armazenamento de grandes volumes de CO₂, com características que as tornam eficazes para o armazenamento em períodos geológicos, que vai de centenas a milhares de anos, como demonstra a existência de acumulações naturais de CO₂, bem como de hidrocarbonetos (IEAGHG, 2009). Entretanto, nem todas as bacias sedimentares são adequadas para o armazenamento de CO₂, algumas são muito rasas e outras são dominadas por rochas com baixa permeabilidade ou com pobres características de confinamento. Bacias adequadas para o armazenamento de CO₂ apresentam características tais como: simplicidade estrutural, acumulações espessas de sedimentos, formações rochosas permeáveis e formações de baixa porosidade atuando como selos (IPCC, 2005).

Neste capítulo serão apresentadas as fases do projeto de armazenamento e algumas características do reservatório e da rocha selo relacionadas ao potencial do ambiente geológico como local estável para garantir a integridade do armazenamento.

3.1. PROJETOS DE CGS

Nesta seção serão apresentadas as fases típicas do ciclo de vida do projeto de armazenamento e características para seleção do local para armazenamento de CO₂.

3.1.1. Ciclo de Vida

Embora alguns autores adotem denominações diferentes para as etapas do ciclo de vida dos projetos de CGS, basicamente são compostas pelas etapas: planejamento e construção, operação, encerramento e pós-encerramento.

O NETL (2009) apresenta 4 (quatro) fases para o ciclo de vida: pré-operação, operação, encerramento e pós-encerramento, já a DNV (2009) apresenta 6 (seis) fases: triagem, seleção e avaliação, projeto, construção, operação e encerramento. O modelo para avaliação do ciclo de vida apresentado pela Worleyparsons (2009) inclui: identificação, avaliação, definição, execução e operação. Para o IEAGHG (2008) o projeto de CGS é conduzido em três fases: planejamento e construção, injeção e pós-injeção.

É na fase de planejamento e construção em que os possíveis locais de armazenamento são identificados, selecionados e caracterizados através da avaliação de alguns aspectos como acessibilidade, capacidade, injetividade e segurança do armazenamento (IEAGHG, 2008). É nesta fase, que a concepção do projeto é realizada, as condições de contorno são estabelecidas, a geologia é caracterizada e os riscos preliminares identificados. A fase de operação é o período em que o CO₂ é injetado no reservatório de armazenamento, indo desde o início da injeção até o seu término. A fase de encerramento é o período pós-operação, em que os poços são abandonados, os equipamentos e instalações são removidos. A fase de pós-encerramento abrange o período durante o qual se faz o contínuo monitoramento para acompanhar a segurança e a eficácia do armazenamento. O monitoramento contínuo por décadas até que seja demonstrada a estabilidade do local (NETL, 2009).

Segundo Câmara (2009), a etapa de monitoramento pós-injeção corresponde a um tempo determinado e é de responsabilidade da empresa que realizou a injeção, esta etapa é iniciada após o encerramento de injeção do CO₂ no reservatório geológico e é caracterizada pelo acompanhamento do comportamento do reservatório geológico ou da pluma de CO₂ injetado pelo concessionário. A etapa seguinte, pós-encerramento, compreende atividades de monitoramento e inspeção e não tem prazo determinado, esta etapa é caracterizada pela transferência de responsabilidade, da área onde foi injetado o CO₂, do concessionário para a autoridade competente indicada.

Os períodos aproximados para execução das fases de pré-injeção, injeção e pós-injeção são apresentados por Pearce *et al.* (2006) como sendo 1 a 5 anos, 5 a 10 anos e 50 a 100 anos, respectivamente. Segundo WRI (2008), os períodos aproximados para execução das fases de seleção e caracterização do local (pré-injeção ou pré-operação), operação, encerramento e pós-encerramento são aproximadamente 1 a 7 anos, 10 a 50 anos, 1 a 5 anos e mais de 10 anos, respectivamente.

3.1.2. Avaliação do Local para Armazenamento

O local para armazenamento deve ter condições adequadas para não comprometer a integridade da contenção e levar ao vazamento de CO₂. Para isso, é necessário determinar se a formação é adequada para o armazenamento geológico em longo prazo. O IEA (2007) sugere duas etapas: caracterização do local e avaliação de risco.

Na caracterização, o local é avaliado quanto à sua adequabilidade através de avaliações de uso da terra, da geologia e hidrogeologia do local, capacidade de armazenar CO₂ e identificação dos possíveis caminhos para a fuga, dentre outros. Já na avaliação de riscos, é possível determinar os potenciais riscos de vazamento a partir das formações geológicas, utilizando modelos para prever movimentos de CO₂ ao longo do tempo e identificar locais específicos onde pode ocorrer vazamento (IEA, 2007).

Segundo Solomon *et al.* (2007), a segurança do armazenamento de CO₂ em formações geológicas depende da escolha criteriosa do local de armazenamento seguido da caracterização:

Métodos adequados para a seleção de um local para armazenamento de CO₂ são os meios mais eficazes de reduzir os riscos potenciais em longo prazo. Nesta fase, o risco técnico associado a cada local de armazenamento deve ser determinado no início de um projeto e posteriormente gerenciado. O primeiro desafio é coletar os dados necessários do local. No entanto, a quantidade de dados coletados haverá sempre algumas incertezas geológicas. Para a previsão precisa do comportamento de CO₂ injetado e, portanto, sua migração e destino a longo prazo na subsuperfície em diferentes formações geológicas, a padronização de técnicas de modelagem é outro desafio que precisa ser considerado. Os resultados irão influenciar, entre outros, a seleção e localização de técnicas de monitoramento como poços de monitoramento e sísmica, projeto e duração de requisitos de monitoramento e verificação para o local de armazenamento proposto. Uma estrutura internacionalmente consistente de orientação, que pode enfrentar estes desafios e que lida com os riscos em longo prazo pode facilitar a implantação da tecnologia CCGS em grande escala e pode construir confiança pública (SOLOMON *et al.*, 2007, pp. 2-3).

Segundo Solomon; Carpenter e Flach (2008), o local para armazenamento, geralmente, deve ter capacidade (porosidade e espessura) e injetividade (permeabilidade), rocha selante satisfatória com baixa permeabilidade e extensão suficiente, ambiente geológico estável com pouca ou nenhuma presença de falhas e fraturas para não comprometer a integridade (confinamento) do local de armazenamento. Além dessas características, o local adequado deve ser economicamente acessível até a fonte de emissão de CO₂ e ter os direitos legais necessários para a sua utilização.

Na etapa de exploração do local de armazenamento, as fases que compreendem a triagem, seleção e qualificação são de fundamental importância para estabelecer a base e atender aos requisitos necessários para o armazenamento seguro (NETL, 2010). Para triagem, seleção e qualificação do local de armazenamento, a DNV (2009) e a NETL (2010) propõem um guia com uma abordagem sistemática, cada uma com suas especificidades. Na etapa de triagem, avalia-se o potencial de CGS quanto às informações de subsuperfície, da região e do contexto social, o objetivo desta etapa é identificar os locais adequados para o armazenamento

com um nível adequado de segurança que possa decidir se deve investir mais na avaliação deste local. Na etapa de seleção, a análise de subsuperfície é mais abrangente, nesta etapa os modelos matemáticos são desenvolvidos, é feita análise de adequabilidade do local com base na análise da infraestrutura e análise regulatória, além de ser feita uma caracterização social preliminar, com base na investigação dos fatores socioculturais. O objetivo desta etapa é caracterizar o local com detalhe suficiente para permitir a seleção do projeto conceitual de engenharia e aplicação de licença para armazenamento.

Um estudo realizado por Ramirez *et al.* (2009) com 500 casos, entre eles campos de óleo e gás e aquíferos, utilizou-se de alguns critérios para triagem e seleção de 177 casos como: potencial da capacidade de armazenamento, custos e esforço necessário para o gerenciamento de risco. Os indicadores analisados para o critério gerenciamento de risco foram: falhas, sismicidade, poço, rocha selo, profundidade do reservatório. Em relação ao potencial do armazenamento, os parâmetros iniciais utilizados para triagem inicial foram: espessura da rocha selo (≥ 10 m), profundidade (≥ 800 m), porosidade ($> 10\%$) e permeabilidade (≥ 2 mD) do reservatório.

A DNV (2010) também apresenta alguns critérios de triagem para avaliar a segurança e adequabilidade dos locais para armazenamento. Dentre os critérios, estão: presença de poços e falhas, uso e característica da superfície da terra, os quais são classificados em três escalas: pobre, médio e bom. Em meio às características tidas como boas estão: profundidade do reservatório maior que 2.500 m e espessura da rocha selo maior que 100 m.

A partir da qualificação e avaliação do local de armazenamento, é possível verificar se o local está apto para o armazenamento e isso inclui demonstrar se há capacidade e injetividade suficiente para os volumes destinados de CO₂, características geológicas que forneçam boa contenção e a proposição de medidas que permitam que os riscos inerentes sejam monitorados e controlados para garantir a segurança. Nesse sentido, os planos de contingência são essenciais para a gestão de risco e incerteza.

3.2. SISTEMA DE ARMAZENAMENTO

De maneira geral, rochas reservatórios apresentam espaços vazios interconectados que lhes conferem as características de permeabilidade e de receptora do CO₂ a ser armazenado. São formadas de rochas sedimentares, principalmente arenitos e calcários. Para que este fluido seja acumulado, faz-se necessário a presença de uma barreira física (rocha selo), cuja característica seja baixa permeabilidade da rocha além da plasticidade. Esta última permite

que a rocha mantenha sua condição de selante mesmo sob esforços determinantes de deformação (THOMAS, 2004). Nesta seção são apresentadas as propriedades básicas da rocha reservatório e selo e suas respectivas condições típicas.

3.2.1. Rocha Reservatório

O conhecimento das propriedades básicas do reservatório e dos fluidos nele contido é de fundamental importância, uma vez que são estas propriedades que determinarão a quantidade de fluido a ser armazenada no espaço poroso, a sua distribuição e a capacidade destes de se moverem e de serem armazenados (THOMAS, 2004). Sendo aqui apresentadas: porosidade, permeabilidade, saturação, mobilidade, densidade do fluido CO₂ e profundidade do reservatório.

3.2.1.1. Porosidade e Permeabilidade

A rocha reservatório é composta de grãos ligados entre si por um material chamado cimento. Entre os grãos também existe um material chamado matriz. O volume total ocupado pela rocha reservatório compreende o volume dos espaços vazios e dos sólidos: grãos, matriz e cimento. A porosidade da rocha, por sua vez, é definida pela relação entre o volume poroso e o volume total, podendo ser efetiva ou absoluta. A porosidade absoluta é a relação do volume de todos os poros (interconectados ou não) e o volume total da rocha, já a porosidade efetiva é a relação entre o volume de poros interconectados e o volume total da mesma (THOMAS, 2004).

Mesmo que uma rocha contenha quantidade apreciável de poros é necessário que o fluido possa percorrer os canais porosos e a essa medida da capacidade de uma rocha permitir o fluxo de fluido é chamada de permeabilidade. A permeabilidade pode ser classificada como: absoluta, efetiva e relativa. Quando há somente um tipo de fluido saturando a rocha, dá-se o nome de permeabilidade absoluta, quando há mais de um tipo de fluido cada um que se move a uma determinada taxa é chamada de permeabilidade efetiva do meio poroso ao fluido considerado, por exemplo, na existência de água e óleo em um meio poroso diz-se permeabilidade efetiva à água e permeabilidade efetiva ao óleo. A permeabilidade relativa é a razão entre a permeabilidade efetiva e a permeabilidade escolhida como base, sendo o mais

utilizado a permeabilidade absoluta do meio em que se encontra o fluído. Sendo assim, podem-se obter as permeabilidades relativas do óleo, água ou gás (THOMAS, 2004).

Segundo Ravagnani (2007), alta permeabilidade é favorável para o armazenamento, pois permite que grandes volumes de CO_2 sejam injetados em um único poço, reduzindo assim o custo, além de permitir que o CO_2 se mova mais rapidamente através do reservatório. Para o armazenamento de CO_2 , a porosidade é um elemento essencial para avaliar a capacidade do reservatório assim como a permeabilidade e a espessura são para avaliar a injetividade. Segundo Bachu (2001), os reservatórios adequados para utilização de CO_2 em EOR tem porosidade e permeabilidade acima de 15% e 1 mD, respectivamente.

3.2.1.2. Molhabilidade, saturação e mobilidade de fluídos.

A molhabilidade depende tanto do fluido quanto do sólido, pois é a tendência de um líquido espalhar-se sobre uma superfície de contato, em presença de outro fluido. É medida pelo ângulo de contato entre o fluido e a superfície. No caso do sistema óleo-água-rocha como apresentado pela Figura 12, quanto menor o ângulo de contato ($\theta < 90^\circ$), maior é a facilidade do fluido em se espalhar sobre a superfície e, portanto, neste caso a rocha é molhada pela água, mas se o ângulo é maior que 90° ($\theta > 90^\circ$), a rocha está molhada pelo óleo (BARILLAS, 2005).

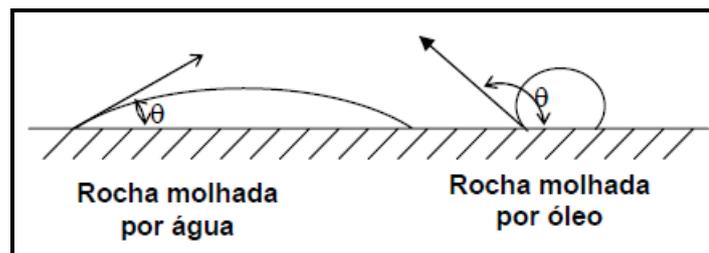


Figura 12 - Molhabilidade do sistema óleo-água-rocha.

Fonte: Barillas (2005).

Saturação de um determinado fluido (água, óleo ou gás) é a fração ou porcentagem do volume poroso ocupado pelo fluido. Em reservatório com presença de água e óleo, por exemplo, a saturação de água (S_w) irreduzível representa a água imóvel mantida na rocha por forças capilares e tensão superficial, já a saturação de óleo (S_o) residual à água representa a quantidade de óleo que não é deslocada pela água e é fortemente influenciada pela molhabilidade da rocha (RAVAGNANI, 2007). Segundo Bachu (2001), projetos de EOR adequados apresentam saturação de óleo maior que 25%.

A mobilidade de um fluido é a razão entre a sua permeabilidade absoluta e a sua viscosidade. Já a injetividade pode ser obtida como produto entre a mobilidade do CO₂ e o valor de conversão 0,0208. Além da permeabilidade, a pressão e espessura são fatores podem influenciar a injetividade (SINGH, 2004). As mobilidades assim como as permeabilidades relativas dependem das saturações dos fluidos (BARILLAS, 2005).

3.2.1.3. Profundidade

A profundidade, temperatura e a pressão do reservatório influenciam diretamente nas propriedades do CO₂ (Figura 13). Segundo o IEAGHG (2008), o CO₂ é injetado como um fluido supercrítico porque além de ocupar menos espaço ao assumir a característica de líquido, se difunde melhor através dos espaços porosos nas rochas como os gases. De acordo com Singh (2004) o CO₂ deve ser injetado acima do seu ponto crítico (31 °C, 7,38Mpa / 74 bar) e em profundidade maiores que 800 m, pois quanto maior a pressão mais denso é o CO₂, menor é o volume ocupado e conseqüentemente maior quantidade de CO₂ poderá ser armazenado. Entretanto, ressalta que altas pressões pode afetar adversamente a injetividade e conseqüentemente aumentar os custos de armazenamento.

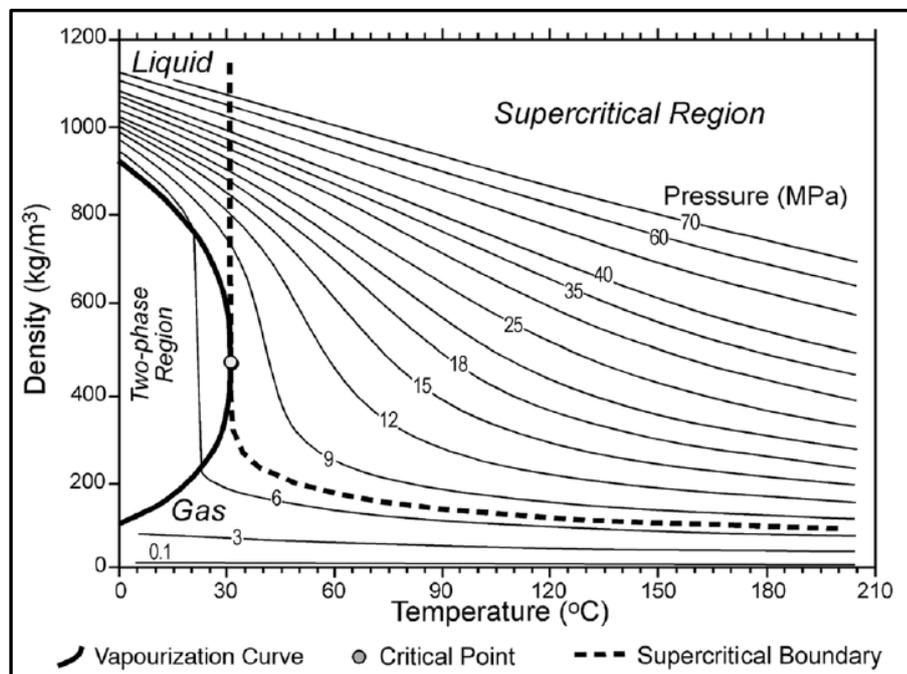


Figura 13 - Variação da densidade de CO₂ em função da pressão e temperatura.
Fonte: IPCC (2005).

Assim, com o objetivo de manter o CO₂ em estado supercrítico, a profundidade do reservatório de injeção deve ser maior que 800 m e menor que 2.000 m devido aos custos, já que estes aumentam com a profundidade e compressão. Em condições gerais, o CO₂ deve ser armazenado em uma área de alta pressão e baixa temperatura onde o gradiente geotérmico seja relativamente baixo, em que a diferença de temperatura seja 25 °C por km e o de pressão 1 MPa por 100 m, sendo que para a segurança do armazenamento é desejável que a diferença de pressão nos poros seja menor que 17,4 KPa/m (QI; ZHANG; SU, 2010). Como pode ser observada na Figura 14, quanto maior a profundidade menor o volume a ser ocupado pelo CO₂, volume este representado pelos balões em azul.

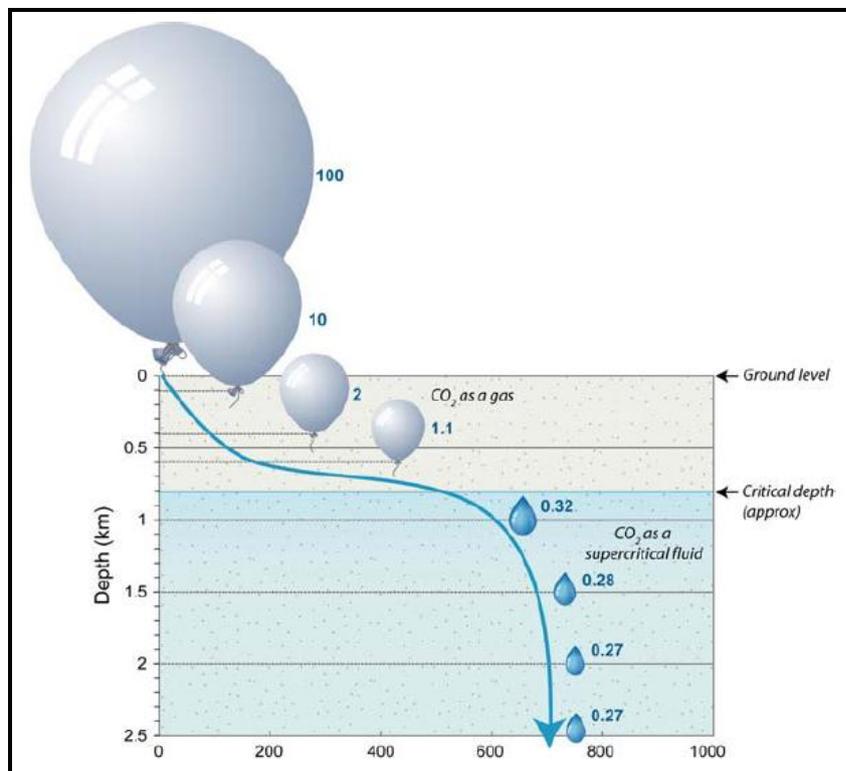


Figura 14 - Densidade do CO₂ vs. profundidade do local de armazenamento.
Fonte: IEAGHG (2008).

De acordo com o IPCC (2005), em profundidades abaixo de 800-1.000 m da superfície, CO₂ supercrítico apresenta densidade em cerca de 500-800 kg/m³, fornecendo o potencial para a utilização eficaz de espaço para o armazenamento. Nos estudos realizados por Qi, Zhang e Su (2010), a densidade de CO₂ em reservatório utilizado para o cálculo da capacidade de armazenamento para o Campo de óleo Weyburn foi de 604 kg/m³. De acordo com os estudos de Jenkins *et al.* (2011) para o Projeto Otway na Austrália, a uma profundidade em torno de 2.000 m a densidade do CO₂ injetado é 500 kg/m³.

3.2.2. Rocha Selo

As características da rocha selo e dos mecanismos de confinamento para projetos de CGS (P) e ocorrências naturais de CO₂ (O) são apresentados no Quadro 2. Ressalta-se que muitas das ocorrências naturais são acumulações naturais de CO₂ em reservatórios que tem permanecido no local por milhares de anos sem evidência de vazamento.

Projeto (P) Ocorrência (O)	Localização	Quantidade de CO ₂	Selo / Mecanismo de confinamento
Sleipner (P)	Mar do Norte; <i>offshore</i> Noruega	21 Mt total; ~ 1Mt/ano.	Rocha selo com 80 m de espessura; trapeamento físico e fixação por dissolução ⁵ .
Weyburn (P)	Bacia Williston, ao sudeste de Sakatchewan, Canadá.	21 Mt total; ~ 1Mt/ano.	Rocha selo composta por duas camadas, sendo a primária evaporito de 4 a 7 m de espessura e a secundária folhelho com ~200 m de espessura; trapeamento físico e fixação por dissolução.
In Salah (P)	Sahara, Algeria	17 Mt total; ~ 1Mt/ano.	Rocha selante carbonática com ~ 950 m de espessura; trapeamento físico e fixação por dissolução.
Frio Brine Pilot (P)	Texas, USA	4 kt total.	Selo composto por diversas camadas espessas de folhelhos; pequeno bloco de falha.
Minami-Nagaoka Gas Field (P)	Nagaoka, Japão	10 kt.	Estrutura anticlinal fechada; selo <i>mudstone</i> (carbonática) com ~160 m de espessura; armadilha estrutural.
K-12B Gas Field (P)	<i>Offshore</i> (Mar do Norte), Nordeste de Amsterdam, Países Baixos	8 Mt total	Rocha selo (anidrita, halita e folhelho) >200 m de espessura; trapeamento estrutural ⁶ .
Teapot Dome, EOR Pilot (P)	Wyoming, USA	1,6 Mt/ano	Rocha selo composta por folhelho, carbonato e anidrita; anticlinal sobre falha.
Ketzin (P)	Alemanha	0,03 Mt/ano por 2 anos.	Rocha selo composta por gipsita e argila; estrutura anticlinal.
Pisgah Anticline, a norte e leste de Jackson Dome (O)	Central Mississippi, USA	215 Mt	Rocha reservatório separada por rochas de baixa permeabilidade composta por anidrito e carbonato denso. Área crestal ~30 x 8 km; “carbonatos impermeáveis, evaporitos e xisto mais que 30 m de espessura sobre Buckner”.
McElmo Dome, a sudeste da Paradox Basin, Colorado Plateau (O)	Sudoeste do Colorado, USA	1.600 Mt	Combinação de trapeamento estrutural e estratigráfica sem presença de falhas que cortem a rocha selo; folhelho com ~ 60 m de espessura; sobre a camada de rocha selo há halita de ~ 400 m de espessura.
Bravo Dome (O)	Northeastern New Mexico, USA	10 Tcf	Trapeamento estrutural e estratigráfica; selo de anidrita com 30 m de espessura.
St. Johns Dome, borda sul de Colorado Plateau (O)	Arizona/Novo México, USA	Estimado em 730 Mt.	Camada de evaporitos (anidrita) e de gipsita de ~ 250 a 1.000 m e permeabilidade < 0,01-0,02 mD.

Quadro 2 - Características da rocha selo e mecanismos de armadilhas de projetos de CGS e ocorrência natural de CO₂.

Fonte: Adaptado de IEAGHG (2009).

⁵ Do inglês *physical / dissolution trapping*.

⁶ Do inglês *structural trap*.

A presença da rocha selo (ou também chamada rocha selante ou rocha capeadora) é um dos fatores mais importantes a considerar ao selecionar o local para armazenamento, pois a falta de contenção adequada pode levar ao vazamento de CO₂ para a atmosfera e para região em que há água subterrânea (SINGH, 2004). Para que o fluido seja confinado, faz-se necessário a existência de armadilha física de confinamento composta por rochas de baixa permeabilidade dispostas de maneira que impeça a migração ou fuga do CO₂. Além da baixa permeabilidade a rocha selo deve ser extensa, espessa e dotada de plasticidade, para que mantenha sua condição de selante mesmo sob pressão. (THOMAS, 2004; IEAGHG, 2008).

Assim, a rocha selo deve apresentar características satisfatórias para não comprometer a integridade do armazenamento. A análise da eficácia de selos envolve basicamente a avaliação de sua espessura, extensão lateral, permeabilidade e propriedades geomecânicas, uma vez que a integridade do armazenamento pode ser influenciada por fatores como: litologia (tipo de sedimentos), espessura, profundidade, ductilidade, permeabilidade e continuidade lateral (NETL, 2010).

3.3. PROCESSOS QUE AFETAM O CGS

Além das propriedades básicas das rochas reservatório e selo, há alguns fatores e processos que afetam a integridade do local de armazenamento. Nesta seção serão apresentados os mecanismos de confinamento, processos geomecânicos e químicos e a presença de impurezas.

3.3.1. Mecanismos de Confinamento

O armazenamento geológico depende da combinação de mecanismos de confinamento para conter o CO₂ injetado em longo prazo e a presença desses mecanismos depende da geologia local. Esses mecanismos incluem armadilhas físicas de baixa permeabilidade e armadilhas geoquímicas, as quais podem operar simultaneamente e em diferentes escalas de tempo como pode ser observada na Figura 15. A eficiência e a segurança do armazenamento dependem dos mecanismos: estrutural e estratigráfica, capilar ou residual, solubilidade e mineral, os quais são cada vez mais eficientes de acordo com o tempo (IPCC, 2005).

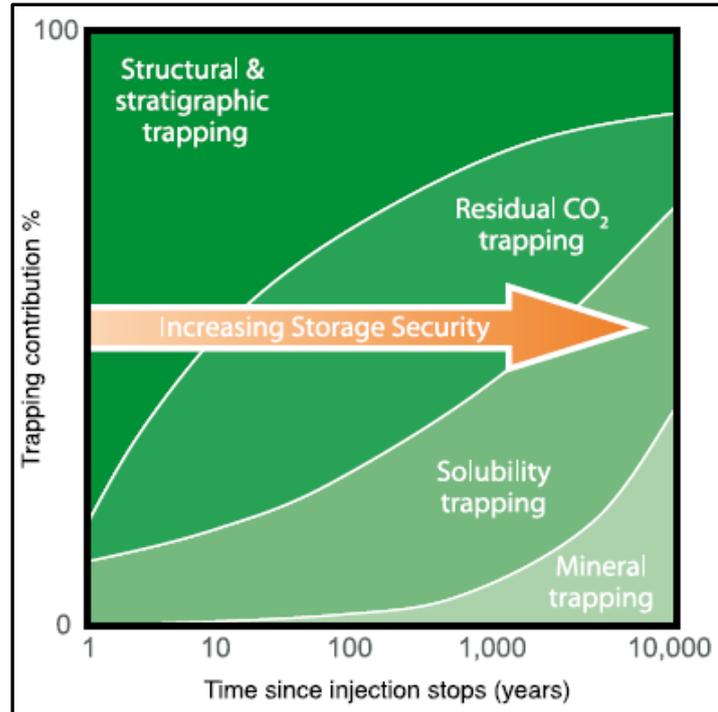


Figura 15 - Mecanismos de confinamento e segurança no armazenamento de CO₂.
Fonte: IPCC (2005).

3.3.1.1. Armadilha física: estratigráfica, estrutural.

Os primeiros mecanismos de confinamento dominantes são, comumente, as armadilhas estratigráfica ou estrutural, ou a combinação das duas, as quais impedem a migração do CO₂ através de camada rochosa selante de baixa permeabilidade, formando uma vedação primária contínua (IEAGHG, 2008). As armadilhas estratigráficas são formadas por mudanças no tipo de rocha causadas pela deposição das rochas enquanto as armadilhas estruturais são formadas por rochas dobradas ou fraturadas podendo ser: anticlinal, falhas e domo de sal como apresentada na Figura 16.

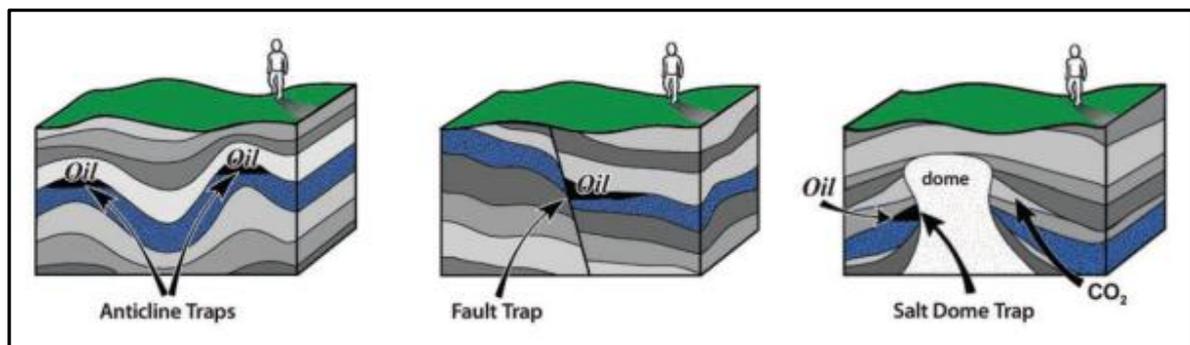


Figura 16 - Armadilhas estruturais: anticlinal (esquerda), falhas (meio) e domos de sal (direita).
Fonte: NETL (2010).

A armadilha anticlinal é formada por dobras, causando o isolamento de reservatórios em pontos altos. A armadilha por falha é formada por falhas com seções paralelas da rocha que se deslocam de modo que a rocha impermeável contenha os fluidos de migração dentro de um reservatório. Já a armadilha por domos de sal no reservatório é formada por domos salinos em camadas sedimentares de modo a isolar o fluido ao longo dos flancos da estrutura de sal (NETL, 2010). As armadilhas estratigráfica e estrutural são adequadas para o armazenamento, entretanto deve-se ter cuidado com a sobrepressão para evitar quebrar a rocha selo ou reativar falhas, uma vez que as falhas podem agir como barreiras de permeabilidade em algumas circunstâncias e como caminhos preferenciais para o fluxo de fluidos em outras (IPCC, 2005).

3.3.1.2. Armadilha geoquímica: residual, solubilidade e mineral

Interações geoquímicas podem ocorrer entre o CO₂ injetado com a rocha e a água de formação contribuindo para aumento da eficácia e capacidade de armazenamento, podendo ser: residual, solubilidade e mineral. A armadilha residual geralmente começa depois que se interrompe a injeção, o CO₂ é aprisionado em minúsculos poros da rocha por pressão capilar com água. A armadilha por solubilidade ocorre quando o CO₂ se dissolve na água de formação, onde o principal benefício é que uma vez que o CO₂ é dissolvido, ele não existe mais como uma fase separada, eliminando assim as forças de empuxo que possam levá-lo para cima. Dependendo da rocha de formação, o CO₂ dissolvido reagirá quimicamente com a rocha formando minerais estáveis (armadilha mineral), a forma mais segura de armazenagem para CO₂, mas é um processo lento que pode levar milhões de anos (IPCC, 2005; IEAGHG, 2008).

3.3.2. Processos Geomecânicos e Geoquímicos

Bildstein *et al.* (2009) apresentam no Quadro 3, a existência de fraturas na rocha selo e como os mecanismos de confinamento (estrutural e estratigráfica, capilar ou residual, solubilidade e mineral) são cada vez mais eficientes com o tempo, mas a segurança é crítica a curto prazo devido ao estresse induzido por injeção mecânica e, a médio prazo devido ao acoplamento entre perturbações mecânica e geoquímica.

Armadilha dominante	Curto prazo	Médio prazo	Longo prazo		Poço	Reservatório	Rocha selo	Sobrecamadas
	~ anos	~ décadas	~ 100 anos	~ 1.000 – 10.000 anos				
	Estrutural	Capilar	Solubilidade	Mineral				
Fratura pré-existente	Caminhos preferenciais através de fraturas ou conjunto de fraturas		-	-	-	-		
Reativação devido à injeção (stress mecânico)	Reativação de fraturas pré-existentes devido ao aumento de pressão no reservatório durante a injeção de CO ₂		-	-	-	-		-
	Fratura da rocha selo devido ao aumento excessivo de pressão no reservatório durante a injeção de CO ₂		-	-	-	-		-
	Atividade sísmica induzida devido ao relaxamento das restrições acumuladas durante a injeção		-	-	-	-		
Reativação devido a processo geoquímico	-	Reativação de fraturas devido a alterações químicas no material que preenche as fraturas.			-	-		-
	-	Reativação ou criação de um conjunto de pequenas fraturas.			-	-		-
Eventos externos	Eventos sísmicos ou antropogênicos afetando o reservatório ocasionando a criação ou ativação de novas fraturas.							
	Perfuração no reservatório depois do período de fiscalização do local							-

Quadro 3 - Segurança e cenários de fraturas ao longo do tempo.

Fonte: Adaptado de Bildstein *et al.* (2009).

Os processos geomecânicos são processos que podem resultar em alterações na integridade estrutural do material geológico, e por isso, uma avaliação adequada da pressão de fratura, pressão para reativação de fratura e falhas e orientação relativa destas em relação à orientação ao regime de tensões regional é importante. Ressalta-se que os processos geomecânicos podem ocorrer em diferentes escalas, e uma deformação na formação geológica não necessariamente afeta a integridade do sistema de confinamento (EPA, 2008).

Segundo Lippmann e Benson (2008), a prática de armazenamento subterrâneo de gás natural, que começou nos EUA em 1916, fornece informações úteis para o armazenamento geológico de carbono e, para estes projetos, a sobrepressão tem sido a principal causa de vazamento. Isso se dá, porque a operação ocorre a pressões superiores ao original, podendo resultar em deslocamento da coluna estática de água, forçando a água para fora da rocha selo, fraturando-a e levando ao vazamento. Por esse motivo, eles afirmam que a sobrepressão é a principal causa de vazamento.

A operação a altas pressões também é frequentemente utilizado na indústria de petróleo e gás para aumentar a injetividade da formação em torno do poço. Os parâmetros que afetam a pressão de injeção são a porosidade e permeabilidade da formação, estas quando são altas são mais receptivas ao fluido injetado, entretanto quando se requer baixa pressão de

injeção a sismicidade induzida é mais suscetível. Assim, a altas pressões de injeção, a formação pode fraturar (fraturamento hidráulico) devido ao excesso de pressão levando à criação ou expansão das fraturas (SMINCHAK; GUPTA; BERGMAN, 2002).

Processos geoquímicos são processos que se referem a reações químicas que podem causar alterações na fase mineral. A acidez causada pela reação do CO₂ e água podem dissolver parcialmente matérias do sistema de confinamento podendo levar à abertura de caminhos de migração. Ressalta-se que as reações geoquímicas também podem ter efeito favorável, pois com a formação de novo material esta pode ajudar na vedação de fraturas. A avaliação destes processos incluem avaliação das taxas de dissolução, capacidade de tamponar, volume molar e o nível de pH. Em relação à zona de injeção, a dissolução de CO₂ na água de formação (por exemplo, a salmoura) pode reduzir o volume de CO₂ a ser armazenado, além de afetar na porosidade, injetividade e permeabilidade (EPA, 2008).

3.3.3. Presença de Impurezas

A presença de impurezas na corrente de CO₂ injetada pode afetar não somente os processos de captura, transporte e injeção, como causar variações geoquímicas e geomecânicas que podem afetar a integridade da rocha selo, material do poço, a rocha reservatório assim como os mecanismos e capacidade de armazenamento geológico.

O CO₂ injetado obtido por processo de combustão pode apresentar impurezas que variam entre os processos pré-combustão, pós-combustão e oxidação, e podem ter potenciais efeitos físicos e químicos para o armazenamento. As impurezas presentes podem ser classificadas como condensáveis e não condensáveis, as quais usualmente estão presentes em quantidades acima de 0,5%, como N₂, Ar, O₂ e H₂O e; abaixo de 0,5% ou a níveis de ppm (partes por milhão) como SO₂, SO₃, NO, NO₂, N₂O. Além destas pode estar presente as chamadas micro impurezas que consistem em: HCl, HF, Hg e outros metais pesados. (IEAGHG, 2011).

Alguns contaminantes como, por exemplo, SO_x, NO_x, H₂S podem exigir classificação como perigosas, por exemplo, impondo exigências diferentes para injeção e disposição quando comparado quando o fluxo é puro. Impurezas no fluxo de CO₂ afetam a compressibilidade do CO₂ injetado (e, portanto, o volume necessário para armazenar um determinado montante) e reduz a capacidade de armazenamento em fase livre, por causa do espaço ocupado por estes gases (IPCC, 2005).

Segundo estudo realizado pela IEAGHG (2011), o efeito mais significativo é a redução da capacidade de armazenamento. A presença de impurezas não-condensáveis em 15% reduz a capacidade de CO₂ em 40% quando comparado com o CO₂ puro. A redução média da injetividade é 6%, menor quando comparado à capacidade de armazenamento, isso ocorre porque apesar da redução da densidade, a viscosidade aumenta. A presença de impurezas reduz a eficiência da dissolução de CO₂ em água de formação, a retenção de CO₂ nos poros de rocha e a segurança do armazenamento em curto e médio prazos. Com relação aos efeitos químicos sobre as rochas, as espécies mais significativas são SO_x, NO_x e H₂S. O NO_x pode catalisar a oxidação de SO₂ para ácido sulfúrico, além de promover a dissolução de minerais, mas não irá causar a precipitação e, portanto, a redução de porosidade da rocha. Em relação à integridade da rocha selo, apesar de 200 ppm não causar impacto significativo, o SO_x e NO_x aumentam a dissolução das rochas carbonáticas e aluminossilicatos. Em relação à corrosão de materiais do poço, estudos sugerem que os efeitos das impurezas ácidas na dissolução do cimento podem ser mais significativas que na rocha.

Para obter CO₂ de alta pureza, há algumas barreiras técnicas suscetíveis a aumento de custos adicionais e de energia, o que pode resultar em perda da eficiência e, portanto, é importante encontrar um equilíbrio entre as especificações e os critérios de segurança, aspectos legais e ambientais para o transporte e armazenamento de CO₂. Os limites de concentração possíveis das impurezas nos fluxos de CO₂ são apresentados por Li *et al.* (2011) na Tabela 6.

Tabela 6 - Limites da composição da corrente de CO₂.

Componente	Limites min-max (mol%)	Componente	Limites min-max (mol%)
CO ₂	75- 99	H ₂ S + CO ₂	0,01 - 1,5
N ₂	0,02 – 10	NO _x	0,0002 - 0,3
O ₂	0,04 – 5	CO	0,0001 - 0,2
Ar	0,005 - 3,5	H ₂	0,06 – 4
SO ₂	< 0,0001 - 1,5	CH ₄	0,7 – 4

Fonte: Li *et al.* (2011). Nota: Traduzido pela autora.

3.4. CAMINHOS DE VAZAMENTO

O vazamento de CO₂ pode ocorrer por potenciais mecanismos e caminhos de migração de acordo com cada etapa da tecnologia CCGS, como apresentado na Figura 17. O potencial de vazamentos a partir das etapas de captura e transporte apresentam similaridades uma vez que envolvem tecnologias operacionais, enquanto que os mecanismos na etapa de

armazenamento são distintos, uma vez que este está inserido em um sistema natural. Este trabalho abordará somente os riscos associados ao sistema de armazenamento, considerados como sendo compostos pelos poços de injeção e formação geológica.

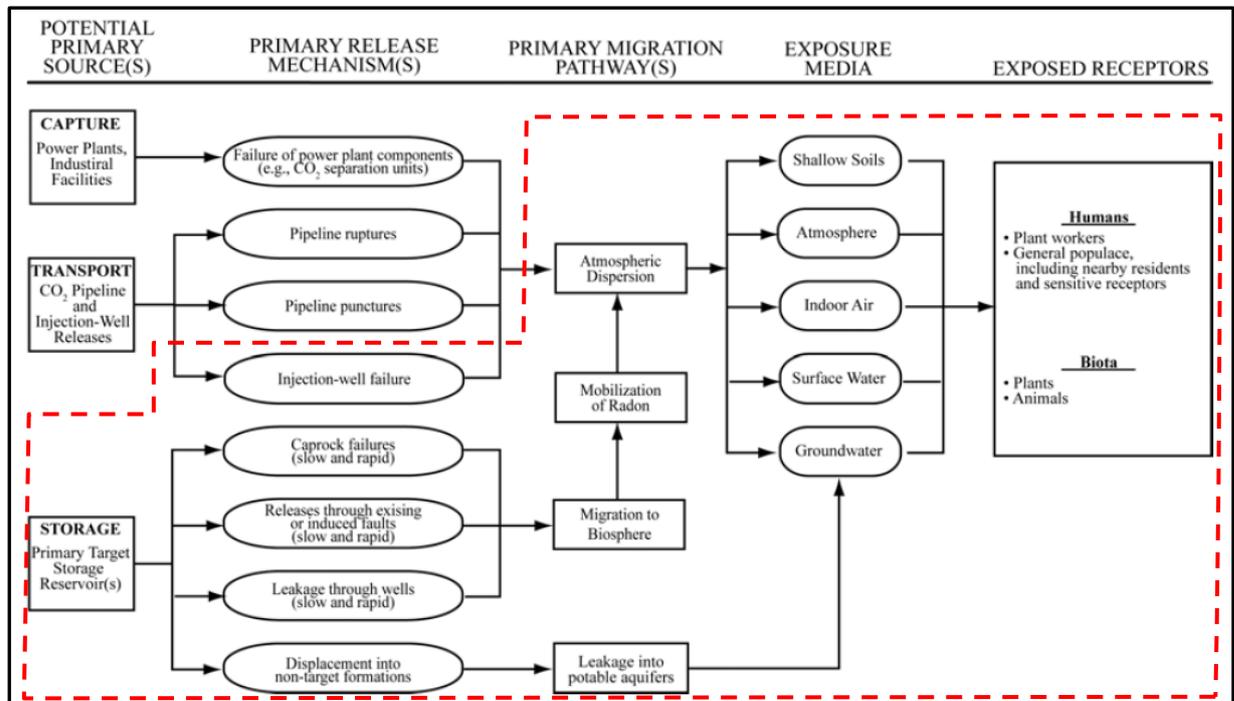


Figura 17 - Potenciais fontes, mecanismos e caminhos de migração de CO₂ e potenciais impactos e meios de exposição.

Fonte: Tetrattech (2009).

Conforme apresentado na Figura 17, em relação à tecnologia de captura, os principais mecanismos de vazamento estão relacionados a falhas de equipamentos e dos componentes da planta industrial, já em relação às tecnologias de transporte, os mecanismos de vazamento podem ser por rupturas na tubulação e falhas no próprio poço de injeção. Para estas etapas, quando o CO₂ migrar, a atmosfera é o primeiro receptor, a partir do qual a depender do potencial de dispersão e do quanto de CO₂ se encontra no meio pode impactar a própria atmosfera, solo, ar e água podendo levar a danos a pessoas, plantas e animais.

Quanto à etapa de armazenamento, os impactos são os mesmos, mas proveniente de mecanismos de vazamento diferentes que podem afetar não só a atmosfera, quanto a biosfera e aquíferos. Os principais mecanismos de vazamento apresentados na Figura 17 são: falhas no selo, falhas induzidas ou já existentes, poços e formações geológicas.

3.4.1. Poços Injetores

De acordo com Thomas (2004), os poços são perfurados em etapas que dependem das características do ambiente a ser perfurado e da profundidade prevista, sendo que cada uma das fases é concluída com a descida de uma coluna de revestimento e sua cimentação. Após a descida da coluna de revestimento, geralmente o espaço anular entre a tubulação de revestimento e as paredes do poço é preenchido com cimento, de modo a fixar a tubulação e evitar que haja migração de fluidos entre as diversas zonas permeáveis atravessadas pelo poço, por detrás do revestimento. Nesse sentido, a cimentação tem papel fundamental na vedação hidráulica impedindo a migração de fluidos e propiciando suporte mecânico ao revestimento. Os cimentos são produzidos a partir de uma mistura de calcário e argila, basicamente: cal (CaO), sílica (SiO₂), alumina (Al₂O₃) e óxido de ferro (Fe₂O₃), as quais a depender da composição presente no cimento são classificados de acordo às condições de uso (como profundidade e temperatura do poço) conforme Tabela 7

Tabela 7 - Classes de cimentos e as suas respectivas condições de uso.

Classe	Profundidade	Aplicação
A	Até 1.830 m	Utilizado quando não são requeridas propriedades especiais. Corresponde ao cimento Portland comum.
B	Até 1.830 m	Requerido quando é necessário resistência de moderada a alta aos sulfatos.
C	Até 1.830 m	Requerido quando é necessário alta resistência aos sulfatos.
D	1.830 m a 3.050m	Utilizado em condições de temperatura moderadamente elevada e pressão alta. Apresenta alta resistência aos sulfatos.
E	1.830 m a 4.270m	Utilizado em condições de pressão e temperatura elevadas. Apresenta alta resistência aos sulfatos.
F	3.050m a 4.880 m	Utilizado em condições extremas de pressão e temperatura. Apresenta alta resistência aos sulfatos.
G e H	Até 2.440m	Podem ser utilizadas para as condições previstas para os cimentos das classes A até E.
J	3.660 m a 4.880m	Utilizado em condições de pressão e temperatura extremamente elevadas

Fonte: Thomas (2004).

A apresentação das classes de cimento é importante para se ter uma ideia das condições adequadas para a sua utilização, uma vez que a pasta de cimento é suscetível à degradação devido à natureza inerente ao processo de injeção e ao próprio armazenamento. Segundo Costa *et al.* (2009), a presença de CO₂ e a água associada a altas temperaturas e pressões das formações geológicas podem levar a reações químicas e conseqüentemente a degradação da pasta de cimento.

3.4.1.1. Potenciais Caminhos de Vazamento

Poços abandonados e de injeção tem sido identificados como um dos mais prováveis caminhos de vazamento de CO₂ em projetos de armazenamento de CO₂. Experiências com a indústria de petróleo sugerem que vazamento através de poço de injeção é resultante dos principais modos de falhas: completação inapropriada e deterioração no revestimento, excesso de pressão, *packers* ou cimento, válvula de segurança, tampões, dentre outros (IPCC, 2005).

O estabelecimento de padrões consistentes para o projeto do poço é necessário para evitar vazamentos de CO₂ assim como para a regulação do armazenamento, devendo incluir no projeto práticas operacionais, materiais utilizados, número e idade dos poços, potencial de mudanças geofísicas, caminhos de vazamento (NETL, 2006).

Os principais caminhos de migração são apresentados na Figura 18: (a) vazamento entre o cimento de revestimento e lado externo do revestimento; (b) vazamento entre o cimento para vedação do poço e lado interno do revestimento; (c) vazamento através do cimento para vedação poço; (d) vazamento através de fraturas no cimento (e) vazamento devido deterioração do cimento; (f) vazamento entre o cimento do revestimento e a formação rochosa.

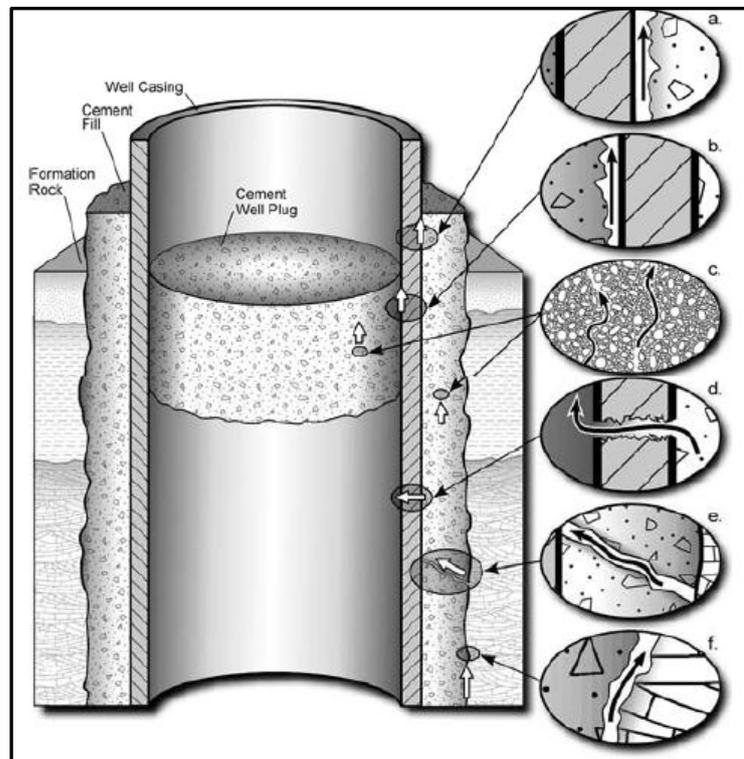


Figura 18 - Possíveis caminhos de vazamento ao longo do poço.
Fonte: IPCC (2005).

3.4.1.2. Medidas de Remediação

Métodos para a reparação de poços ativos e abandonados são usados na indústria de gás, óleo, armazenamento de gás natural e eliminação de resíduos. Estas técnicas são apresentadas por Benson e Hepple (2005) para corrigir vazamentos em projetos de poços de armazenamento de CO₂, tais como:

- a) Reparar vazamentos de poços de injeção com técnicas de recompletação padrão como substituição do tubo de injeção e *packers*;
- b) Reparar vazamentos de poços de injeção por compressão de cimento atrás do revestimento do poço para tamponar vazamentos por trás do revestimento;
- c) Tamponar e abandonar poços de injeção que não podem ser reparados pelos métodos listados acima;
- d) Interromper *blow-outs*⁷ de poços de injeção ou poços abandonados utilizando técnicas padrão como "matar" um poço, tais como: injeção de lama pesada no revestimento do poço. Depois de restabelecido o controle do poço, práticas de recompletação ou abandono, acima descritos, podem ser utilizados. Caso o poço não seja acessível, um poço próximo pode ser perfurado para interceptar o revestimento abaixo da superfície do solo e "matar" o poço por bombeamento de lama por baixo da interceptação do poço.

3.4.2. Formação Geológica

Além de caminhos existentes na região do poço, o CO₂ também pode ser liberado através das formações geológicas. Nesse sentido, a identificação dos cenários com potencial para vazamento é o primeiro passo para avaliar os riscos associados, assim como as opções de remediação e monitoramento.

De acordo com Polson, Curtis e Vivalda (2012) para prevenir a fuga de CO₂ é necessário a existência da rocha selo de baixa permeabilidade. No entanto, caminhos de fuga podem existir através de fraturas, falhas ou poços de injeção, ou ainda devido sobrepressão, resultando em danos ao selo. Oldenburg (2005) ressalta que todos os caminhos de fuga envolvem o potencial de atenuação das barreiras geológicas ou dispersão perto da superfície, uma vez que os efeitos à SSMA dependem da alta concentração em que os seres humanos,

⁷ Uma das principais funções do fluido de perfuração é exercer pressão hidrostática sobre as formações a serem perfuradas pela broca. Quando esta pressão for menor que a pressão dos fluidos confinados nos poros das formações e se a formação for permeável, ocorrerá influxo destes fluidos para o poço. Se este influxo for controlável diz-se que o poço está em *kick*; se incontrolável, diz-se em *blowout* (Thomas, 2004, p. 102)

plantas, animais estarão expostos. Na Figura 19 são apresentados os potenciais caminhos de migração.

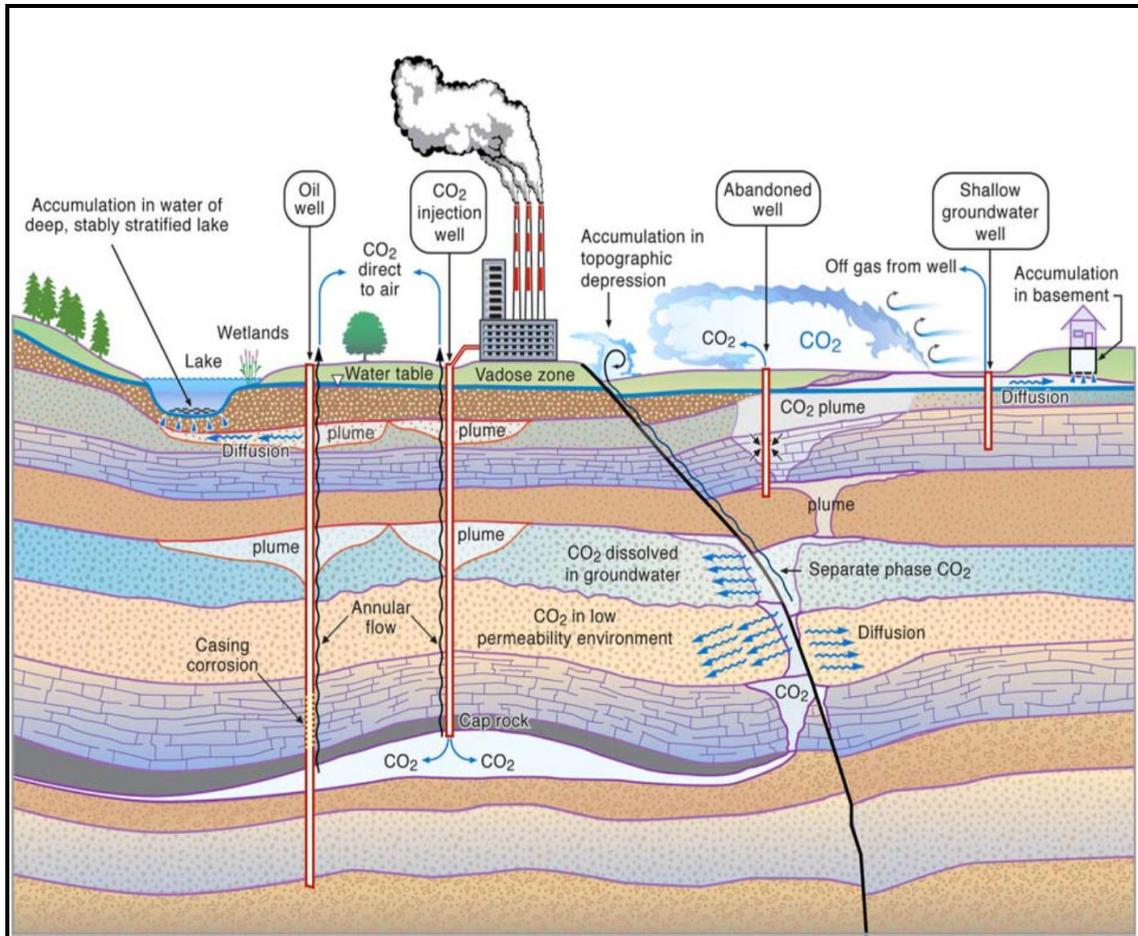


Figura 19 - Potenciais caminhos de vazamento de CO₂ no sistema geológico.

Fonte: Benson e Hepple (2005).

3.4.2.1. Medidas de remediação

Apesar dos locais para armazenamento geológico serem selecionados e operados de modo a evitar vazamentos, há a possibilidade deste tipo de evento ocorrer e, caso isso ocorra, medidas de mitigação serão necessárias, pois a apresentação de medidas e opções de remediação para interromper o vazamento e evitar danos ao meio ambiente e aos seres humanos, pode dar maior garantia ao público da segurança e desempenho do armazenamento.

À medida que o CO₂ se aproxima da superfície terrestre, a sua liberação pode ocorrer de diferentes maneiras. Benson e Hepple (2005) discutem opções de remediação para os diferentes cenários de vazamento do CO₂ até a atmosfera no Quadro 4.

Cenário	Opções de Remediação
Vazamento a partir de reservatório de armazenamento	<ul style="list-style-type: none"> • Reduzir a pressão de injeção, injetando a uma taxa inferior ou através de mais poços; • Reduzir a pressão do reservatório por remoção de água ou outros fluidos a partir da estrutura de armazenamento ou por criação de uma via para acessar novos compartimentos no reservatório de armazenagem; • Interceder o vazamento com poços de extração na área do vazamento; • Interromper a injeção para estabilizar o projeto; • Interromper a injeção, produzir CO₂ a partir do reservatório de armazenamento e o reinjetar de volta em uma estrutura de armazenamento mais adequada.
Vazamento em águas subterrâneas rasas	<ul style="list-style-type: none"> • Acumulações de CO₂ gasoso em águas subterrâneas podem ser removidas ou, pelo menos, imobilizá-lo por perfuração de poços que cruzam as acumulações e extraem o CO₂. O CO₂ extraído pode ser ventilado para a atmosfera ou reinjetado de volta para um local de armazenamento adequado; • CO₂ residual que é preso como uma fase imóvel gás pode ser removido por dissolução em água e extraído como uma fase dissolvido através de poço de extração de água subterrânea; • CO₂ que se dissolveu na água subterrânea superficial pode ser removida, se necessário, por bombeamento para a superfície e gaseificação para remover o CO₂. A água pode então ser usada diretamente ou ser reinjetada de volta; • Se os metais ou outros traços contaminantes foram mobilizados pela acidificação das águas subterrâneas, o método de “bombear e tratar” podem ser usados para removê-los. Alternativamente, barreiras hidráulicas podem ser criadas para imobilizar e reter os contaminantes por injeção apropriada e poços de extração. Além destes métodos ativos, os métodos passivos que dependem de processos naturais biogeoquímicos podem ser utilizados.
Vazamento na vadosa zona e acumulação em gás do solo	<ul style="list-style-type: none"> • CO₂ pode ser extraído a partir da zona vadosa e gás do solo por técnicas padrão de extração de vapor a partir de poços horizontais ou verticais; • Fluxos a partir da zona vadosa para a superfície do solo podem ser reduzidas ou suspensas por capas ou barreiras de vapor de gás. Bombeamento abaixo da capa ou barreira de vapor pode ser usado para esgotar o acúmulo de CO₂ na zona vadosa; • Como o CO₂ é um gás denso, pode ser coletado em trincheiras subterrâneas. Gás acumulado pode ser bombeado a partir das trincheiras e liberado para a atmosfera ou ser reinjetado de volta ao subsolo; • Técnicas passivas de remediação que dependem apenas de difusão e bombeamento barométrico podem ser usadas para esgotar lentamente o vazamento de CO₂ para a zona vadosa. Este método não será efetivo para gerenciar vazamentos contínuos (em curso), porque é relativamente lento; • A acidificação dos solos a partir de contato com o CO₂ pode ser remediado ou corrigido através de irrigação e drenagem e, de suplementos agrícolas como cal para neutralizar o solo.
Grandes vazamentos de CO ₂ para a atmosfera	<ul style="list-style-type: none"> • Em vazamento para dentro de construções ou espaço confinado, grandes ventiladores podem ser utilizados para diluir rapidamente o CO₂ a níveis seguros; • Para grandes vazamentos espalhados em uma grande área, a diluição a partir da mistura atmosférica natural (vento) será o único método prático para diluir o CO₂; • Para vazamento contínuo (em curso) em áreas estabelecidas, os riscos de exposição a altas concentrações de CO₂ em espaços confinados (por exemplo, em torno da cabeça de poço) ou durante períodos de vento muito baixo, os ventiladores podem ser usados para manter a taxa de circulação de ar suficientemente elevada para assegurar a diluição adequada.
Acúmulo de CO ₂ dentro de ambientes com vazamento crônico de baixo nível	<ul style="list-style-type: none"> • Vazamento lento pode ser eliminado usando técnicas desenvolvidas para controlar vazamento de compostos orgânicos em construções. Os dois principais métodos para gerenciar o vazamento neste ambiente são ventilação de fundamento/infra-estrutura ou pressurização. Ambos, teria o efeito de diluição do CO₂ antes de entrar no ambiente interno.
Acúmulo em águas de superfície	<ul style="list-style-type: none"> • Corpos de águas superficiais rasas que tem volume significativo (lagos rasos) ou turbulência (fluxos) liberará CO₂ dissolvido rapidamente para a atmosfera; • Para águas profundas, lagos estratificado estavelmente, sistemas ativos para ventilar acúmulos de gás foram desenvolvidos e aplicados ao Lago Nyos e Monoun em Camarões.

Quadro 4 - Opções de remediação para vazamento a partir da formação de armazenamento.

Fonte: Adaptado de Benson e Hepple (2005).

4. ANÁLISE E GERENCIAMENTO DE RISCO EM PROJETOS DE CGS

A perda de contenção do armazenamento geológico de CO₂ é um processo que tem potencial de causar danos ao meio ambiente, à saúde humana, à imagem do empreendimento, à própria instalação e levar a danos financeiros. Portanto, é um processo passível de avaliação de riscos, na qual devem ser identificadas as possibilidades acidentais de CO₂.

Kaplan e Garrick (1981) discutem três alternativas para a definição do risco, as quais são: combinação de incertezas e dano; razão de perigo e salvaguarda e combinação de probabilidade e consequência. Dentre estas, a última é mais utilizada para estimativa do risco, sendo a probabilidade ou frequência de ocorrência, o potencial ou a chance que tem o evento de ocorrer e a consequência, a magnitude de seu impacto. Neste capítulo serão apresentados: as ocorrências de vazamento e como os impactos, análise e gerenciamento de risco, assim como as metodologias existentes para análise de risco de projetos de CGS.

4.1. OCORRÊNCIA DE VAZAMENTO DE CO₂ E MAGNITUDE DO SEU IMPACTO

Nesta seção são apresentadas as ocorrências de vazamento de CO₂, assim como a sua probabilidade ou frequência de ocorrência e a magnitude das consequências.

4.1.1. Ocorrência de Vazamento de CO₂

Segundo a CSLF (2009), os componentes a serem avaliados para o risco de contenção (chamado também de risco de vazamento) incluem: zonas permeáveis no selo, vazamento a partir de falhas e através do selo, vazamento a partir de poços (exploração, produção e injeção), sobrepressão regional e local, capacidade insuficiente, fraturas induzidas, detecção de migração (predição incorreta de direção da migração), compressor, tubulação e falha da cabeça de poço.

Segundo Stenhouse, Gale e Zhou (2009), os análogos naturais e industriais podem ser usados para construir a confiança quanto à segurança e eficácia do armazenamento, em particular entre os agentes reguladores, *stakeholders* e o público em geral. Assim, durante a última década, estudos envolvendo análogos naturais e industriais tem sido feito, fornecendo informações úteis para o armazenamento geológico de CO₂.

Estudo realizado pelo IEAGHG (2009) apresenta alguns vazamentos naturais de CO₂: campo vulcânico Yellowstone (EUA) com aproximadamente 16 Mt/ano; vazamento no campo de óleo Rangely (Colorado, EUA) em torno de 170 a 3.800 t/ano a partir de reações de CO₂ com o sistema água-rocha; campo Florina (Grécia) com 0,02 a 0,03 Mt/ano; complexo vulcânico Dieng (Inonésia) estimado em torno de 0,2 Mt e Lagos Monoun e Nyos (Camarões) com aproximadamente 0,05 Mt e 1,24 Mt, respectivamente. O vazamento de CO₂ a partir de complexos vulcânicos e dos lagos situados em região vulcânica resultou na morte de mais de 1.500 pessoas.

A partir de lições aprendidas em estudos de análogos naturais e industriais, Benson (2005b) defende que o CO₂ pode ser armazenado seguramente desde que o local seja cuidadosamente selecionado e monitorado e baseando-se na experiência com armazenamento de gás natural e injeção de resíduos perigosos, os principais riscos a partir do armazenamento de CO₂ são devido a: vazamentos através de completação de poços de injeção de qualidade pobre e antigos, vazamentos através de poços abandonados e caracterização inadequada da rocha selo assim como monitoramento de poços de injeção inconsistente e inadequado.

Com base em estudos de análogos naturais, que sugerem o armazenamento geológico de CO₂ como eficaz para conter o CO₂, a probabilidade de uma fuga através da rocha e falhas, geralmente, é adotado como menor quando comparado com poços, desde a escolha do local até a completa caracterização. Assim, o poço tem sido um fator importante associado ao risco de vazamento a partir da formação, dentre as preocupações estão: corrosão de revestimentos, tampões e cimentos presentes na conclusão e abandono do poço, bem como completação inicial potencialmente pobre (CSLF, 2009).

Embora o objetivo da armazenagem geológica de CO₂ seja mantê-lo no subsolo permanentemente, taxas aceitáveis de vazamento têm sido expressas como uma percentagem do volume total injetado e tipicamente pode variar de 0,01% por ano (1% em mais de 100 anos) a 0,001% por ano (1% em mais de 1000 anos) (STENHOUSE, GALE, ZHOU; 2009).

Segundo o IPCC (2005), desde que o local para armazenamento de CO₂ seja bem selecionado, projetado, operado e apropriadamente monitorado, de acordo com observações de engenharia e análogos naturais: é muito provável⁸ que 99% do CO₂ permaneça retido por 100 anos e provável⁹ que 99% fique retido por mais que 1.000 anos. As observações de engenharia e análogos naturais são considerados como sistemas representativos para comparar com o armazenamento, os quais são apresentados na Tabela 8.

⁸ De acordo com o IPCC (2005) “muito provável” é classificado como uma probabilidade entre 90 e 99% e

⁹ “provável” é uma probabilidade de 66 a 90%.

Tabela 8 - Taxas de vazamento de CO₂.

Sistema	Taxa de vazamento	Características
Formação natural	$< 10^{-7}$ /ano	CO ₂ armazenado em bacias sedimentares. Em região com sistemas vulcânicos altamente fraturados, a taxa de vazamento pode ser de magnitude mais rápida.
Gás e óleo	$< 10^{-7}$ /ano	Presença de selos que são capazes de aprisionar gases e óleos.
Armazenamento de Gás Natural	10^{-4} a $< 10^{-6}$ /ano	Experiência em mais de 10 mil instalações demonstra que sistemas operacionais de engenharia de armazenamento pode conter metano.
EOR	~ 0	Mais de 100 MtCO ₂ tem sido injetado para EOR.
Modelo	$< 10^{-6}$ /ano	Modelos numéricos mostram que vazamento de CO ₂ por subsolo através de meios geológicos não deformados (excluindo poços) pode ser próximo de zero: estudos para o campo de Sleipner sugeriram, que mesmo depois de milhões de anos, a taxa de vazamento seria cerca de 10^{-6} /ano.
	10^{-5} a $< 10^{-7}$ /ano	Modelo de fluxo através de poços: evidências de um pequeno número de estudos de avaliação de risco de modelos de poços de óleo com muitos poços abandonados, como Weyburn.
	$< 10^{-2}$ /ano	Modelo de fluxo através de poços: simulações com sistemas idealizados com poços “abertos” mostram que as taxas de liberação podem ser superiores a 10^{-2} /ano, embora na prática tais poços, presumivelmente, são fechados assim que o CO ₂ foi detectado.

Fonte: Adaptado de IPCC (2005).

O conhecimento da frequência de ocorrência é um fator importante para a estimativa de risco dos cenários de vazamento de CO₂. Para avaliação de risco, a DNV (2011) no guia para gerenciamento de risco de poços existentes em locais de armazenamento de CO₂, com base em dados históricos do setor de petróleo e gás (ISO 17776 - *Petroleum and natural gas industries – Offshore production installations – Guidelines on tools and techniques for hazard identification and risk assessment*) classifica qualitativamente a frequência em quatro categorias, sendo eles: tem ocorrido na indústria; tem ocorrido em empresa operadora; ocorreram várias vezes por ano na empresa operadora e ocorreram várias vezes por ano no local.

Tetrattech (2009) apresenta estimativas da frequência para falhas de poços de gás natural a partir de três fontes diferentes: 1) estimado a partir dos maiores acidentes no mundo desde 1970: $2,02 \times 10^{-5}$ incidentes/poço-ano para poços de armazenamento de gás natural; 2) Estimado a partir de dados europeus $5,1 \times 10^{-5}$ acidentes/poço-ano para poços de armazenamento de gás natural; 3) Estimado a partir de dados da Holanda: $5,0 \times 10^{-5}$ *blow-out* a

partir de poços de produção de gás e óleo/poço-ano. Embora, cada fonte tenha suas especificidades, dados a partir da avaliação das taxas de falha de projetos já existentes são referências válidas na determinação da ordem de grandeza dos eventos a serem estudados.

Com base em informações de especialistas, Vendrig *et al.* (2003) fazem um estudo sobre a estimativa quantitativa da frequência de vazamento e probabilidade de falha a partir de estruturas geológicas para armazenamento de CO₂. A principal conclusão da análise junto com maior parte dos especialistas foi que era impossível fazer estimativas confiáveis de risco quantitativo, e isso se deve à falta de estudos detalhados de pesquisa e de campo e à dificuldade de atribuir riscos genéricos para o que na realidade seria extremamente específico do local para armazenamento. Por sua vez, eles consideram que as estimativas são úteis desde que sejam levadas em consideração as incertezas. Assim, de acordo com os especialistas que apoiam esta abordagem e a partir de conhecimento prévio de reservatório de óleo e gás e aquíferos salinos *offshore*, minas de carvão *onshore* assim como análise de risco eles apresentaram na Figura 20 o perfil da frequência anual de vazamento através do reservatório.

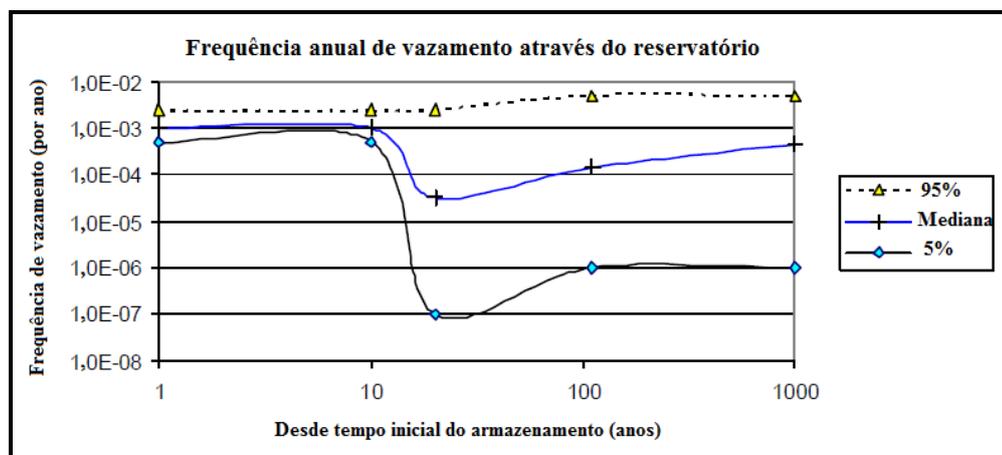


Figura 20 - Frequência anual de vazamento através do reservatório de CO₂.

Fonte: Vendrig *et al.* (2003). Nota: Traduzido pela autora.

O período de tempo considerado por Vendrig *et al.* (2003) até a selagem do reservatório é de 10 anos e o intervalo de confiança está entre 5% e 95% da distribuição de probabilidade e a mediana equivale a 50%. Ressalta-se que na análise de risco *offshore*, a taxa de vazamento inicial é normalmente considerada como sendo 5 (cinco) vezes maior que a taxa de produção e uma taxa inicial de vazamento considerada como significativa equivale a uma taxa média de 10 t/d (0,1 kg/s) de CO₂.

Assim, de acordo com Vendrig *et al.* (2003), a frequência de ocorrência para cada reservatório é esperado ser em torno de 10⁻³/ano, semelhante ao de reservatórios de

hidrocarbonetos durante a produção. Depois que o reservatório é selado, a incerteza sobre a frequência de vazamento é maior, pois os processos de degradação do poço bem como o comportamento dos reservatórios em grande escala de tempo são muito difíceis de serem previstos. A partir da estimativa de frequência anual, a probabilidade cumulativa do vazamento durante o período de 1000 anos é apresentada na Figura 21, sendo 0,34 o valor da probabilidade mediana com intervalo de confiança entre 0,6% e 99%.

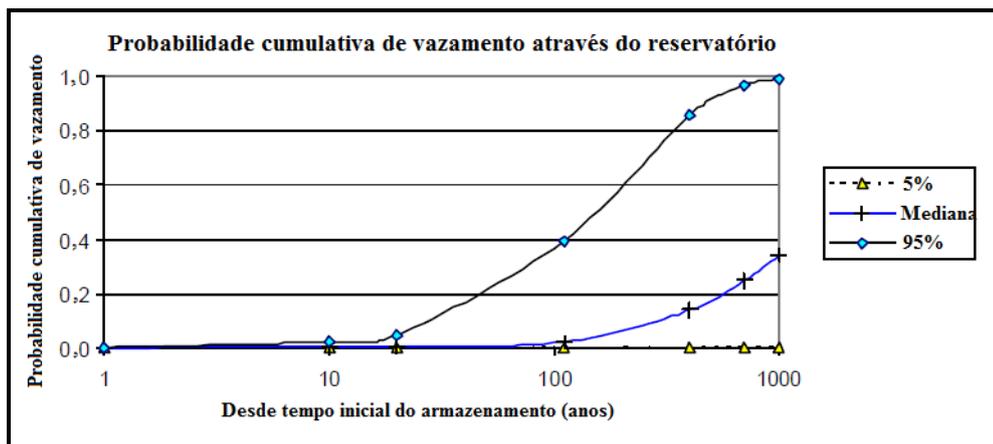


Figura 21 - Probabilidade cumulativa de vazamento através do reservatório de CO₂.

Fonte: Vendrig *et al.* (2003). Nota: Traduzido pela autora.

A probabilidade para a taxa inicial de vazamento é apresentada na Figura 22.

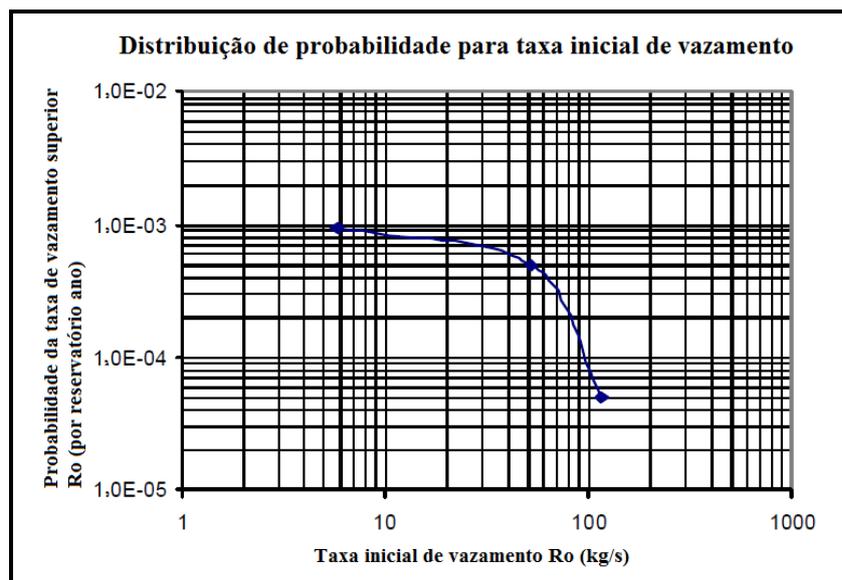


Figura 22 - Distribuição de Probabilidade para taxa inicial de vazamento de CO₂.

Fonte: Vendrig *et al.* (2003). Nota: Traduzido pela autora.

A distribuição de probabilidade para a taxa inicial de vazamento apresentada na Figura 22 foi estimada por Vendrig *et al.* (2003) tomando como base a frequência de vazamento

como sendo 10^{-3} reservatório ano e assumindo uma média de 4.500 t/d (representando uma mediana de 90% a partir de uma faixa de 500 a 10.000 t/d) como única entrada sobre a taxa inicial de vazamento. Ressalta-se que devido à dificuldade na obtenção de valores para este parâmetro, foi considerado inviável quantificar a incerteza associada. No entanto, a incerteza na frequência de qualquer dada taxa de vazamento não será menor do que a apresentada na Figura 20 para a frequência de vazamento considerada como base. A probabilidade da taxa de vazamento superior à quantidade liberada (por vazamento) é apresentada na Figura 23.

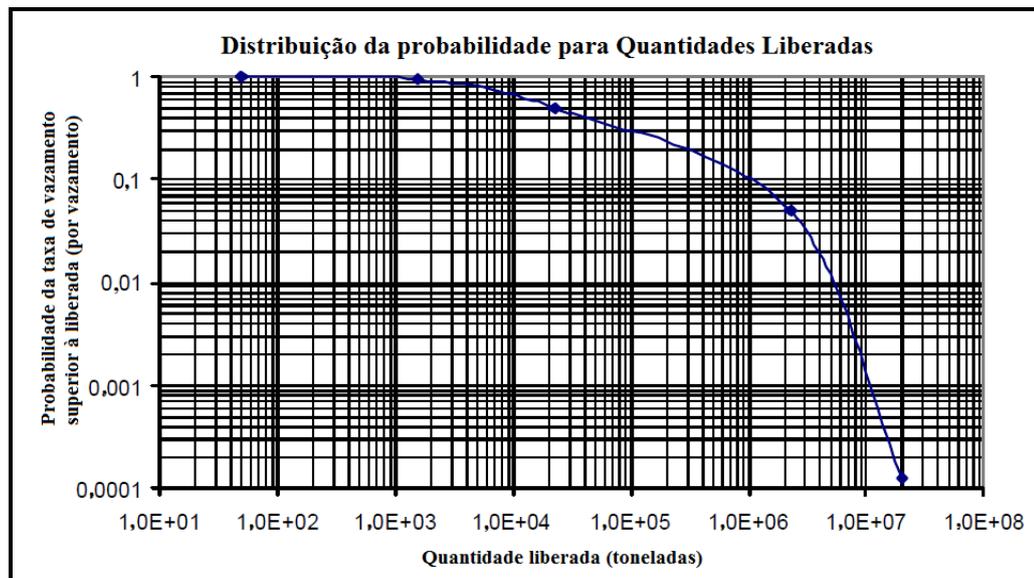


Figura 23 - Distribuição de Probabilidade para Quantidades liberadas de CO₂.
 Fonte: Vendrig *et al.* (2003). Nota: Traduzido pela autora.

A partir das estimativas de frequência e probabilidade apresentadas nas Figuras 20, 21, 22 e 23, embora não conclusivos devido à falta de históricos dessa natureza, observa-se que há chance do CO₂ ser liberado e, por isso atenção deve ser dada tanto à frequência de ocorrência quanto a incerteza nas avaliações de risco para armazenamento de CO₂.

Para avaliação do desempenho da injeção de CO₂ a longo prazo, em Buracica na Bacia do Recôncavo, Estublier *et al.* (2011) classifica qualitativamente a probabilidade em quatro escalas, sendo elas: > 0,9 como “muito provável”; 0,1 a 0,9 como “provável”; 10^{-4} a 0,1 como “improvável” e $< 10^{-4}$ como “muito improvável”. Hnottavange-Telleen, Krapac e Vivalda (2009) propõem cinco escalas para a probabilidade no estudo de avaliação de risco na Bacia de Illinois. A probabilidade proposta se baseia na relação com projetos similares, no caso, eles se utilizam da proposição se houver 100 projetos como Decatur, o impacto relacionado à FEP (*Features, Events and Processes*) poderá ser: muito improvável, improvável, possível, provável e muito provável. Utilizando-se da abordagem FEP, a DNV (2010) apresenta

exemplos de probabilidade para características e processos (FP) e frequência para eventos disponibilizada na Tabela 9.

Tabela 9 - Exemplos de classificação qualitativa de frequência para os eventos e probabilidade para as características e processos.

Nº	1	2	3	4	5
Nome	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
Descrição	Improável, desprezível	Remotamente provável, pouco provável	Ocasional, possível	Provável, muito provável	Frequente, esperado
Evento	Pouco provável de ocorrer nos próximos 5.000 anos	Pouco provável de ocorrer durante as operações de injeção	Pode ocorrer durante as operações de injeção	Pode ocorrer várias vezes durante as operações de injeção	Ocorrerá diversas vezes durante as operações de injeção
Frequência	≤ 1/10.000 anos	1/1.000 anos	1/100 anos	1/10 anos	1/ano
Característica (F), Processos (P)	Desconsiderada	Não esperado	Chance de 50/50	Esperado	Com certeza
Probabilidade	≤ 1%	≤ 10%	≤ 50%	≤ 90%	≤ 99%

Fonte: DNV (2010). Nota: Traduzido pela autora.

4.1.2. Magnitude do Impacto de Vazamento de CO₂

Tipicamente, a avaliação do risco considera assim como a probabilidade do evento ocorrer, também o impacto potencial (ou consequência) deste evento. De acordo com a DNV (2011), o risco pode ser expresso como uma combinação da probabilidade e consequência e para avaliação de riscos, os mesmos podem ser agrupados em categorias de acordo com a natureza de suas consequências, ou seja, categorias de severidades tais como apresentados no Quadro 5: risco para pessoas, risco ao ambiente, risco a ativos e a reputação, os quais também são descritos na norma ISO 17776.

Classe	Categoria de Consequência			
	Pessoas	Ativos	Meio Ambiente	Reputação
0	Nenhuma lesão	Nenhum dano	Nenhum efeito	Nenhum impacto
1	Lesão leve	Dano leve	Efeito leve	Impacto leve
2	Ligeira lesão	Ligeiro dano	Ligeiro efeito	Impacto limitado
3	Lesão grave	Dano local	Efeito local	Impacto considerável
4	Fatalidade única	Dano grave	Efeito grave	Impacto nacional grave
5	Fatalidades múltiplas	Dano extensivo	Efeito massivo	Impacto internacional maior

Quadro 5 - Categorias de consequência.

Fonte: DNV (2011). Nota: Traduzido pela autora.

Estublier *et al.* (2011) apresentam o potencial do impacto em escala qualitativa a partir da relação entre a vazão mássica de vazamento em 100 anos pela vazão mássica armazenada,

sendo elas: 0% classificado como “sem impacto”, <1-10% classificado como “insignificante”, <20% como “marginal” e > 20% como “significante”. Hnottavange-Telleen, Krapac e Vivalda (2009), por sua vez, apresenta cinco escalas (leve, sério, maior, catastrófico, multicatastrófico) de severidade e os classifica de acordo com o impacto a: saúde e segurança, financeiro, meio ambiente, pesquisa e viabilidade econômica.

As consequências de cada categoria de impacto devem ser definidas individualmente para cada projeto, consultando especialistas e utilizando-se de experiências anteriores, as classes de consequências adotadas devem refletir as expectativas de desvios da funcionalidade. No guia para seleção e qualificação de locais e projetos para armazenamento geológico de CO₂, a DNV (2009, 2010) apresenta exemplos para classificar qualitativamente as consequências de acordo com os impactos como apresentado no Quadro 6.

Definição de Consequência para rápida classificação de risco					
Nº	1	2	3	4	5
Nome	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
Impacto na injetividade	Pequena redução temporária. Sem interrupção da injeção.	Pequena redução. Menor interrupção da injeção (horas).	Redução temporária significativa. Interrupção da injeção por dias.	Redução permanente significativa. Necessidade de novo sistema de injeção.	Redução permanente significativa. Sem correção disponível.
Impacto na capacidade	Chance pequena de capacidade reduzida no futuro.	Ligeira redução na capacidade, impacto na viabilidade do projeto.	Redução significativa na capacidade, solução sem novos poços.	Redução significativa na capacidade, solução com novos poços.	Redução significativa na capacidade, sem correção disponível.
Impacto na integridade do armazenamento	Nenhum.	Migração inesperada de CO ₂ dentro do sistema de armazenamento.	Migração inesperada de CO ₂ para fora do sistema de armazenamento.	Vazamento para a zona vadosa sobre pequena área (<100 m ²).	Vazamento para a zona vadosa sobre grande área (>100 m ²).
Impacto no ambiente local	Ligeiro dano ambiental.	Dano ambiental local de curta duração.	Tempo para restituição de recurso ecológico < 2 anos.	Tempo para restituição de recurso ecológico de 2-5 anos.	Tempo para restituição de recurso ecológico tal como sistema biológico marinho, água subterrânea > 5 anos.
Impacto na reputação	Leve impacto ou sem impacto.	Impacto Limitado.	Impacto Considerável.	Impacto Nacional.	Impacto Internacional.
Consequência em permitir operar	Nenhum.	Pequena multa.	Grande multa.	Suspensão temporária de autorização.	Perda permanente de permissão.

Quadro 6 - Exemplos de consequência para rápida classificação de risco.

Fonte: DNV (2010). Nota: Traduzido pela autora.

Um dos principais desafios para análises de risco de projetos de CGS é a presença de incertezas para as frequências de falha e para as consequências devido à falta de conhecimento prévio e de experiência. Estas incertezas devem ser registradas durante a fase de identificação dos perigos, a fim de possibilitar o início das atividades de avaliação que deverão ser posteriormente melhoradas. Além disso, uma abordagem conservadora deve ser tomada, até que mais dados e conhecimento do projeto estejam disponíveis. Dessa forma a incerteza, para as frequências de falha e para as consequências não deve ser subestimada (DNV, 2009).

4.2. ANÁLISE E GERENCIAMENTO DE RISCO

A identificação e análise de risco é essencial e necessária para identificar as ameaças potenciais e as vulnerabilidades que possam comprometer o desempenho do sistema sendo esta, possível de ser realizada de forma qualitativa, semi-quantitativa ou quantitativa (Figura 24).

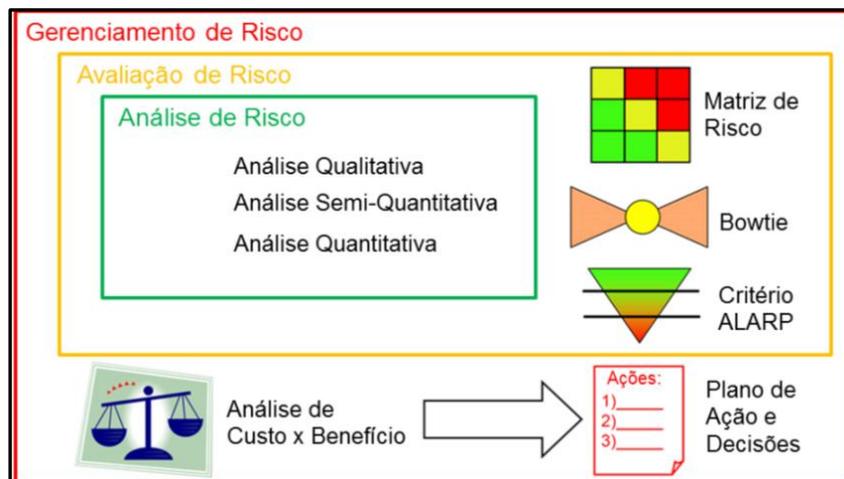


Figura 24 - Diagrama esquemático mostrando a relação entre análise, avaliação e gerenciamento de risco.

Fonte: DNV (2009). Nota: Traduzido pela autora.

Quando a estimativa do risco é feita com base em cálculos e métodos matemáticos a análise é tida como quantitativa, já quando a análise baseia-se em informações e experiência dos integrantes da equipe executora, a análise é qualitativa. A análise qualitativa de risco, geralmente é realizada nos primeiros estágios do projeto de CGS, já a análise quantitativa, necessita de informações mais detalhadas do sistema, geralmente é aplicada após a análise qualitativa quando já se conhece e compreende melhor os cenários mais críticos.

A análise qualitativa do risco realizada nos para auxiliar na triagem e seleção do local, nos aspectos de comunicação do projeto ao público e auxiliar os agentes reguladores na autorização de projetos. O principal objetivo desta análise é interpretar e registrar o cenário de risco inicial baseado nos dados disponíveis até o momento atual da análise. Para a caracterização e modelagem detalhada, mais esforços são necessários para estimar a probabilidade de risco à saúde humana e ao meio ambiente, etapa em que pode ser realizada uma análise quantitativa (NETL, 2011).

De acordo com a Figura 24 e com as definições da Norma ISO 31000 (2009). A análise de risco é o processo de compreender a natureza do risco e determinar seu nível através da identificação dos riscos que envolvem a identificação das fontes, eventos, causas e consequências. A análise de risco fornece a base para a avaliação de risco e para as decisões sobre os seus tratamentos. A avaliação de risco, por sua vez, é o processo de comparar os resultados da análise de riscos com os critérios de risco para determinar se o mesmo é aceitável, tolerável ou não.

O resultado da avaliação de risco em conjunto com os aspectos sociais, políticos e técnico-econômicos serão utilizados para priorizar, monitorar, controlar e mitigar os riscos na etapa de gerenciamento de risco. É importante ressaltar que há incertezas envolvidas neste processo e que estas também devem ser levadas em consideração durante as análises e também no próprio gerenciamento de risco. Deste modo, controlar os riscos não é simplesmente avaliar os riscos existentes, mas também gerenciá-los, considerando ações que os mantenham dentro dos padrões de segurança considerados toleráveis ou aceitáveis, e ainda gerenciar as informações: políticas, sociais, técnicas, econômicas e financeiras da relação entre o projeto de CGS e a as expectativas das partes interessadas (NETL, 2011).

4.2.1. Risco e Incerteza

O armazenamento geológico faz parte de um sistema natural, heterogêneo e complexo e a sua análise de risco não é uma tarefa simples e fácil, Morgado e Esteves (2010) o classifica como risco híbrido, uma combinação de riscos tecnológicos e naturais, característica inclusive que acaba dificultando um gerenciamento de risco clássico baseado em procedimentos administrativos e controles operacionais, como é o caso de planta industrial de processo.

Para Vendrig *et al.* (2003), estimar os riscos geológicos é um desafio pois não há experiência com vazamento relevantes. Condor *et al.* (2011) definem o armazenamento

geológico de carbono como um sistema em que maior parte de seus componentes não são bem conhecidos, ou seja, há incertezas associadas ao sistema. Por esse motivo, devido à falta de dados específicos, a aplicação ou adaptação de metodologias de avaliação quantitativa de risco industrial não é conveniente, sendo as metodologias qualitativas mais confiáveis para os projetos atuais.

De acordo com a Figura 25, durante as fases do ciclo de vida de um projeto de CGS, o perfil do risco muda ao longo do tempo em função das operações de injeção de CO₂, aumentando durante a fase de operação e declinando após o encerramento dos poços de injeção. Na fase pós-encerramento, a pressão na formação diminui, pois o CO₂ é confinado por mecanismos como o de dissolução em salmoura ou a precipitação de carbonatos ou armadilha estratigráfica (TETRATECH, 2009).

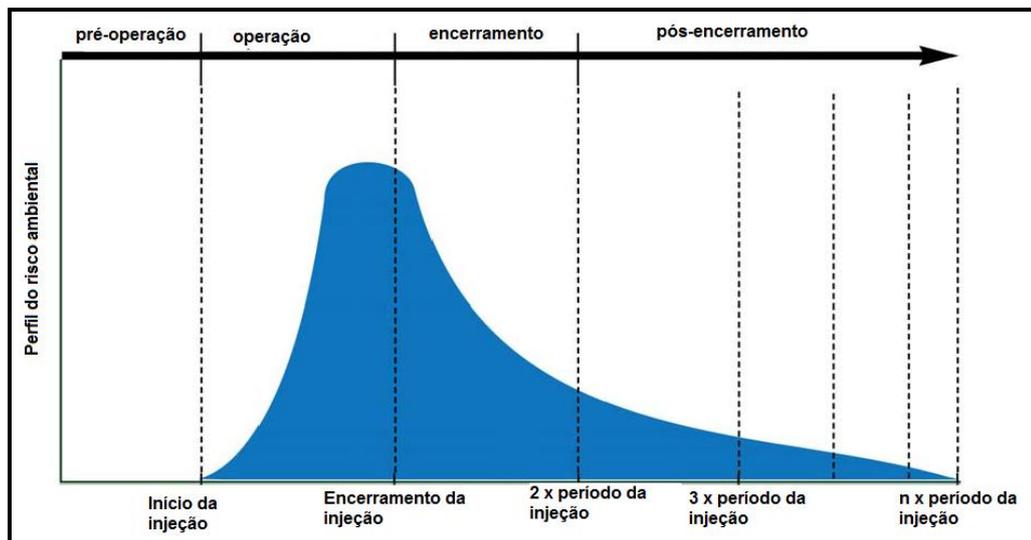


Figura 25 - Risco potencial durante as fases de projetos de CGS.

Fonte: Tetrattech (apud Benson, 2007). Nota: Traduzido pela autora.

A heterogeneidade dos sistemas naturais e a incapacidade de caracterizá-los (ou defini-los) completamente estão entre os muitos fatores que contribuem para a incerteza, mesmo para locais bem caracterizados. Assim, a incertezas tem sido um dos fatores chave na avaliação de risco para a engenharia de sistemas geológicos (CSLF, 2009).

Segundo Korre *et al.* (2009) as incertezas na avaliação de risco para armazenamento de CO₂ incluem: incerteza de medição; incerteza dos parâmetros do modelo, incerteza de modelagem e incerteza do cenário de risco. Muitas das incertezas, por exemplo, estão relacionadas com informações dos processos geomecânicos, geoquímicos, mudanças hidrológicas ou hidrogeológicas, presença de falhas ou fraturas, dentre outros que podem afetar o poço ou reservatório levando à fuga de CO₂.

De acordo com a Figura 26 apresentada pela DNV (2009), as incertezas vão diminuindo ao longo do ciclo de vida dos projetos de CGS e a estimativa do tempo de vida do projeto se torna mais precisa a cada etapa, verifica-se que o nível de aceitação da incerteza durante a triagem e seleção do local é maior que na fase de encerramento do armazenamento.

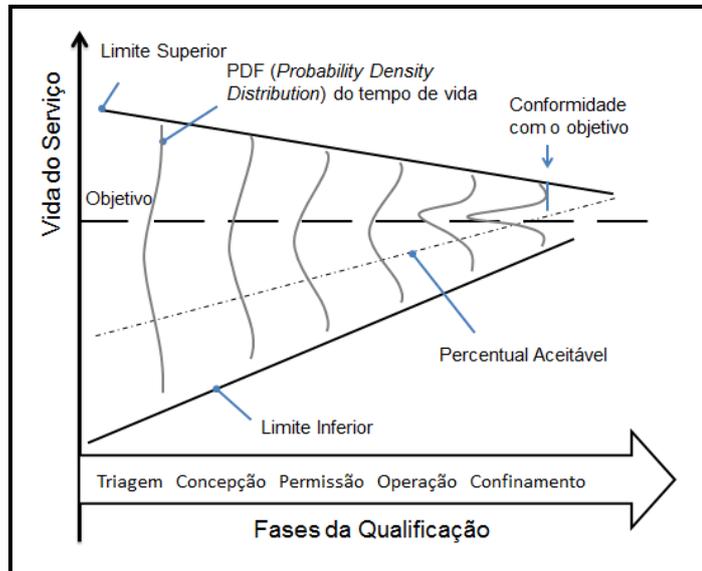


Figura 26 - Redução sistemática da incerteza durante as fases de vida do projeto.

Fonte: DNV (2009). Nora: Traduzido pela autora.

A presença de incertezas pode comprometer a leitura do verdadeiro risco existente no processo tornando a estimativa do risco maior que a real o que pode até mesmo inviabilizar a implantação do projeto, como pode ser observada também na Figura 27.

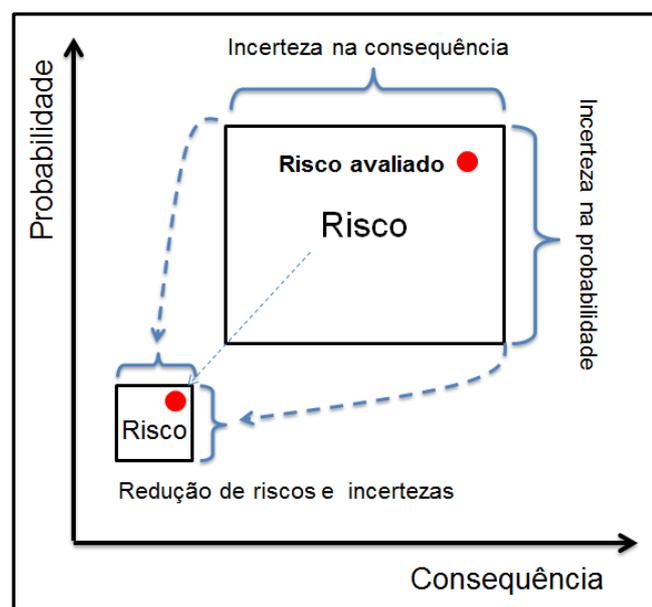


Figura 27 - Influência da incerteza na estimativa do risco.

Fonte: DNV (2009). Nota: Traduzido pela autora.

Para Polson, Curtis e Vivalda (2012), a incerteza e a falta de informação tendem a ser o fator mais influente para a estimativa de risco alto. Em 2005, Benson (2005b) levanta algumas lacunas entre a necessidade futura para avaliação de risco e o conhecimento atual e dentre as recomendações está o desenvolvimento de uma estratégia para avaliação de risco à SSMA, incluindo tratamento de incerteza para o armazenamento de carbono.

4.2.2. Matriz de Risco

A matriz de risco pode ser obtida a partir da combinação entre frequência (ou probabilidade) e consequência (ou severidade ou impacto) e é o instrumento que permite priorizar qualitativamente os riscos. As regras para classificação de risco devem ser definidas na etapa planejamento e podem ser provenientes de normas, leis, políticas e objetivos organizacionais.

A partir da definição do impacto potencial e probabilidade para avaliação do desempenho da injeção de CO₂ em Buracica, Estublier *et al.* (2011) apresentam a matriz de risco baseado na combinação das informações probabilidade e potencial impacto. Conforme apresentado no Quadro 7, o risco pode ser classificado em quatro escalas: alto, médio, baixo e muito baixo. De acordo com a análise realizada para o sistema, o risco ao poço e a falhas é classificado como “baixo” e “muito baixo” para rocha selo. As escalas adotadas para a probabilidade e o impacto potencial são descritas nas seções 4.1.1 e 4.1.2, respectivamente.

Impacto Potencial	Probabilidade			
	Muito provável	Provável	Improvável	Muito improvável
Significante	Risco alto	Risco alto	Risco médio	Risco médio
Marginal	Risco médio	Risco médio	Risco baixo	Falha
Insignificante	Poço	Risco baixo	Risco baixo	Risco muito baixo
Sem impacto	Rocha selo	Risco muito baixo	Risco muito baixo	Risco muito baixo

	Risco alto
	Risco médio
	Risco baixo
	Risco muito baixo

Quadro 7 - Matriz de risco para avaliação do desempenho da injeção de CO₂ em Buracica.

Fonte: Estublier *et al.* (2011). Nota: Traduzido pela autora.

A abordagem realizada por Hnottavange-Telleen, Krapac e Vivalda (2009), no estudo de avaliação de risco e estratégias para avaliação do desempenho na Bacia de Illinois, é feita pela caracterização das FEP de acordo com a sua probabilidade e severidade. Conforme Quadro 8, a matriz de risco proposta apresenta cinco escalas para as categorias de risco a partir das escalas adotadas para a probabilidade e a severidade, as quais são descritas nas seções 4.1.1 e 4.1.2, respectivamente.

Medidas de Controle		Muito improvável	Improvável	Possível	Provável	Muito Provável
		1	2	3	4	5
		Prevenção ← Probabilidade				
Leve	-1	-1	-2	-3	-4	-5
Sério	-2	-2	-4	-6	-8	-10
Grave	-3	-3	-6	-9	-12	-15
Catastrófico	-4	-4	-8	-12	-16	-20
Multi-catastrófico	-5	-5	-10	-15	-20	-25

Quadro 8 - Matriz de risco para avaliação de risco na Bacia de Illinois.

Fonte: Hnottavange-Telleen, Krapac e Vivalda (2009). Nota: Traduzido pela autora.

4.2.3. Monitoramento de CO₂

O monitoramento tem um papel importante no gerenciamento de risco, pois ao se unir efetivamente com a avaliação de risco, o monitoramento pode reduzir as incertezas nas previsões, pode verificar o desempenho previsto do local e pode permitir a identificação prévia de problemas que necessitam ser mitigados. Os dados são utilizados para ajustar os modelos preditivos que sustentam a avaliação de risco e validá-los, além de permitir uma melhoria contínua do modelo geológico para o local, a avaliação de risco e o plano de monitoramento. Por isso, o programa de monitoramento deve ser elaborado desde a fase inicial do projeto, uma vez que a avaliação inicial dos riscos foi realizada e para que seja eficaz, deve-se levar em conta as potenciais vias de fugas, magnitude da fuga (taxas de fluxo), potenciais receptores e parâmetros críticos que afetam as fugas, tal como definido pela avaliação de risco (CSLF, 2009).

De acordo com NETL (2009), o monitoramento das atividades de projetos de CGS deve ser adaptado às condições específicas e os riscos no local de armazenamento de modo a acompanhar as fases: pré-operação, operação, encerramento e pós-encerramento conforme Quadro 9.

Técnicas	Fases do Projeto de Armazenamento		
	Pré-operação	Operação	Encerramento
Perfil do poço	X	X	-
Pressão da cabeça de poço	X	X	X
Pressão da Formação	X	-	-
Levantamento sísmico	X	X	X
Levantamento gravimétrico	X	X	X
Levantamento eletromagnético	X	X	X
Monitoramento Atmosférico de CO ₂	X	X	-
Monitoramento de fluxo de CO ₂	X	X	X
Pressão e qualidade da água sobre a formação de armazenamento	X	X	X
Taxa de injeção e produção	X	X	-
Microsismicidade	-	X	-

Quadro 9 - Programa de monitoramento para as fases do projeto de armazenamento.

Fonte: Adaptado de NETL (2009).

Algumas técnicas de monitoramento requerem comparação com fases anteriores do projeto e o conhecimento das características geomorfológicas do local de armazenamento é essencial para se estabelecer uma linha base para posteriores análises comparativas. Técnicas como medição do fluxo de CO₂, identificação da saturação de fluidos, monitoramento geoquímicos do local requerem uma base de dados anterior para serem monitorados (IPCC, 2005).

Os principais pontos em que o monitoramento pode ser necessário são apresentados na Figura 28. Algumas das técnicas de monitoramento são detalhadas no Quadro 10. Segundo Pearce *et al.* (2006), o programa de monitoramento requer a aquisição e determinação das condições e parâmetros de operação antes do início da injeção do CO₂. Estas condições serão utilizadas como referência para comparações posteriores o que possibilitará acompanhar a evolução do desempenho do local de armazenamento, ressaltando-se que alguns parâmetros específicos podem necessitar uma segunda etapa de aquisição e determinação. Durante o monitoramento do local de armazenamento, nem todos os parâmetros necessitam ser comparados ao longo da vida útil do projeto, entretanto em muitos casos, durante o encerramento muitos das condições e parâmetros são verificados para assegurar um correto descomissionamento livre de impactos ambientais.

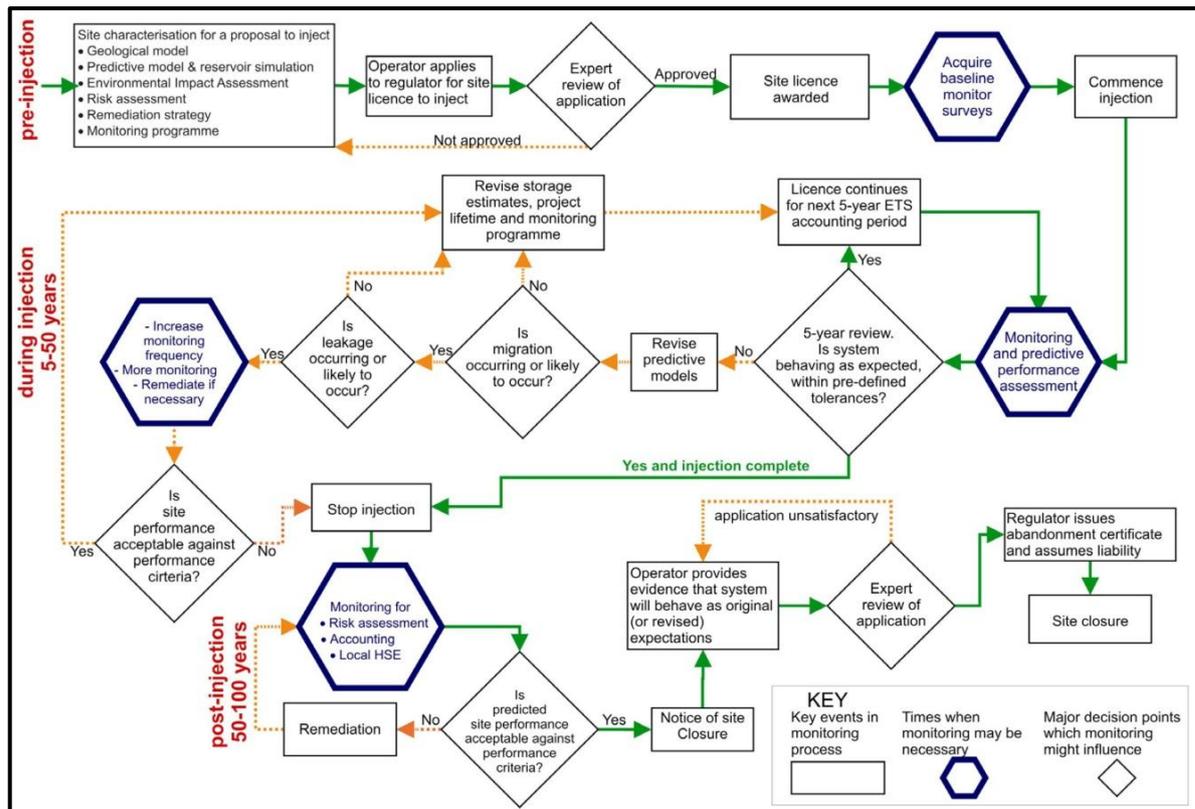


Figura 28 - Pontos que podem ser monitorados durante as fases do projeto de CGS.

Fonte: Pearce *et al.*(2006).

Algumas das técnicas para monitorar os efeitos do meio ambiente local como: águas de subsuperfície, qualidade do ar e ecossistema são detalhadas no Quadro 10. Quanto às técnicas utilizadas para monitorar o CO₂ na subsuperfície elas podem ser de forma direta ou indireta, as quais serão utilizadas em um determinado local de armazenamento de acordo com suas características.

Em relação às técnicas diretas, elas são limitadas. O uso mais comum é de indicadores, não presentes no reservatório (gases e gases isótopos). Poços de monitoramento podem ser utilizados continuamente para avaliar o movimento de CO₂, entretanto por ser uma técnica invasiva agrega risco potencial com a criação de novos caminhos de migração de CO₂. Como estes poços não apresentem revestimento é possível acompanhar o seu comportamento ao longo da distribuição lateral do CO₂ no reservatório. Em relação às técnicas indiretas, estas incluem uma variedade de técnicas geofísicas e geoquímicas, sísmicas e não sísmicas. Basicamente, as técnicas sísmicas medem velocidade e a absorção de energia das ondas, geradas artificialmente ou naturalmente, através das rochas (IPCC, 2005).

Técnicas de medição	Parâmetros de medição	Exemplo de aplicação
Traçadores introduzidos ou naturais	<ul style="list-style-type: none"> - Tempo de viagem - Particionamento de CO₂ em salmoura ou óleo - Identificação de fontes de CO₂ 	<ul style="list-style-type: none"> - Rastreamento do movimento de CO₂ na formação de armazenamento - Quantificação da armadilha de solubilidade - Rastreamento de pontos de fuga
Composição da água	<ul style="list-style-type: none"> - CO₂, HCO₃⁻, CO₃²⁻ - Íons maiores - Traçadores de elementos - Salinidade 	<ul style="list-style-type: none"> - Quantificação das armadilhas de solubilidade e minerais e da interação entre CO₂-água-rocha - Detecção de vazamento em aquíferos subterrâneos e superficiais
Pressão de subsuperfície	<ul style="list-style-type: none"> - Pressão da formação - Pressão do anel - Pressão de aquífero subterrânea 	<ul style="list-style-type: none"> - Controle de pressão da formação abaixo do gradiente de fratura - Condição do poço e da tubulação de injeção - Vazamento para fora da formação de armazenamento
Perfis do poço	<ul style="list-style-type: none"> - Salinidade da água - Velocidade sônica - Saturação de CO₂ 	<ul style="list-style-type: none"> - Rastreamento do movimento de CO₂ na formação de armazenamento e acima dela - Acompanhamento da migração de água nos aquíferos rasos - Calibragem de velocidades sísmicas para levantamentos sísmicos 3D
Imagem sísmica 3D ao longo do tempo	<ul style="list-style-type: none"> - Velocidade da onda P e S - Horizonte de reflexão - Atenuação da amplitude sísmica 	<ul style="list-style-type: none"> - Rastreamento de movimentos de CO₂ na formação de armazenamento e acima dela
Perfis sísmicos verticais e imagens sísmicas do poço	<ul style="list-style-type: none"> - Velocidade da onda P e S - Horizonte de reflexão - Atenuação da amplitude sísmica 	<ul style="list-style-type: none"> - Detectar a distribuição detalhada do CO₂ na formação de armazenamento - Detecção de fugas através de falhas e fraturas
Monitoramento sísmico passivo	<ul style="list-style-type: none"> - Localização, magnitude e características da fonte de eventos sísmicos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Desenvolvimento de microfraturas na formação ou caminhos de migração de CO₂ na rocha selo
Técnicas elétricas e eletromagnéticas	<ul style="list-style-type: none"> - Condutividade da formação - Indução eletromagnética 	<ul style="list-style-type: none"> - Rastreamento do movimento de CO₂ na formação de armazenamento e acima dela - Detecção de migrações de salmoura nos aquíferos superficiais
Medição gravimétrica ao longo do tempo	<ul style="list-style-type: none"> - Mudança de densidade causada por deslocamento do fluido 	<ul style="list-style-type: none"> - Detectar movimento de CO₂ na formação de armazenamento e acima dela - Balanço de massa de CO₂ na subsuperfície
Deformação da superfície da terra	<ul style="list-style-type: none"> - Inclinação, deslocamento vertical e horizontal usando interferometria e GPS 	<ul style="list-style-type: none"> - Detectar os efeitos geomecânicos da formação de armazenamento e da rocha selo. - Localizar as vias de migração de CO₂
Imagem visível e de infravermelho de aviões e satélites	<ul style="list-style-type: none"> - Imagens hiperespectrais da superfície terrestre 	<ul style="list-style-type: none"> - Detectar estresse vegetativo
Monitoramento do fluxo de CO ₂ na superfície da terra usando câmaras de fluxo ou <i>eddycovariância</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Fluxo de CO₂ entre a superfície da terra e a atmosfera 	<ul style="list-style-type: none"> - Detectar, localizar e quantificar vazamentos de CO₂
Amostragem de gases do solo	<ul style="list-style-type: none"> - Composição de gás no solo - Análise isotópica de CO₂ 	<ul style="list-style-type: none"> - Detectar níveis elevados de CO₂ - Identificar as fontes que levam ao elevado teor de CO₂ no solo - Avaliar impactos no ecossistema

Quadro 10 - Técnicas diretas e indiretas usadas para monitorar projetos de armazenamento.

Fonte: IPCC (2005). Nota: Traduzido pela autora.

4.3. METODOLOGIA QUALITATIVA DE ANÁLISE DE RISCO

Nesta seção são apresentadas as principais metodologias e posteriormente uma análise comparativa com base nos aspectos que influenciam na estimativa de risco.

4.3.1. Principais Aspectos que Influenciam na Estimativa de Risco

A escolha dos aspectos ocorreu devido às suas influências sobre a estimativa do risco já que, como descrito por Kaplan e Garrick (1981), pode ser definido como: razão entre perigo e salvaguarda, combinação de incertezas e dano ou de probabilidade e consequência.

As causas ou eventos iniciadores são responsáveis pelo desencadeamento de eventos que podem levar à consequência do cenário, sendo de fundamental importância para compreender a razão pela qual um potencial cenário de risco pode resultar em dano ou prejuízo. As consequências, por sua vez, são expressas como a magnitude do impacto em virtude da ocorrência do evento. Já a probabilidade ou frequência está relacionada com o potencial do cenário de risco acontecer. AICHE/CCPS (2000) define a frequência como o número de ocorrências de um evento por unidade de tempo e, a probabilidade como uma expressão para frequência de ocorrência sendo expressa por um número entre 0 e 1. Kaplan e Garrick (1981) definem a probabilidade como uma medida numérica que expressa um estado de confiança, enquanto a frequência é um número mensurável.

Para a estimativa de risco, a incerteza está associada à dúvida ou à falta de conhecimento sobre a frequência de ocorrência (ou probabilidade) e a severidade (ou consequência) de potenciais cenários de risco em sistemas geológicos. A incerteza é definida pela AICHE/CCPS (2000) como uma medida, às vezes quantitativa, do grau de dúvida ou falta de certeza associada com a estimativa do verdadeiro valor do parâmetro. A Norma ISO 3100 (2009) define a incerteza como um estado da deficiência das informações relacionadas a um evento, sua compreensão, conhecimento, consequência ou probabilidade.

As salvaguardas são medidas utilizadas para evitar, controlar ou mitigar os acidentes, reduzindo a probabilidade de ocorrência, limitando a duração do evento ou reduzindo as consequências. Salvaguarda é definida pela DNV (2011) como medida preventiva ou corretiva para evitar o desenvolvimento do risco em incidente, ou mitigar seus efeitos, pode também ter por objetivo reduzir a incerteza associada com a probabilidade e consequência de um potencial perigo.

4.3.2. Metodologias Analisadas

O objetivo e a aplicação de cada metodologia são apresentados de forma resumida no Quadro 11.

Metodologia	Objetivo	Aplicação
VEF	Avaliação da vulnerabilidade do sistema a impactos adversos no CGS.	Estratégia para avaliação do local e guia para agências reguladoras.
SWIFT	Identificação de perigos.	Mapeamento dos perigos e consequências.
MOSAR	Identificação dos riscos e barreiras para contê-los.	Análise sistemática de risco para locais bem conhecidos.
FEP	Elaboração de cenários.	Triagem e seleção do local.
CASSIF	Análise de cenários com base na análise de poço, falhas e selo.	Triagem e seleção do local.
SRF	Análise das barreiras geológicas e do potencial de fuga próximo à superfície.	Avaliação de riscos dos locais de armazenamento.
MCA	Avaliação de alternativas.	Estratégia para triagem e seleção do local de armazenamento.

Quadro 11 - Metodologias qualitativas de análise de risco de Projetos de CGS.

Fonte: Adaptado de Condor *et al.* (2011).

Fez-se um mapeamento das principais características das metodologias qualitativas de análise de risco existentes bem como suas aplicações. De forma a orientar a seleção das principais características das metodologias e avaliar qual delas é a mais adequada para ser tida como referência, cada metodologia foi avaliada de acordo com o nível de atendimento de cada aspecto que influencia na estimativa do risco (descrito na Seção 4.3.1). Cada aspecto pode ser ponderado em uma escala de 0 a 3, sendo representada por três cores. A tonalidade mais escura, representado por um peso igual a 3 (três), indica que a metodologia pode atender às características sugeridas pelo aspecto mencionado. Já a tonalidade intermediária, representado pelo peso igual a 2 (dois), atende parcialmente. A tonalidade mais clara, representada pelo peso igual a 1 (um) atende muito pouco e a ausência de cor representado por 0 (zero) indica que a metodologia não aborda ou não menciona o item descrito.

4.3.2.1. Análise VEF

A análise VEF (*Vulnerability Evaluation Framework*) consiste em identificar sistematicamente as condições que poderiam aumentar ou diminuir o potencial dos impactos adversos no armazenamento de carbono, ou seja, identificar a vulnerabilidade do sistema, a qual é classificada qualitativamente como: baixa ou alta. Nesta análise, conforme apresentado

na Figura 29, o processo de caracterização da injeção de CO₂ é dividido em: sistema de confinamento e zona de injeção. Na análise do sistema de confinamento uma série de atributos geológicos que poderiam afetar à vulnerabilidade do sistema e causar uma migração imprevista e vazamento de CO₂ é analisada para determinar o potencial de impactos para a atmosfera, o ecossistema, entre outros. Já na zona de injeção serão analisados atributos que podem resultar em uma mudança indesejável de pressão e consequentemente impactar o lençol freático e geosfera (EPA, 2008).

Apesar desta metodologia não ser considerada pela EPA (2008) como uma ferramenta que orienta na seleção de local ou para estabelecimento de padrões, a VEF pode ser utilizada como guia para orientar especialistas na avaliação de riscos, monitoramento e gestão. Além disso, o resultado final da análise pode servir como documento de referência para as agências reguladoras responsáveis pela aprovação de estudos ambientais, aprovação de locais de armazenamento, ou emissão de licenças para projetos de armazenamento.

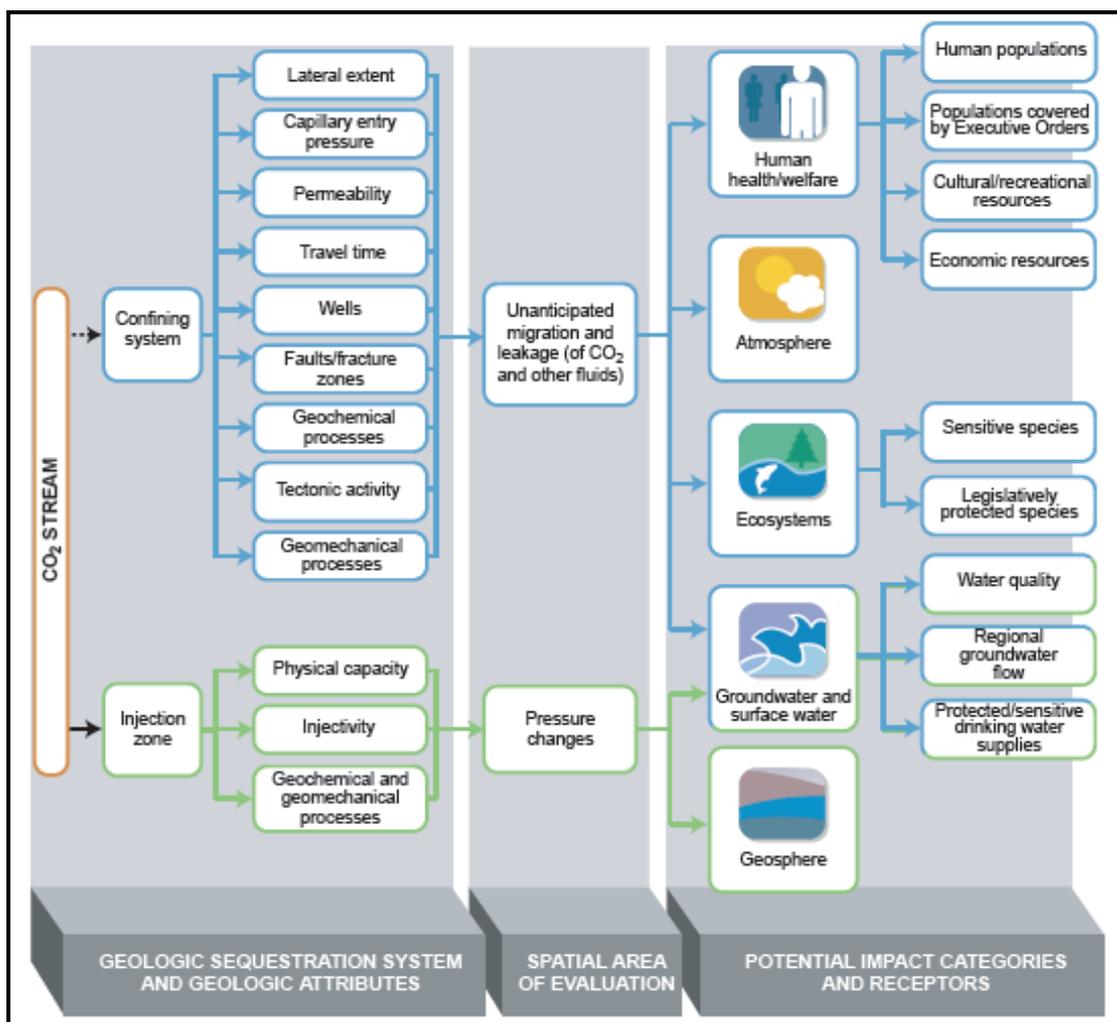


Figura 29 - Modelo Conceitual VEF.

Fonte: EPA (2008).

Como na análise VEF é possível identificar as condições que poderiam aumentar ou diminuir o potencial para impactos adversos no armazenamento, como resultado, tem-se uma determinação clara da “Consequência” (representando peso igual a 3). A partir da análise dos impactos é proposto o desenvolvimento do monitoramento e mitigação para impactos associados com a mudança de pressão ou migração imprevista de CO₂, ou seja, há espaço para propor medidas para evitar ou reduzir os impactos e por isso “Salvaguarda” (3) é considerado ser representado de forma clara. A “Frequência” (0) com que o cenário pode ocorrer não é enfatizada e por isso é tida como 0 (zero), isso ocorre porque a avaliação da vulnerabilidade incorporado na VEF foi desenvolvida para identificar sistematicamente as condições que poderiam aumentar o potencial a impactos negativos do armazenamento independentemente da sua probabilidade ou frequência de ocorrência. A caracterização do sistema quanto à injeção da corrente de CO₂ e quanto ao seu confinamento é feita a partir da identificação e avaliação dos atributos geológicos, sendo esta uma das etapas do modelo conceitual VEF, tido aqui como causa raiz para análise do cenário, ou seja, o “Evento iniciador” (3) é identificado. Apesar da “Incerteza” (1) não ser incorporada na análise e ser explícito essa consideração no decorrer da elucidação desta metodologia, as mesmas são enfatizadas, por esse motivo é considerada com nível de atendimento 1.

4.3.2.2. Análise SWIFT

A metodologia SWIFT (*Strutured What-if Technique*), adaptada e desenvolvida pela DNV em colaboração com a GE Plastics, é uma técnica para identificação de perigos apoiada por uma lista elaborada com base no banco de dados FEP, desenvolvido pela Quintessa (2010). Os pontos discutidos para cada perigo identificado são: causas, consequências, incertezas e salvaguardas como apresentado na Figura 30. As discussões são estruturadas com base em categorias de análise, tais como: reservatório, selo, zona vadosa, zona de falhas, poço, dentre outros (DNV, 2010; SOLLIE *et al.*, 2011)

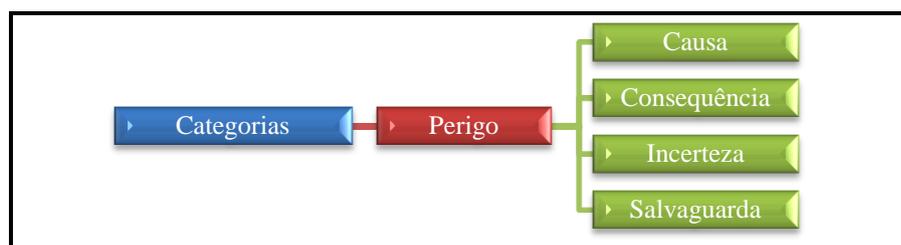


Figura 30 - Etapas da análise SWIFT.

Fonte: Elaborado pela autora com base em DNV (2010) e SOLLIE *et al.* (2011).

Como a metodologia SWIFT é uma técnica para identificação de perigos, e para cada perigo são avaliadas as causas, incertezas, salvaguardas e os potenciais impactos, ou seja, os aspectos “Salvaguarda” (3), “Evento iniciador” (3) e “Consequência” (3) podem ser analisados através desta metodologia de forma estruturada. A técnica trata a “Incerteza” (3), possibilitando o mapeamento desta em relação à probabilidade ou frequência de ocorrência e à consequência de perigos. Apesar do aspecto “Frequência” (1) não ser mencionado de forma clara, este aspecto foi considerado com nível mínimo de atendimento, pois é enfatizado durante a explicação da metodologia a sua inclusão quanto ao mapeamento da incerteza.

4.3.3. Análise MOSAR

MOSAR (*Méthode Organisée et Systémique d'Analyse de Risques*) é um método projetado para analisar os riscos técnicos de um sistema e para identificar as medidas preventivas e mitigadoras necessárias para neutralizá-los. Conforme apresentado na Figura 31, este método é estruturado em duas etapas: A e B, onde cada etapa é dividida em níveis e cada nível traz informações independentes possibilitando a interrupção da análise de um nível sem comprometer a análise de outro (PERILHON, 1999; CHERKAOUI; LOPEZ, 2009).

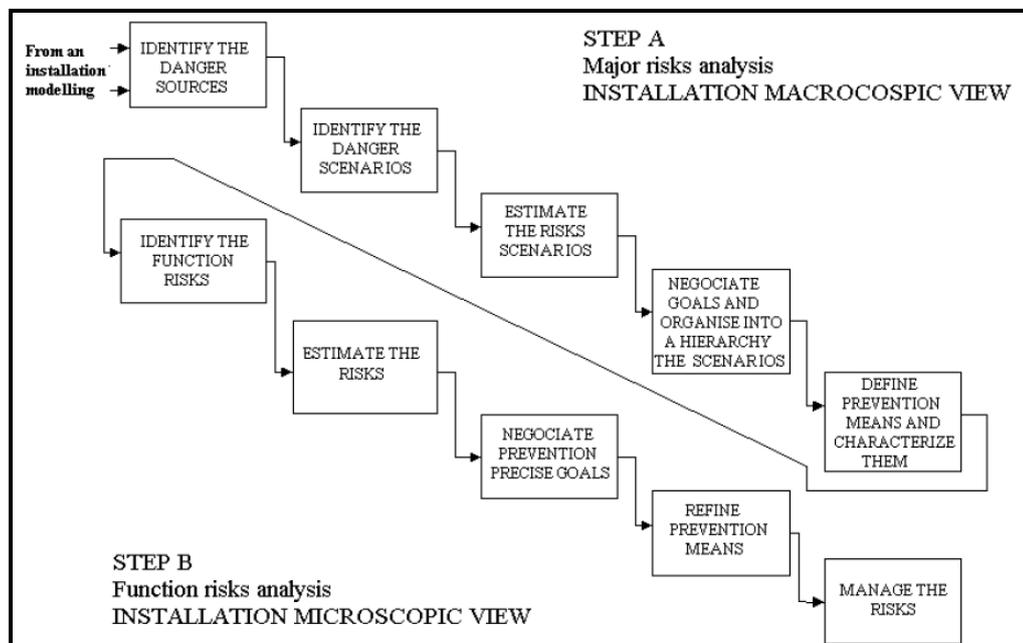


Figura 31 - MOSAR: Etapas A e B.

Fonte: Cherkaoui e Lopez (2009).

Na primeira etapa, faz-se uma análise dos principais riscos a partir da decomposição do sistema de armazenamento em cinco subsistemas: falhas, camada impermeável, poços de

injeção, aquíferos salinos profundos e instalação de injeção de CO₂ na superfície. Os cenários são construídos em torno de cada subsistema, os quais serão avaliados numa matriz tipo "Gravidade x Probabilidade" possibilitando classificar o cenário de risco como aceitável ou inaceitável. Nesta etapa também são avaliados os meios de prevenção (barreiras técnicas e operacionais) necessários para neutralizar os riscos identificados para os cenários, assegurando a aceitabilidade do risco. Este primeiro módulo termina com uma qualificação das barreiras identificadas. Já na segunda etapa, faz-se uma análise detalhada do sistema e, especificamente, implementam-se as ferramentas de confiabilidade (segurança) relativas às falhas técnicas de máquinas e dispositivos (PERILHON, 1999; CHERKAOUI; LOPEZ, 2009).

Como através desta metodologia é possível identificar de forma clara o “Evento Iniciador” (3) e a “Salvaguarda” (3), estes aspectos foram classificados com nível 3 (três) de atendimento. A partir do método MOSAR é possível obter os riscos dos cenários com base na estimativa qualitativa da probabilidade e potencial de impacto, sendo os aspectos “Frequência” (3) e “Consequência” (3) classificados com nível 3 de atendimento. Não se observa a inclusão da “Incerteza” (0) na análise, por isso o atendimento foi adotada como sendo 0 (zero).

4.3.3.1. Análise FEP

A análise FEP (*Features, Events and Processes*) visa analisar os cenários que podem levar ao vazamento imprevisto de CO₂ ou de movimento sísmico não intencional de superfície da terra. Como suporte para a análise é utilizado o banco de dados FEP (QUINTESSA, 2010), o qual contém FEPs que podem ter um efeito potencial na segurança do armazenamento. As características (F, do inglês *features*) compreendem todos os fatores e parâmetros estáticos que descrevem as instalações do armazenamento. Os eventos (E, do inglês *events*) estão relacionados a ocorrências futuras como mudanças que venham a ocorrer nas características do sistema e no processo. Os processos (P, do inglês *processes*) estão relacionados a processos de superfície e subsuperfície que descrevem os aspectos dinâmicos físico, químico e biológico atual e futuro das instalações do armazenamento (WILDENBORG *et al.*, 2005).

De acordo com Savage e Maul (2004), as FEPs são relevantes para descrever o sistema de armazenamento, sendo que os processos (P) podem influenciar na evolução do sistema de armazenamento e eventos (E) são processos que ocorrem em escalas de tempo relativamente curtas quando comparado à escala de tempo de P. Como exemplo: aquífero

perto da superfície e suas características (uma característica do sistema), erosão da superfície da terra (um processo que afeta a evolução do sistema) e um grande terremoto (um evento de curto prazo que também afeta o modo como o sistema evolui com o tempo).

Segundo o IPCC (2005), as características (F) incluem propriedades ou parâmetros, tais como: permeabilidade do reservatório, espessura da rocha selo e número de poços de injeção. Os eventos (E) incluem processos como: eventos sísmicos, *blow-outs* e danos no armazenamento por penetração de novos poços. Processos (P) referem-se a processos físico-químicos, tais como: fluxo multifásico, reações químicas e mudanças de tensão geomecânicas que influenciam na segurança e capacidade do armazenamento.

Essa análise foi feita para os projetos Weyburn e In Salah (NETL, 2011) e a sua estrutura pode ser visualizada na Figura 32.

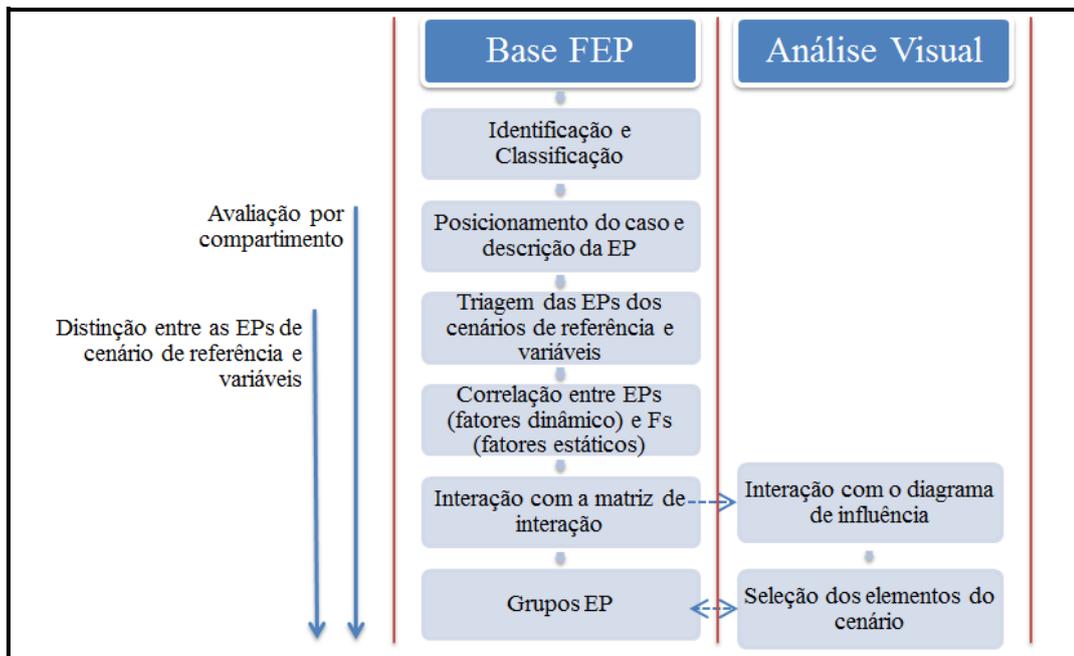


Figura 32 - Análise FEP.

Fonte: Wildenborg *et al.* (2005). Nota: Traduzido pela autora.

A análise FEP é uma ferramenta de análise qualitativa e tem como objetivo analisar e identificar cenários, sendo suportado pelas FEPs que influenciam na segurança do armazenamento. De acordo com Wildenborg *et al.* (2005), a distinção entre as FEPs é feita para apoiar o processo de formação do cenário. A formação do cenário é proveniente da combinação de elementos de cenários que são agrupamentos de EPs e que de alguma forma afetam na integridade da zona de confinamento, na migração de CO₂ desta zona para biosfera e também afetam a biosfera propriamente dita. Para a formação desses grupos de EPs,

inicialmente os fatores estáticos (F) e dinâmicos (EP) são identificados, analisados e classificados de acordo com: a probabilidade de ocorrência das mesmas, o impacto caso o evento perigoso ocorra e a sua relevância para a avaliação. Nesse sentido, há a identificação do “Evento iniciador” (3) que pode levar à ocorrência de um evento indesejável, da “Frequência” (3) e da “Consequência” (3). De acordo com uma matriz de risco, as EPs podem ser classificadas como: risco muito baixo, baixo, médio, alto ou muito alto. As EPs que representam a evolução esperada do sistema de armazenamento são consideradas como EPs de cenários de referência e as que representam uma ocorrência futura incerta é tida como EPs de cenários variáveis, como estes cenários não são ponderados de acordo com a sua “Incerteza” (2), este aspecto foi classificado com nível de atendimento parcial, representado por 2 (dois). Após a triagem, ao classificar as EPs como EP de cenários de referência ou variáveis, é realizada uma análise de interação e correlação entre as Fs e EPs para formação de grupos de EP e conseqüentemente formação do cenário que resultam na descrição da evolução das instalações do armazenamento. O aspecto “Salvaguarda” (0) não é mencionado ou avaliado pela metodologia.

4.3.4. Análise CASSIF

O método CASSIF (*Carbon Storage Scenario Identification Framework*) desenvolvido por Yavuz *et al.* (2009) é considerado como a segunda geração da análise FEP e tem como objetivo a análise de cenários suportado pelo banco de dados FEP. A análise baseia-se na avaliação dos três maiores cenários de vazamento de CO₂: poço, falha e selo, de onde os eventos e processos relevantes são identificados e modelados. O modelo simplificado deste método é apresentado na Figura 33.

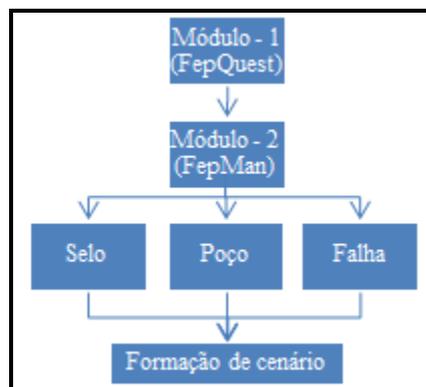


Figura 33 - Estrutura simplificada da análise CASSIF.

Fonte: Adaptado de Yavuz *et al.* (2009).

Inicialmente, para ter uma visão global dos fatores de risco potencialmente importantes, os participantes da análise respondem a um questionário com informações sobre o local de armazenamento (FEPQue – FEP *Questionnaire*). A partir desta avaliação é feita uma pré-seleção de FEPs (FEPMan – FEP *Manager*) para posterior análise dos cenários de vazamento: poço, falha e selo. É na etapa de pré-seleção que, a depender da resposta dos analistas, alguns grupos de FEPs são destacados para a necessidade de atenção extra, principalmente para respostas que indicam incerteza na qualidade dos dados. O resultado desta etapa será utilizado para guiar na avaliação dos cenários de caso base (poço, selo, falhas), os quais podem levar à formação e análise de outros cenários. Como ferramenta de tomada de decisão, o método CASSIF permite facilitar o processo de seleção do local de armazenamento assim como a verificação dos locais já selecionados. Para desenvolvimento futuro desta tecnologia, está a criação de dois módulos: um para adicionar opções de monitoramento (FEPMon) e outro para quantificação de risco utilizando abordagem probabilística (FEPChain) (YAVUZ *et al.*, 2009).

Mesmo sendo uma metodologia voltada para análise de cenário, não se observou a avaliação dos aspectos “Frequência” (0) e “Salvaguarda” (0), diferentemente da “Consequência” (3) e “Evento Iniciador” (3) que apesar de não serem analisados de forma estruturada e explicitamente foram considerados com bom nível de atendimento devido à análise das FEPs, as quais descrevem a evolução do sistema de armazenamento a partir de casos base que podem levar à fuga de CO₂. O atendimento do aspecto “Incerteza” (2) foi parcial, pois na etapa de pré-seleção maior atenção é dada às respostas que apresentaram dúvidas, por parte do usuário, quanto à certeza das informações. Entretanto, a incerteza não é contabilizada.

4.3.5. Análise SRF

O método SRF (*Screening and Ranking Framework*) foi desenvolvido por Curt Oldenburg (2005, 2008) para avaliar o potencial do armazenamento sobre o risco à saúde, segurança e meio ambiente (SSMA) a partir do vazamento de CO₂ e consiste na análise da integridade do armazenamento com base na avaliação de barreiras geológicas que influenciam na segurança do armazenamento de CO₂. Assim, a abordagem se baseia na suposição de que o risco de fuga de CO₂ depende de três características básicas: potencial para falha na contenção primária dada pela formação primária; potencial de falha da contenção secundária caso ocorra

vazamento da formação primária e potencial de atenuação e dispersão da fuga de CO₂ caso ocorram vazamentos da formação primária e secundária. Cada uma destas barreiras é dividida em atributos conforme apresentados de forma simplificada na Figura 34

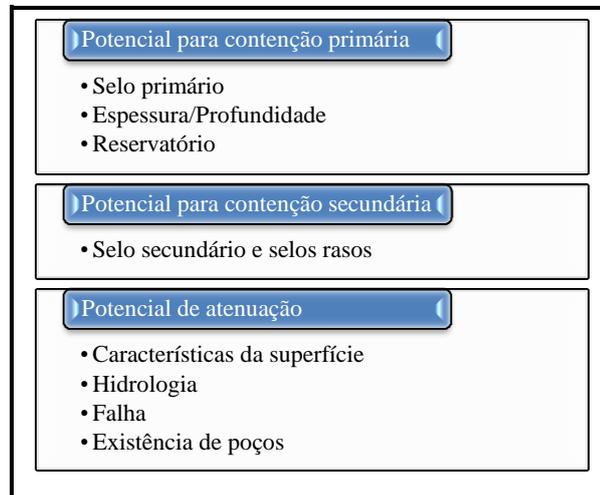


Figura 34 - Barreiras geológicas e os respectivos atributos analisados pela metodologia SRF.

Fonte: Adaptado de Oldenburg (2005, 2008).

Durante a avaliação, as informações são implementadas em uma planilha baseada em quatro classes de informações: 1) caracterização do local realizada a partir da análise de 2) atributos, os quais são definidos por 3) propriedades, os quais são ponderados por 4) valores de entrada realizada pelo usuário. Cada um dos itens é ponderado quanto à sua relevância para avaliar o risco sobre a SSMA e por um fator de certeza, representando a opinião do usuário em relação à informação fornecida e a incerteza desta informação, respectivamente. A análise SRF foi aplicada nos Campos de Óleo Ventura e de gás Rio Vista (OLDENBURG, 2005, 2008).

Devido às suas características, de acordo com Oldenburg (2008), SRF é uma técnica que pode ser usada nos primeiros estágios para a avaliação dos riscos e incertezas envolvidas no processo de CGS e para avaliar múltiplos locais, permitindo orientar a escolha do melhor local para avaliações futuras mais detalhadas, como a avaliação quantitativa de risco.

Como é uma técnica utilizada para avaliar os obstáculos geológicos e o potencial de fuga próximo à superfície, a medida de proteção ou controle para que um evento indesejável ocorra faz parte do próprio método em que se analisam as barreiras físicas, como por exemplo: potencial de atenuação caso a contenção secundária falhe e o fluxo de CO₂ vá para superfície e análise deste, caso a primeira falhe, ou seja, não há evidência de que ocorre um levantamento específico de salvaguardas por esta metodologia. Assim, por este motivo o nível

de atendimento dos aspectos “Salvaguarda” (1) e “Frequência” (1) são considerados como baixo. Em relação à “Consequência” (3) o nível de atendimento foi considerado como bom porque o foco desta análise é avaliar o potencial de impacto do armazenamento com base na estimativa do risco à SSMA.

É importante ressaltar que os principais itens avaliados nesta metodologia estão relacionados com os processos que ocorrem dentro do sistema de armazenamento e que podem impactar negativamente a SSMA como, por exemplo: selo primário, reservatório, profundidade, selo secundário e superfície, poços, falhas, hidrologia, característica de superfície. Cada um desses itens, denominados atributos, podem afetar as zonas de contenção e são analisados pelo método SRF a partir da ponderação das propriedades físicas, como por exemplo: litologia, pressão, salinidade, falhas tectônicas, permeabilidade, dentre outros que podem afetar as zonas de contenção. Devido ao levantamento detalhado das propriedades que influenciam os atributos e que por sua vez influenciam a migração de CO₂ através das zonas de contenção, o aspecto “Evento iniciador” (3) é classificado com bom atendimento.

Como para a avaliação da técnica, o usuário entra com escore numérico representando sua opinião com estimativa da “Incerteza” (3), o aspecto é atendido, pois nesta análise as informações disponibilizadas são ponderadas quanto à sua incerteza em três escalas, o que é de fundamental importância para a estimativa de risco.

4.3.5.1. Análise MCA

A técnica MCA (*Multi-Criteria Assessment*) consiste na avaliação dos principais aspectos relacionados à tecnologia CCGS, desde questões técnicas quanto questões voltadas a preocupações e os reais benefícios obtidos com a sua implementação e desenvolvimento. O MCA fornece um meio sistemático de representar as diferentes perspectivas em um processo de avaliação, permitindo às partes flexibilidade para explorar opções com seus próprios critérios, ponderações e pontuações. Como apresentado na Figura 35, a metodologia MCA compreende duas etapas: critérios de avaliação e análise de cenários. A primeira etapa do processo de análise consiste na definição de um conjunto de critérios relacionados com armazenamento de carbono tendo o objetivo de explorar detalhadamente as alternativas de reservatórios. O segundo estágio da avaliação é voltado para análise de cenários. A partir desta metodologia é possível identificar alguns dos benefícios, barreiras e *trade-offs*¹⁰

¹⁰ Os *trade-offs* podem ser caracterizados como incompatibilidade entre dois ou mais critérios.

associados ao CCGS e mapear os principais problemas encontrados (GOUGH, SHACKLEY, 2006).

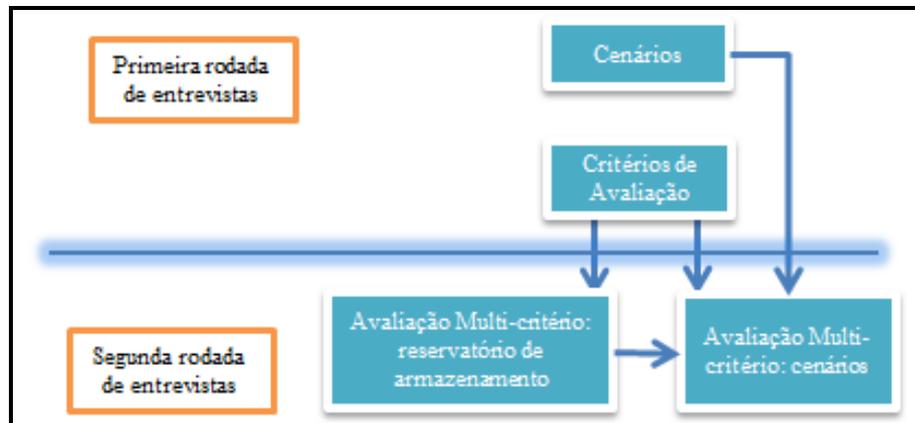


Figura 35 - Etapas da metodologia MCA.
Fonte: Adaptado de Gough e Shackley (2006).

Dentre os critérios utilizados para avaliar o reservatório, Gough e Shackley (2006) apresentam, por exemplo: impactos à saúde humana e ecossistema, custos, barreiras legais e de planejamento, oposição pública, monitoramento e verificação assim como segurança, capacidade e escala de tempo do armazenamento. Já para avaliação de cenários, dentre os critérios, estão: mudanças da infraestrutura ciclo de vida e impacto ambiental. Cada um dos critérios é ponderado dentro de uma escala relativa de 100 pontos, sendo que as pontuações mais altas indicam um melhor desempenho do critério, o que reflete o nível de incerteza associado ao sistema de armazenamento e à tecnologia CCGS.

Devido à subjetividade da análise e da dependência de escolha dos critérios que serão selecionados e analisados por parte da equipe executora e dos atores envolvidos, o nível de atendimentos dos aspectos: “Salvaguarda” (1), “Evento iniciador” (1), “Consequência” (1), “Frequência” (1) foram considerados como baixo, pois não se apresentam de forma estruturada. Apesar de ser ressaltado que o nível de incerteza está relacionado com a atribuição de pesos e prioridade dos critérios de análise dos cenários e do armazenamento, não é apresentado de forma clara como isso ocorre e nem como é possível mapear a incerteza associada à informação fornecida. Assim, há a necessidade de uma compreensão detalhada do processo de armazenamento assim como sua “Incerteza” (1).

4.3.6. Análise Comparativa

Dentre as metodologias qualitativas de análise de risco, a metodologia SWIFT apresentou-se como a mais completa de acordo com os aspectos avaliados: incerteza, evento iniciador, salvaguarda, frequência e consequência. A partir do estudo realizado observou-se que a maior parte das metodologias de análise de risco se baseia no banco de dados FEP e muitas delas fazem referência à Análise FEP, isso porque esta análise é uma das primeiras metodologias propostas e utilizadas para avaliar o risco de fuga do CO₂ armazenado. O resultado da análise é apresentado compilado no Quadro 12.

Aspectos Analisados	Metodologias de Análise de Risco						
	VEF	SWIFT	MOSAR	FEP	CASSIF	SRF	MCA
Incerteza	1	3	0	2	2	3	1
Evento iniciador	3	3	3	3	3	3	1
Salvaguarda	3	3	3	0	0	1	1
Frequência	0	1	3	3	0	1	1
Consequência	3	3	3	3	3	3	1

Escala de tonalidade	
Não atende	0
Atende pouco	1
Atende parcialmente	2
Atende o aspecto mencionado	3

Quadro 12 - Quadro-síntese comparativo das metodologias de análises de risco em projetos de CGS.

Fonte: Elaborado pela autora.

Dentre as metodologias, a MCA foi a que menos atendeu aos aspectos avaliados, isso porque os itens a serem analisados por essa metodologia dependem da escolha por parte da equipe executora e dos atores envolvidos. Os aspectos: evento iniciador, salvaguarda, incerteza e frequência não foram apresentados de forma clara.

O método MOSAR apresentou-se como um método estruturado para compreensão dos cenários de risco, entretanto a incerteza que é um fator crítico para obtenção do risco em projeto de CGS não é considerada. Por sua vez, o método SRF apresentou assim como o método SWIFT bons resultados do ponto de vista da análise e consideração da incerteza. No caso da análise SWIFT é possível mapear a incerteza associada à informação dos fatores de risco frequência e consequência, já com a metodologia SRF é possível mapear a incerteza em relação à informação do risco sobre a SSMA. A partir da metodologia CASSIF, na primeira

etapa ao se responder o questionário o usuário pode informar qual a sua incerteza em relação à informação fornecida para a formação do cenário. Já na metodologia FEP, a incerteza é associada à dúvida que se tem sobre a ocorrência de cenários, os quais são classificados como cenários variáveis. A metodologia VEF apesar de não ponderar a incerteza, a menciona na exposição do método. A Metodologia MCA por sua vez, apesar de mencionar que a atribuição de pesos aos critérios de análise tem influência da incerteza, não é explicitada de forma clara como isso ocorre e nem como é possível mapear a incerteza associada à informação fornecida.

Os aspectos evento iniciador e consequências são os mais tratados pelas metodologias, apesar de não serem mencionados de forma clara como é o caso das metodologias VEF, SRF e CASSIF foram considerados com bom nível de atendimento por tratar de forma clara os atributos ou eventos e processos.

A frequência foi um dos aspectos menos tratados pelas metodologias devido à dificuldade em estimar a frequência de falhas e de ocorrência de vazamento de CO₂ e à falta de conhecimento específico baseado em dados de pesquisa e de campo que pudessem oferecer melhor embasamento à estimativa. Em relação à frequência, o método MOSAR é o que mais chama a atenção para este item, uma vez que a partir dessa metodologia o cenário é classificado a partir da combinação de probabilidade e gravidade ou efeito. Para a análise FEP o que se ressalta é o levantamento da probabilidade de ocorrência de uma EP.

Apesar da importância de medidas que possam evitar, controlar ou mitigar os efeitos ocasionados com a fuga de CO₂, o aspecto salvaguarda também não é tratado na maioria das metodologias. Os métodos SWIFT e MOSAR são os que permitem um mapeamento mais estruturado, a VEF indica quais os itens que podem ser avaliados para monitorar e mitigar os riscos.

Um dos principais desafios para a classificação do risco em projetos de CGS são as incertezas. A partir da análise feita foi possível observar que muitas metodologias ainda não possibilitam ao usuário avaliar a incerteza e a influência desta sobre a estimativa de risco e, devido à sua importância, é necessário que maior ênfase seja dada a este aspecto. Sendo necessário serem sempre registradas, principalmente durante a fase de identificação de perigos, a fim de melhor compreender os riscos relevantes.

5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste capítulo são apresentados os procedimentos metodológicos adotados para o desenvolvimento desta dissertação de mestrado, elaboração da metodologia de avaliação de risco proposta e estudo de caso.

5.1. ELABORAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A dissertação “Proposta de Metodologia Qualitativa para Avaliação de Risco no Armazenamento Geológico de CO₂: um estudo de caso ilustrativo do Campo Fazenda Mamoeiro na Bacia do Recôncavo” foi desenvolvida tendo como base inicial a pesquisa bibliográfica sobre o tema em foco, análise comparativa entre as metodologias qualitativas existentes e desenvolvimento de metodologia qualitativa para análise de risco no armazenamento de CO₂. Primeiramente, definiu-se o projeto de pesquisa e o escopo para então ser realizada a pesquisa bibliográfica. Após levantamento inicial das informações da pesquisa realizada, foram selecionadas quatro grandes áreas de interesse para análise e apoio ao desenvolvimento da metodologia.

As áreas de interesse estudadas, as quais foram contempladas nos capítulos deste trabalho são: CO₂ e tecnologia CCGS, armazenamento geológico, análise e gerenciamento de risco e metodologias de análise de risco existentes. Na primeira área são apresentadas as características do CO₂, os impactos ambientais e de segurança associados à fuga de CO₂ e os aspectos técnicos relacionados às etapas da tecnologia CCGS assim como o contexto desta tecnologia dentro do mercado de carbono e aspectos regulatórios. Em relação ao armazenamento geológico, são apresentadas as características inerentes ao processo e os mecanismos de fuga de CO₂. Para as duas áreas seguintes são apresentadas os principais conceitos sobre análise e gerenciamentos de riscos, assim como as principais metodologias de análise de risco para projetos de armazenamento de CO₂. Em relação às metodologias, é realizada uma análise comparativa destas quanto aos aspectos que influenciam a estimativa de risco.

As metodologias de análise de risco foram comparadas de acordo com o nível de atendimento dos aspectos identificados como: incerteza, evento iniciador ou causas, salvaguarda, frequência e consequência. Cada um destes aspectos foi avaliado de acordo com o que cada metodologia pode proporcionar e os seus requisitos de execução. Para isso, foram

determinados quatro níveis de atendimento para cada aspecto, os quais podem ser ponderados em uma escala de cores. A cor mais escura (3) indica que a metodologia contempla as características sugeridas pelo aspecto mencionado, já a tonalidade intermediária (2) atende parcialmente e, a tonalidade mais clara (1) a metodologia atende muito pouco. A ausência de cor (0) indica que a metodologia não aborda ou não menciona o item descrito.

Em relação ao aspecto “Evento Iniciador”, por exemplo, para um nível de atendimento 3 significa que a metodologia contempla a análise deste item e através da metodologia de análise de risco o usuário pode identificar e compreender, de forma estruturada e de fácil compreensão, quais as características, mecanismos, causas, ou seja, os próprios eventos iniciadores, que podem levar ao vazamento de CO₂, sendo, portanto, possível compreender a origem a que levou à evolução do sistema de análise. Para o nível de atendimento classificado como 2, durante a explicação ou aplicação da metodologia é possível compreender, mas não de forma estruturada e de fácil compreensão, como o vazamento de CO₂ pode ocorrer. Um nível de atendimento classificado como 1, a metodologia não possibilita compreender como o aspecto é contemplado.

A partir do estudo comparativo realizado entre as metodologias, foram identificadas as principais características e lacunas que balizaram o desenvolvimento da Metodologia Qualitativa de Avaliação de Risco de CO₂ armazenado (denominada AR-CO₂), assim como alguns guias e normas de segurança existentes. A metodologia proposta foi aplicada em estudo de caso ilustrativo, sendo realizada uma coleta de dados tanto a partir da revisão da literatura quanto via visitas às instituições e consulta aos especialistas da área de análise de risco e armazenamento de carbono (geologia, geofísica e engenharia de segurança, de petróleo, de reservatório, química e mecânica).

Após avaliação da metodologia a partir da sua aplicação em estudo de caso ilustrativo são apresentados os resultados encontrados, as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

O procedimento metodológico descrito foi estruturado como pode ser observada na Figura 36, onde são expostas as fases para o desenvolvimento do trabalho e suas interações. Além das caixas de início e fim, cada fase é identificada por um bloco, ressaltando-se que os losangos representam a etapa de verificação e decisão e os retângulos representam as atividades e ações, os quais são associados a uma tonalidade para identificação visual:

	Verde	-	Atividades de pesquisa
	Azul	-	Análise e ações que visam definição
	Amarelo	-	Áreas de estudo
	Laranja	-	Atividades de identificação
	Vermelho	-	Ações de Finalização

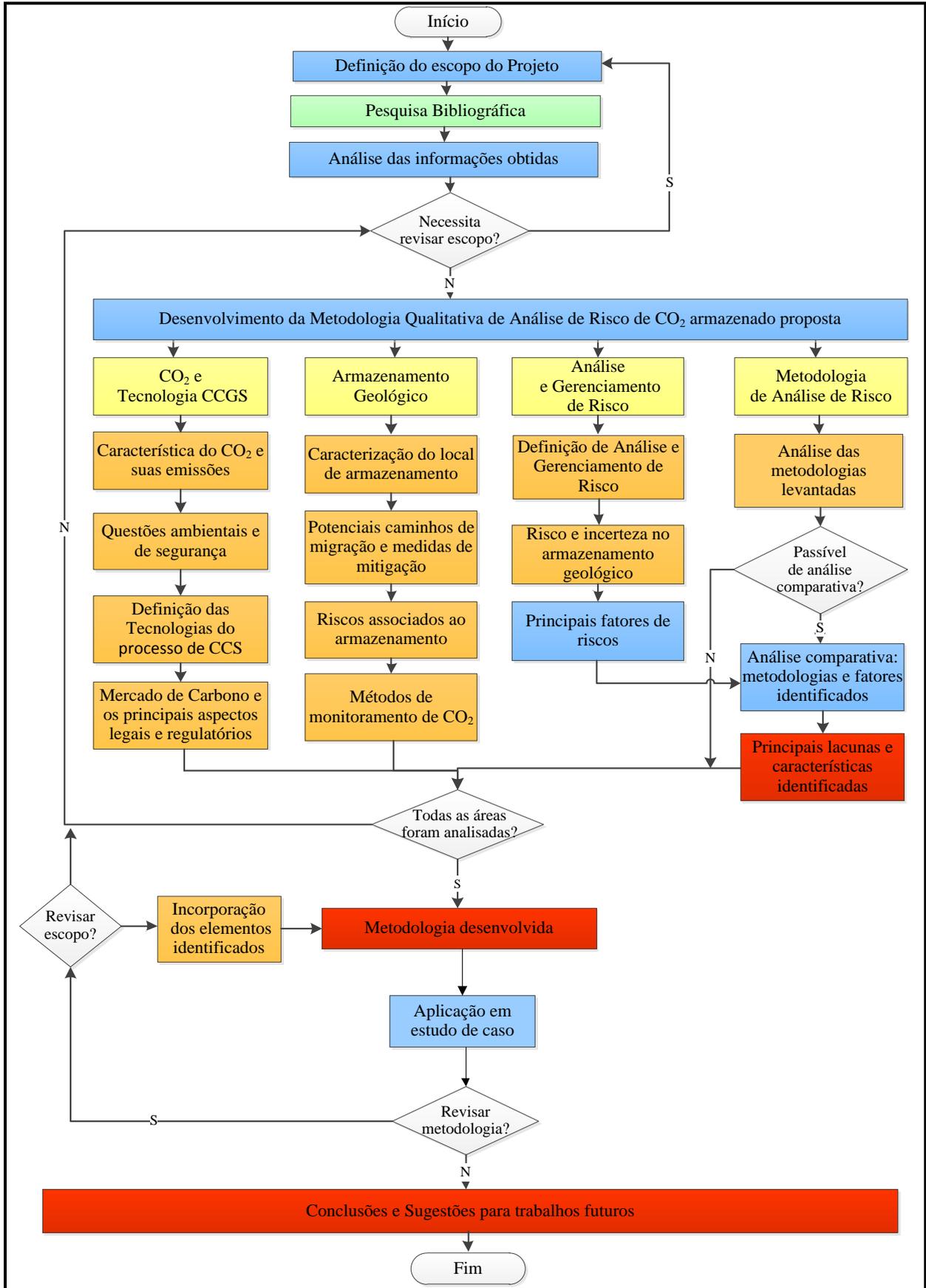


Figura 36 - Procedimento metodológico adotado para elaboração da dissertação.
 Fonte: Elaborado pela autora.

O procedimento metodológico foi elaborado de forma a buscar atender a proposta deste trabalho que consiste em propor uma metodologia qualitativa de avaliação de risco de CO₂ armazenado, uma vez que é de fundamental importância conhecer e compreender quais os riscos de fuga envolvidos no armazenamento de CO₂, assim como o quanto o confinamento é confiável para projetos de CGS.

Para o estudo de caso ilustrativo, a metodologia foi aplicada utilizando-se de dados concedidos pelo Projeto Campo Escola (UFBA/ANP). Dentre os Campos Caracatu, Quiambina, Riacho Sesmaria, Fazenda Mamoeiro e Bela Vista, devido à disponibilidade de informações geológicas, o Campo Fazenda Mamoeiro foi escolhido para análise.

Ressalta-se, que este trabalho restringiu-se a propor uma metodologia para avaliação das fases de injeção e pós-injeção de CO₂, etapas estas de responsabilidade da empresa que realizou a injeção. A etapa caracterizada pela transferência de responsabilidade do concessionário para a autoridade competente não faz parte do escopo.

Dentre as premissas adotadas, destaca-se que o local de armazenamento escolhido para o estudo de caso ilustrativo já apresenta características adequadas e necessárias para o armazenamento geológico do CO₂. As etapas correspondentes à triagem, seleção e caracterização não estão no escopo deste trabalho.

5.2. METODOLOGIA AR-CO₂ PROPOSTA

Foi realizado um mapeamento das principais características das metodologias qualitativas de análise de risco apontadas pelas referências Condor *et al.* (2011) e NETL (2011), as quais foram: VEF, SWIFT, MOSAR, FEP, CASSIF, SRF e MCA. Além destas metodologias, deram suporte ao desenvolvimento do trabalho: o banco de dados FEP desenvolvido pela Quintessa (2010), relatórios técnicos da DNV (2009, 2010, 2011) e Normas e Guias de Análise e Gerenciamento de Risco e Estratégias de Avaliação e Gerenciamento de Risco para sequestro de CO₂ em estruturas geológicas submarinas da London Convention (2006).

A partir do estudo comparativo realizado entre as metodologias citadas e os aspectos que influenciam o risco, identificou-se que os aspectos menos trabalhados pelas metodologias são os aspectos frequência e incerteza. Detectou-se também, que estas metodologias apresentam importantes aspectos complementares e dentro do que se propõe este trabalho há espaço para apresentar uma metodologia de fácil uso, aplicável para sistemas complexos e

dinâmicos, como é o caso do armazenamento de carbono, assim como para locais pouco ou bem conhecidos e que ainda seja possível trabalhar com todos os aspectos avaliados.

Uma metodologia que possibilite identificar sistematicamente as principais causas que levam ao impacto a: pessoas, imagem, instalações, meio ambiente e danos financeiros em virtude de vazamento de CO₂, identificar as salvaguardas necessárias para conter ou reduzir a frequência de ocorrência de vazamento ou a magnitude do impacto e mapear as incertezas que influenciam na estimativa de risco e ainda, que seja possível estimar o risco com base nas informações de frequência e consequência. Neste sentido, há espaço para uma metodologia que apresente características, tais como: baixo custo, praticidade, operacionalização, abrangência e transparência, as quais podem ser obtidas com a Metodologia AR-CO₂.

Os critérios e a abordagem a serem utilizados pela Metodologia proposta foram definidos a partir do conjunto de características positivas das metodologias de análise de risco para projetos de CGS e a partir da inserção de novos conceitos baseando-se nos relatórios e normas de análise e gerenciamento de risco conforme apresentados no Quadro 13.

Itens da Metodologia proposta	Definição sucinta	Referência
Estrutura da Metodologia	Estruturar as informações a serem trabalhadas pela metodologia.	FEPAM (2001), BAHIA (2009), DNV (2010), Sollie <i>et al.</i> (2011)
Compartimento	Principais caminhos de migração e vazamento de CO ₂ .	Perilhon (1999), Cherkaoui e Lopez (2009), FEPAM (2001), BAHIA (2009), Wildenborg <i>et al.</i> (2005), Yavuz <i>et al.</i> (2009)
Atenuantes	Também chamada de salvaguardas, são medidas e ações que podem reduzir o risco.	Perilhon (1999), Cherkaoui e Lopez (2009), FEPAM (2001), BAHIA (2009), Wildenborg <i>et al.</i> , (2005), Yavuz <i>et al.</i> (2009), DNV (2010), Sollie <i>et al.</i> (2011).
Agravantes	Itens que levam a intensificar o evento iniciador ou os efeitos do vazamento de CO ₂ .	Wildenborg <i>et al.</i> (2005).
Frequência	Chance do vazamento de CO ₂ ocorrer.	Perilhon (1999), FEPAM (2001), Cherkaoui e Lopez (2009), BAHIA (2009), DNV (2010), Sollie <i>et al.</i> (2011).
Severidade	Categorias de consequência ou impactos em virtude do vazamento de CO ₂ .	Perilhon (1999), FEPAM (2001), Wildenborg <i>et al.</i> , (2005), HSE (2008), Cherkaoui e Lopez (2009), BAHIA (2009), Yavuz <i>et al.</i> (2009).
Evento iniciador ou causa	Cada evento iniciador pode ter uma ou mais causas, sendo as mesmas responsáveis pela ocorrência do vazamento.	Perilhon (1999), FEPAM (2001), Wildenborg <i>et al.</i> (2005), EPA (2008), Cherkaoui e Lopez (2009), BAHIA (2009), DNV (2010), Sollie <i>et al.</i> (2011).
Incerteza	Nível de desconfiança ou dúvida das informações disponibilizadas durante a análise.	Oldenburg (2005, 2008), Yavuz <i>et al.</i> (2009), DNV (2010), Sollie <i>et al.</i> (2011).

Quadro 13 - Referencial para o desenvolvimento da Metodologia AR-CO₂.

Fonte: Elaborado pela autora.

Os critérios propostos para as categorias de frequência e severidades foram baseadas, também no Manual de Análise de Riscos Industriais (FEPAM, 2001), no *Risk Assessment Tool and Guidance* (HSE, 2008) e na Norma de Gerenciamento de Risco no Estado da Bahia (BAHIA, 2009), embora estes três não sejam específicos para o armazenamento de CO₂ tratam-se de referências técnicas consolidadas. O trabalho foi desenvolvido seguindo as diretrizes e guias apresentados na Norma ISO 31000 (2009) de forma a apresentar uma Metodologia de Análise de Risco consistente com esta norma.

A estrutura da Metodologia AR-CO₂ foi adotada com base na estrutura apresentada pela Metodologia SWIFT e pelas Metodologias HAZOP (*HAZard and OPerability Study*) e APP (Análise Preliminar de Perigos) consagradas pela indústria de processo, apresentadas em BAHIA (2009) e FEPAM (2001), nas quais uma planilha estruturada em colunas é preenchida. A divisão da análise por compartimento é a mesma adotada pela metodologia CASSIF no qual a análise de cenários é realizada baseando-se na avaliação dos três maiores cenários de vazamento de CO₂: poço, falha e selo. Polson, Curtis e Vivalda (2012) também ressaltam estes três, como potenciais caminhos de fuga para o CO₂.

Embora de maneiras diferenciadas, a incerteza quanto ao conhecimento das informações que estão sendo dispostas durante a análise são tratadas pelas Metodologias SWIFT, CASSIF, FEP e SRF. No caso da SWIFT faz-se um mapeamento da incerteza relacionada à probabilidade ou à consequência de perigos. Em relação ao CASSIF, para ter uma visão global dos fatores de risco potencialmente importantes, inicialmente os participantes da análise respondem a um questionário com informações sobre o local de armazenamento e nesse momento é exposta qual a incerteza da qualidade das informações disponibilizadas. Na metodologia FEP, a incerteza é associada à dúvida que se tem sobre a ocorrência de cenários. No método SRF, durante a análise dos obstáculos geológicos e do potencial de fuga próximo à superfície, as informações são inseridas em uma planilha onde o usuário pode ponderar as propriedades do atributo e suas incertezas a partir do fator denominado fator de certeza. Na metodologia AR-CO₂, a incerteza esta associada às informações de frequência e severidade e é expressa em percentagem, que varia de 0-100% conforme o consenso da equipe executora da análise.

Na análise FEP, os cenários são identificados e analisados tomando como base o banco de dados FEP, o qual contém conjuntos de FEPs que podem ter um efeito na segurança do sistema de armazenagem. A formação do cenário é proveniente de agrupamentos de EPs formadas a partir da identificação e análise dos fatores estáticos (F) e dinâmicos (EP), os quais são classificados de acordo com a probabilidade de ocorrência e do impacto. Na

metodologia AR-CO₂, as características “dinâmicas e estáticas” são incorporadas às condições agravantes de uma determinada causa a que levou ao vazamento indesejável de CO₂.

As causas para a ocorrência de vazamento são associadas às condições agravantes que podem intensificar negativamente a sua ocorrência assim como os fatores atenuantes. Ressalta-se que, uma condição tida como agravante em um determinado cenário pode ser a própria causa em outro cenário e, novas condições agravantes e atenuantes podem ser associadas a esta para a formação de um novo cenário. A principal característica da identificação da causa e dos fatores associados é que o risco obtido para cada cenário não tem efeito cumulativo. Assim, os resultados obtidos com as informações de cada cenário são mais robustos já que há um confronto de informações e avaliação da interação entre elas do mesmo modo que na Análise FEP. Dessa forma, o cenário global do sistema analisado estará sendo mapeado levantando todas as possíveis situações que possam levar ao vazamento de CO₂.

Os riscos são agrupados em categorias de acordo com as categorias de severidade como: pessoas, meio ambiente, imagem, instalações (armazenamento geológico) e financeiro. Estas categorias foram adotadas com base em FEPAM (2001), HSE (2008), BAHIA (2009) e DNV (2009, 2010, 2011), já os critérios adotados para a classificação de frequências são baseados em FEPAM (2001) e BAHIA (2009).

5.3. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA EM ESTUDO DE CASO ILUSTRATIVO

O procedimento utilizado para o estudo de caso seguiu-se, basicamente, a execução das etapas propostas pela Metodologia AR-CO₂. Inicialmente, foi definido o objetivo e escopo da análise assim como os participantes do grupo de trabalho. Em seguida, fez-se um levantamento de informações relevantes para análise, incluindo: dados geológicos, meteorológicos e da região. A partir das informações coletadas e compreensão do processo foi feita a análise por compartimentos (poço, selo e falhas) com o preenchimento da planilha.

Além das metodologias citadas, contribuições de especialistas e dados da literatura foram relevantes para construção dos cenários de risco.

6. METODOLOGIA QUALITATIVA PARA AVALIAÇÃO DE RISCOS DE CO₂ ARMAZENADO (AR-CO₂)

A Metodologia Qualitativa de Avaliação de Riscos de CO₂ armazenado (AR-CO₂) proposta é uma metodologia indutiva estruturada para identificar as potenciais causas que levam ao perigo de vazamento de CO₂ decorrente do sistema de armazenamento de CO₂ ou da própria operação do sistema, pelas vias: selo, poço e zona de falhas e fraturas. Para cada evento iniciador identificado é feito um levantamento dos potenciais impactos, fatores atenuantes e agravantes, a partir do qual se associa à frequência de ocorrência e à severidade. A partir da combinação das informações de frequência e severidade, é possível classificar qualitativamente o risco do cenário como sendo baixo, médio ou alto.

A Metodologia AR-CO₂ busca analisar as maneiras pelas quais o CO₂ pode ser liberado de forma indesejável ou descontrolado podendo levar a impactos: à imagem, ao meio ambiente, às pessoas, ao sistema de armazenamento e danos financeiros.

A metodologia é aplicável para avaliação das fases de operação a encerramento do poço de injeção de CO₂. Por esse motivo, o escopo da Metodologia AR-CO₂ envolve a análise de eventos, em que as causas tenham origem no sistema de armazenamento ou da própria operação do sistema, sejam estas falhas naturais ou operacionais. Devido às suas características, esta metodologia pode ser aplicada para:

- Analisar o poço, a rocha selo e as zonas de falhas e fraturas durante e após a fase de injeção de CO₂;
- Mapear os eventos iniciadores que podem resultar na fuga de CO₂;
- Mapear as condições agravantes que possam potencializar o vazamento de CO₂ e os atenuantes que tem potencial para minimizar ou reduzir os riscos;
- Avaliar a frequência de ocorrência e a consequência da fuga de CO₂;
- Avaliar qualitativamente o risco dos cenários identificados.

6.1. DADOS NECESSÁRIOS

Para a realização da análise é necessário determinar as condições de contorno, os limites a serem abordados e considerados na avaliação. Segundo a CETESB (2011), uma das primeiras etapas para a realização de um estudo de análise de risco é a obtenção de dados para a caracterização do empreendimento e da região, de forma a identificar os potenciais fatores que possam interferir na segurança e operação do sistema. Esta etapa contempla os aspectos relacionados às condições meteorológicas da região (temperatura, umidade relativa do ar, velocidade e direção de ventos), características da instalação (descrição física da instalação e do processo, características da substância, dados operacionais, dentre outros) e aspectos fisiográficos (localização, presença de habitantes, bem como quantidade e perfil da população, utilização agropecuária, dentre outros).

As informações descritas pela CETESB (2011) fazem-se necessárias para a caracterização de um empreendimento a ser realizado um estudo de análise de risco e pode ser aplicável a um sistema típico de armazenamento de CO₂ por se tratar de um sistema com potencial de causar danos. Entretanto, é importante ressaltar que além das informações citadas acima, devido às características do sistema de armazenamento, é indispensável buscar dados do poço e do ambiente geológico.

Muitas das informações geológicas e sobre o poço são obtidas e tratadas na etapa de caracterização do local, em que se faz necessário analisar o potencial dos dados geofísicos, geológicos, geomecânicos e hidrogeológicos. Para análise de risco, estes dados são de importância relevante, uma vez que permite melhor conhecer o sistema. Segundo IPCC (2005), dentre os dados típicos usados para caracterização estão, por exemplo:

- a) perfis sísmicos da área de interesse;
- b) dados sismológicos, dados geomorfológicos e investigações para indicar atividade tectônica;
- c) mapas detalhados de fraturas e falhas e dos limites estruturais da armadilha onde o CO₂ irá se acumular, especialmente destacando pontos e caminhos de fuga em potencial e;
- d) medições, incluindo: porosidade, permeabilidade, mineralogia, capacidade de vedação, pressão, temperatura, salinidade e testes laboratoriais para determinar a tensão da rocha.

Ressalta-se que, em relação aos poços, cada um tem suas particularidades e deve ser avaliado levando-se em conta o máximo de detalhes. De acordo com a DNV (2011) devem-se incluir dados de produção e dados históricos de intervenção e coordenadas direcionais do

local de armazenamento, sendo importante ressaltar falta de informação, dados ambíguos e incertezas.

As principais informações necessárias para execução da metodologia AR-CO₂ são resumidas no Quadro 14, as quais estão relacionadas à região, instalações, substância e ambiente geológico.

Informações	Descrição
Região	Dados demográficos e climatológicos Dados geológicos e geofísicos (propriedades das rochas e fluidos nela contidos)
Instalações	Premissas e especificações técnicas de projeto e de equipamento <i>Lay-out e P&D</i> da instalação (documentação técnica do processo) Descrição dos principais sistemas de proteção e segurança
Substância	Propriedades físico-químicas e termodinâmicas Características de toxicidade Limite de aceitabilidade de CO ₂ e impurezas presentes
Armazenamento geológico e poço de injeção	Tipo de armazenamento e delimitação da área de estudo Presença de armadilhas de CO ₂ e suas características Presença de selos primários e secundários e suas características Presença de fraturas e falhas e suas características Escala espacial e de tempo Histórico das atividades humanas na região Presença de poços de injeção e suas características

Quadro 14 - Informações necessárias para a realização da Metodologia AR-CO₂.

Fonte: Elaborado pela autora com base em Wildenborg (2005) e CETESB (2011).

6.2. EXECUÇÃO DA ANÁLISE AR-CO₂

Por ser uma metodologia qualitativa e, portanto resultado das informações disponíveis e da experiência dos integrantes da equipe executora, a análise deve ser realizada por uma equipe multidisciplinar. Aguiar (2009) sugere que cada reunião deve ser composta por uma equipe de cinco a oito pessoas.

Dentre os integrantes da equipe deve-se dispor de um com experiência em segurança e pelo menos um que conheça o processo envolvido. Para Nolan (1994), é fundamental a presença de, no mínimo, três tipos de profissionais para dar suporte à metodologia: o líder, o relator e os especialistas. Aguiar (2009) os define como sendo:

- Líder: a pessoa que conhece a metodologia, sendo responsável por explicar a metodologia a ser empregada aos demais participantes, conduzir as reuniões e definir o ritmo de andamento das mesmas, cobrando dos participantes pendências de reuniões anteriores.

- Relator: a pessoa que registra as informações, o relator tem poder de síntese para fazer anotações, preenchendo as colunas da planilha de forma clara e objetiva. Caso a equipe

seja pequena, o relator pode ficar responsável por definir a equipe, reunir e atualizar as informações, distribuir material para a equipe, programar as reuniões e encaminhar aos responsáveis as sugestões e modificações oriundas da planilha da avaliação de risco. Neste caso, AR-CO2.

- Especialistas: pessoas que detêm informações sobre o sistema a ser analisado ou experiência adquirida em sistemas similares, como por exemplo: engenheiro de reservatório, de segurança, de materiais e engenheiro químico, geólogo, geofísico, ecólogo, dentre outros, de forma que cada um contribua significativamente para o trabalho, pois o resultado final tem influência direta da experiência de cada um dos integrantes.

6.3. ESTRUTURA DA METODOLOGIA AR-CO2

O estudo do processo é feito por compartimentos (selo, poço e zonas de falhas e fraturas), onde a realização da análise propriamente dita é feita através do preenchimento de uma planilha, a qual contém nove colunas a serem preenchidas conforme descrição a ser observada no Quadro 15. A metodologia proposta compreende a execução das seguintes etapas:

- Definição dos objetivos e do escopo da análise assim como dos participantes do grupo de trabalho.
- Levantamento dos dados necessários para análise.
- Definição das fronteiras do processo analisado: subdivisão do processo em compartimentos de análise: selo, poço e zonas de falhas e fraturas.
- Realização da análise, consistindo no preenchimento da planilha: identificação das causas ou eventos iniciadores, condições agravantes e atenuantes, consequências, frequência e severidade, sugestões ou recomendações.
- Análise e materialização dos resultados: descrição da metodologia utilizada, destacando os eventuais critérios adotados na análise; elaboração das estatísticas dos cenários identificados por categorias de risco, frequência e severidade; conclusões gerais listando os cenários de risco identificados, as observações relevantes pontuadas durante a análise e ações necessárias para reduzir os riscos.

Os itens de avaliação (colunas) contemplados pela planilha proposta para a Metodologia AR-CO2 são apresentados no Quadro 15.

Metodologia de Avaliação de Riscos de CO ₂ Armazenado (AR-CO ₂)									
Equipe:		Área:		Sistema:		Data:			
Compartimento:		Agravantes		Atenuantes		Impactos / Consequências		Categoria de Frequência	
Evento Iniciador		Ações Dinâmicas		Condições Estáticas		Categoria de Severidade		Categoria de Risco	
						S		R	
						I		I	
						F		I	
								N ^o	
Responsável pela ocorrência do perigo de vazamento de CO ₂ com potencial para causar danos (Dinâmico).		São os fatores que intensificam ou contribuem negativamente para a ocorrência do perigo (Crônico). A ação é ao longo do tempo e o resultado sobre o evento iniciador é cumulativo e dinâmico.		São os fatores que intensificam ou contribuem negativamente para a ocorrência do perigo (Agudo). Condição eventual ou inerente ao processo, ambiente ou à operação.		São as condições que atenuam a ocorrência e o impacto do vazamento de CO ₂ .		As consequências ou impactos são os efeitos ocasionados com o vazamento de CO ₂ e que podem levar a danos às pessoas, à imagem, ao meio ambiente, às instalações e financeiros.	
						A frequência de ocorrência do cenário pode ser classificada como: frequente, provável, ocasional, remoto e improvável.		Incerteza associada à frequência.	
						As categorias de severidade adotadas são de impactos a: pessoas, imagem, meio ambiente, instalações e danos financeiros. Cada categoria de severidade pode ser classificada como: baixa, moderada, crítica e catastrófica.		Incerteza associada à severidade.	
						Os riscos são agrupados em categorias de acordo com as categorias de severidade e classificados como baixo, médio e alto.		Incerteza associada ao risco.	
						As observações são os principais aspectos identificados durante a análise e as ações são as medidas preventivas ou mitigadores propostas para redução do risco.			

Quadro 15 - Planilha utilizada na Avaliação de Riscos de CO₂ armazenado (AR-CO₂).

Fonte: Elaborado pela autora.

6.4. CATEGORIAS CONSIDERADAS NA METODOLOGIA AR-CO2

A planilha da Metodologia AR-CO2 (Quadro 15) apresenta nove colunas as quais são explanadas a seguir:

Causa ou Evento Iniciador (1ª Coluna): nesta coluna são discriminados todos os eventos iniciadores ou causas que possam acarretar em uma migração indesejável, vazamento ou fuga de CO₂ e que tem potencial para levar à perda financeira e a impactos negativos aos operadores, ao público, às instalações, ao meio ambiente e à imagem. Estas causas podem envolver tanto falhas intrínsecas de equipamentos (vazamentos, rupturas, falhas de instrumentação, entre outros) como erros humanos (erros de operação e manutenção) e ocorrências naturais (atividades sísmicas, presença de falhas e fraturas, entre outros). Como exemplo, temos:

- Falha mecânica ou química entre os revestimentos do poço, erro operacional, falha de equipamento, atividade sísmica, processos geomecânicos ou geoquímicos, sobrepressão, entre outros.

Agravantes (2ª Coluna): nesta coluna são discriminadas as ações e condições que podem intensificar a ocorrência dos eventos iniciadores contribuindo negativamente ou potencializando as ocorrências identificadas. As condições agravantes podem ocorrer devido a ações dinâmicas ou condições estáticas.

A ação dinâmica é crônica e pode facilitar ou intensificar a ocorrência do evento iniciador. A ação é ao longo do tempo e o resultado sobre o evento iniciador é cumulativo e dinâmico, ou seja, o efeito da sua ação não é imediato (crônico). Por exemplo:

- Ataque ou contaminação biológica (onde o evento iniciador é falha mecânica ou química entre o revestimento e o tampão do poço). O efeito que o ataque ou contaminação biológica terá sobre a causa não é imediato.
- Falta de treinamento (onde o evento iniciador é erro operacional). O efeito da falta de treinamento pode repercutir sobre a operação depois de um tempo.

A condição estática é uma condição eventual ou inerente ao processo, ambiente ou à operação. O resultado sobre o evento iniciador é imediato (agudo) e a escala de tempo é menor quando comparado com a escala de tempo da ação dinâmica. Por exemplo:

- Impureza presente no cimento do tampão do poço (onde o evento iniciador é falha mecânica ou química entre o revestimento e o tampão do poço). A impureza

existe, e ela por si só não evolui como ocorre com ataque ou contaminação biológica.

- Padrões ou ferramentas inadequados (onde o evento iniciador é erro operacional). O efeito sobre o evento iniciador é imediato.

Atenuantes (3ª Coluna): nesta coluna são discriminadas todas as condições atenuantes, relacionadas tanto com as causas quanto aos efeitos identificados e que possam reduzir a frequência e a severidade dos cenários de risco. Por exemplo:

- Avaliação das propriedades mecânicas do cimento utilizado no poço (onde o evento iniciador é falha mecânica ou química entre o revestimento e o tampão do poço). A medição e controle de parâmetros que podem impactar a integridade do poço é uma forma de se reduzir o risco do cenário.
- Realização de treinamento e procedimentos operacionais, controle de qualidade e controle administrativo (onde o evento iniciador é erro operacional).

Consequências (4ª Coluna): nesta coluna são discriminados todos os efeitos ou consequências esperadas em decorrência do evento iniciador identificado. São os efeitos que podem impactar e levar a danos financeiros, pessoas, imagem, meio ambiente e instalações do sistema de armazenamento.

Frequência (5ª Coluna): nesta coluna consta a categoria de frequência e a incerteza dessa informação associado ao cenário de risco. Cada cenário é classificado de acordo com a sua categoria de frequência, a qual fornece uma indicação qualitativa da frequência esperada de ocorrência, conforme apresentado como proposta no Quadro 16. A incerteza associada às informações de frequência é expressa em percentagem e varia entre 0 e 100% conforme o consenso da equipe executora.

Sigla	Denominação	Descrição
IM	IMPROVÁVEL	Conceitualmente possível, mas extremamente improvável de ocorrer durante a vida útil do projeto.
RE	REMOTA	Não esperado ocorrer durante a vida útil do projeto. Requer falhas múltiplas
OC	OCASIONAL	Pouco provável de ocorrer. Requer falha dupla ou simples retardada.
PR	PROVÁVEL	Esperado ocorrer durante a vida útil do projeto/instalação. Requer falha simples.
FR	FREQUENTE	Esperado de ocorrer várias vezes durante a vida útil do projeto.

Quadro 16- Exemplo de categorias de frequências para a Metodologia AR-CO2

Fonte: Adaptado de FEPAM (2001) e BAHIA (2009).

Severidade (6ª Coluna): nesta coluna consta a categoria de severidade e a incerteza dessa informação associado a cada cenário de risco. A descrição detalhada de cada categoria é apresentada como proposta no Quadro 17.

Impacto	Descrição			
	BA	MO	CR	CA
	BAIXO	MODERADO	CRÍTICO	CATASTRÓFICO
MEIO AMBIENTE	Ligeiro efeito - Sem danos ou com danos mínimos ao meio ambiente. - Impacto ambiental de pequena magnitude com alcance interno ou externo, reversível com ações imediatas.	Efeito menor - Danos devido a situações ou valores considerados toleráveis entre níveis mínimo e médio.	Efeito local - Grande ocorrência ambiental provocando danos em uma vasta região. - Danos devido a situações ou valores considerados toleráveis entre níveis médio e máximo.	Efeito massivo - Grande ocorrência ambiental provocando danos em uma vasta região. - Danos devido a situações ou valores considerados acima dos níveis máximos toleráveis.
PESSOAS	Ligeiro ferimento - Acidente sem afastamento (SAF sem restrições). - Desconforto em decorrência do evento na área local.	Ferimentos - Acidente com afastamento (CAF) ou SAF com restrição. - Evasão de funcionários.	Fatalidade - Vítimas com lesões incapacitantes permanentes ou com vítima fatal. - Evasão de comunidade externa	Fatalidades múltiplas* - Provoca morte ou lesões graves em uma ou mais pessoas. *Múltiplos = depende do projeto, da empresa, do contexto.
IMAGEM	Ligeiro impacto - Sem registro ou registro não significativo em mídia local.	Impacto local - Possíveis questionamentos externos com registro de incidente por comunidade vizinha.	Impacto regional - Reclamações e registro do incidente pela comunidade vizinha repercutindo em mídia regional.	Impacto nacional ou Internacional - Protestos e manifestações repercutindo em mídia nacional e internacional.
INSTALAÇÕES	Dano menor ou nenhum dano - Nenhuma migração ou migração dentro do sistema de armazenamento - Sem danos ou danos insignificantes. - Acidente restrito ao local de origem do problema.	Dano local - Migração indesejável para fora da zona de armazenamento - Impacto de magnitude considerável, porém reversível com ações mitigadoras restritas à área do sistema de estocagem.	Danos severos - Vazamento para a zona vadosa sobre área menor que 100m ² - Impacto de magnitude considerável, porém reversível com ações mitigadoras que extrapolam o limite do sistema de análise.	Danos irreparáveis e extensivos (reparação lenta ou impossível) - Vazamento para a zona vadosa sobre área maior que 100m ² - Impacto irreversível ou de difícil reversão mesmo com ações mitigadoras ou impacto de grande magnitude e grande extensão.
FINANCEIRO	Perda insignificante para o que foi investido no projeto.	Perda significativa com comprometimento reversível dos investimentos realizados para o projeto.	Perda significativa com comprometimento parcialmente reversível dos investimentos realizados para o projeto.	Comprometimento irreversível dos investimentos realizados para o projeto.

Quadro 17 - Exemplos de categorias de severidade para a Metodologia AR-CO2.

Fonte: Elaborado pela autora com base em HSE (2008), Hnottavange-Telleen, Krapac e Vivalda (2009), Polson, Curtis e Vivalda (2009), BAHIA (2009) e DNV (2009, 2010, 2011).

Conforme Quadro 17, cada categoria pode ser classificada como catastrófico, crítico, moderado e baixo frente ao impacto que pode provocar sobre a segurança das pessoas, meio ambiente, imagem, instalações e danos financeiros. A incerteza associada às informações de severidade é expressa em porcentagem e varia entre 0 e 100% conforme o consenso da equipe executora.

Risco (7ª Coluna): o risco associado a cada cenário é discriminado nesta coluna. O risco é obtido como resultado da combinação das informações de frequência e severidade podendo ser classificada como baixo, médio e alto conforme Matriz de Risco apresentada como proposta no Quadro 18. Em seguida é apresentada a condição de classificação, a qual se baseia nos critérios adotados em BAHIA (2009).

Sendo o risco, resultado da combinação da frequência de ocorrência do evento e das consequências geradas por esses, a redução dos riscos pode ser obtida por meio da implementação de ações preventivas, que reduzam as frequências de ocorrência ou por meio de ações corretivas que reduzam as consequências. A seleção da opção mais adequada dependerá do equilíbrio entre os custos, esforços e os benefícios decorrentes da implementação destas. A decisão deve levar em consideração se o tratamento dado ao risco é economicamente justificável.

Os riscos obtidos para todos os cenários estão associados a uma incerteza, proveniente dos valores estipulados da frequência e consequência. Para cenários que apresentem incerteza superior a 50%, devem-se propor medidas para reduzir a incerteza.

MATRIZ DE RISCO			Categoria de Frequência				
			IM	RE	OC	PR	FR
			Improvável	Remoto	Ocasional	Provável	Frequente
Categoria de Severidade	CA	Catastrófico	MÉDIO	MÉDIO	ALTO	ALTO	ALTO
	CR	Crítico	BAIXO	MÉDIO	MÉDIO	ALTO	ALTO
	MO	Moderado	BAIXO	BAIXO	BAIXO	MÉDIO	ALTO
	BA	Baixo	BAIXO	BAIXO	BAXIO	BAIXO	MÉDIO

Quadro 18 - Exemplo de matriz de classificação de risco para a Metodologia AR-CO2.

Fonte: Elaborado pela autora com base em BAHIA (2009) e DNV (2010).

Risco Alto: Esta categoria indica uma condição de classificação de risco inaceitável para o cenário avaliado. Assim, para os cenários de risco classificados como alto, deve ser realizada uma estimativa mais rigorosa além da necessidade de se propor medidas de redução de risco que devem ser implementadas em caráter obrigatório e imediato. Há a necessidade de estudos complementares como, por exemplo, Análise Quantitativa de Riscos.

Risco Médio: Esta categoria indica uma condição de classificação de risco intermediário em que se faz necessário propor ações corretivas e recomendações, as quais necessitem ser apresentadas assim como seus respectivos prazos para implementação. As recomendações são de caráter obrigatório, entretanto sem a necessidade de implementação imediata. Os cenários de riscos classificados como risco médio devem ser objeto de uma análise mais detalhada para diminuir os riscos e as incertezas da análise. Após estas ações, esgotadas as possibilidades de melhorias, os mesmos podem ser considerados como aceitáveis ainda que continuem classificados como risco médio. Esta condição remete a um cenário considerado como ALARP, em que de acordo com BAHIA (2009) corresponde a uma região onde os riscos devem ser reduzidos, mas as medidas de redução devem ser implementadas, somente se, os seus custos não forem excessivamente altos ou as medidas forem consideradas tecnicamente viáveis.

Risco Baixo: Esta categoria indica uma condição de classificação de risco como aceitável, em que a proposição de recomendação para redução da frequência ou da severidade, assim como estudos complementares não são necessários. Sugestões, observações e ações de melhorias podem ser propostas, entretanto a sua implementação não é obrigatória.

Observações e Ações (8ª Coluna): nesta coluna são listadas as observações, sugestões e ações necessárias, de forma a promover a redução da frequência ou severidade dos cenários quando necessário, assim como pontuar informações que sejam relevantes para posteriores análises.

Número do cenário (9ª Coluna) Nesta coluna está disposto um número sequencial referenciando cada um dos cenários de risco para facilitar a sua identificação.

O modelo conceitual da Metodologia AR-CO2 é apresentado na Figura 37. Inicialmente, os objetivos e escopo da análise devem ser definidos para então se levantar os dados necessários para a formação dos cenários através do preenchimento da planilha AR-CO2. Para cada compartimento (selo, poço e zonas de falhas e fraturas), os cenários são elaborados a partir da identificação dos eventos iniciadores e, para cada evento iniciador são identificados os principais fatores agravantes e atenuantes assim como as potenciais consequências. Estas informações darão subsídio para a classificação do cenário quanto às

categorias de frequência e severidade. A cada uma dessas categorias são informadas as incertezas que se tem em relação à informação fornecida. Baseando na matriz de risco, a partir da combinação da frequência e severidade é possível classificar os cenários de risco como sendo baixo, médio ou alto. Cada um dos cenários de risco apresenta um valor de incerteza proveniente dos valores de incerteza associados às informações de frequência e severidade. Cada cenário de risco deve apresentar valor de incerteza abaixo de 50 %, caso seja superior a este valor devem-se propor medidas para a sua redução. Em relação aos cenários de risco, devem ser propostas medidas para redução quando classificados como alto ou médio e observações de melhoria (se necessário) quando classificados como baixo. Todos os cenários de risco devem ser monitorados para mantê-los dentro das condições de segurança consideradas como aceitáveis ou toleráveis.

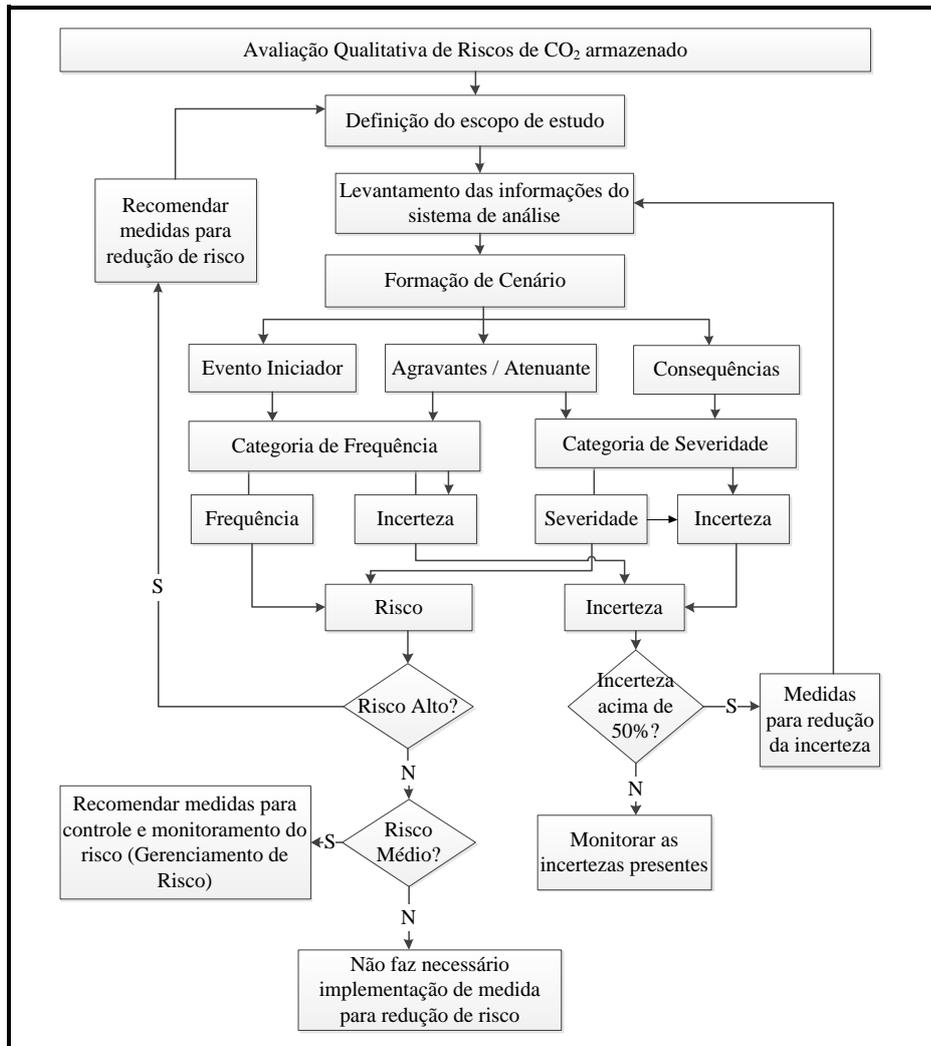


Figura 37 - Modelo conceitual da Metodologia AR-CO2.

Fonte: Elaborado pela autora.

7. ESTUDO DE CASO ILUSTRATIVO DO CAMPO FAZENDA MAMOEIRO

Como estudo de caso ilustrativo¹¹, a Metodologia AR-CO₂ proposta foi aplicada para análise do Campo Fazenda Mamoeiro, um dos campos do Projeto Campo Escola (PCE). Neste capítulo serão apresentados: o Projeto PCE, as premissas adotadas e a caracterização do sistema de armazenamento.

7.1. PROJETO CAMPO ESCOLA

O PCE foi criado, em julho de 2003, pela ANP em parceria com a UFBA e apoio da Fundação de Apoio à Pesquisa e à Extensão (FAPEX) com o objetivo de operacionalizar e gerir os campos de Caracatu, Quiambina, Riacho Sesmaria, Fazenda Mamoeiro e Bela Vista além capacitar mão de obra local treinada em operação de campos de petróleo e gás, desenvolvimento de tecnologias para extração e aperfeiçoamento do ensino (OLIVEIRA JÚNIOR; SILVA; OLIVEIRA JÚNIOR, 2005). As principais informações sobre os campos são apresentados no ANEXO A.

Dentre os campos apresentados, para o estudo de caso ilustrativo foi selecionado o Campo Fazenda Mamoeiro. Devido a limitações de tempo para execução e conclusão do trabalho, o critério adotado para a seleção do local de armazenamento foi em função do acesso às informações do campo para o período e, dentre as informações disponibilizadas ressalta-se: desenho esquemático do poço (Figura 38) e seção geológica (Figura 40).

7.2. OBJETIVO E ESCOPO DO ESTUDO

O escopo do estudo engloba as instalações do Campo Fazenda Mamoeiro constituído das zonas de injeção e de confinamento. Da zona de injeção faz parte o poço, enquanto a zona de confinamento inclui a potencial área geológica para a armazenagem indo desde a rocha reservatório até a superfície e ocupando 4,7 km², área correspondente ao campo. O Campo Fazenda Mamoeiro está localizado na Bacia do Recôncavo, no município Entre Rios, a 120 km da cidade de Salvador.

¹¹ O estudo de caso foi a estratégia utilizada para apresentar a sistemática da Metodologia AR-CO₂, via sua simulação, baseando-se em dados típicos de um caso real. Ressalta-se que o estudo de caso apresentado se trata de um estudo meramente ilustrativo e, neste caso, para fins acadêmicos.

Este estudo tem como objetivo analisar qualitativamente os riscos envolvidos no armazenamento geológico de CO₂ que possam colocar em risco a saúde e a segurança da população presente no entorno das instalações assim como causar danos aos operadores, às próprias instalações e ao meio ambiente. Também foi avaliado como o vazamento pode impactar a imagem e aspectos financeiros do projeto.

A avaliação de risco foi feita utilizando-se da Metodologia AR-CO₂ que visa analisar as maneiras pelas quais o CO₂ pode ser acidentalmente liberado. Para a análise propriamente dita, levou-se em consideração informações como: distribuição populacional, classificação de vento regional por intensidade e direção, estabilidade atmosférica, dados geológicos, dentre outros que influenciam diretamente na análise.

Com o objetivo de nortear a análise, a caracterização dos cenários de vazamento foi feito com base na avaliação qualitativa das frequências de ocorrência, da severidade das consequências e critério de aceitabilidade de riscos apresentados na Seção 6.4.

7.3. PREMISSAS E RESTRIÇÕES ADOTADAS

As premissas¹² adotadas para a execução das análises e condução deste trabalho foram:

- O fluido de injeção é CO₂ com pureza de 99%;
- A densidade do fluido de injeção é de aproximadamente 650 kg/m³;
- Foi considerada a presença de água de produção com pH variando entre 6,7 e 7,4 e com presença de sólidos suspensos totais em torno de 600 mg/L e teor de óleos e graxas de 220 mg/L;
- Foi considerada a presença (resquícios) de óleos, gases e ácido sulfídrico assim como bactérias redutoras de sulfato (BRS);
- A injeção será feita pelo poço existente 01-FMO-001-BA;
- O propósito da injeção de CO₂ no poço 01-FMO-001-BA é apenas para armazenamento de carbono, não estando no escopo da análise a recuperação avançada de hidrocarbonetos;
- De acordo com o programa de reabilitação, estima-se que o poço ainda possui potencial de produção de hidrocarbonetos (OLIVEIRA JUNIOR, 2009). Entretanto, o poço foi considerado com pressão insuficiente para entrar em surgência;

¹² Por se tratar de um estudo de caso ilustrativo e, portanto, uma simulação da Metodologia AR-CO₂ para fins acadêmicos, algumas das premissas adotadas não refletem a realidade do Campo Fazenda Mamoeiro.

- A capacidade do poço atende aos critérios de projeto estabelecidos para o CO₂ proveniente de Empresa situada no Polo Industrial da região de Camaçari;
- A análise de risco engloba as fases de responsabilidade do operador, ou seja, período de injeção e encerramento do poço;
- Para cada cenário de risco analisado, os atenuantes (barreiras existentes) serão levados em consideração para caracterização das categorias de frequência e severidade;
- Não serão considerados como atenuantes: procedimentos operacionais e equipamentos de proteção individual;
- Para análise, considerar-se-á que as instalações atendem aos demais requisitos mínimos legais de licenciamento ambiental;
- Em relação ao processo foi considerada a presença de um sistema instrumentado de segurança de pressão;
- Não foi considerada a existência de plano de resposta à emergência;
- A análise não inclui programa de gerenciamento de risco.

As restrições adotadas para a execução das análises e condução deste trabalho foram:

- O CO₂ deverá ser injetado em estado supercrítico.
- A quantidade máxima de CO₂ a ser injetado no Campo Fazenda Mamoeiro é aproximadamente 18 kt;
- A rocha reservatório está localizada a uma profundidade superior a 800 m;
- A espessura da rocha selo é maior que 100 m e a sua extensão ultrapassa a área de 4,7 km²;
- Os períodos de tempo para as fases de operação e encerramento são 3 e 30 anos, respectivamente;

7.4. CARACTERIZAÇÃO DAS INSTALAÇÕES ANALISADAS

O campo Fazenda Mamoeiro situa-se na Bacia do Recôncavo, onde se encontra o poço 01-FMO-001-BA com profundidade total de 3.622 m. De acordo com os estudos realizados, os reservatórios portadores de hidrocarbonetos são arenitos da Formação Água Grande e as acumulações ocorrem à profundidade de 3.250 m, região esta em que apresentou indícios de

hidrocarbonetos no intervalo entre 1.839 m e 3.484 m. Os volumes originais *in situ*¹³ de óleo e gás foram estimados na ordem de 3,07 milhões de m³ (19,3 milhões de barris) e 1,28 bilhões de m³, respectivamente, enquanto as produções acumuladas foram 99 mil barris de óleo (15,7 mil m³) e 16,6 milhões de m³ de gás (UNICAMP, 2000; OLIVEIRA JUNIOR, 2009).

7.4.1. Infraestrutura e Histórico de Exploração e Produção

Conforme Relatório “Projeto Campo Escola: Fazenda Mamoeiro” elaborado pela UNICAMP (2000) e concedido pelo PCE, o campo Fazenda Mamoeiro foi descoberto pelo poço 1-FMO-1-BA (Figura 38).

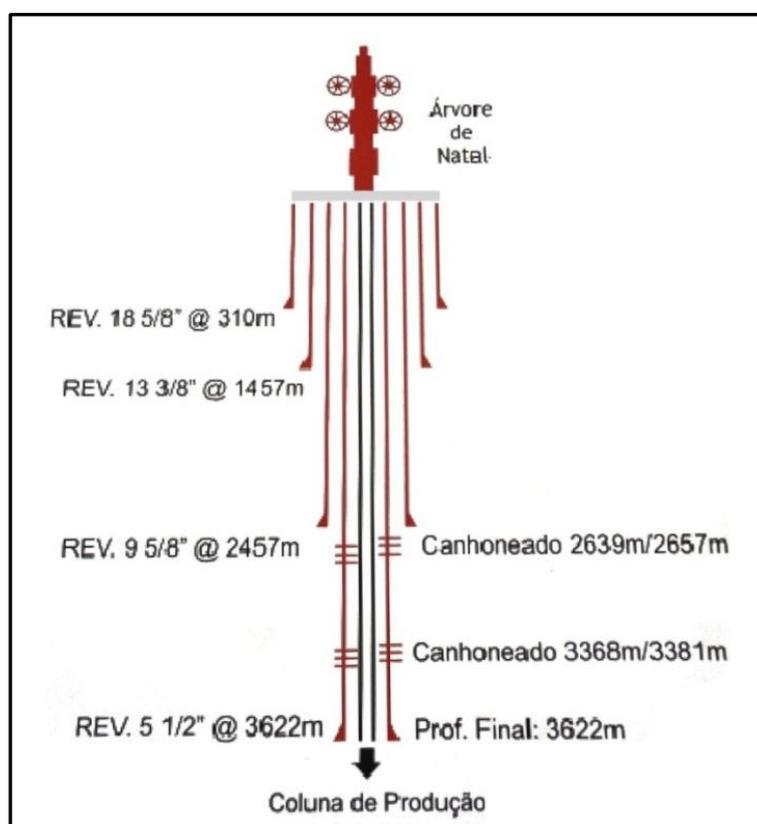


Figura 38 - Desenho esquemático do poço em Fazenda Mamoeiro.

Fonte: Elaborado pela autora.¹⁴

¹³ De acordo com análise dos dados de produção e volumes originais, os resultados encontrados pela UNICAMP (2000) indicam que o volume original de óleo e gás é bem menor do que o reportado (3,07 milhões de m³ de óleo e 1,28 bilhões de m³ de gás). Dentre as razões, estão: a) o fator de formação de volume indicado para a Formação Água Grande é bem menor daquele obtido por correlação, o que reduz o volume de óleo em cerca de 20%; b) a solubilidade do gás no óleo obtido em dados de produção em teste prolongado e bem controlado é bem menor (cerca da metade) do que o utilizado para o cálculo do volume de gás e c) a existência de óleo no Sergi é questionável, pois, além de não ter sido testado, apresenta porosidade de 3 a 6%. A partir dessas considerações, o volume de óleo fica reduzido de 3,07 para 2,21 milhões de m³ e o volume de gás de 1,28 bilhões para 456 milhões de m³. A ausência de mapas estrutural e de isólicas não permite avaliar a confiabilidade do volume original *in situ* de óleo.

¹⁴ Foto do desenho esquemático do poço 1-FMO-001-BA tirada em visita ao Campo. Autorizada pelo PCE.

O poço 1-FMO-001-BA foi perfurado até uma profundidade de 3.622 m, com sapata do revestimento de 5 1/2" localizado em 3.622 m, sendo que este revestimento se estende até a superfície. O poço foi canhoneado em dois trechos: 3.360 m a 3.381 m e, 2.639 m a 2.657 m. Quando o poço foi devolvido continha 5 tampões de cimento nos seguintes intervalos: 3.275 – 3.390 m, 2.569 – 2.659 m, 1.350 – 1.450 m, 250 - 353 m e finalmente, 2 m até a superfície e, para abandono definitivo da área seria necessário retirar a cabeça de produção e 150 m de linha de produção (UNICAMP, 2000). Os tampões foram retirados e atualmente a situação do poço e das instalações são apresentadas na Figuras 38 e 39.



Figura 39 - Instalações do poço em Fazenda Mamoeiro.

Fonte: Elaborada pela autora¹⁵.

O poço que produziu por surgência, visava testar a feição dômica alongada na direção NE-SW, mapeada pela sísmica ao nível da Formação Sergi. Os principais objetivos eram os reservatórios das formações Água Grande e Sergi e, em segundo plano, os reservatórios das formações Pojuca e Marfim (UNICAMP, 2000). As principais características das formações Marfim e Água Grande são apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 - Características das Formações do Campo Fazenda Mamoeiro.

Formação	Intervalo (m)	Espessura (m)	Porosidade (%)	Saturação da água (%)	Fluido
Formação Marfim	2.465 – 2.478	5,0	10-13	58	Óleo? ¹⁶
Formação Marfim	2.638 – 2.660	5,3	10-12	55	Óleo?
Formação Água Grande	3.365 – 3.385	13	12-17	14-25	Óleo

Fonte: UNICAMP (2000).

¹⁵ Foto das instalações do Campo Fazenda Mamoeiro tirada em visita ao Campo. Autorizada pelo PCE.

¹⁶ O sinal de pontuação representado pelo sinal gráfico "?" para o fluido óleo da Formação Marfim indica dúvida quanto a presença do fluido nesta região conforme Relatório da UNICAMP (2000).

7.4.2. Caracterização Geológica e Física do Reservatório

De acordo com os estudos da UNICAMP (2000), o campo Fazenda Mamoeiro apresenta uma acumulação de óleo, localizada em reservatórios da Formação Água Grande, o qual é constituído por arenitos siliciclásticos depositados em ambiente fluvial com retrabalhamento eólico no topo (Eocretáceo). A acumulação está situada no ápice de uma estrutura homoclinal, associado a um bloco escalonado, limitado a W e a E por falhas normais, com mergulho para NW. O traçamento existente é do tipo estrutural, sendo o fechamento proporcionado por mergulho e o selo pelos folhelhos da Formação Candeias. Apesar do mecanismo inicial de produção ser gás em solução com pequena recuperação prévia devido à expansão de líquidos, o principal fluido do reservatório da Formação Água Grande é óleo leve de 36 °API. A pressão original e a pressão de saturação do reservatório são 344 kgf/cm², estando originalmente subsaturado. As características de permeabilidade, viscosidade e espessura definem o reservatório como de baixa transmissibilidade em cerca de 127 mD.m/cP. As características gerais e da rocha da Formação Água Grande são apresentadas nas Tabelas 11 e 12.

Tabela 11 - Características gerais e da rocha da Formação Água Grande.

Dados Gerais				Rochas		
Profundidade (m) (n. mar)	Pressão de Saturação (kgf/cm ²)	Temperatura (°C)	Espessura HC (m)	Porosidade (%)	Permeabilidade (mD)	Saturação da Água (%)
3.250	344	116	16,5	15	2,0	16

Fonte: UNICAMP (2000).

Tabela 12 - Características do óleo e do gás da Formação Água Grande.

Óleo					Gás			
Pressão de saturação (kgf/cm ²)	Razão de solubilidade (m ³ /m ³)	Densidade (°API)	Viscosidade (cP @ °C)		Bo (m ³ /m ³)	γ _g (ar=1)	P.Cal. (kcal/m ³)	B _g (m ³ /m ³)
275*	211**	42,7	0,26*	116	1,77*	0,84	9.400	0,0045*

Bo – Fator volume de formação do óleo

B_g – Fator volume de formação do gás

* obtido por correlação ** dados de produção

Fonte: UNICAMP (2000).

De acordo com Wildenborg *et al.* (2004), o conceito de armazenamento em reservatórios de óleo e gás depletados é que a recuperação de óleo cria espaços para armazenar CO₂, sendo três os principais parâmetros para determinar o potencial de armazenamento de CO₂: a densidade do CO₂ (ρ_{CO_2}) nas condições do reservatório, os fatores

volume de formação do óleo (B_o) e do gás (B_g). Nesse sentido, as equações que podem ser utilizadas para calcular a capacidade do armazenamento em campos de óleo e gás são 1 e 2 respectivamente :

$$V_{CO_2(\acute{o}leo)} = V_{CO_2} = \left(V_{oil(stp)} / 1000 \right) \times B_o \times \rho_{CO_2} \quad (1)$$

$$V_{CO_2(gás)} = V_{CO_2} = V_{gás(stp)} \times B_g \times \rho_{CO_2} \quad (2)$$

onde:

- V_{CO_2} = Capacidade de armazenamento de CO_2 [Mt]
- $V_{oil(stp)}$ = Volume de óleo recuperado nas condições padrão [10^6 m³]
- $V_{gas(stp)}$ = Volume de gás recuperado nas condições padrão [10^9 m³]
- B_o = Fator volume de formação do óleo [-]
- B_g = Fator volume de formação do gás [-]
- ρ_{CO_2} = Densidade do CO_2 nas condições do reservatório [kg / m³]

Como, segundo o Relatório da UNICAMP (2000), o principal fluido da Formação Água Grande é óleo, a capacidade teórica de armazenamento de CO_2 foi estimada baseando-se na produção acumulada de óleo (15,7 mil m³) do Campo Fazenda Mamoeiro. Assim, a partir da equação 1, da informação de produção acumulada e dos parâmetros: densidade $\rho_{CO_2} = 650$ kg/m³ e $B_o = 1,77$ m³/m³, tem-se que a capacidade teórica é estimada em aproximadamente 18 kt de CO_2 .

De acordo com WorleyParsons (2011) são quatro as categorias de classificação para projetos de captura e armazenamento: laboratorial, piloto, demonstração e comercial. Esta classificação se baseia em percentagem da escala comercial. Considerando projetos como Sleipner, In Salah e Weyburn de escala comercial com capacidade de injeção em torno de 20 Mt, o Campo Fazenda Mamoeiro pode ser classificado como um projeto de laboratório (projeto experimental) em que a escala é menor que 5% deste valor.

7.4.3. Seção Geológica

De acordo com Simões de Oliveira, Jesus e Miranda (2006) a Bacia do Recôncavo formou-se em duas fases: na primeira fase, chamada pré-rifte, sedimentos constituído por arenitos continentais e folhelhos lacustrinos foram depositados em um período de relativa calma tectônica, e; a segunda fase, chamada de sin-rifte, iniciou-se durante o Neocomiano,

com a predominância de falhamento normal e a deposição de grandes espessuras de conglomerados grosseiros próximo às falhas de borda (Formação Salvador). No centro da bacia, formaram-se lagos profundos que foram preenchidos por folhelhos, arenitos turbidíticos e deltaicos com intercalações cíclicas de arenitos, folhelhos e calcários (Formação Pojuca) e arenitos fluviais (Formação São Sebastião) preenchem a calha do rifte. A coluna estratigráfica e a seção geológica esquemática da Bacia do Recôncavo são apresentadas nos ANEXOS B e C.

Além das formações Pojuca e São Sebastião, o poço 01-FMO-001-BA está em contato com as Formações Marfim, Candeias, Água Grande, Itaparica, Sergi e Aliança conforme apresentado na Figura 40. Nesta mesma figura observa-se a presença de outros poços (do lado esquerdo do poço 01-FMO-001-BA) que estão fora do domínio de análise, pois não pertencem ao PCE. Desta forma, suas informações não estão disponíveis.

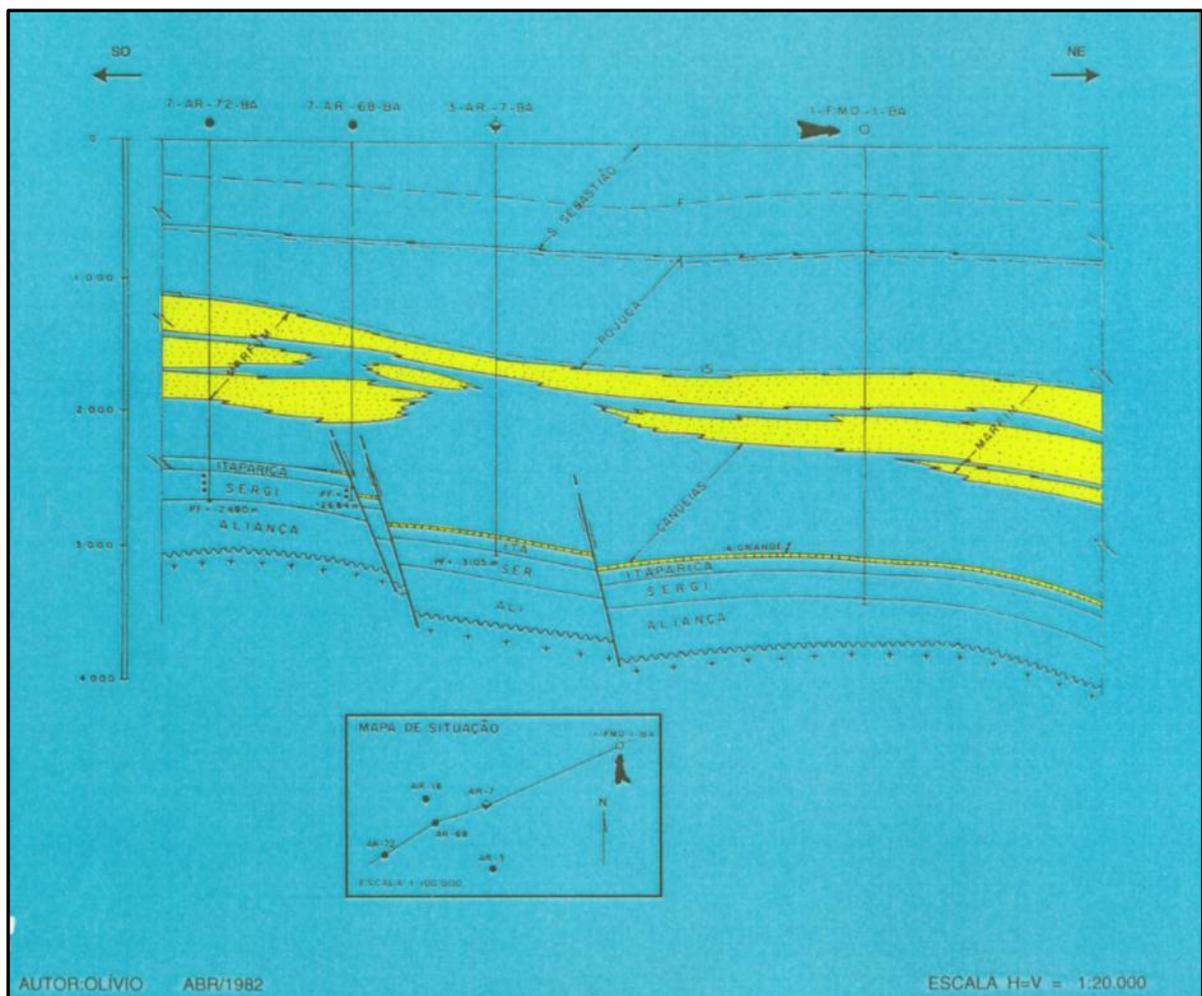


Figura 40 - Seção geológica do Campo Fazenda Mamoeiro.
 Fonte: Informação concedida pelo Projeto Campo Escola (PCE).

Santos (2011) em seu estudo apresenta algumas características dessas formações. A Formação Sergi é composta por arenitos finos a conglomeráticos, com intercalações de folhelhos vermelhos a cinza esverdeados enquanto a Formação Aliança consiste de arenitos avermelhados que variam de finos a conglomeráticos. A Formação Itaparica, sobreposta concordantemente à Formação Sergi, é caracterizada por folhelhos e siltitos com raras intercalações de arenitos finos. A Formação Água Grande, sobreposta a Formação Itaparica, é constituída por arenitos finos a grossos. Já a Formação Candeias consiste de folhelhos cinza escuros, ricos em matéria orgânica. A Formação Marfim é constituída por arenitos finos a médios intercalados a camadas de folhelhos cinza esverdeados. A Formação Pojuca, por sua vez é constituída por arenitos finos a médios e folhelhos cinza, siltitos e biocalcarenitos ostracoidais.

A Formação São Sebastião é constituída por arenitos bem estratificados e algumas vezes maciços, com composição predominantemente arenosa e espessura que chega a 3.000 m. A espessura de água doce presente nas areias desta Formação chega até 1000 metros (FONSECA, 2004).

7.4.4. Potencial do Reservatório para Injeção de CO₂ para EOR

O campo Fazenda Mamoeiro foi um dos campos devolvidos pela PETROBRAS por ser considerado como economicamente marginal e foi designado pela ANP para compor o PCE na Bahia. Embora Câmara (2004) apresente definições que distinguem campos maduros de campos marginais, para efeito de simplificação deste trabalho os mesmos serão considerados como campos antieconômicos e que necessitam de operações e tecnologias para recuperar a sua rentabilidade.

A partir de estudo realizado pela UNICAMP (2000), embora o poço do campo Fazenda Mamoeiro não tenha utilizado elevação artificial, é possível produzir óleo e gás em pequenas vazões injetando água para aumentar a pressão do reservatório e, conseqüentemente, o fator de recuperação. Para isso, seria necessária a perfuração de novos poços, o que acaba por inviabilizá-lo economicamente.

Caponero (2009) sugere que uma das formas de aumentar o fator de recuperação de hidrocarbonetos e conseqüentemente aumentar a vida útil e o fluxo de caixa do campo é utilizar a injeção do CO₂. Além deste, a possibilidade de se contar com créditos de carbono advindos de projetos MDL, eleva ainda mais o potencial para armazenamento geológico nesses campos.

Segundo Ravagnani (2007) um reservatório com potencial à injeção de CO₂ para recuperação avançada de óleo são aqueles em que maior parte do óleo móvel já foi produzida e o volume significativo de óleo remanescente não pode ser produzido sem recuperação avançada. Mas para que o reservatório utilize CO₂ para maior recuperação de óleo é necessário atender alguns critérios, os quais são determinados principalmente pelas propriedades do reservatório. As principais características do reservatório para a classificação e seleção para injeção de CO₂ são reunidos na Tabela 13.

Tabela 13 - Critérios para seleção de reservatórios de óleo com potencial para aplicação de CO₂.

Características do Reservatório	Variação	Referência utilizada por Ravagnani (2007)
Densidade (°API)	> 40	Cacoana, 1982
	> 30	Klins, 1984
	> 27	Bachu, 2001 e Stalkup, 1984
	> 13 e < 55	(Holtz <i>et al.</i> , 2001)
Saturação do Óleo (%)	> 25	Bachu, 2001
	> 30	Carcoana, 1982
Temperatura (°C)	< 90	Carcoana, 1982
Porosidade (%)	> 15	Bachu, 2001
	> 11 e < 30	Beike e Holtz, 1996
Permeabilidade (mD)	> 1	Bachu, 2001
	Fator não crítico	Klins, 1984
Espessura (m)	Fator não crítico	Klins, 1984
Pressão do Reservatório (Psi)	> 1.102	Bachu, 2001
	> 1.500	Klins, 1984
Profundidade (m)	< 2.990	Cacoana, 1982
	> 914	Klins, 1984
	> 762	Stalkup, 1984
Viscosidade (cP)	< 12	Klins, 1984 e TOA, 1978

Fonte: Ravagnani (2007).

Algumas das propriedades do reservatório Água Grande atendem aos critérios apresentados na Tabela 13 e de acordo com a estimativa da quantidade de CO₂ a ser armazenada, verifica-se que o Campo Fazenda Mamoeiro tem potencial para ser um projeto experimental de armazenamento geológico de carbono acompanhando a proposta e objetivo do PCE. Ressalta-se que para um projeto em escala comercial, para resultados conclusivos, é necessário fazer um estudo de viabilidade técnico-econômica, avaliar a capacidade teórica, efetiva e de operação do Campo, a disponibilidade da fonte emissora, o custo com a perfuração de um novo poço para a injeção de CO₂, os custos dos créditos no mercado de carbono e os reais benefícios ambientais com a quantidade a ser estocada, entre outros.

7.5. CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO

Nesta seção são apresentadas as informações básicas para a realização da avaliação de risco do estudo de caso, tais como: características do fluido de injeção, dados referentes à região de interesse, incluindo a localização geográfica, a distribuição populacional na região circunvizinha às instalações e dados meteorológicos.

7.5.1. Características do Fluido de Injeção

O fluido movimentado nas instalações constitui-se basicamente de CO₂ com pureza de 99% a ser injetado em sua condição supercrítica de pressão e temperatura. O local de armazenamento trata-se de um campo em que o poço foi descoberto em 26/10/1982, colocado em produção em 01/11/1982 e fechado em 01/1987 chegando a produções acumuladas de 15,7 mil m³ (99 mil barris) de óleo e 16,6 milhões de m³ de gás. Para fins da avaliação de riscos, apresentada neste estudo, foram considerados os seguintes produtos químicos além do CO₂: resquícios de óleo, gás e água produzida proveniente da rocha reservatório, traços de ácido sulfídrico (H₂S), gás ácido e tóxico gerado a partir da ação das Bactérias Redutoras de Sulfato (BRS) e, presença de impurezas como NO₂ e SO₂. A caracterização da água de produção adotada foi baseada em dados da literatura conforme apresentada na Tabela 14.

Tabela 14 - Caracterização típica da água de produção.

Substância	Concentração	Substância	Concentração
pH	6,8 - 7,4	Potássio (mg/L)	-
DQO (mg/L)	490 - 4.600	Magnésio (mg/L)	-
COT (mg/L)	180 - 1.470	Amônio (mg/L)	18 - 260
Fenóis (mg/L)	0,2 - 4,4	Cromo (mg/L)	0,2 - 0,45
Sulfatos (mg/L)	-	Ferro (mg/L)	
Cloretos (mg/L)	5.000 - 75.000	Alumínio (mg/L)	0,2 - 1,8
Salinidade (mg/L)	-	Bário (mg/L)	< 0,1 - 85
Sódio (mg/L)	-	Zinco (µg/L)	1,2 - 3,5

Fonte: Campos, Nobrega e Sant'Anna Jr. (2001).

A Ficha de Informação de Segurança do Produto Químico (FISPQ) do CO₂ é apresentada no ANEXO D. Os demais produtos podem ser acessados pela *website* do CETESB <<http://www.cetesb.sp.gov.br/>>.

7.5.2. Localização Geográfica

O Campo Fazenda Mamoeiro está situado na Bacia do Recôncavo a 120 km da cidade de Salvador, no município Entre Rios, região que apresenta uma topografia de colinas e morros com vales encaixados. O acesso à região é atendido por boa malha viária. (UNICAMP, 2000). As regiões populacionais que se encontram próximas ao Campo são apresentadas na Figura 41, sendo as mais próximas Entre Rios e Araçás.

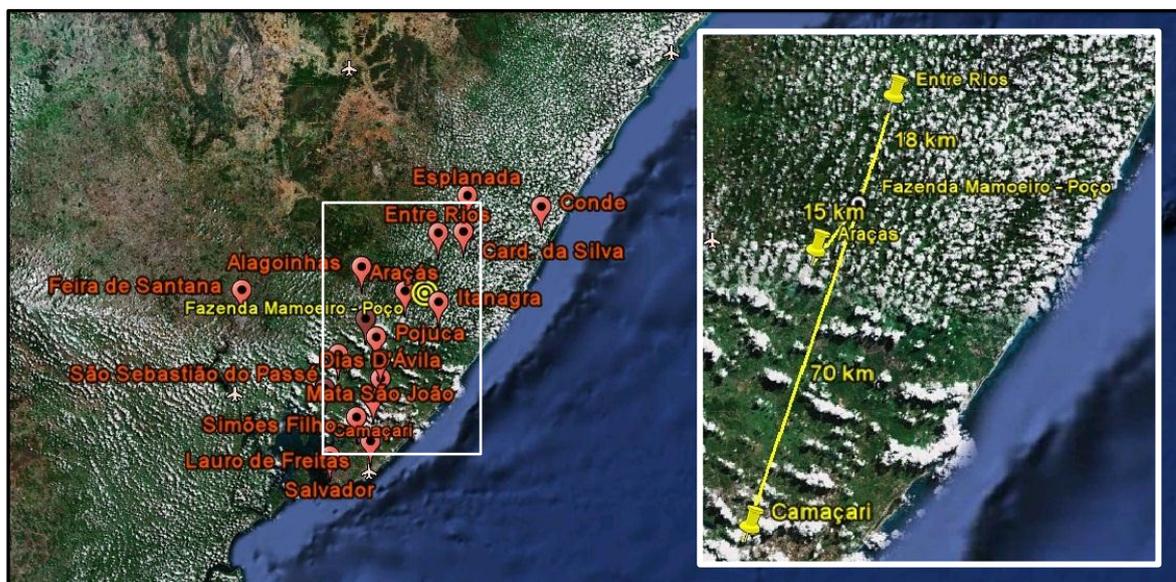


Figura 41 - Localização do Poço do Campo Fazenda Mamoeiro e população vizinha.

Fonte: Elaborado pela autora.¹⁷

A distância do poço e aos Municípios Entre Rios e Araçás são aproximadamente 18 km e 15 km, respectivamente. A distância aproximada entre o poço e a fonte de emissão de CO₂ localizada no Polo Industrial de Camaçari, região de Camaçari, é de aproximadamente 70 km.

De acordo com estudos do IEAGHG (2010), o uso do solo no local de armazenamento proposto pode ser categorizado em áreas, sendo elas: povoada, agricultável, protegida, árida e arborizada. Para este, a área de análise foi considerada como sendo protegida e arborizada.

A área do bloco é de 4,7 km² e envolve 9 (nove) propriedades rurais. O bloco situa-se a oeste dos Campos Riacho Sesmária e Caracatu, os quais também fazem parte do PCE e estão distantes do Poço 01-FMO-001-em cerca de 6 km, conforme apresentado na Figura 42.

¹⁷ Dado de localização do Poço 1-FMO-1-BA obtido a partir do Projeto PCE e plotado através do Google Earth.

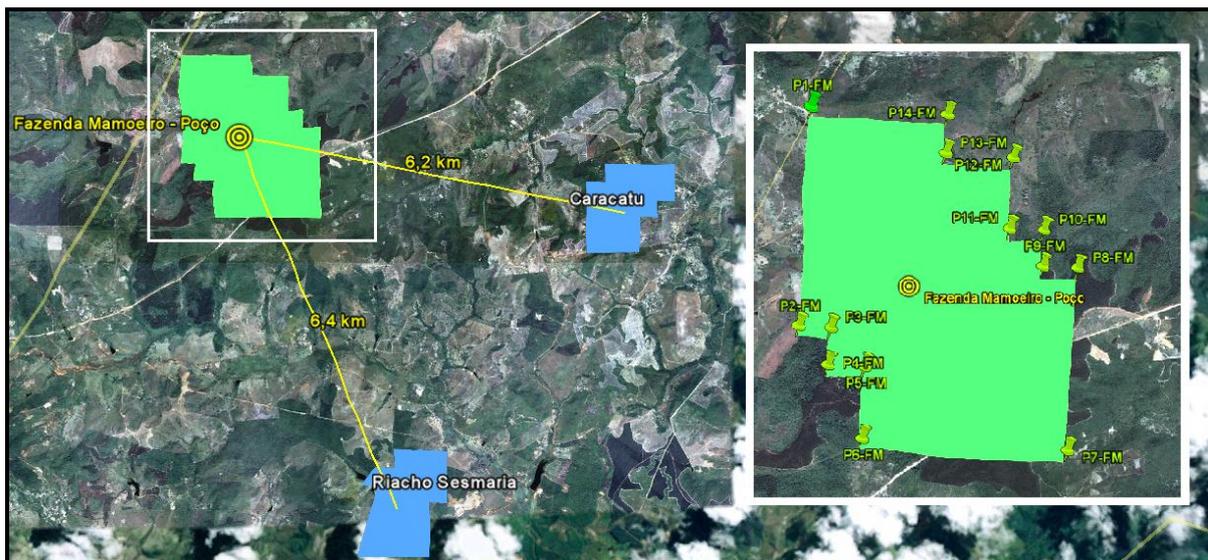


Figura 42 - Campos Fazenda Mamoeiro, Riacho Sesmaria e Caracatu.

Fonte: Elaborado pela autora.¹⁸

7.5.3. Dados Meteorológicos

As informações meteorológicas e do meio, em que o sistema em análise está inserido, são necessárias para compreender e prever o comportamento da nuvem de gás na atmosfera. Para este trabalho, em função dos dados de ventos obtidos no Mapa Eólico do Estado da Bahia disponibilizado pela COELBA (2000) e informações sobre previsão do tempo para cidades pela *website* Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC, 2012), considerou-se a estabilidade atmosférica diurna como fracamente instável e noturna como neutra, categorias estas classificadas por Pasquill como sendo C e D, respectivamente.

A umidade relativa e a temperatura do ar também foram adotadas com base no CPETC (2012). O valor para rugosidade do solo foi adotado como sendo 0,2 m, média dos valores apresentados para terras cultivadas e terra plana conforme apresentado pela AICHE/CCPS (2000), ou seja, representa região de área aberta, vegetação alta, longas planícies e com poucas construções.

As informações de temperatura, pressão, vento e umidade relativa para os Municípios de Entre Rios e Araçás são apresentados no ANEXO E. Os dados de velocidade, classe de estabilidade atmosférica, umidade relativa do ar, temperatura e rugosidade adotados para a região do Campo Fazenda Mamoeiro são apresentadas na Tabela 15.

¹⁸ Dados de localização dos Campos de Fazenda Mamoeiro, Caracatu e Riacho Sesmaria (coordenadas do bloco) obtidos a partir do Projeto PCE e plotados através do Google Earth.

Tabela 15 - Rugosidade do solo e dados meteorológicos adotados para a Região do Campo Fazenda Mamoeiro.

Descrição dos Parâmetros	Valores médios
Velocidade do Vento (diurno/noturno)	5 m/s e 2 m/s
Classe de Estabilidade Atmosférica (diurno/noturno)	C e D
Temperatura do Ar (diurno/noturno)	26 °C e 22°C
Umidade Relativa do Ar	80%
Rugosidade do Solo	0,2

Fonte: Elaborado pela autora.

De acordo com o Atlas do Potencial Eólico do Estado da Bahia, as três regiões mais próximas que circundam os Campos do PCE e apresentam estudo da estatística de velocidade e direção dos ventos são Conde, Sauípe e Teofilândia apresentado na Figura 43. Nesta Figura, observa-se que a direção dos ventos para Conde e Sauípe é predominantemente nordeste enquanto para Teofilândia é sudeste. Isso implica que há uma menor tendência da nuvem de gás ir em direção aos Municípios de Entre Rios, caso haja vazamento no poço do Campo Fazenda Mamoeiro para a atmosfera.

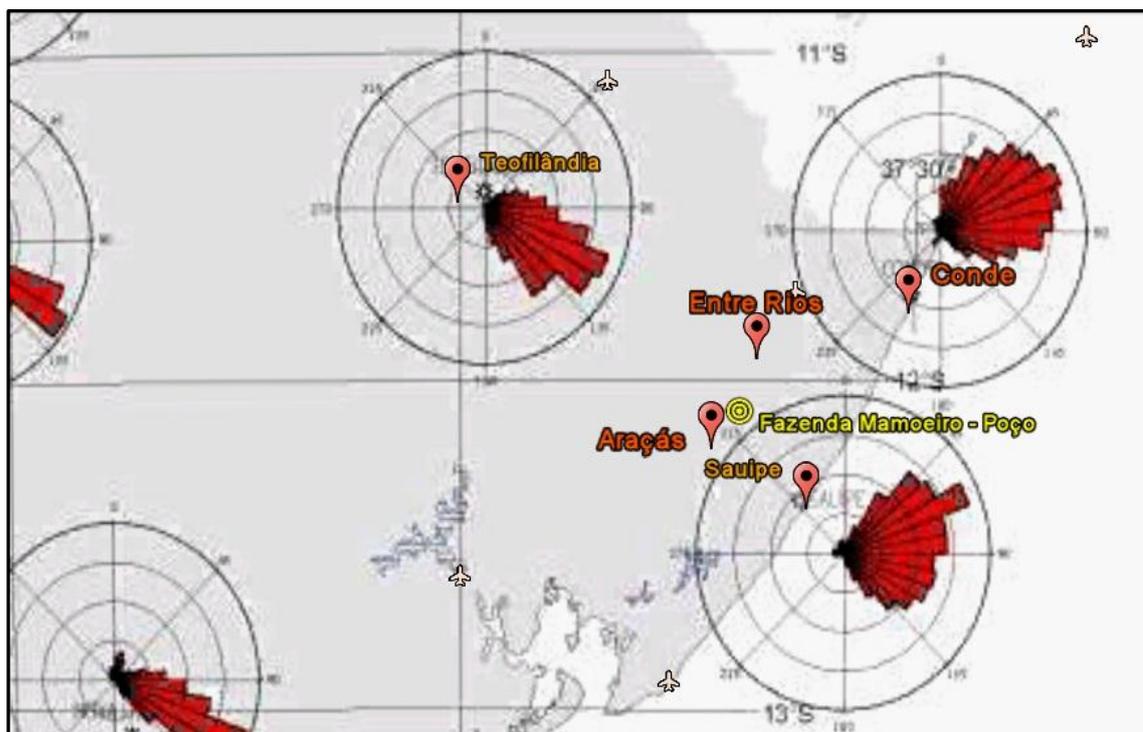


Figura 43 - Vento predominante para a região da Fazenda Mamoeiro.

Fonte: Elaborado pela autora com base em COELBA (2000)¹⁹.

¹⁹ Elaborado a partir dos dados de direções de ventos predominantes (COELBA, 2000) do Estado da Bahia e dos dados de localização dos Campos Fazenda Mamoeiro (Projeto PCE) e, plotado através do *Google Earth*.

7.5.4. Distribuição Populacional e Aspecto Econômico

Entre Rios, município do Estado da Bahia, localiza-se a uma latitude sul de 11° 56' 31" e a uma longitude oeste de 38° 05' 04", estando a uma altitude média de 162 metros em relação ao nível do mar. Este possui uma área total de 1.235,8 km² e uma população que no ano de 2010 era de 39.883 habitantes resultando em uma densidade populacional de 32,3 habitantes por km² (SEI, 2011). O município é formado pelos distritos de Entre Rios (sede), Ibatuí e as praias de Subaúma, Massadandupió e Porto de Sauípe e teve o Produto Interno Bruto, no ano de 2008, calculado em 242.160,161 mil reais (IBGE, 2008).

7.5.5. Caracterização Ambiental: Recurso Hídrico e Meio Biótico

A vegetação da região é de Floresta Densa que foi sendo substituída por pastagens e monoculturas. Houve algumas modificações nas formas de relevo causadas pelos cortes e aterros principalmente nas proximidades da base do poço (UNICAMP, 2000). A região do empreendimento encontra-se inserida geograficamente na Bacia Hidrográfica do Rio Inhambupe, mais conhecida como Bacia Hidrográfica do Recôncavo Norte. Os principais rios que compõem a bacia são: Rio Subauma, Rio Catu, Rio Sauípe, Rio Jacuípe, Rio Pojuca e o Rio Inhambupe e o Rio Quiricó que corta o Município de Araçás, sendo estas águas utilizadas para: abastecimento urbano e rural, irrigação, lazer e turismo na faixa litorânea, navegação e abastecimento industrial, uso para exploração mineral e uso para exploração petrolífera (ECMAN, 2010).

A área em estudo encontra-se inserida no ecossistema de Restinga, termo empregado para designar de forma genérica as planícies litorâneas que de forma descontínua se estende cerca de 7.400 Km da costa do Brasil.. A sua flora é representada principalmente pelas variadas espécies das famílias botânicas das Myrtaceas, Rubiaceae, Ciperaceas, Arecaceae e Burseraceae, tais como: pitanga, araçá, mangaba, capim barba-de bode, piaçava, caju, murici, entre outros. Parte da fauna terrestre da restinga pode transitar entre as áreas abertas e as florestais e durante o dia a avifauna e a herpetofauna são facilmente evidenciadas. Entre as aves há: bem-te-vis, suiriris, rolinhas-fogo-apagou, sanhaços, sabiás-da-praia e os jandaias. Encontram-se comumente na região lagartos, calangos, teiús e lagartixas. Entre os mamíferos, maior parte tem hábito predominantemente noturno como: sarigues, morcegos, raposa, entre outros; e de hábito diurno, destaca-se o sagui-estrela-de-tufobranco (PLAMA, 2010).

8. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A elaboração e classificação dos cenários de riscos foram realizadas com base na caracterização do sistema de análise e do levantamento dos potenciais eventos iniciadores, consequências, fatores agravantes e atenuantes. Informações estas, provenientes da coleta de dados tanto da literatura quanto via consulta aos especialistas e visitas ao campo e às instituições da área de análise de risco e armazenamento de carbono.

Dentre as principais fontes de dados para a caracterização do sistema, estão: Projeto PCE, UNICAMP (2000), COELBA (2000), Wildenborg *et al.* (2004), CPTEC (2012). Após caracterização, definidos os objetivos do estudo de avaliação de risco e as condições de contorno, fez-se o levantamento e mapeamento dos potenciais eventos iniciadores, das consequências e dos fatores agravantes e atenuantes a partir de informações, tais como: Vendrig *et al.* (2003), banco de dados FEP (SAVAGE, MAUL, 2004; QUINTESSA, 2010), Benson e Hepple (2005), Wildenborg *et al.* (2005), IPCC (2005), Stenhouse *et al.* (2005), Solomon (2007), Pearce *et al.* (2006), NETL (2009), DNV (2009, 2010, 2011), TETRATECH (2009), Hnottavange-Telleen, Krapac e Vivalda (2009) e Polson, Curtis e Vivalda (2012).

Os cenários pré-elaborados foram apresentados aos especialistas conforme Quadro 19. Cada um dos integrantes avaliou os cenários competentes à sua área, corroborando as informações apresentadas de acordo com a sua experiência. A partir do que foi discutido em reunião e das informações disponibilizadas, os cenários foram classificados conforme critérios apresentados na descrição da Metodologia AR-CO₂ (Seção 6.4).

Nome	Área / Especialidade	Empresa
A	Engenharia Química	τ
B	Engenharia Mecânica e de Segurança de Processo	β
C	Geologia / Monitoramento	α
D	Geologia / Mineralogia	α
E	Engenharia de Automação e de Materiais / Cimentação - Poço	α
F	Engenharia Química e de Materiais / Rocha Selo	α
G	Engenharia de Reservatório	δ
H	Engenharia de Petróleo	ω

Quadro 19 - Integrantes que contribuíram para a análise do Campo Fazenda Mamoeiro.²⁰

Fonte: Elaborado pela autora.

²⁰ Por se tratar de um estudo de caso ilustrativo e, portanto, uma simulação da Metodologia AR-CO₂ para fins acadêmicos, os nomes dos integrantes envolvidos foram suprimidos respeitando sua confidencialidade.

Assim, a avaliação dos cenários de riscos do Campo Fazenda Mamoeiro, situado na Bacia do Recôncavo através da Metodologia AR-CO₂ levou à identificação de 23 cenários de vazamento passíveis de ocorrência no sistema de injeção e confinamento. Os cenários decorrentes da análise por compartimentos e as planilhas da análise são apresentadas no APÊNDICE desta dissertação. As principais informações sobre os cenários identificados e a sua distribuição nas categorias de frequência, severidade e risco serão apresentados a seguir.

8.1. CENÁRIOS DE RISCOS ANALISADOS

Foram gerados 23 cenários decorrentes de possíveis condições que tem potencial para causar o vazamento de CO₂ pelas vias: poço, falhas e selo. Cada cenário foi avaliado de acordo com os seguintes impactos: meio ambiente, pessoas, imagem, instalações e danos financeiros.

Nesta seção serão apresentadas informações gerais sobre o estudo realizado e a distribuição dos cenários identificados por categorias de frequência, severidade e risco nas próximas seções.

8.1.1. Aspectos Gerais

Em relação ao poço, 16 cenários foram analisados e as principais causas identificadas estão relacionadas a problemas com a cimentação, sendo falhas ou reação indevida no cimento do tampão ou do revestimento. Dentre os cenários, erro operacional ou falha de equipamento foram identificados como potenciais causadores de vazamentos descontrolados de CO₂.

Para o compartimento falhas ou zona de falhas e fraturas, foram analisados 3 cenários de riscos. As principais causas identificadas estão relacionadas a problemas de sobrepressão e sismicidade, as quais podem fraturar a rocha ou levar à reativação de falhas. Sendo o cenário devido à sobrepressão o mais crítico, porém é extremamente improvável de ocorrer durante a vida útil do projeto.

Do compartimento selo, referente à rocha selo, foram analisados 4 cenários os quais apresentaram como principais causas atividade sísmica e sobrepressão. Estas causas tem potencial para levar à instabilidade ou alteração da rocha.

Os 23 eventos iniciadores identificados como potenciais responsáveis pela ocorrência de vazamento de CO₂ pelas vias poço, selo e zona de falhas e fraturas são listados no Quadro 20.

Compartmento	Eventos Iniciadores	Cenário
Poço	Falha mecânica entre o lado interno do revestimento e o tampão levando a vazamento de CO ₂	1
	Falha mecânica entre cimento de revestimento do poço e lado externo do revestimento levando a vazamento de CO ₂ .	2
	Falha mecânica entre o cimento de revestimento do poço e a rocha de formação levando a vazamento de CO ₂ .	3
	Falha no tampão de cimento do poço levando a vazamento de CO ₂ pelo poço	4
	Injeção de CO ₂ fora de especificação levando a danos em equipamentos ou poço e consequente vazamento de CO ₂ .	5
	Degradação do packer de produção levando a vazamento de CO ₂ .	6
	Degradação das conexões / tubulação levando a vazamento de CO ₂ .	7
	Degradação do revestimento / liner / cimento levando a vazamento de CO ₂ .	8
	Degradação do condutor levando a vazamento de CO ₂ .	9
	Reação química indevida levando a danos no poço e vazamento de CO ₂ .	10
	Erro operacional levando a vazamento/Blow-out do poço.	11
	Falha de equipamento de injeção levando a vazamento/blow-out.	12
	Extração de água devido a construção de canais, estações de bombeamento alterando e levando a dano no poço.	13
	Destruição parcial ou total (1 a 10km) das instalações/equipamentos devido a impacto de meteoros e meteoritos levando a vazamento de CO ₂ .	14
	Movimento tectônico levando a instabilidade geológica com dano ao poço e vazamento de CO ₂ .	15
	Erosão em larga escala devido a fatores externos levando a danos na estrutura física do poço e consequente vazamento de CO ₂ .	16
Zona de Falhas e Fraturas	Sobrepessão devido ao aumento da taxa de injeção de CO ₂ levando a ativação ou reativação de falhas e consequente vazamento de CO ₂	1
	Atividade sísmica induzida devido à injeção de CO ₂ levando a ativação ou reativação de falhas e consequente vazamento de CO ₂ .	2
	Perfuração indevida do reservatório em virtude de perfuração de novo poço/ atividade de escavação ou mineração levando a criação de novo caminho de migração/vazamento de CO ₂ .	3
Selo	Reação química indevida levando a danos na rocha selo (dissolução e reprecipitação de minerais).	1
	Vazamento de CO ₂ em virtude de alterações da rocha por atividade sísmica natural	2
	Vazamento de CO ₂ em virtude de alterações da rocha por atividade sísmica induzida (durante e após a injeção)	3
	Vazamento de CO ₂ pela rocha selante devido a aumento de pressão excedendo a pressão capilar da rocha selo (injeção contínua)	4

Quadro 20 - Eventos iniciadores mapeados para estudo do Campo Fazenda Mamoeiro.

Fonte: Elaborado pela autora com base em Savage e Maul (2004), IPCC (2005), DNV (2009, 2010, 2011) e Quintessa (2010).

Dos cenários avaliados, 3 eventos iniciadores resultaram em cenários considerados com probabilidade irrelevante dentro do escopo de aplicação da Metodologia, os quais são:

Compartmento: Zona de falhas e fraturas

- Destruição parcial ou total das camadas rochosas devido a grande ocorrência sísmica natural ou impacto de meteoros e meteoritos levando a grandes danos à instalação.

Compartimento: Selo

- Extração de água devido a construção de canais, estações de bombeamento alterando a instabilidade da rocha e levando a dano na rocha selo.
- Movimento tectônico levando a instabilidade geológica com dano na rocha selo.

Já o evento iniciador “Sobrepessão devido ao aumento da taxa de injeção de CO₂ levando a danos na rocha selo” não foi classificado por já ter sido analisado no compartimento: zona de falhas e fraturas.

8.1.2. Frequência dos Cenários

Nas planilhas do estudo de AR-CO₂ (maiores detalhes no APÊNDICE), os cenários foram classificados quanto à frequência de ocorrência como podem ser observados na Tabela 16. Dentre os 23 cenários, 12 (representando 52% do total de cenários analisados) foram classificados como “improvável”, 8 (representando 35% do total de cenários analisados) como “remoto”, 3 (representando 13% do total de cenários analisados) como “ocasional”, e nenhum cenário foi classificado como “provável” ou “frequente”. Em relação aos compartimentos, para poço a categoria de frequência classificada como “remoto” foi a de maior ocorrência, já para os compartimentos falhas e selo, foi a categoria “improvável”. Isto indica que, dentre os cenários analisados, a ocorrência de vazamento é tendenciosamente improvável de ocorrer ou para que ocorra é necessário haver falhas múltiplas.

Tabela 16 - Classificação dos cenários de risco do Campo Fazenda Mamoeiro por categoria de frequência.

Impactos dos cenários	Frequência					Total
	IM	RE	OC	PR	FR	
Poço	5	8	3	0	0	16
Falhas	3	0	0	0	0	3
Selo	4	0	0	0	0	4
Total	12	8	3	0	0	23

Fonte: Elaborado pela autora.

O compartimento poço foi o que apresentou maior quantidade de cenários de riscos analisados mais suscetíveis à ocorrência de vazamento quando comparado aos cenários obtidos pelos compartimentos selo e zona de falhas e fraturas. Entretanto, ressalta-se que mesmo tendo mais cenários, estes são pouco prováveis de ocorrer sendo necessário para sua ocorrência falha dupla, retardada ou múltipla.

Uma observação importante pontuada durante a análise foi quanto aos cenários que tem como causa falhas no tampão do poço, pois foi considerado a presença de 5 tampões durante a fase de encerramento (pós-injeção de CO₂) o que diminui significativamente a frequência de ocorrência destes cenários.

Durante análise do compartimento zona de falhas e fraturas geológicas, de acordo com as informações obtidas não foram identificadas falhas geológicas relevantes que pudessem servir como potenciais caminhos de migração. A fratura observada através da Figura 40 termina na Formação Candeia não comprometendo a integridade do armazenamento. Ressalta-se que a Bacia do Recôncavo está situada numa placa estável, sendo tida como uma região geologicamente estável. Estas características fazem dos cenários analisados improváveis de ocorrer.

Já o compartimento selo apresentou cenários de riscos improváveis de ocorrer devido às características da rocha selo proporcionada pela Formação Candeias como grande extensão e espessura. A extensão é maior que 4,7 km², cobrindo toda a área de análise do campo Fazenda Mamoeiro. Conforme Figura 40, a espessura da Formação é maior que 600 m, espessura satisfatória de acordo com os critérios de segurança apresentados pela DNV (2010), em que a espessura considerada como boa para assegurar o armazenamento deve ser maior que 100 m.

A profundidade em que está situada a rocha reservatório Formação Água Grande é outra característica vantajosa já que está situada a uma profundidade em torno de 3.000 m e atende aos critérios para assegurar o armazenamento apresentados tanto pela DNV (2010) em que a profundidade do reservatório deve ser maior que 2.500 m assim quanto por Singh (2004), Ramirez *et al.* (2009), Qi, Zhang e Su (2010) e IPCC (2005), em que deve ser maior que 800 m por questões de segurança e para manter o CO₂ em estado supercrítico.

Ravagnani (2007) apresenta algumas características necessárias para que um reservatório possa ser utilizado para injeção de CO₂ as quais estão reunidas na Tabela 13 e, dentre estas, o reservatório Água Grande atende a alguns critérios como: porosidade entre 15 e 30%, permeabilidade maior que 1 mD e pressão maior que 1.102 Psi.

Os valores médios de incerteza quanto à classificação das categorias de frequência da Tabela 16 são apresentados na Tabela 17 e representados graficamente na Figura 44.

Tabela 17 - Incerteza média dos cenários de risco do Campo Fazenda Mamoeiro por categorias de frequência.

Impactos dos cenários	Frequência				
	IM	RE	OC	PR	FR
Poço	20%	26%	30%	-	-
Falhas	30%	-	-	-	-
Selo	22%	-	-	-	-

Fonte: Elaborado pela autora.

A partir da observação da Tabela 17 e Figura 44, verifica-se que maior média de incerteza (30%) se tem para as categorias classificadas como “ocasional” em relação ao compartimento poço e “improvável” para o compartimento falhas.

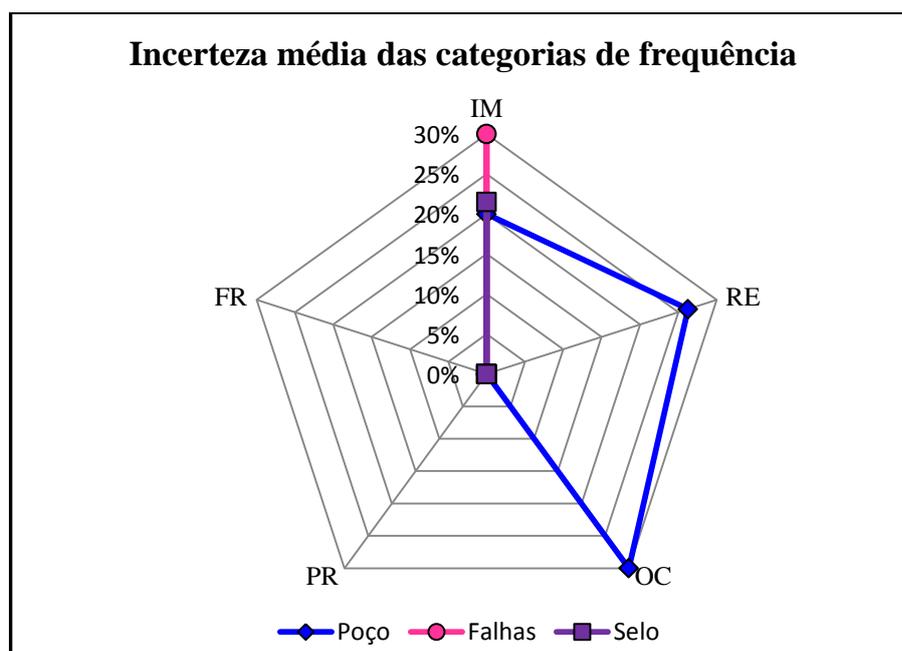


Figura 44 - Incerteza média das categorias de frequência de ocorrência dos cenários de risco do Campo Fazenda Mamoeiro por compartimentos de análise: poço, falhas e selo.

Fonte: Elaborado pela autora.

Nenhum cenário de risco foi classificado nas categorias “provável” ou “frequente” e para os compartimentos falhas e selos, nenhum cenário foi classificado como “remoto” ou “ocasional”. Por esse motivo, neste caso, os mesmos se encontram no ponto zero.

Para o estudo realizado, os cenários que governam os valores médios de incerteza para a categoria de frequência “ocasional” são: 2, 3, 5 e 6 e; para a categoria “remota” são: 7, 8 e 9.

Os cenários citados fazem parte do compartimento poço, já em relação aos compartimentos falhas e selo são os cenários 3 e 4, respectivamente.

8.1.3. Severidade dos Cenários

De acordo com o estudo realizado atenção em especial deve ser dada ao poço na altura da Formação São Sebastião, uma vez que há a presença de água potável na região o que faz dessa zona uma região crítica. A presença de poços próximos ao sistema de armazenamento também é outro fator crítico, uma vez que podem ser potenciais caminhos de migração para o CO₂. Entretanto, os mesmos não foram considerados na avaliação por não pertencerem ao PCE e, portanto, não ter informações disponíveis sobre os mesmos.

Dentre os principais fatores agravantes identificados, estão: impurezas presentes na corrente de CO₂ injetada, ataque biológico, especificação errada ou falha do cimento ou do aço para revestimento, variações naturais de pressão e temperatura, os quais podem influenciar na integridade do armazenamento. A degradação do cimento por ataque biológico pode ser explicado pela presença de resquícios bactérias redutoras de sulfato e por corrosão devido à presença de impurezas tanto do meio como água (a exemplo da água de produção) e gases ácidos (a exemplo o H₂S) como da corrente injetada. Apesar da especificação do fluido de injeção ser 99% podem ocorrer problemas com a especificação da corrente de CO₂. Ressalta-se, que o CO₂ em meio com presença de água reagirá formando ácido carbônico, alterando o pH e tornando o meio ácido propício para mobilização de metais e a depender da concentração contaminando água potável ou água para irrigação.

Os principais impactos do CO₂ estão associados à taxa de liberação e à concentração do CO₂ liberado no meio. Como o CO₂ é um gás, nas condições de temperatura e pressão ambiente, mais pesado que o ar atmosférico, as situações de perigo à saúde (pessoas, animais e plantas) dependem do CO₂ ser acumulado e confinado em ambientes de difícil ventilação. Nesse sentido, o Campo Fazenda Mamoeiro apresenta potencial de dispersão da nuvem de gás por apresentar estabilidade atmosférica classificada como neutra à fracamente estável, velocidade considerável dos ventos e estar localizado em região com topografia de colinas e morros, com vales encaixados representados pela rugosidade de superfície, de acordo com a classificação da AICHE/CCPS (2000): área aberta, vegetação alta, longas planícies e com poucas construções.

A área do bloco envolve 9 (nove) propriedades rurais, tendo sido categorizado como sendo uma área protegida e arborizada de acordo com a definição do IEAGHG (2010). Em

relação à população próxima, os maiores centros são os Municípios de Entre Rios e Araçás, distantes do Campo aproximadamente 18 km e 15 km, respectivamente. Dessa forma, com base na quantidade de CO₂ a ser armazenada (18 kt), na direção predominante dos ventos, no potencial de dispersão da nuvem de CO₂ na região e com base na distância até o possível ponto de fuga de CO₂ os impactos à população vizinha são reduzidos significativamente, pois possivelmente a concentração do CO₂ chegará a níveis considerados como seguros e aceitáveis.

Os cenários foram classificados quanto à severidade, as quais foram influenciadas pelas características da região e das instalações. A estimativa da classificação dos cenários por categorias de severidade é apresentada resumida na Tabela 18 e em maior detalhe nas planilhas AR-CO₂ do APÊNDICE.

Tabela 18 - Classificação dos cenários de risco do Campo Fazenda Mamoeiro por categorias de severidade.

Impactos dos cenários	Severidade			
	CA	CR	MO	BA
Meio Ambiente	0	4	15	4
Pessoas	0	8	5	10
Imagem	0	8	11	4
Instalações	0	7	6	10
Financeiro	0	0	10	13
Média	0	5	9	8

Fonte: Elaborado pela autora.

Dentre os 23 cenários, 9 foram classificados como “moderado” (representando 41% do total de cenários analisados), seguidas das categorias classificadas como “baixo” 8 (representando 36% do total de cenários analisados) e “crítico” 5 (representando 23% do total de cenários analisados). Nenhum cenário foi classificado como “catastrófico”. Estes resultados indicam que, dentre os cenários analisados, no caso da ocorrência de vazamento de CO₂ os impactos e danos podem extrapolar o limite do sistema de análise, podendo ser reversíveis se controlados e gerenciados.

Em relação à classificação das categorias de severidade apresentadas na Tabela 18, os valores médios de incerteza são apresentados na Tabela 19 e representados na Figura 45.

Tabela 19 - Incerteza média dos cenários de risco do Campo Fazenda Mamoeiro por categorias de severidade.

Impactos dos cenários	Severidade			
	CA	CR	MO	BA
Meio Ambiente	-	30%	31%	20%
Pessoas	-	28%	27%	19%
Imagem	-	27%	24%	10%
Instalações	-	22%	28%	29%
Financeiro	-	-	28%	23%
Média	-	27%	27%	20%

Fonte: Elaborado pela autora.

Em relação aos maiores valores médios de incerteza, o impacto ao “meio ambiente” foi o mais representativo com 31% na categoria “moderada”, seguida dos impactos às “instalações” com 29% na categoria “baixo” e, a pessoas e danos financeiros com 28% nas categorias “moderada” e ”crítica”, respectivamente. Os cenários mais representativos e que contribuem para os valores médios de incerteza apresentados são provenientes do compartimento falhas.

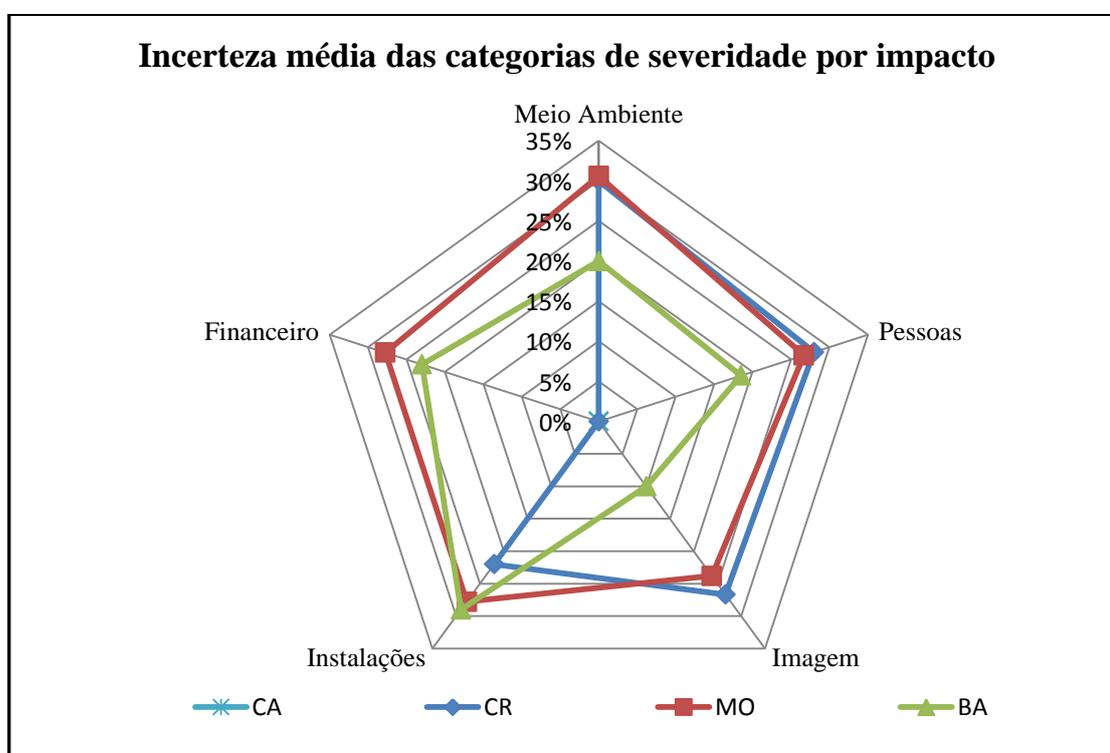


Figura 45 - Incerteza média dos cenários de risco do Campo Fazenda Mamoeiro por categorias de severidade.

Fonte: Elaborado pela autora.

Nenhum cenário foi classificado na categoria “catastrófico”, por esse motivo na Figura 45 o valor de incerteza se encontra no ponto central, 0%, assim como a classificação “crítico” para o impacto financeiro. Em relação às categorias de severidade, a classificação “crítica” e “moderada” apresentaram maiores valores médios de incerteza, representando neste caso, maior área quando comparado com as outras categorias: “catastrófica” e “baixa”.

8.2. CENÁRIOS POR CATEGORIA DE RISCOS

8.2.1. Estatística dos Cenários de Riscos

Os cenários de riscos analisados para o Campo Fazenda Mamoeiro e apresentados nas planilhas de AR-CO₂ no APÊNDICE foram classificados com base na Matriz de Risco (Quadro 18) e de acordo com a classificação de frequência e severidade (seções 8.1.2 e 8.1.3, respectivamente). A estatística de todos os cenários analisados para os compartimentos poços, selo e zona de falhas e fraturas é apresentada por categorias de risco nos seguintes quadros: Quadro 21 (cenários de risco ao meio ambiente), Quadro 22 (cenários de risco a pessoas), Quadro 23 (cenários de risco à imagem), Quadro 24 (cenários de risco a instalações) e Quadro 25 (cenários de risco financeiro).

Matriz de Risco (Meio Ambiente)		Frequência					Total
		IM	RE	OC	PR	FR	
Severidade	CA	0	0	0	0	0	0
	CR	3	0	1	0	0	4
	MO	8	5	2	0	0	15
	BA	1	3	0	0	0	4
Total		12	8	3	0	0	23

Quadro 21 - Cenários de risco ao meio ambiente.

Fonte: Elaborado pela autora.

O cenário de risco médio ao meio ambiente (Quadro 21) é proveniente do cenário 3 (três) do compartimento poço que tem como evento iniciador “falha mecânica entre o cimento de revestimento do poço e a rocha de formação levando a vazamento de CO₂”.

Matriz de Risco (Pessoas)		Frequência					Total
		IM	RE	OC	PR	FR	
Severidade	CA	0	0	0	0	0	0
	CR	6	2	0	0	0	8
	MO	5	0	0	0	0	5
	BA	1	6	3	0	0	10
Total		12	8	3	0	0	23

Quadro 22 - Cenários de risco a pessoas.

Fonte: Elaborado pela autora.

Os 2 (dois) cenários de risco médio a pessoas (Quadro 22), à imagem (Quadro 23) e a instalações (Quadro 24) são provenientes dos cenários 11 (onze) e 12 (doze) do compartimento poço que tem como eventos iniciadores “erro operacional” e “falha de equipamento de injeção” levando a vazamento / *blow-out* do poço”, respectivamente.

Matriz de Risco (Imagem)		Frequência					Total
		IM	RE	OC	PR	FR	
Severidade	CA	0	0	0	0	0	0
	CR	6	2	0	0	0	8
	MO	5	3	3	0	0	11
	BA	1	3	0	0	0	4
Total		12	8	3	0	0	23

Quadro 23 - Cenários de risco à imagem.

Fonte: Elaborado pela autora.

Matriz de Risco (Instalações)		Frequência					Total
		IM	RE	OC	PR	FR	
Severidade	CA	0	0	0	0	0	0
	CR	5	2	0	0	0	7
	MO	6	0	0	0	0	6
	BA	1	6	3	0	0	10
Total		12	8	3	0	0	23

Quadro 24 - Cenários de risco a instalações.

Fonte: Elaborado pela autora.

Matriz de Risco (Financeiro)		Frequência					Total
		IM	RE	OC	PR	FR	
Severidade	CA	0	0	0	0	0	0
	CR	0	0	0	0	0	0
	MO	8	2	0	0	0	10
	BA	4	6	3	0	0	13
Total		12	8	3	0	0	23

Quadro 25 - Cenários de risco financeiro.

Fonte: Elaborado pela autora.

Considerando os diferentes impactos, dos cenários avaliados, em média 22 foram classificados com “Risco Baixo” representando 94% do total analisado como apresentado na Tabela 20 e na Figura 46. Não foram identificados cenários de riscos classificados como alto.

Tabela 20 – Classificação dos cenários de risco do Campo Fazenda Mamoeiro por categorias de impacto.

Impactos dos cenários	Risco		
	Alto	Médio	Baixo
Meio Ambiente	0	1	22
Pessoas	0	2	21
Imagem	0	2	21
Instalações	0	2	21
Financeiros	0	0	23
Média	0	1	22

Fonte: Elaborado pela autora.

Em relação aos cenários de risco para os diferentes impactos, como descrito anteriormente, a parcela correspondente à classificação de risco “médio” às pessoas, ao meio ambiente, à imagem e às instalações tem importante contribuição de dois eventos iniciadores do compartimento poço: “erro operacional e falha de equipamento levando a vazamento ou *blow-out*” e “falha mecânica entre o cimento de revestimento do poço e a rocha de formação levando a vazamento de CO₂”.

Estes dois cenários são governados pela categoria de severidade classificado como “crítico”, o que o coloca em uma situação em que os danos são consideráveis, extrapolam o limite do sistema de análise e estão a um nível de tolerabilidade que requer ações imediatas para sua reversibilidade. Ações estas, como, por exemplo: dispor de técnicas de monitoramento suficientes para detectar previamente qualquer vazamento de CO₂ ou desvio padrão de operação e elaboração de Plano de Ação de Emergência, incluindo sirenes para alerta à comunidade e trabalhadores locais.

Para os compartimentos selo e zona de falhas e fraturas, só houve cenários de risco classificado como “baixo”. A classificação dos cenários de riscos do Campo Fazenda Mamoeiro é apresentada por categorias de impacto na Figura 46

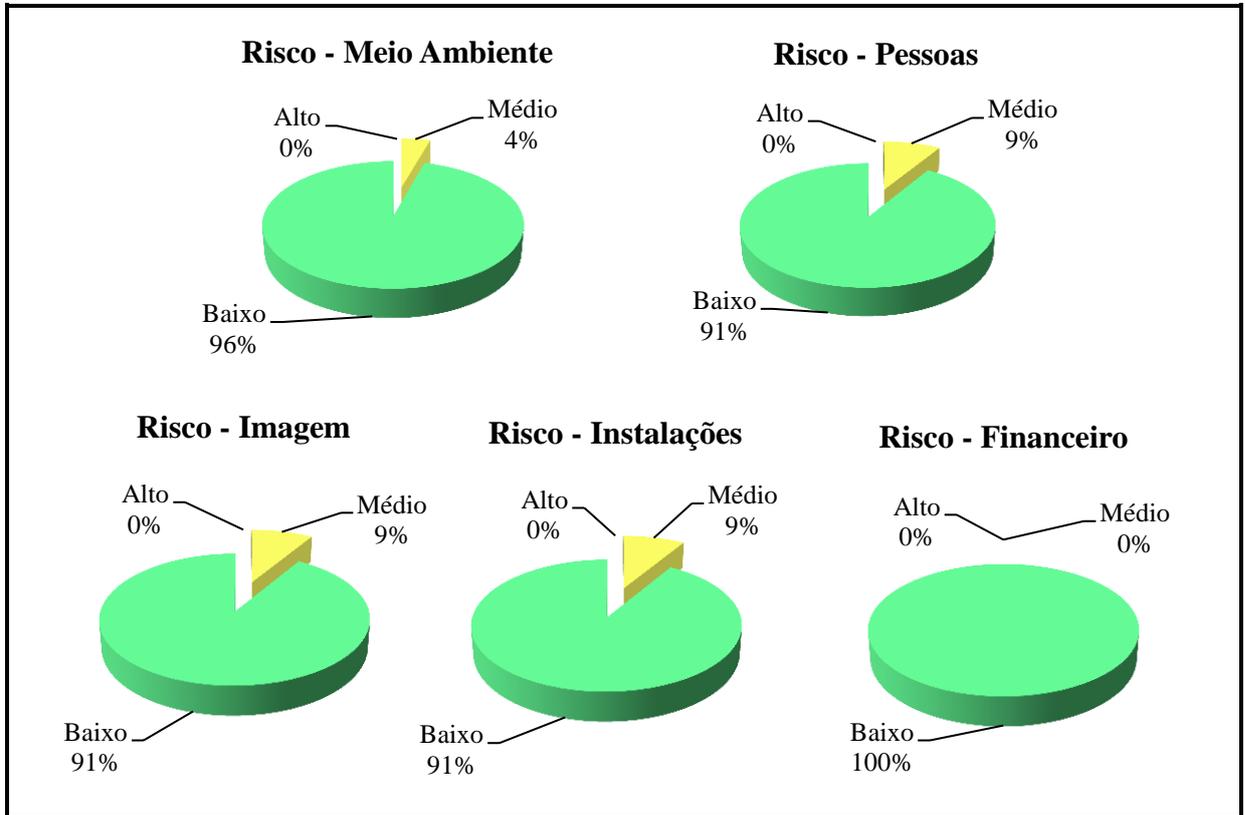


Figura 46 - Classificação dos cenários de riscos do Campo Fazenda Mamoeiro por categorias de impacto.

Fonte: Elaborado pela autora.

A incerteza, ou seja, o nível de confiança das informações associadas aos riscos a pessoas, meio ambiente, financeiros, instalações e a imagem apresentados na Tabela 21 são representados graficamente na Figura 47.

Tabela 21 - Incerteza média dos cenários de risco do Campo Fazenda Mamoeiro por categorias de impacto.

Impactos dos cenários	Risco			Média
	Alto	Médio	Baixo	
Meio Ambiente	-	44%	47%	45%
Pessoas	-	51%	43%	47%
Imagem	-	44%	39%	42%
Instalações	-	51%	46%	49%
Financeiro	-	-	47%	47%
Média	-	48%	44%	46%

Fonte: Elaborado pela autora.

A incerteza das informações para os riscos classificados como “baixo” foi menor quando comparado com os riscos classificados como “médio”. Como não houve nenhum cenário de risco classificados como alto, o mesmo se encontra representado no ponto zero como apresentado na Figura 47. Os cenários de risco classificados como “médio” apresentaram a incerteza com média de 49%, sendo governado pela média das incertezas associado ao risco a pessoas, meio ambiente, instalações e financeiro com 51%. Já para os cenários classificados como baixo, estes apresentaram uma média de 44% de incerteza governada pelo risco a danos financeiros com 47% e a instalações com 46%.

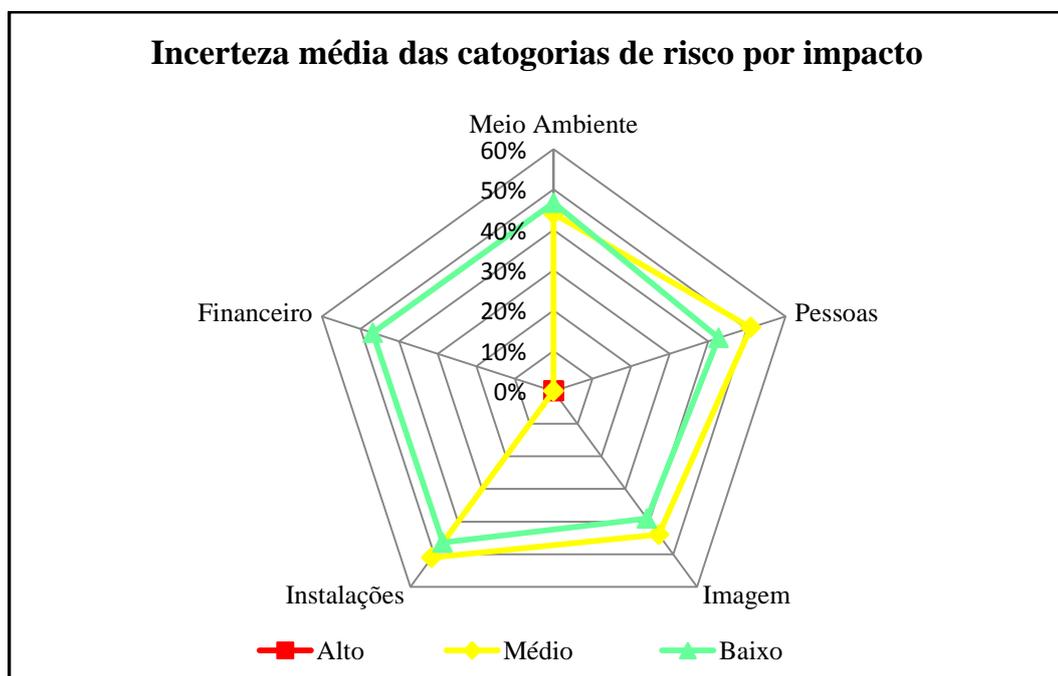


Figura 47 - Incerteza média dos cenários de riscos do Campo Fazenda Mamoeiro por categorias de impacto.

Fonte: Elaborado pela autora.

8.2.2. Considerações Finais, Medidas e Observações

Como os cenários de risco analisados não foram classificados como alto, não foram propostas recomendações obrigatórias que tem por objetivo reduzir os riscos mediante implantação de medidas em caráter imediato. Mas devido à presença de cenários de risco classificados como médio foram propostas recomendações que devem ser atendidas e implementadas em prazos a serem determinados assim como observações de melhoria para os cenários classificados como baixo, tais como:

- Dispor de técnicas de monitoramento e verificação adequadas para detectar previamente, ou no estágio inicial qualquer vazamento de CO₂ ou desvio padrão de operação, tais como: geofísica de poço, métodos geoquímicos como traçadores gasosos, detectores ou sensores de CO₂, monitoramento da saúde da vegetação local ao redor do poço.
- Realizar procedimento de manutenção.
- Elaboração de plano de ação de emergência, incluindo sirenes para alerta à comunidade e trabalhadores locais.
- Atenção deve ser dada à confiabilidade dos dados referentes à frequência de ocorrência e a severidade para cenários de risco apresentando incerteza superior a 50%, tais como: aquisição de mais dados do poço e da zona geológica, revisão de dados históricos, estabelecimento de processos de melhoria contínua (PGR - Programa de Gerenciamento de Risco) e dar ênfase ao item pessoas (capacitação, treinamento, procedimentos).

A identificação das contribuições da incerteza global é importante para a análise assim como para os resultados finais, pois possibilita detectar ações e medidas para reduzir as incertezas e melhorar a qualidade da estimativa. Para o estudo realizado, os cenários que governam os valores médios de incerteza para as categorias de frequência ou severidade e que necessitam de ações são apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 - Redução da incerteza dos cenários de risco do Campo Fazenda Mamoeiro por categorias de frequência e severidade.

Fatores de risco	Cenários por compartimento		
	Poço	Zona de Falhas e Fraturas	Selo
Frequência	2, 3, 5, 6, 7, 8, 9 e 10	3	4
Severidade	11 e 12	1, 2 e 3	-

Fonte: Elaborado pela autora.

9. CONCLUSÕES, LIMITAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.

Neste capítulo serão apresentadas as principais conclusões sobre o estudo da tecnologia de armazenamento geológico de carbono bem como da Metodologia AR-CO₂ proposta incluindo os resultados obtidos com a aplicação no estudo de caso ilustrativo e sugestões para trabalhos futuros.

9.1. O ARMAZENAMENTO DE CARBONO

O armazenamento de carbono é uma tecnologia proposta para mitigação dos efeitos ocasionados pelas emissões de CO₂ para a atmosfera e o vazamento deste pode comprometer a saúde humana, a segurança das instalações e o meio ambiente, levando à redução dos benefícios ambientais propostos por esta tecnologia. Pelo fato do CO₂ ser armazenado em um corpo natural, os riscos envolvidos no armazenamento são complexos e vulneráveis às incertezas do próprio processo, demandando mais esforços para a sua análise.

A avaliação de risco apresenta papel importante para comprovar a segurança desta tecnologia, podendo ser um dos requisitos a serem avaliados dentro das categorias mecanismos de financiamento e aspectos regulatórios aonde este tipo de estudo colabora nos estudos de viabilidade técnica e econômica do projeto, assim como uma das informações a compor os documentos que serão disponibilizados aos *stakeholders*.

Do ponto de vista tecnológico, verificou-se com este estudo que os aspectos regulatórios (estabelecimento de um arcabouço político-regulatório), os mecanismos de financiamento, a melhora da logística de transporte da fonte de CO₂ para o local de armazenamento, a redução de custo do processo de captura, a comprovação da segurança da tecnologia de confinamento, análise de risco e a aceitação pública são os principais aspectos que devem ser superados e que podem impulsionar a implantação em escala comercial de projetos de CGS.

Em relação aos impactos ambientais, à saúde humana e a própria integridade do sistema de armazenamento proveniente de vazamentos de CO₂, estes vão depender do quanto estará sendo armazenado, da taxa de fuga do fluido, da concentração de CO₂ no meio, assim como das impurezas presentes, da sensibilidade dos receptores e do seu tempo de exposição.

9.2. CAMPO FAZENDA MAMOEIRO

As premissas adotadas para a condução do trabalho e execução das análises propriamente ditas através das planilhas de AR-CO₂ são apresentadas na seção 8.2, sendo as principais delas: pureza do fluido de CO₂ injetado, presença de impurezas, condições do poço, escala de tempo adotada, dentre outros. Ressalta-se que, por se tratar de um estudo de caso ilustrativo e, portanto, uma simulação da Metodologia AR-CO₂ para fins acadêmicos, algumas das premissas adotadas não refletem a realidade do Campo Fazenda Mamoeiro.

Conforme visto no capítulo 7, devido à estabilidade atmosférica da região, à velocidade e direção dos ventos, profundidade do reservatório Água Grande e presença da rocha selo de grande extensão e profundidade tal qual é a Formação Candeias, as regiões populacionais próximas não apresentam potencial de serem afetadas por nuvem de CO₂ ou contaminação de aquífero. Entretanto, atenção especial se faz necessário quanto à vegetação local e ao aquífero da Formação Sebastião. De acordo com os resultados obtidos a partir dos cenários de riscos identificados, verifica-se que a Fazenda Mamoeiro apresenta-se com cenários de risco predominantemente baixos.

Corroborado pelos estudos realizados, conclui-se que o Campo Fazenda Mamoeiro tem potencial para ser um projeto experimental de armazenamento geológico de carbono acompanhando a proposta e objetivo do Projeto Campo Escola.

9.3. A METODOLOGIA AR-CO₂

Para o desenvolvimento da Metodologia AR-CO₂, foi de suma importância a avaliação das principais metodologias de análise de risco existentes e a simulação da Metodologia AR-CO₂ através da sua aplicação em estudo de caso ilustrativo do Campo Fazenda Mamoeiro na Bacia do Recôncavo.

A metodologia proposta possibilita conhecer, de forma estruturada e sistemática, as principais causas que levam ao vazamento de CO₂, os principais agravantes e atenuantes para as causas identificadas, assim como as medidas de monitoramento, verificação e remediação. Estas informações são analisadas para cada compartimento, os quais são considerados como os principais caminhos de fuga, sendo eles: poço, selo e zona de falhas e fraturas.

Por ser de natureza indutiva qualitativa, a Metodologia AR-CO₂ possibilita analisar e explorar cenários com possibilidade de vazamentos, fornecendo melhor entendimento do

funcionamento destes cenários. A partir dessa análise, os dados e resultados podem ser refinados para posteriores análises como, por exemplo, uma avaliação quantitativa de riscos. Este diagnóstico prévio facilita futuras análises quantitativas, uma vez que as informações a serem utilizadas já foram coletadas, o escopo e as condições de contorno já estão definidos, além de identificar quais os cenários de riscos mais significativos e que requerem uma análise mais detalhada, entre outros, o que permite reduzir os esforços posteriores necessários.

Devido às suas características, a metodologia AR-CO₂ pode ser aplicada em projetos pouco ou bem conhecidos para a análise de risco durante as fases de operação a encerramento, possibilitando identificar os cenários de riscos relevantes para posterior análise quantitativa, além de revisar a segurança das unidades de armazenamento e injeção avaliadas nas etapas anteriores do projeto de CGS.

Assim, a metodologia AR-CO₂ apresenta a vantagem de ser flexível (adaptável), prática, robusta, abrangente, sistemática, transparente de baixo custo e fácil uso para estimativa qualitativa do risco a partir da avaliação qualitativa das frequências de ocorrências e severidades dos cenários de riscos, compostos pela identificação das causas, fatores agravantes e atenuantes e consequências.

As metodologias que serviram como base para o desenvolvimento da Metodologia AR-CO₂ proposta foram: VEF, SWIFT, MOSAR, FEP, CASSIF, SRF, MCA. A partir da análise comparativa entre elas, observou-se que estas metodologias apesar de mencionarem a incerteza dos riscos envolvidos e das informações existentes e a análise da frequência de ocorrência, estas ainda não são enfatizadas pelas maiorias das metodologias. Isso se deve porque a tecnologia de CGS é relativamente nova e não há registro de ocorrência significativa de acidentes em projetos existentes que possam dar suporte aos dados e informações utilizadas, além disso, existe carência de informações de pesquisa e de campo. Os estudos que tem sido feitos, dessa natureza, se baseiam em projetos de análogos naturais e industriais e a partir destes, os resultados tem indicado que o armazenamento de CO₂ é seguro se bem monitorado e selecionado.

A Metodologia AR-CO₂ incorpora as principais características das metodologias analisadas e apesar destas metodologias qualitativas de análise de risco para o armazenamento de CO₂ serem vistas por Condor *et al.* (2011) como deficientes por serem adaptações das metodologias da indústria de processo, a metodologia AR-CO₂ incorpora elementos críticos e visualizados como pouco trabalhados, como por exemplo: a análise da incerteza e da frequência.

9.4. LIMITAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A principal barreira encontrada para o desenvolvimento deste trabalho foi quanto à aplicação da metodologia em estudo de caso ilustrativo, pois carece de algumas informações relevantes para a análise de risco. Como CGS é uma tecnologia nova, em fase de testes no Brasil, e embora na literatura apresente algumas informações de melhores práticas, lições e experiências aprendidas não foram encontradas dados pontuais para o cenário brasileiro, haja a importância de se ressaltar que cada ambiente geológico apresenta características específicas.

Um dos pontos críticos identificados em relação às contribuições a partir do contato com os especialistas foi quanto à dificuldade em reunir todos os integrantes para compor a análise, uma vez que a natureza da Metodologia é qualitativa e as contribuições foram feitas em momentos diferentes e individuais.

Outro fator que vale a pena destacar é quanto à ausência de um arcabouço político-regulatório para projetos de CGS no Brasil, pois a presença de leis e regulamentações auxiliaria na definição dos limites de aceitabilidade do risco e balizaria no cumprimento dos requisitos a serem contemplados no estudo. A presença de uma norma específica para armazenamento geológico de CO₂ no Brasil auxiliaria e serviria para guiar nos critérios a serem estabelecidos durante a análise de risco, como por exemplo, a taxa de vazamento a partir do sistema de armazenamento, concentrações aceitáveis de CO₂ na superfície e subsuperfície, dentre outros.

Por ser uma metodologia qualitativa, a Metodologia AR-CO₂ apresenta algumas limitações básicas e intrínsecas da sua natureza, como a dependência da experiência das pessoas envolvidas na análise, o que pode implicar, por exemplo, em um estudo incompleto ou na preparação ou interpretação incorreta da análise e dos resultados. Por isso, é imprescindível a presença, dentre os participantes, de profissionais com experiência e conhecimento do local para armazenagem de CO₂, conhecimento das condições que podem levar ao vazamento assim como análise, avaliação e gerenciamento de risco.

Os impactos a pessoas, meio ambiente, imagem, instalações e danos financeiro podem ser diferentes durante as fases do ciclo de vida do projeto de CGS e a magnitude de cada um deles pode resultar em receptividades diferentes por parte de quem está solicitando a análise (*stakeholders*). Como, neste trabalho eles foram tratados com o mesmo peso, recomenda-se para trabalhos futuros avaliar o escore ou peso de cada impacto de acordo com o objetivo da

análise de risco, se o documento será apresentado para o licenciamento de construção e operação; para seguradoras (seguro de projeto), obtenção de crédito no mercado de carbono, financiamento de projetos, *stakeholders*, entre outros.

O estudo realizado foi aplicado somente no Campo Fazenda Mamoeiro, na Bacia do Recôncavo, como proposta para trabalhos futuros destacam-se:

- Avaliar a possibilidade da utilização da injeção de CO₂ para recuperação avançada do óleo no Campo Fazenda Mamoeiro, assim como o risco associado ao reciclo do CO₂ produzido junto com o óleo recuperado caso esse processo venha a ser utilizado.
- Aplicar a Metodologia desenvolvida em outros campos a fim de incluir novas informações e contemplar lacunas que venham a ser identificadas.
- Obter mais dados que possam melhor representar a frequência de ocorrências das possíveis falhas de vazamento de CO₂, assim como a incerteza associada.
- Avaliar o risco das outras etapas do processo da tecnologia de Captura e Armazenamento de Carbono, como captura ou separação e transporte a fim de avaliar o risco global da tecnologia.
- Avaliar Quantitativamente os Riscos dos principais cenários identificados na Avaliação Qualitativa do Campo Fazenda Mamoeiro e, realizar análise comparativa.
- Integrar a Metodologia AR-CO₂ a um Modelo de Gerenciamento de Risco no Armazenamento de Carbono.
- Integrar a Metodologia AR-CO₂ a uma plataforma de dados para que possa servir como lições aprendidas e aproveitar os dados existentes em outras bases e análises.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, L.A. **Metodologias de Análise de Riscos: APP & HAZOP**. Segurança de Processos e Prevenção de Perdas. Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ. Versão 1. 2009. [Apostila]. Disponível em: <<https://sites.google.com/a/eq.ufrj.br/eqe592/home/arquivos>>. Acesso em: 27 fev. 2012.

AICHE/CCPS – CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY, AMERICAN INSTITUTE OF CHEMICAL ENGINEERS. **Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis**. 2º ed., New York: AICHE/CCPS, 2000.

BACHU, S. Screening and Ranking of Hydrocarbon Reservoirs for CO₂ Storage in the Alberta. US Department of Energy – National Energy Technology Laboratory, **Proceedings...** National Conference on Carbon Sequestration, 5, Washington D.C., 2001. Disponível em: <http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/01/carbon_seq/p21.pdf>. Acesso em: 27 fev. 2012.

BAHIA (Estado). Resolução CEPRAM (Conselho Estadual do Meio Ambiente) nº 3.965, art. 1º, de 30 de Junho de 2009. Aprova a Norma Técnica NT- 01/2009 e seus Anexos, que dispõe sobre o Gerenciamento de Risco no Estado da Bahia. **Diário Oficial do Estado**, Bahia, 11 ago. 2009. Nº 20.053.

BARILLAS, J.L.M. **Estudo de processo de drenagem gravitacional de óleo com injeção contínua de vapor em poços horizontais**. 2005. 183 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN, Natal, 2005.

BECK, B.; CUNHA, P.; KETZER, M.; MACHADO, H.; ROCHA, P.S.; ZANCAN, F.; ALMEIDA, A.S.; PINHEIRO, D.Z. The current status of CCS development in Brazil. GHGT-10 Conference. **Energy Procedia**, v.4, p. 6148–6151, 2011.

BENSON, S.M. Carbon Dioxide Capture and Storage in Underground Geologic Formations. From Workshop Proceedings, “The 10-50 Solution: Technologies and Policies for a Low-Carbon Future.” **Proceedings...** The Pew Center on Global Climate Change and the National Commission on Energy Policy. 25-26 Mar. 2004. Disponível em: <http://www.pewclimate.org/global-warming-in-depth/workshops_and_conferences/tenfifty/proceedings.cfm> Acesso em: 15 jun. 2011.

BENSON, S. Risk Assessment Preface. In: _____. **Carbon Dioxide Capture for Storage in Deep Geologic Formations - Results from the CO₂ Capture Project: Geologic Storage of Carbon Dioxide with Monitoring and Verification**. Londres: Elsevier, v. 2, 2005a.

_____. Lessons learned from industrial and natural analogs for health, safety and environmental Risk Assessment for geological storage of carbon dioxide. In: _____. **Carbon Dioxide Capture for Storage in Deep Geologic Formations - Results from the CO₂ Capture Project: Geologic Storage of Carbon Dioxide with Monitoring and Verification**. Londres: Elsevier, v. 2, 2005b. Cap. 25, p. 1133-1141.

BENSON, S.; HEPPLER, R. Prospects for early detection and options for remediation of leakage from CO₂ storage projects. In: BENSON, S. M. **Carbon Dioxide Capture for Storage in Deep Geologic Formations - Results from the CO₂ Capture Project: Geologic**

Storage of Carbon Dioxide with Monitoring and Verification. Londres: Elsevier, v. 2, 2005. Cap. 28, p. 1189-1203.

BILDSTEIN, O.; JULLIEN, M.; CRÉDOZ, A.; GARNIER, J. Integrated modeling and experimental approach for caprock integrity, risk analysis, and long term safety assessment. GHGT-9 Conference. **Energy Procedia**, v.4, p. 3237-3244, 2009.

BIOENERGIA. Meio Ambiente Carbono na atmosfera: seus dias podem estar contados. **Revista Brasileira de Bio Energia.** Centro Nacional de Referência em Biomassa (CENBIO), ano 5, nº 10. 2011. Disponível em: <<http://cenbio.iee.usp.br/download/revista/RBB10.pdf>>. Acesso em: 05 mar. 2012.

BLOMEN, E.; HENDRIKS, C.; NEELE, F. Capture technologies: Improvements and Promising Developments. GHGT-9 Conference. **Energy Procedia**, v.1, p. 1505–1512, 2009.

BURTON, T.; SHARPE, D.; JENKINS, N.; BOSSANYI, E. **Wind Energy Hand Book.** Chichester: John Wiley & Sons, 2001.

CAAMAÑO, J. A. Toxicidades por oxígeno, monóxido de carbono y dióxido de carbono. **Jano: Medicina Subacuática**, y. 2, nº 1707, p. 23-30, 2008. Disponível em: <www.jano.es/ficheros/sumarios/1/0/1707/23/00230030-LR.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2009.

CÂMARA, G.; ANDRADE, J.; ROCHA, P.; FERREIRA, L. Análise e Proposição para a Regulação Brasileira do uso da Tecnologia de Armazenamento Geológico de CO₂. In: CONGRESSO NACIONAL EM EXCELENCIA EM GESTÃO, 6., 2010, Niterói, Rio de Janeiro **Anais eletrônicos...**, Rio de Janeiro: Escola de Engenharia da Universidade Federal Fluminense. Disponível em: <http://www.excelenciaemgestao.org/Portals/2/documents/cneg6/anais/T10_0242_1043.pdf>. Acesso em: 26 jan. 2012.

CÂMARA, G.A.B. **Aspectos importantes do armazenamento geológico de CO₂ e uma proposta para o seu modelo regulatório no Brasil.** 2009. 141 f. Dissertação (Mestrado em Regulação da Indústria de Energia) - Universidade Salvador, UNIFACS, Salvador, 2009.

CÂMARA, R.J.B. **Campos Maduros e Campos Marginais: definição para efeitos regulatórios.** 2004. 139 f. Dissertação (Mestrado em Regulação da Indústria de Energia) - Universidade Salvador, UNIFACS, Salvador, 2004.

CAMPOS, J. C.; NOBREGA, R.; SANT'ANNA JR., G. L. II-001 - Tratamento de água de produção de petróleo em reator biológico do tipo "AIR-LIFT". In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21., 2001, João Pessoa. **Anais eletrônicos...** João Pessoa: ABES, 2001. Disponível em: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/aresidua/brasil/ii-001.pdf>>. Acesso em: 03 mar. 2012.

CAPONERO, J. Oportunidades na Aplicação de Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL) na Produção de Petróleo e Gás em Campos Marginais no Brasil. In: FERREIRA D. F. (Org.). **Produção de Petróleo e Gás em Campos Marginais: Um nascente mercado no Brasil.** Campinas, SP: KOMEDI, 2009. p. 207-221.

CARVALHO, L. D. A Responsabilidade Civil do Estado Brasileiro Perante os Riscos do Sequestro Geológico de Carbono para O Meio-Ambiente. **Lawinter Review**, v. I, n. 2, p. 258-259. abr. 2010.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Gerenciamento de riscos**. 2011. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/gerenciamento-de-riscos/Emeg%C3%A4ncias-Qu%C3%ADmicas/13-Etapas>>. Acesso em: 25 out. 2011.

CHERKAOUI, A.; LOPEZ, P. CO₂ Storage Risk Assessment: Feasibility Study of the Systemic Method MOSAR. **Safety and Security Engineering III (WIT Transactions on the Built Environment)**, v. 108, p. 173-184, 2009.

CO2CAPTUREPROJECT. **Key large scale CO₂ Capture and Storage projects**. Disponível em: <http://www.co2captureproject.org/ccs_in_action.html>. Acesso em: 12 fev. 2012.

COELBA - Companhia de eletricidade do Estado da Bahia. **Estado da Bahia: Atlas do Potencial Eólico**. Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento COELBA-ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) Salvador. 2000.

CONDOR, J.; UNATRAKARN, D.; WILSON, M.; ASGHARI, K. A comparative analysis of risk assessment methodologies for the geologic storage of carbon dioxide. GHGT-10 Conference. **Energy Procedia**, v. 4, p. 4036–4043, 2011.

COSTA, E; HASTENPLUG, D.; SCHIPER, N.; VECCHIA, F.; ANDRADE, J.; MORAIS, M.; BRITTO, R.; TAVARES, L. Avaliação das propriedades mecânicas da pasta de cimentação em poços de petróleo na presença de CO₂ supercrítico. In: ZILLOTTO, M. A. (Ed.). **Mudanças Climáticas, sequestro e Mercado de Carbono no Brasil**, Curitiba, Brasil 2009. p. 251-266.

CPTEC. **CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS**. 2012. Disponível em: < <http://www.cptec.inpe.br/cidades/Meteograma/1890>>. Acesso em: 13 fev. 2012.

CARBON SEQUESTRATION LEADERSHIP FORUM - CSLF. **Phase I Final Report From CSLF Risk Assessment Task Force**. Report CSLF-T-2009-04. 2009. Disponível em: <http://www.cslforum.org/publications/documents/RATF_Phase1FinalReport.pdf>. Acesso em: 21 mar. 2012.

CUNHA, P.; ZAVERUCHA, D.; CUNHA, F.; FRAGA, F.; LAMPREIA, J.; CARVALHO, R. Geopolítica do CCGS: Mapa dos países, empresas e instituições de petróleo, energia, serviços e de pesquisas mais atuantes e/ou de maior potencial para a implantação do CCGS - suas estratégias estruturais organizacionais empresariais, atividade, projetos, resultados, política & regulação e sustentabilidade. In: ZILLOTTO, M. A. (Ed.). **Mudanças Climáticas, sequestro e Mercado de Carbono no Brasil**, Curitiba, Brasil. 2009. p. 27-65.

DNV - DET NORSKE VERITAS. **CO2QUALSTORE: Guideline for Selection and Qualification of Sites and Projects for Geological Storage of CO₂**. Report nº 2009-1425, Norway, 2009. Disponível em: <http://www.dnv.com/binaries/co2qualstore_guideline_tcm4-412142.pdf>. Acesso em: 31 jul. 2012.

_____. **CO2QUALSTORE: Workbook with examples of applications**. Report nº 2010-0254, Norway. 2010. Disponível em: <http://www.dnv.com/binaries/co2qualstore_workbook_tcm4-436659.pdf>. Acesso em: 31 jul. 2012.

_____. **CO2WELLS: Guideline for the risk management of existing wells at CO₂ geological storage sites.** Report n° 2011-0448, Norway, 2011. Disponível em: <http://www.dnv.com/binaries/co2wells_guideline_tcm4-465269.pdf>. Acesso em: 31 jul. 2012.

ECMAN - ECMAN ENGENHARIA S.A.. **Plano de Recuperação de Áreas Degradadas.** IBAMA, Bahia, 2010. Disponível em: <http://siscom.ibama.gov.br/licenciamento_ambiental/Dutos/Gasoduto/GASEB/Relat%C3%B3rio%20PE%20Ara%C3%A7%C3%A1s%20e%20Anexos/ANEXO%20F%20-%20PRAD/PRAD.pdf>. Acesso em: 16 mar. 2012.

EPA - ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Vulnerability Evaluation Framework for Geologic Sequestration of Carbon Dioxide.** U.S. Environmental Protection Agency, 2008.

_____. **Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2009.** EPA 430-R-11-005, 2011. Disponível em: <http://epa.gov/climatechange/emissions/downloads11/US-GHG-Inventory-2011-Complete_Report.pdf>. Acesso em: 17 jan. 2012,

ESTUBLIER, A.; DINO, R.; SCHINELLI, M.C.; BELTRAN, A.M. CO₂ Injection in Buracica – Long-term performance assessment. GHGT-10 Conference, **Energy Procedia**, v.4, p. 4028-4035, 2011.

FEPAM - FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUIZ ROESSLER. **Manual de Análise de Riscos Industriais.** Projeto de Manual de Análise FEPAM n° 01/01. Rio Grande do Sul: FEPAM. 2001.

FIGUEIREDO, M.A. **The liability of carbon dioxide storage.** 2007. 417 f. Thesis (Doctor of Philosophy in Technology, Management and Policy) - Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 2007. Disponível em: <http://sequestration.mit.edu/pdf/Mark_de_Figueiredo_PhD_Dissertation.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2012.

FONSECA, P.P. **Mapeamento Geológico e Zoneamento Geoambiental da Região do Polo Industrial de Camaçari, através do uso de Ortofotos Digitais.** 2004. 77 f. Monografia (Curso de Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, UFBA, Salvador, 2004

GIBBINS, J.; CHALMERS, H. Carbon capture and storage. **Energy Policy**. v. 36, p. 4317–4322, 2008.

GOUGH, C.; SHACKLEY, S. Towards a Multi-Criteria Methodology for Assessment Of Geological Carbon Storage Options. **Climate Change**, v. 74, n° 1-3, p. 141-174, Manchester, 2006.

GRAU NETO, W. **O Protocolo de Quioto e o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo - MDL: Uma análise crítica do Instituto.** São Paulo: Fiuza, 2007.

GREENPEACE - GREENPEACE INTERNATIONAL. **False Hope - fact sheet.** 2008. Disponível em: <<http://www.greenpeace.org/international/Global/international/planet-2/report/2008/5/false-hope-fact-sheet.pdf>>. Acesso em: 20 fev. 2011

HEYBERG, A; MERCIER, A.; CZERNICHOWSKI-LAURIOL, I.; VASSAL, P.; LETHIEZ, P.; BOISSERPE, P. Reducing Greenhouse gas emissions: CO₂ Capture and Geological Storage. **Geoscience Issues**. 2005. Disponível em: <<http://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=web&cd=2&cts=1331048697708&ved=0CD8QFjAB&url=http%3A%2F%2Fwww2.ademe.fr%2Fservlet%2FgetBin%3Fname%3D8876424D3FA2715DDFF9A5CFA16486FE1203346283370.pdf&ei=9zBWT82iJ5LsggfhlrXMCg&usg=AFQjCNHfCP8ZYY1WjYEBpe7tkX6BcGMjPA&sig2=CzheAP3j9P3qk-h62bzELw>>. Acesso em: 06 mar. 2012

HNOTTAVANGE-TELLEEN, K.; KRAPAC, I.; VIVALDA, C. Illinois Basin – Decatur Project: initial risk-assessment results and framework for evaluating site performance. GHGT-9 Conference. **Energy Procedia**, v.1, p. 2431-2438, 2009.

HSE - HEALTH SERVICE EXECUTIVE. **Risk Assessment Tool and Guidance: Including guidance on application**. 2008. Disponível em: <http://www.rcpi.ie/Faculties/Faculty%20of%20Pathology%20Downloads/HSE_Risk_Assessment_Tool_and_Guidance.pdf>. Acesso em: 03 mar. 2012.

HUSTAD, C.W. **Large-Scale CO₂ Sequestration on the Norwegian Continental Shelf: A Technical, Economic, Legal and Institutional Assessment**. CO₂-Norway AS, Norwegian School of Management, Center for International Climate and Environmental Research – Oslo (CICERO), Faculty of Law, Norges Forskningsrad Prosjektnr: 151393/210.2004.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produto Interno Bruto dos Municípios 2004-2008**, 2008. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/pibmunicipios/2004_2008/defaulttab.shtml>. Acesso em: 04 mar. 2012.

_____. **Indicadores de desenvolvimento sustentável Brasil 2010**. 2010. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/recursosnaturais/ids/ids2010.pdf>>. Acesso em: 16 jan. 2012.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Legal Aspects of Storing CO₂** – Update e Recommendations. Paris. 2007. p. 144. Disponível em: <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2007/legal_aspects.pdf>. Acesso em: 26 fev. 2012.

_____. **Energy technology perspectives 2008: scenarios & strategies to 2050 in support of the G8 plan of action**. Paris. 2008. Disponível em: <<http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2008/etp2008.pdf>>. Acesso em: 06 mar. 2012.

_____. **CO₂ Emissions from Fuel Combustion - 2011 Highlights**. Paris. 2011. Disponível em: <<http://www.iea.org/co2highlights/co2highlights.pdf>>. Acesso em: 17 jan. 2012.

IEAGHG - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY GREENHOUSE GAS R&D PROGRAMME. **Geological Storage of Carbon Dioxide – Staying safely underground**. 2008.

_____. **Natural and Industrial Analogues for Geological Storage of Carbon Dioxide**. Copyright © IEA Greenhouse Gas R&D Programme. 2009. Disponível em: <http://www.ieaghg.org/docs/general_publications/Natural%20Analogues%20Final%20low%20res.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2012.

_____. **Interactive Design of Monitoring Programmes for the Geological Storage of CO₂**. Version 2.2.2, Oct. 2010. Disponível em: <<http://www.ieaghg.org/index.php?/Monitoring-Selection-Tool.html>>. Acesso em: 27 mai. 2012.

_____. **Effects of Impurities on Geological storage of CO₂. Report: 2011/04**. Jun. 2011. Orchard Business Centre, Stoke Orchard, Cheltenham. Disponível em: <<http://www.globalccsinstitute.com/publications/effects-impurities-geological-storage-co2>>. Acesso em: 20 mai. 2012.

INSALAHCO₂. **In Salah Gas Stockage de CO₂. Gas production at In Salah: IN SALAH - Industrial-scale CCS in action**. Disponível em: <<http://www.insalahco2.com/>>. Acesso em: 12 fev. 2012.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **IPCC special report on carbon dioxide capture and storage**. Cambridge: Cambridge University Press, Cambridge, 2005.

_____. **Climate Change 2007: Synthesis Report**. Geneva, Switzerland. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_synthesis_report.htm>. Acesso em: 05 mar. 2012.

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 31000: Risk Management — Principles and Guidelines**, Switzerland, 2009. Disponível em: <http://calmap.gisc.berkeley.edu/dwh_doc_link/Technical_Background/RAM_documents/ISO+31000-2009.pdf>. Acesso em: 09 jul. 2012.

JENKINS, C.R.; COOK, P.J.; ENNIS-KING, J.; UNDERSHULTZ, J.; BOREHAM, C.; DANCE, T.; CARITAT, P.; ETHERIDGE, D.M.; FREIFELD, B.M.; HORTLE, A.; KIRSTE, D.; PATERSON, L.; PEVZNER, R.; SCHACHT, U.; SHARMA, S.; STALKER, L.; UROSEVIC, M. **Safe storage and effective monitoring of CO₂ in depleted gas fields**. p. 1-7, 2011. Disponível em: <www.pnas.org/lookup/suppl/doi:10.1073/pnas.1107255108/-/DCSupplemental>. Acesso em: 26 fev. 2012.

KAPLAN, S.; GARRICK, B.J. **On The Quantitative Definition of Risk**. Society for Risk Analysis, v. I, nº I, p. 11-27, 1981.

KETZER, M.; CUNHA, P. The Need for an Integrated and Holistic Socio-Economic Approach to Carbon Planning - The Brazilian Case. Session II: Carbon Planning and Energy Demand and Development. Meeting of the Policy and Technical Groups (**Plenary Meeting**). Carbon Sequestration Leadership Forum (CSLF). Cape Town, South Africa. 2008. Disponível em: <<http://www.cslforum.org/meetings/capetown2008/index.html>>. Acesso em: 06 mar. 2012.

KORRE, A.; SHI, J.; IMRIE, C.; DURUCAN, S. Modeling the uncertainty and risk associated with the design and life cycle of CO₂ storage in coalbed reservoirs. GHGT-9 Conference. **Energy Procedia**, v.1, p. 2525-2532, 2009.

LI, H.; JAKOBSEN, J.P.; WILHELMSSEN, Ø.; YAN, J. PVTxy properties of CO₂ mixtures relevant for CO₂ capture, transport and storage: Review of available experimental data and theoretical models. **Applied Energy**. v. 88, nº 11, p. 3567–3579. Nov. 2011.

LINO, U.R.A. Case History of Breaking a Paradigm: Improvement of an Immiscible Gas-Injection Project in Buracica Field by Water Injection at the Gas/Oil Contact. In: SPE LATIN AMERICAN AND CARIBBEAN PETROLEUM ENGINEERING CONFERENCE, 2005, Rio de Janeiro. **Anais eletrônicos...** Rio de Janeiro: SPE, 2005. Disponível em: <<http://www.spe.org>>. Acesso em: 10 mar. 2009.

LIPPMANN, M.; BENSON, S. **Relevance of underground natural gas storage to geologic sequestration of carbon dioxide**. DOE Technical Report Server (U.S. Department of Energy). 2008.

LONDON CONVENTION. **Risk assessment and management framework for CO₂ sequestration in sub-seabed geological structures**. LC/SG-CO2 1/7, Annex 3, London, 2006.

MACHADO, C.; KETZER, J.; MARASCHIN, A.; ROCKETT, G.; SBRISSA, G.; CAPORALE, G.; ROCHA, L.; MACALOS, C.; CENTENO, C.; CRUZ, A. O.. Construção de um SIG para associação de fontes estacionárias e reservatórios geológicos de CO₂ no Brasil. In: ZILLOTTO, M. A. (Ed.). **Mudanças Climáticas, sequestro e Mercado de Carbono no Brasil**, Curitiba, Brasil 2009. p. 267-279.

MAIOLI, O. L.; NASCIMENTO, G. N. **Monitoramento da Qualidade do Ar: Composição da Atmosfera, Ciclos Globais e Tempo de Vida**. UFES, 2005. Disponível em: <<http://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=web&cd=1&ved=0CB0QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.inf.ufes.br%2F~neyval%2FMonitoramento%2FQualidade%2FTrabalho%2FGil%20e%20Otavio.doc&ei=5FwUT5b2B4TCgAemNz8Aw&usq=AFQjCNF%2F7jmL1jdgzFcHB4bjKSRZNz0g&sig2=At>>. Acesso em: 16 jan. 2012.

MANFREDI, J. F. Poluição Atmosférica. **ARGUMENTO - Revista das Faculdades de Educação, Ciências e Letras e Psicologia Padre Anchieta**, Jundiaí, ano 6, nº 11, p. 61-72, jul. 2004.

MCTI - MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. **Protocolo de Quioto**. 2000

_____. **Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas por Fontes e Remoções por Sumidouros de Gases de Efeito Estufa não Controlados pelo Protocolo de Montreal. Parte 2**. 2009. Disponível em: <<http://mct.gov.br/index.php/content/view/328762.html>>. Acesso em: 07 fev. 2012.

_____. **Status atual das atividades de projeto no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) no Brasil e no Mundo**. 28 fev. 2011. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/upd_blob/0215/215908.pdf>. Acesso em: 04 jun. 2012.

MOREIRA, D.M.; TIRABASSI, T.; MORAES, M.R. Meteorologia e Poluição Atmosférica. **Ambiente & Sociedade**, v. 11, nº 1, p. 1-13, 2008. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/asoc/v11n1/01.pdf>>. Acesso em: 05 mar. 2012.

MORGADO, C.R.V.; ESTEVES, V.P.P. Captura e Sequestro Geológico de Carbono - Tecnologias e perspectivas para a utilização no Brasil. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 30., 2010, São Carlos. **Anais...** São Carlos: ABEPRO, pp. 1-15. Disponível em: <

http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2010_TN_STO_121_785_16424.pdf>. Acesso em: 30 jul. 2012.

NETL - NATIONAL ENERGY TECHNOLOGY LABORATORY. **International Carbon Capture and Storage Projects Overcoming Legal Barriers**. DOE/NETL-2006/1236. 2006. Disponível em: <www.netl.doe.gov>. Acesso em: 15 jan. 2012.

_____. **BEST PRACTICES for: Monitoring, Verification, and Accounting of CO₂ Stored in Deep Geologic Formations**. 2009. Disponível em: <www.netl.doe.gov>. Acesso em: 15 jan. 2012.

_____. **BEST PRACTICES for: Site Screening, Site Selection, and Initial Characterization for Storage of CO₂ in Deep Geologic Formations**. 2010. Disponível em: <www.netl.doe.gov>. Acesso em: 15 jan. 2012.

_____. **BEST PRACTICES for: Risk Analysis and Simulation for Geological Storage of CO₂**. 2011. Disponível em: <www.netl.doe.gov>. Acesso em: 15 jan. 2012.

NOLAN, D.P. **Application of HAZOP and What-if Safety Reviews to the Petroleum, Petrochemical and Chemical Industries** (1st ed.). New Jersey: Noyes Publications, 1994.

OLAJIRE, A.A. CO₂ capture and separation technologies for end-of-pipe applications - A review. **Energy**, v. 35, p. 2610-2628, 2010.

OLDENBURG, C.M. **Health, Safety, and Environmental Screening and Ranking Framework for Geologic CO₂ Storage Site Selection**. 2005. Report N° LBNL-58873.

_____. Screening and ranking framework (SRF) for geologic CO₂ storage site selection on the basis of HSE risk. **Environmental Geology**, v. 54, p. 1687-1694, 2008.

OLIVEIRA JUNIOR, J. Projeto Campo-Escola: Revitalização de Campos Marginais de Petróleo e Gás Natural no Estado da Bahia. In: FERREIRA D. F. (Org.). **Produção de Petróleo e Gás em Campos Marginais: Um nascente mercado no Brasil**. Campinas, SP: KOMEDI, 2009. p. 115-133.

OLIVEIRA JÚNIOR, J.; SILVA, A.; OLIVEIRA JÚNIOR, L. Projeto Campo-Escola e a sua contribuição para a capacitação humana e tecnológica na Bahia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO E GÁS, 3., 2005, Salvador, **Anais eletrônicos...** Salvador: IBP/UNIFACS, 2005. Disponível em: <http://www.portalabpg.org.br/PDPetro/3/trabalhos/IBP0455_05.pdf>. Acesso em: 30 jul. 2012.

PACALA, S.; SOCOLOW, R. Stabilization Wedges: Solving the Climate Problem for the Next 50 Years with Current Technologies. **Science**, v. 305, pp. 968-972. 2004.

PEARCE, J.; CHADWICK, A.; KIRBY, G.; HOLLOWAY, S. The objectives and design of generic monitoring protocols for CO₂ storage. **Proceedings...** International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, GHGT-8 Conference, 19-22 Jun. 2006, Trondheim, Greenhouse Gas Control Technologies Norway. Disponível em: <http://nora.nerc.ac.uk/1548/1/02_07_01.pdf>. Acesso em: 09 mai. 2012.

PERILHON, P. P. Méthode Organisée et Systémique d'Analyse de Risques. **Previnfo.net**, 1999. Disponível em: <<http://www.previnfo.net/sections.php?op=viewarticle&artid=20>>. Acesso em: 12 jul. 2011.

PLAMA - PLANEJAMENTO E MEIO AMBIENTE. **Caracterização Ambiental Preliminar de Área em Subauma. Entre Rios - BA**, Bahia, 2010. Disponível em: <http://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=caracterizacao%20ambiental%20entre%20rios&source=web&cd=1&ved=0CCwQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.propertyinbrasil.com%2FgetDocument.php%3Fid%3D51445&ei=KplTT-mFK-K3sQL10vDvBQ&usg=AFQjCNHRZm_ZisD5geubUrI24jX-nS7RHw>. Acesso em: 04 mar. 2012.

POLSON, D; CURTIS, A.; VIVALDA, C. The evolving perception of risk during reservoir evaluation projects for geological storage of CO₂. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 9, p. 10–23. 2012.

QI, D.; ZHANG, S.; SU, K. Risk Assessment of CO₂ Geological Storage and the Calculation of Storage Capacity. **Petroleum Science and Technology**, v.28, n. 10, p. 979- 986, 2010.

QUINTESSA. **Generic CO₂ FEP Database**, Version 1.1.0. Quintessa Limited, Henley-on-Thames, United Kingdom. 2010. Disponível em: <<http://www.quintessa.org/co2fepdb/>> Acesso em: 12 jul. 2011.

RAMIREZ, A.; HAGEDOORN, S.; KRAMERS, L.; WILDENBORG, T., HENDRIKS, C. Screening CO₂ storage options in the Netherlands. GHGT-9 Conference. **Energy Procedia**, v. 1, p. 2801–2808, 2009.

RAVAGNANI, A.T.F.S.G. Modelagem Técnico-Econômica de Sequestro de CO₂ considerando Injeção em Campos Maduros. 2007. 201 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Petróleo) - Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências (FEM e IG), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

ROCHA, C.S. **Análise do regime jurídico da introdução da atividade de Captura e Armazenamento Geológico de gás Carbônico (CCS) no âmbito do direito constitucional Brasileiro**. 2011. 56 f. Monografia (Curso de Direito) – Núcleo de Pesquisa e Extensão, Faculdade Ruy Barbosa, Salvador, 2011.

ROCKETT, G.; MACHADO, C.; KETZER, J.; CENTENO, C. The CARBMAP Project: Matching CO₂ Sources and Geological Sinks in Brazil using Geographic Information System. GHGT-10 Conference. **Energy Procedia**, v.4, p. 2764-2771, 2011.

SABBAG, B. Indicação das principais questões jurídicas que devem ser enfrentadas para atingir o sucesso em transações no mercado de carbono no Brasil. In: ZILIOOTTO, M. A. (Ed.). **Mudanças Climáticas, sequestro e Mercado de Carbono no Brasil**, Curitiba, Brasil 2009. p. 281-288.

SANTOS, N.L. **Estudo dos sentidos de fluxos gravitacionais da formação Maracangalha (Eocretáceo). Bom Despacho, NNE da Ilha de Itaparica, Bahia, Brasil**. 2011. 83 f. Monografia (Curso de Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, UFBA, Salvador, 2011.

SASAKI, K. Carbon Sequestration Technology – Current Status and Future Outlook, **IEEJ Publication**, Mar. 2004.

SAVAGE, D.; MAUL, P. **A generic FEP database for the assessment of long-term performance and safety of the geological Storage of CO₂**, versão 1.0. QRS-1060A-1. QUINTESSA, Jun. 2004. Disponível em: < http://quintessa-online.org/FED_DB_report.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2012.

SEI - SUPERINTENDÊNCIA DE ESTUDOS ECONÔMICOS E SOCIAIS DA BAHIA. **Estatísticas dos Municípios Baianos**, Bahia, 2011. Disponível em: <http://www.sei.ba.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=127&Itemid=107>. Acesso em: 04 mar. 2012.

SIMÕES DE OLIVEIRA, A.G; JESUS, A.C; MIRANDA; S.B. **Estudo Geológico – Geotécnico dos Solos Expansivos da Região do Recôncavo Baiano**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE JOVENS GEOTÉCNICOS - II GEOJOVEM. 2., 2006, Nova Friburgo/RJ. Disponível em: <<http://www.geotecnia.ufba.br/?vai=Downloads>>. Acesso em: 29 fev. 2012.

SINGH, N. **A Systems Perspective for Assessing Carbon Dioxide Capture and Storage Opportunities**. 2004. 89 p. Thesis (Master of Science in Engineering and Management) - Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 2004.

SMINCHAK, J. N.; GUPTA, C.; BERGMAN, B. A. Issues related to seismic activity induced by the injection of CO₂ in deep saline aquifers. **Journal of Energy & Environmental**, 2, pp. 32-46, 2002.

SOLLIE, O. K.; BERNSTONE, C.; CARPENTER, M. E.; SELMER-OLSEN, S. An early phase risk and uncertainty assessment method for CO₂ geological storage sites. GHGT-10 Conference. **Energy Procedia**, v. 4, p. 4132–4139, 2011.

SOLOMON, S.; KRISTIANSEN, B.; STANGELAND, A.; TORP, T.; KÅRSTAD; O. A Proposal of Regulatory Framework for Carbon Dioxide Storage in Geological Formations. **International Risk Governance Council Workshop**, Washington, p. 1-10, 2007.

SOLOMON, S. **Carbon Dioxide Storage: Geological Security and Environmental Issues** – Case Study on the Sleipner Gas field in Norway. Bellona Foundation. f. 128, Report n° 1-2007. 2007. Disponível em: <<http://www.bellona.org/reports/1192434230.05>>. Acesso em: 06 abr. 2012.

SOLOMON, S.; CARPENTER, M.; FLACH, T.A. Intermediate storage of carbon dioxide in geological formations: A technical perspective. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 2, p. 502 – 510, 2008.

STATOIL. **Sleipner and Snøhvit CCS Statoil**. Disponível em: < <http://www.statoil.com> >. Acesso em: 09 fev. 2012.

STENHOUSE, M.J.; ZHOU, W.; SAVAGE, D.; BENBOW, S. Framework methodology for long-term assessment of the fate of CO₂ in the Weyburn Field. In: BENSON, S. M. **Carbon Dioxide Capture for Storage in Deep Geologic Formations - Results from the CO₂ Capture Project: Geologic Storage of Carbon Dioxide with Monitoring and Verification**. Londres: Elsevier, v. 2, 2005. Cap. 31, p. 1251-1261.

STENHOUSE, M.J.; GALE, B; ZHOU, W. Current status of risk assessment and regulatory frameworks for geological CO₂ storage. GHGT-9 Conference. **Energy Procedia**, v. 1, p. 2455–2462, 2009.

SUSTAINABLE CARBON. 2011. Disponível em: <<http://www.sustainablecarbon.com>>. Acesso em: 03 jan. 2012.

TETRATECH. **Assessment of Risk, Legal Issues, and Insurance for Geologic Carbon Sequestration in Pennsylvania**. Pennsylvania Department of Conservation and Natural Resources, Pennsylvania, 2009.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de engenharia de petróleo**, 2º ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2004.

UNICAMP. **Projeto Campo Escola**: Fazenda Mamoeiro. Convênio UNICAMP-ANP, 2000.

UTZ, C. **Carbon capture and storage: a done deal at Durban**. Global CCS Institute. dez. 2011. Disponível em: <<http://www.globalccsinstitute.com/institute/news/carbon-capture-and-storage-done-deal-durban>>. Acesso em: 16 jan. 2012.

VENDRIG, M.; SPOUGE, J.; BIRD, A.; DAYCOCK, J.; JOHNSEN, O. **Risk Analysis of the Geological Sequestration of Carbon Dioxide**. Report nº R286, DTI/Pub URN 03/1320. mar. 2003. Disponível em: <<http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/+http://www.berr.gov.uk/energy/sources/renewables/publications/page21932.html>>. Acesso em: 10 mai. 2012.

VICENTINO, C. **História Geral**. 8º ed. São Paulo: Scipione, 1997.

WILDENBORG, T.; HOLLOWAY, S.; HENDRIKS, C.; KREFT, E.; LOKHORST, A.; BROOK, M.; BRANDSMA, R.; EGBERTS, P.; LARSEN, M. **Cost curves for CO₂ storage part 2**: European sector. TNO Report NITG 04-238-B1208. Final Version presented to IEAGHG – IEA GREENHOUSE GAS R&D PROGRAMME – Project number 005.72043. p. 162. dec. 2004.

WILDENBORG, A.F.B.; LEIJNSE, A.L.; KREFT, E.; NEPVEU, M.N.; OBDAM, A.N.M.; ORLIC, B.; WIPFLER, E.L.; GRIFT, B.; KESTEREN, W.; GAUS, I.; CZERNICHOWSKI-LAURIO, I.; TORFS, P.; WÓJCIK, R. Risk Assessment Methodology for CO₂ Storage: The Scenario Approach. In: BENSON, S. M. **Carbon Dioxide Capture for Storage in Deep Geologic Formations - Results from the CO₂ Capture Project: Geologic Storage of Carbon Dioxide with Monitoring and Verification**. Londres: Elsevier, v. 2, 2005. Cap. 33, p. 1293-1316.

WILSON, E.; JOHNSON, T.; KEITH, D. Regulating the ultimate sink: managing the risks of geologic CO₂ storage. **Environmental Science & Technology**, v. 37, n. 36, p. 3476-3483, 2003.

WORLEYPARSONS. **Strategic Analysis of the Global status of Carbon Capture and Storage**. Report 1: Status of Carbon Capture and Storage Projects Globally. Final Report, Australia, 2009. Disponível em: <<http://cdn.globalccsinstitute.com/sites/default/files/publications/5751/report-1-status-carbon-capture-and-storage-projects-globally.pdf>>. Acesso em: 03 mar. 2012.

WRI - WORLD RESOURCES INSTITUTE. **CCS Guidelines**: Guidelines for Carbon Dioxide Capture, Transport, and Storage. Washington, DC: WRI, 2008. ISBN 978-1-56973-701-9. Disponível em: < http://pdf.wri.org/ccs_guidelines.pdf >. Acesso em: 29 mai. 2012.

YAVUZ, F.; TILBURG, T.V.; DAVID, P.; WILDENBORG, T. Second Generation CO₂ FEP Analysis: CASSIF - Carbon Storage Scenario Identification Framework. GHGT-9 Conference. **Energy Procedia**, v. 1, p. 2479-2485, 2009.

APÊNDICES

Planilhas de AR-CO₂ do Campo Fazenda Mamoeiro para os compartimentos: poço, selo e zona de falhas e fraturas.

ANPÊNDICE A – Cenários de risco do compartimento: poço

ANPÊNDICE B – Cenários de risco do compartimento: selo

ANPÊNDICE C – Cenários de risco do compartimento: zona de falhas e fraturas.

ANEXOS

ANEXO A – Informações e parâmetros mais importantes dos Campos cedidos pela ANP para o Projeto Campo Escola (PCE)

ANEXO B – Coluna Estratigráfica da Bacia do Recôncavo

ANEXO C – Seção Geológica Esquemática da Bacia do Recôncavo

ANEXO D – Ficha de Informação de Produto Químico - FISPQ

ANEXO E – Meteograma dos municípios próximas ao poço do Campo Fazenda Mamoeiro: Entre Rios e Araçás

APÊNDICE A – Planilhas de AR-CO2 para o Campo Fazenda Mamoeiro com cenários do compartimento: poço.

Metodologia de Avaliação de Riscos de CO ₂ Armazenado (AR-CO ₂)												
Equipe:				Área: Campo Fazenda Mamoeiro, Bacia do Recôncavo								
Compartimento: Poço			Sistema: Injeção de CO ₂ para armazenamento através do poço 1-FMO-001. Base: 18 kt de CO ₂ , considerando tempo de operação e encerramento 3 e 30 anos, respectivamente.				Data: 10/08/2012					
Evento Iniciador	Agravante		Atenuante	Impactos / Consequências	Categoria Frequência		Categoria de Severidade		Categoria de Risco		Observações e ações	Nº
	Ação Dinâmica	Condição Estática			F	I	S	I	R	I		
Falha mecânica entre o lado interno do revestimento e o tampão levando a vazamento de CO ₂ (pós injeção)	1 - Falha de fabricação do revestimento: composição química, microestrutura, processos de fabricação (com e sem costuras) tratamentos térmicos. 2 - Ataque biológico ou especificação errada do cimento ou do aço levando à degradação ao longo do tempo. 3 - Falta de monitoramento e procedimento de monitoramento (ex.: Fissuras cumulativas). 4 - Impurezas presentes proveniente da corrente de CO ₂ injetada (degradação química). 5 - Presença de CO ₂ úmido abaixo do tampão.	1 - Variações indevidas de pressão do processo (durante a injeção). 2 - Sobrepressão. 3 - Falta de procedimento de manutenção. 4 - Presença de falhas na cimentação ou falha de cimentação.	1- Monitoramento da pressão de CO ₂ na cabeça do poço e no reservatório. 2 - Reparo do poço por cimentação.	- Meio Ambiente: Danos considerados entre níveis mínimo e médio. - Pessoas: Sem impacto a pessoas. - Imagem: Possíveis questionamentos externos. - Instalações: Sem danos ou danos insignificantes. - Financeiro: Perda insignificante para o que foi investido no projeto	RE	5%	MEIO AMBIENTE - MO	20%	BAIXO	24%	- Obs1.: Presença de 5 tampões, sendo a análise realizada para o primeiro tampão, fundo do poço.	1
							PESSOAS - BA	20%	BAIXO	24%		
							IMAGEM - MO	10%	BAIXO	15%		
							INSTALAÇÕES - BA	30%	BAIXO	34%		
							FINANCEIRO - BA	30%	BAIXO	34%		
Falha mecânica entre cimento de revestimento do poço e lado externo do revestimento levando a vazamento de CO ₂ (durante e pós injeção)	1 - Falha de fabricação do revestimento: composição química, microestrutura, processos de fabricação (com e sem costuras) tratamentos térmicos. 2 - Ataque biológico ou especificação errada do cimento ou do aço levando à degradação ao longo do tempo. 3 - Falta de monitoramento e procedimento de	1 - Variações indevidas de pressão do processo (durante a injeção). 2 - Sobrepressão. 3 - Falta de procedimento de manutenção. 4 - Presença de falhas na cimentação ou falha de	1- Monitoramento da pressão de CO ₂ na cabeça do poço e no reservatório. 2 - Interromper injeção. 3 - Criação de barreira hidráulica por aumento de pressão do reservatório à montante do vazamento.	- Meio Ambiente: Danos considerados entre níveis mínimo e médio. - Pessoas: Sem impacto a pessoas. - Imagem: Possíveis questionamentos externos. - Instalações: Sem danos ou danos insignificantes. - Financeiro: Perda	OC	30%	MEIO AMBIENTE - MO	20%	BAIXO	44%	-Obs2.: Atenção deve ser dada à confiabilidade dos dados referentes à frequência de ocorrência e severidade: aquisição de mais dados do poço e zona geológica, revisar dados históricos, estabelecer processos de melhoria contínua	2
							PESSOAS - BA	20%	BAIXO	44%		
							IMAGEM - MO	10%	BAIXO	37%		
							INSTALAÇÕES - BA	30%	BAIXO	51%		

Metodologia de Avaliação de Riscos de CO₂ Armazenado (AR-CO₂)

Equipe:		Área: Campo Fazenda Mamoeiro, Bacia do Recôncavo										
Compartimento: Poço		Sistema: Injeção de CO ₂ para armazenamento através do poço I-FMO-001. Base: 18 kt de CO ₂ , considerando tempo de operação e encerramento 3 e 30 anos, respectivamente.						Data: 10/08/2012				
Evento Iniciador	Agravante		Atenuante	Impactos / Consequências	Categoria Freqüência		Categoria de Severidade		Categoria de Risco		Observações e ações	Nº
	Ação Dinâmica	Condição Estática			F	I	S	I	R	I		
	monitoramento (ex.: Fissuras cumulativas). 4 - Impurezas presentes proveniente da corrente de CO ₂ injetada (degradação química).	cimentação.	4 - Baixar a pressão do reservatório por remoção de água ou outros fluidos e ainda por criação de caminhos para acessar novas áreas no reservatório de armazenamento. 5 - Reparo do poço por cimentação.	insignificante para o que foi investido no projeto.			FINANCEIRO - BA	30%	BAIXO	51%	(PGR) e dar ênfase ao item pessoas (capacitação, treinamento, procedimentos).	
Falha mecânica entre o cimento de revestimento do poço e a rocha de formação levando a vazamento de CO ₂ . (durante e pós injeção)	Mesmas ações dinâmicas do cenário 2 (compartimento poço).	Mesmas condições estáticas do cenário 2 (compartimento poço)	Mesmos atenuantes do cenário 2 (compartimento poço)	- Meio Ambiente: Impactos considerável, mas reversível - Pessoas: Sem impacto a pessoas. - Imagem: Possíveis questionamentos externos. - Instalações: Sem danos ou danos insignificantes. - Financeiro: Perda insignificante para o que foi investido no projeto	OC	30 %	MEIO AMBIENTE - CR	20%	MÉDIO	44%	- Rec1.: Dispor de técnicas de monitoramento e verificação adequadas para detectar qualquer vazamento de CO ₂ ou desvio padrão de operação, tais como: geofísica de poço, métodos geoquímicos como traçadores gasosos, detectores/Sensores de CO ₂ , monitoramento da saúde da vegetação local ao redor do poço. - Rec2.: Realizar procedimento de manutenção.	3
							PESSOAS - BA	20%	BAIXO	44%		
							IMAGEM - MO	10%	BAIXO	37%		
							INSTALAÇÕES - BA	30%	BAIXO	51%		
							FINANCEIRO - BA	30%	BAIXO	51%		

Metodologia de Avaliação de Riscos de CO₂ Armazenado (AR-CO₂)

Equipe:		Área: Campo Fazenda Mamoeiro, Bacia do Recôncavo										
Compartimento: Poço		Sistema: Injeção de CO ₂ para armazenamento através do poço I-FMO-001. Base: 18 kt de CO ₂ , considerando tempo de operação e encerramento 3 e 30 anos, respectivamente.						Data: 10/08/2012				
Evento Iniciador	Agravante		Atenuante	Impactos / Consequências	Categoria Freqüência		Categoria de Severidade		Categoria de Risco		Observações e ações	Nº
	Ação Dinâmica	Condição Estática			F	I	S	I	R	I		
											- Obs2 do cenário 2 (compartimentos: poço)	
Falha no tampão de cimento do poço levando a vazamento de CO ₂ pelo poço (pós injeção)	1 - Ataque biológico ou especificação errada do cimento ou do aço levando à degradação ao longo do tempo. 2 - Falta de monitoramento e procedimento de monitoramento (ex.: Fissuras cumulativas). 3 - Impurezas presentes proveniente da corrente de CO ₂ injetada (degradação química). 4 - Presença de CO ₂ úmido abaixo do tampão.	1 - Falta de procedimento de manutenção. 2 - Presença de falhas na cimentação ou falha de cimentação.	1- Monitoramento da pressão de CO ₂ na cabeça do poço e no reservatório. 2 - Reparo do poço por cimentação.	- Meio Ambiente: Danos considerados entre níveis mínimo e médio. - Pessoas: Sem impacto a pessoas. - Imagem: Possíveis questionamentos externos. - Instalações: Sem danos ou danos insignificantes. - Financeiro: Perda insignificante para o que foi investido no projeto.	RE	5%	MEIO AMBIENTE - MO	20%	BAIXO	24%	- Obs1 do cenário 1 (compartimentos: poço)	4
							PESSOAS - BA	20%	BAIXO	24%		
							IMAGEM - MO	10%	BAIXO	15%		
							INSTALAÇÕES - BA	30%	BAIXO	34%		
							FINANCEIRO - BA	30%	BAIXO	34%		
Injeção de CO ₂ fora de especificação levando a danos em equipamentos ou poço e consequente vazamento de CO ₂ . (durante injeção)	1 - Falta de procedimento operacional (diretamente relacionada à má especificação do fluido de injeção) 2 - Ataque biológico devido à má especificação da composição do cimento. 3 - Falta de treinamento	1 - Variações indevidas de pressão do processo (durante a injeção). 2- Presença de falhas na cimentação ou falha de cimentação	1- Monitoramento da composição do CO ₂ injetado e da pressão na cabeça do poço e no reservatório. 2 - Interromper injeção. 3 - Reparo do poço por cimentação.	- Mesmos impactos e consequências do cenário 4 (compartimento: poço)	RE	30%	MEIO AMBIENTE - MO	20%	BAIXO	44%	-	5
							PESSOAS - BA	20%	BAIXO	44%		
							IMAGEM - MO	10%	BAIXO	37%		
							INSTALAÇÕES - BA	30%	BAIXO	51%		
							FINANCEIRO - BA	30%	BAIXO	51%		
Degradação do packer de produção levando a	1 - Falha de fabricação. 2 - Falta de monitoramento e procedimento de monitoramento (ex.: Fissuras	1 - Falta de resistência mecânica do material .	1- Monitoramento da composição do CO ₂ injetado e da pressão na cabeça	- Mesmos impactos e consequências do cenário 4 (compartimento: poço)	OC	30%	MEIO AMBIENTE - MO	20%	BAIXO	44%	- Obs2 do cenário 2 (compartimentos: poço)	6

Metodologia de Avaliação de Riscos de CO₂ Armazenado (AR-CO₂)

Equipe:												Área: Campo Fazenda Mamoeiro, Bacia do Recôncavo							
Compartimento: Poço			Sistema: Injeção de CO ₂ para armazenamento através do poço I-FMO-001. Base: 18 kt de CO ₂ , considerando tempo de operação e encerramento 3 e 30 anos, respectivamente.						Data: 10/08/2012										
Evento Iniciador	Agravante		Atenuante	Impactos / Consequências	Categoria Freqüência		Categoria de Severidade		Categoria de Risco		Observações e ações	Nº							
	Ação Dinâmica	Condição Estática			F	I	S	I	R	I									
vazamento de CO ₂ . (durante injeção)	cumulativas). 4 - Impurezas presentes proveniente da corrente de CO ₂ injetada (degradação química). 5 - Presença de contaminantes microbiológicos. 6 - Possibilidade de corrosão devido a presença de impurezas acima do limite tolerável (CO, H ₂ , NOx, SOx, H ₂ O, O ₂). 7 - Falta de procedimento de manutenção. 8 - Ataque biológico devido à má especificação da composição do cimento.	2 - Expansão ou contração térmica. 3 - Degradação do material por descompressão explosiva. 4 - Fadiga devido à instabilidade do fluxo.	do poço e no reservatório. 2 - Interromper injeção. 3 - Reparo do poço por cimentação.										PESSOAS - BA	20%	BAIXO	44%			
													IMAGEM - MO	10%	BAIXO	37%			
													INSTALAÇÕES - BA	30%	BAIXO	51%			
													FINANCEIRO - BA	30%	BAIXO	51%			
Degradação das conexões / tubulação levando a vazamento de CO ₂ . (durante injeção)	1 - Falha de fabricação. 2 - Falta de monitoramento e procedimento de monitoramento (ex.: Fissuras cumulativas). 4 - Impurezas presentes proveniente da corrente de CO ₂ injetada (degradação química). 5 - Presença de contaminantes microbiológicos. 6 - Possibilidade de corrosão devido a presença de impurezas acima do limite tolerável (CO, H ₂ , NOx, SOx, H ₂ O, O ₂). 7 - Falta de procedimento de manutenção. 8 - Ataque biológico devido à má especificação da	1 - Falta de resistência mecânica do material . 2 - Expansão ou contração térmica. 3 - Degradação do material por descompressão explosiva. 4 - Fadiga devido à instabilidade do fluxo.	1- Monitoramento da composição do CO ₂ injetado e da pressão na cabeça do poço e no reservatório. 2 - Interromper injeção. 3 - Reparo do poço por cimentação.	- Meio Ambiente: Sem danos ao meio ambiente. - Pessoas: Sem impacto a pessoas. - Imagem: Sem registro em mídia local. - Instalações: Impacto considerável, porém reversível. - Financeiro: Perda insignificante para o que foi investido no projeto		RE	30 %							MEIO AMBIENTE - BA	20%	BAIXO	44%	- Mesmas recomendações e observações do cenário 3 (compartimento: poço)	7
														PESSOAS - BA	20%	BAIXO	44%		
														IMAGEM - BA	10%	BAIXO	37%		
														INSTALAÇÕES - BA	30%	BAIXO	51%		
														FINANCEIRO - BA	30%	BAIXO	51%		

Metodologia de Avaliação de Riscos de CO₂ Armazenado (AR-CO₂)

Equipe:		Área: Campo Fazenda Mamoeiro, Bacia do Recôncavo										
Compartimento: Poço		Sistema: Injeção de CO ₂ para armazenamento através do poço I-FMO-001. Base: 18 kt de CO ₂ , considerando tempo de operação e encerramento 3 e 30 anos, respectivamente.						Data: 10/08/2012				
Evento Iniciador	Agravante		Atenuante	Impactos / Consequências	Categoria Freqüência		Categoria de Severidade		Categoria de Risco		Observações e ações	Nº
	Ação Dinâmica	Condição Estática			F	I	S	I	R	I		
	composição do cimento.											
Degradação do revestimento / liner / cimento levando a vazamento de CO ₂ . (durante e pós injeção)	Mesmas ações dinâmicas do cenário 7 (compartimento: poço)	Mesmas condições estáticas do cenário 7 (compartimento: poço)	Mesmos atenuante do cenário 7 (compartimento: poço)	- Mesmos impactos e consequências do cenário 7 (compartimento: poço)	RE	40 %	MEIO AMBIENTE - BA	20%	BAIXO	52%	- Mesmas recomendações e observações do cenário 3 (compartimento: poço)	8
							PESSOAS - BA	20%	BAIXO	52%		
							IMAGEM - BA	10%	BAIXO	46%		
							INSTALAÇÕES - BA	30%	BAIXO	58%		
Degradação do condutor levando a vazamento de CO ₂ . (durante e pós injeção)	Mesmas ações dinâmicas do cenário 7 (compartimento: poço)	Mesmas condições estáticas do cenário 7 (compartimento: poço)	Mesmos atenuante do cenário 7 (compartimento: poço)	- Mesmos impactos e consequências do cenário 7 (compartimento: poço)	RE	40 %	MEIO AMBIENTE - BA	20%	BAIXO	52%	-	9
							PESSOAS - BA	20%	BAIXO	52%		
							IMAGEM - BA	10%	BAIXO	46%		
							INSTALAÇÕES - BA	30%	BAIXO	58%		
Reação química indevida levando a danos no poço e vazamento de CO ₂ . (durante e pós injeção)	1 - Injeção de CO ₂ fora de especificação. 2 - Falta de procedimento operacional (diretamente relacionada à má especificação do fluido de injeção) 2 - Ataque biológico devido à má especificação da composição do cimento.	1 - Falta de resistência mecânica do material . 2 - Expansão ou contração térmica.	1- Monitoramento da composição do CO ₂ injetado e da pressão na cabeça do poço e no reservatório. 2 - Interromper injeção. 3 - Reparo do poço por cimentação.	- Mesmos impactos e consequências do cenário 7 (compartimento: poço)	IM	40 %	MEIO AMBIENTE - BA	20%	BAIXO	52%	- Obs2 do cenário 2 (compartimentos: poço)	10
							PESSOAS - BA	5%	BAIXO	43%		
							IMAGEM - BA	10%	BAIXO	46%		
							INSTALAÇÕES - BA	20%	BAIXO	52%		
Erro operacional levando a vazamento / Blow-out do poço.	1 - Falta de procedimento de manutenção e operacional (exemplo: treinamentos) 2 - Falta de treinamento. 3 - Sobrecarga de trabalho (erro operacional).	1 - Falta de procedimento operacional (exemplo: falta de controle administrativo,	1 - Presença de BOP (Blow Out Preventer) 2- Monitoramento da composição do CO ₂ injetado e da	- Meio Ambiente: Impacto de magnitude reversível. - Pessoas: evasão de funcionários e desconforto de	RE	30 %	MEIO AMBIENTE MO	30%	BAIXO	51%	- Rec1 do cenário 3 (compartimento: poço). - Rec3.: Elaboração de Plano de Ação a Emergência,	11
							PESSOAS CR	30%	MÉDIO	51%		

Metodologia de Avaliação de Riscos de CO₂ Armazenado (AR-CO₂)

Equipe:													
						Área: Campo Fazenda Mamoeiro, Bacia do Recôncavo							
Compartimento: Poço			Sistema: Injeção de CO₂ para armazenamento através do poço I-FMO-001. Base: 18 kt de CO₂, considerando tempo de operação e encerramento 3 e 30 anos, respectivamente.						Data: 10/08/2012				
Evento Iniciador	Agravante		Atenuante	Impactos / Consequências	Categoria Freqüência		Categoria de Severidade		Categoria de Risco		Observações e ações	Nº	
	Ação Dinâmica	Condição Estática			F	I	S	I	R	I			
(durante injeção)		registro das informações, elaboração de relatórios). 2- Variações indevidas de pressão do processo (durante a injeção). 3 - Sobrepressão. 5 - Presença de falhas na cimentação ou falha de cimentação.	pressão na cabeça do poço e no reservatório. 3 - Interromper injeção. 4 - Utilizar técnicas para "matar" o poço como injeção de lama pesada (ou fluido) para o revestimento do poço. Se a cabeça do poço não está acessível, perfurar um poço próximo para interceptar o revestimento abaixo da superfície e injetar a lama (ou fluido). 5 - Após controle do poço reestabelecido, utilizar práticas de recompletação de poços 6 - Reparo do poço por cimentação.	comunidade vizinha. - Imagem: possíveis questionamentos podendo repercutir em mídia regional. - Instalações: perdas ou danos significantes, porém reversível. - Financeiro: Perda insignificante para o que foi investido no projeto			IMAGEM	CR	20%	MÉDIO	44%	incluindo sirenes para alerta à comunidade e trabalhadores locais.	
							INSTALAÇÕES	CR	30%	MÉDIO	51%		
							FINANCEIRO	MO	30%	BAIXO	51%		
Falha de equipamento de injeção levando a vazamento / blow-out. (durante injeção)	Mesmas ações dinâmicas do cenário 12 (compartimento: poço)	Mesmas condições estáticas do cenário 12 (compartimento: poço)	Mesmos atenuantes do cenário 12 (compartimento: poço)	- Mesmos impactos e consequências do cenário 12 (compartimento: poço)	RE	30%	MEIO AMBIENTE	MO	30%	BAIXO	51%	- Mesmas recomendações do cenário 11 (compartimento: poço)	12
							PESSOAS	CR	30%	MÉDIO	51%		
							IMAGEM	CR	20%	MÉDIO	44%		
							INSTALAÇÕES	CR	30%	MÉDIO	51%		
							FINANCEIRO	MO	30%	BAIXO	51%		

Metodologia de Avaliação de Riscos de CO₂ Armazenado (AR-CO₂)

Metodologia de Avaliação de Riscos de CO ₂ Armazenado (AR-CO ₂)													
Equipe:				Área: Campo Fazenda Mamoeiro, Bacia do Recôncavo									
Compartimento: Poço			Sistema: Injeção de CO₂ para armazenamento através do poço I-FMO-001. Base: 18 kt de CO₂, considerando tempo de operação e encerramento 3 e 30 anos, respectivamente.					Data: 10/08/2012					
Evento Iniciador	Agravante		Atenuante	Impactos / Consequências	Categoria Freqüência		Categoria de Severidade		Categoria de Risco		Observações e ações	Nº	
	Ação Dinâmica	Condição Estática			F	I	S	I	R	I			
Extração de água devido a construção de canais, estações de bombeamento alterando e levando a dano no poço.	-	-	-	- Meio Ambiente: Impacto de magnitude reversível. - Pessoas: evasão de funcionários e desconforto de comunidade vizinha. - Imagem: possíveis questionamentos. - Instalações: perdas ou danos significantes, porém reversível. - Financeiro: Perda insignificante para o que foi investido no projeto.	IM	30 %	MEIO AMBIENTE	- MO	20%	BAIXO	44%	-	13
							PESSOAS	- MO	20%	BAIXO	44%		
							IMAGEM	- MO	20%	BAIXO	44%		
							INSTALAÇÕES	- MO	20%	BAIXO	44%		
							FINANCEIRO	- MO	20%	BAIXO	44%		
Destruição parcial ou total (1 a 10km) das instalações/equipamentos devido a impacto de meteoros e meteoritos levando a vazamento de CO ₂ . (pós injeção)	-	-	-	- Meio Ambiente: Impacto de magnitude reversível. - Pessoas: evasão de funcionários e desconforto de comunidade vizinha. - Imagem: possíveis questionamentos, repercutindo em mídia regional. - Instalações: perdas ou danos significantes, porém reversível. - Financeiro: Perda insignificante para o que foi investido no projeto.	IM	5%	MEIO AMBIENTE	- MO	20%	BAIXO	24%	-	14
							PESSOAS	- CR	20%	BAIXO	24%		
							IMAGEM	- CR	20%	BAIXO	24%		
							INSTALAÇÕES	- CR	20%	BAIXO	24%		
							FINANCEIRO	- MO	20%	BAIXO	24%		
Movimento tectônico	-	-	-	- Mesmos impactos e consequências do	IM	5%	MEIO AMBIENTE	- MO	20%	BAIXO	24%	-	15

Metodologia de Avaliação de Riscos de CO₂ Armazenado (AR-CO₂)

Equipe:												Área: Campo Fazenda Mamoeiro, Bacia do Recôncavo	
Compartimento: Poço			Sistema: Injeção de CO ₂ para armazenamento através do poço I-FMO-001. Base: 18 kt de CO ₂ , considerando tempo de operação e encerramento 3 e 30 anos, respectivamente.						Data: 10/08/2012				
Evento Iniciador	Agravante		Atenuante	Impactos / Consequências	Categoria Freqüência		Categoria de Severidade		Categoria de Risco		Observações e ações	Nº	
	Ação Dinâmica	Condição Estática			F	I	S	I	R	I			
levando a instabilidade geológica com dano ao poço e vazamento de CO ₂				cenário 14 (compartimento: poço)			PESSOAS - CR	20%	BAIXO	24%			
								IMAGEM - CR	20%	BAIXO	24%		
								INSTALAÇÕES - CR	20%	BAIXO	24%		
								FINANCEIRO - MO	20%	BAIXO	24%		
Erosão em larga escala devido a fatores externos levando a danos na estrutura física do poço e consequente vazamento de CO ₂ . (durante e pós injeção)	-	-	-	- Mesmos impactos e consequências do cenário 14 (compartimento: poço)	IM	20%	MEIO AMBIENTE - MO	20%	BAIXO	36%	-	16	
							PESSOAS - CR	20%	BAIXO	36%			
							IMAGEM - CR	20%	BAIXO	36%			
							INSTALAÇÕES - CR	20%	BAIXO	36%			
							FINANCEIRO - MO	20%	BAIXO	36%			

APÊNDICE B – Planilhas de AR-CO2 para o Campo Fazenda Mamoeiro com cenários do compartimento: selo.

Metodologia de Avaliação de Riscos de CO ₂ Armazenado (AR-CO2)													
Equipe:						Área: Campo Fazenda Mamoeiro, Bacia do Recôncavo							
Compartimento: Selo			Sistema: Injeção de CO2 para armazenamento através do poço 1-FMO-001. Base: 18 kt de CO2, considerando tempo de operação e encerramento 3 e 30 anos, respectivamente.						Data: 10/08/2012				
Evento Iniciador	Agravante		Atenuante	Impactos / Consequências	Categoria Freqüência		Categoria de Severidade		Categoria de Risco		Observações e ações	N ^o	
	Ação Dinâmica	Condição Estática			F	I	S	I	R	I			
Reação química indevida levando a danos na rocha selo (dissolução e reprecipitação de minerais). (durante e pós injeção)	1 - Presença de impureza na corrente de CO ₂ injetada acima do limite tolerável. 2 - Presença de contaminantes microbiológicas. 3 - Alterações do pH e do equilíbrio redox. 4 - Presença de contaminantes microbiológicos.	1 - Possibilidade de variação natural de temperatura e pressão 2 - Características (porosidade, permeabilidade, continuidade lateral, presença de fraturas) da rocha favoráveis para a ocorrência da reação. 3 - Características de composição mineral da rocha e arranjo dos poros (porosidade e permeabilidade). 4 - Presença de minerais de cálcio favorece para a reprecipitação de minerais da rocha podendo eventualmente danificar a estrutura da rocha selo.	1 - Fluxos de CO ₂ na zona vadosa podem ser extraídos utilizando a técnica de extração de vapor (SVE), ou uso de trincheiras. 2 - Em caso de grandes vazamentos, utilização de grandes ventiladores para auxiliar na diluição do CO ₂ na atmosfera.	- Meio Ambiente: vazamento até a zona vadosa, mas em delimitada área de extensão. - Pessoas: evasão da comunidade. - Imagem: registro em mídia local. - Instalações: perdas ou danos significantes, tanto para a rocha selo quanto para a magnitude de uma migração ou vazamento indesejável, mas reparáveis. - Financeiro: Perda significativa, porém reversível para o que foi investido no projeto	IM	30%	MEIO AMBIENTE	- CR	20%	BAIXO	44%	-	1
							PESSOAS	- CR	20%	BAIXO	44%		
							IMAGEM	- CR	20%	BAIXO	44%		
							INSTALAÇÕES	- CR	20%	BAIXO	44%		
							FINANCEIRO	- MO	20%	BAIXO	44%		
Vazamento de CO ₂ em virtude de alterações da rocha por atividade sísmica natural	Mesmas ações dinâmicas do cenário 1 (compartimento: selo)	1 - Característica da rocha e composição mineral da rocha e arranjo dos poros	Mesmos atenuantes do cenário 1 (compartimento: selo)	- Meio Ambiente: danos considerados entre níveis mínimo e médio toleráveis. - Pessoas: invasão de funcionários. - Imagem: registro em mídia	IM	8%	MEIO AMBIENTE	- MO	10%	BAIXO	17%	-	2
							PESSOAS	- MO	10%	BAIXO	17%		
							IMAGEM	- MO	10%	BAIXO	17%		

Metodologia de Avaliação de Riscos de CO₂ Armazenado (AR-CO₂)

Equipe:		Área: Campo Fazenda Mamoeiro, Bacia do Recôncavo										
Compartmento: Selo		Sistema: Injeção de CO₂ para armazenamento através do poço 1-FMO-001. Base: 18 kt de CO₂, considerando tempo de operação e encerramento 3 e 30 anos, respectivamente.							Data: 10/08/2012			
Evento Iniciador	Agravante		Atenuante	Impactos / Consequências	Categoria Freqüência		Categoria de Severidade		Categoria de Risco		Observações e ações	N ^o
	Ação Dinâmica	Condição Estática			F	I	S	I	R	I		
(pós injeção)				local. - Instalações: danos de impacto considerável, mas reparável. - Financeiro: perda insignificante.			INSTALAÇÕES - MO	10%	BAIXO	17%		
							FINANCEIRO - BA	10%	BAIXO	17%		
Vazamento de CO ₂ em virtude de alterações da rocha por atividade sísmica induzida. (durante e após a injeção)	Mesmas ações dinâmicas do cenário 1 (compartimento: selo)	1 - Característica da rocha e composição mineral da rocha e arranjo dos poros	Mesmos atenuantes do cenário 1 (compartimento: selo)	- Meio Ambiente: danos considerados entre níveis mínimo e médio toleráveis. - Pessoas: invasão de funcionários. - Imagem: registro em mídia local. - Instalações: danos de impacto considerável, mas reparável. - Financeiro: perda insignificante.	IM	8%	MEIO AMBIENTE - MO	30%	BAIXO	36%	-	3
							PESSOAS - MO	30%	BAIXO	36%		
							IMAGEM - MO	30%	BAIXO	36%		
							INSTALAÇÕES - MO	30%	BAIXO	36%		
							FINANCEIRO - BA	30%	BAIXO	36%		
Vazamento de CO ₂ pela rocha selo devido a aumento de pressão excedendo a pressão capilar da rocha selo. (*Injeção contínua) (durante a injeção)	Mesmas ações dinâmicas do cenário 1 (compartimento: selo).	1 - Falta de Treinamento. 2 - Especificação errada do sistema de injeção. 3 - Erro operacional.	Mesmos atenuantes do cenário 1 (compartimento: selo)	- Meio Ambiente: vazamento até a zona vadosa, mas em delimitada área de extensão. - Pessoas: evasão da comunidade. - Imagem: registro em mídia local. - Instalações: perdas ou danos significantes, tanto para a rocha selo quanto para a magnitude de uma migração ou vazamento indesejável, mas reparáveis. - Financeiro: Perda significativa, porém reversível para o que foi investido no projeto.	IM	40%	MEIO AMBIENTE - CR	20%	BAIXO	52%	-Obs2.: Atenção deve ser dada à confiabilidade dos dados referentes à frequência de ocorrência e severidade: aquisição de mais dados do poço e da zona geológica, revisar dados históricos, estabelecer processos de melhoria contínua (PGR) e dar ênfase ao item pessoas (capacitação, treinamento, procedimentos).	4
							PESSOAS - CR	20%	BAIXO	52%		
							IMAGEM - CR	20%	BAIXO	52%		
							INSTALAÇÕES - CR	20%	BAIXO	52%		
							FINANCEIRO - MO	20%	BAIXO	52%		

APÊNDICE C– Planilhas de AR-CO2 para o Campo Fazenda Mamoeiro com cenários do compartimento: zona de falhas e fraturas.

Metodologia de Avaliação de Riscos de CO ₂ Armazenado (AR-CO ₂)												
Equipe:				Área: Campo Fazenda Mamoeiro, Bacia do Recôncavo								
Compartimento: Zonas de Falhas/Fraturas			Sistema: Injeção de CO ₂ para armazenamento através do poço 1-FMO-001. Base: 18 kt de CO ₂ , considerando tempo de operação e encerramento 3 e 30 anos, respectivamente.				Data: 10/08/2012					
Evento Iniciador	Agravante		Atenuante	Impactos / Consequências	Categoria Freqüência		Categoria de Severidade		Categoria de Risco		Observações e ações	N ^o
	Ação Dinâmica	Condição Estática			F	I	S	I	R	I		
Sobrepessão devido ao aumento da taxa de injeção de CO ₂ levando a ativação ou reativação de falhas ou fraturas e consequente vazamento de CO ₂ (durante a injeção)	-	1- Falha humana (avaliação errada quanto à definição da pressão de reativação de falha). 2 - Falha no sistema de controle. 3 - Falha em ação operacional. 4 - Presença de fraturas na região num raio em torno de 4 km.	1 - Reduzir a sobrepessão (por exemplo, colocar o poço em produção) 2- Monitoramento da pressão na cabeça do poço e no reservatório.	- Meio Ambiente: grande ocorrência ambiental. - Pessoas: Vítimas e evasão de funcionários - Imagem: Registro em mídia regional - Instalações: impacto e danos significativos, porém reversíveis. - Financeiro: Perda significativa, porém reversível.	IM	20 %	MEIO AMBIENTE - CR	50 %	BAIXO	60 %	- Rec1.: Dispor de técnicas de monitoramento e verificação adequadas para detectar previamente, ou no estágio inicial qualquer vazamento de CO ₂ ou desvio padrão de operação, tais como: geofísica de poço, métodos geoquímicos como traçadores gasosos, detectores/Sensores de CO ₂ , monitoramento da saúde da vegetação local ao redor do poço. - Rec3.: Elaboração de Plano de Ação a Emergência, incluindo sirenes para alerta à comunidade e trabalhadores locais.	1
							PESSOAS - CR	40 %	BAIXO	52 %		
							IMAGEM - CR	40 %	BAIXO	52 %		
							INSTALAÇÕES - MO	50 %	BAIXO	60 %		
							FINANCEIRO - BA	20 %	BAIXO	36 %		
Atividade sísmica induzida devido à injeção de CO ₂ levando a ativação ou reativação de falhas e	1 - Falta de monitoramento e procedimento de monitoramento. 2 - Falta de monitoramento sísmico.	1 - Falta de treinamento/procedimento de manutenção. 2 - Presença de falhas na cimentação ou falha de cimentação. 3 - Falha no sistema de controle.	1 - Reduzir a sobrepessão (por exemplo, colocar o poço em produção) 2- Monitoramento da pressão na cabeça do poço e no reservatório.	- Meio Ambiente: impacto ambiental de pequena magnitude. - Pessoas: em virtude da sobrepessão, possibilidade de acidente com afastamento. Como a taxa de injeção é	IM	30 %	MEIO AMBIENTE - MO	50 %	BAIXO	65 %	-Obs2.: Atenção deve ser dada à confiabilidade dos dados referentes à frequência de ocorrência e severidade: aquisição de mais dados do	2
							PESSOAS - MO	40 %	BAIXO	58 %		

Metodologia de Avaliação de Riscos de CO₂ Armazenado (AR-CO₂)

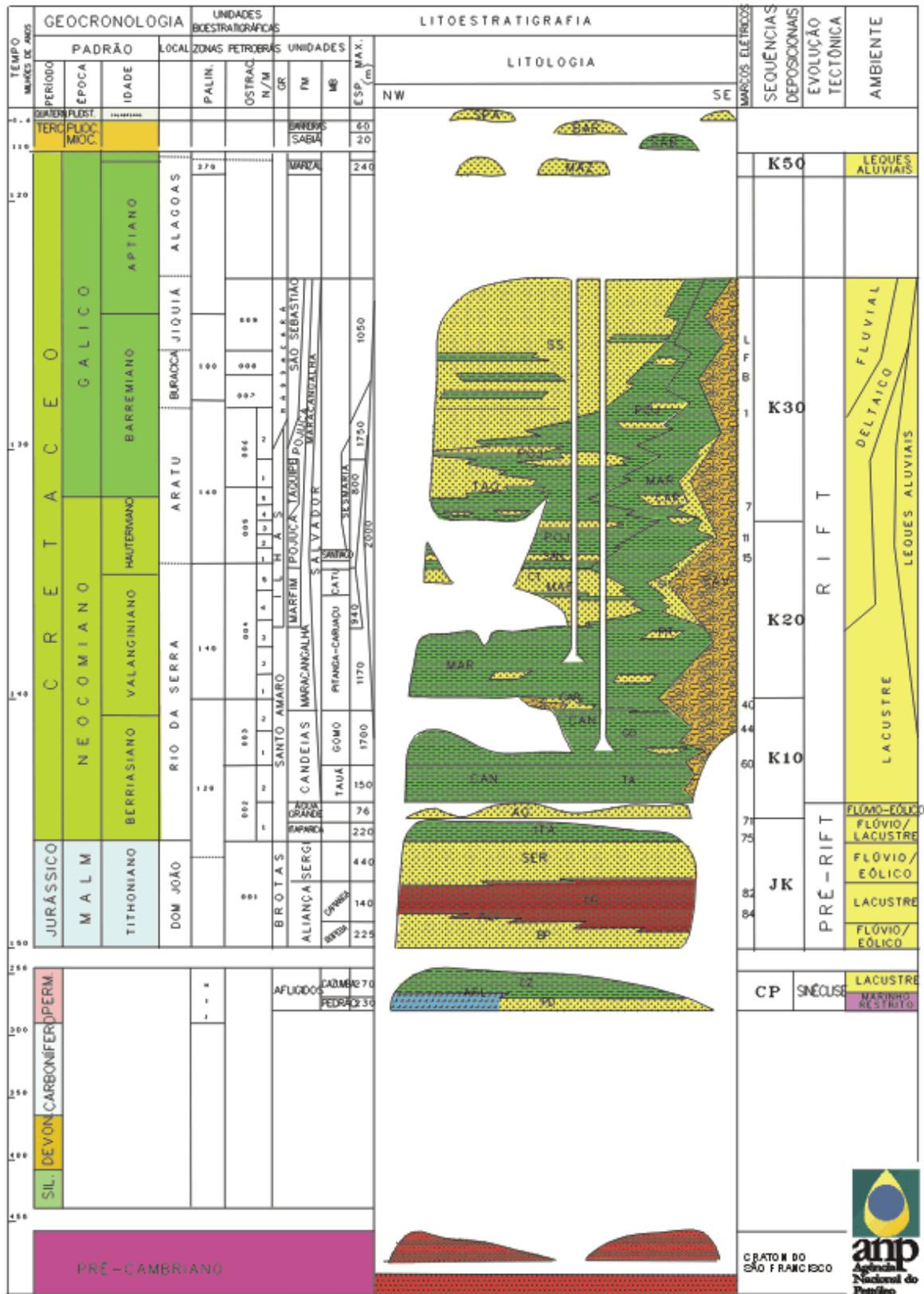
Equipe:		Área: Campo Fazenda Mamoeiro, Bacia do Recôncavo										
Compartimento: Zonas de Falhas/Fraturas		Sistema: Injeção de CO₂ para armazenamento através do poço 1-FMO-001. Base: 18 kt de CO₂, considerando tempo de operação e encerramento 3 e 30 anos, respectivamente.						Data: 10/08/2012				
Evento Iniciador	Agravante		Atenuante	Impactos / Consequências	Categoria Freqüência		Categoria de Severidade		Categoria de Risco		Observações e ações	N ^o
	Ação Dinâmica	Condição Estática			F	I	S	I	R	I		
consequente vazamento de CO ₂ (durante a injeção)		4 - Falha em ação operacional. 5 - Falha na especificação de equipamentos ou instrumentos. 6 - Presença de fraturas na região num raio em torno de 4 km.	Interromper injeção. 3 - Rocha reservatório situada a uma profundidade superior a 2.000 m.	relativamente baixa, não há potencial de evasão de funcionários. - Imagem: registro não significativo em média local e possibilidade de questionamento externo em virtude do registro de incidente. - Instalações: Sem danos, acidente restrito ao local de origem do problema. - Financeiro: Perda insignificante para o que foi investido no projeto			IMAGEM - MO	40 %	BAIXO	58 %	poço e da zona geológica, revisar dados históricos, estabelecer processos de melhoria contínua (PGR) e dar ênfase ao item pessoas (capacitação, treinamento, procedimentos).	
						INSTALAÇÕES - MO	40 %	BAIXO	58 %			
						FINANCEIRO - MO	40 %	BAIXO	58 %			
Perfuração indevida do reservatório em virtude de perfuração de novo poço/ atividade de escavação ou mineração levando a criação de novo caminho de migração/vazamento de CO ₂ .	1 - Falha do revestimento. 2 - Especificação errada do cimento ou do aço utilizado. 3 - Falta de monitoramento e procedimento de mineração levando a criação de novo caminho de migração/vazamento de CO ₂ .	1 - Falta de treinamento/procedimento de manutenção. 2 - Presença de falhas na cimentação ou falha de cimentação. 3 - Falha no sistema de controle. 4 - Falha em ação operacional. 5 - Falha na especificação de equipamentos ou instrumentos. 6 - Presença de fraturas na região num raio em torno de 4 km.	1 - Reduzir a sobrepessão (por exemplo, colocar o poço em produção) 2 - Monitoramento da pressão na cabeça do poço e no reservatório. Interromper injeção. 3 - Rocha reservatório situada a uma profundidade superior a 2.000 m.	- Mesmos impactos e consequências do cenário 2 (compartimento: zona de falhas e fraturas)	IM	40 %	MEIO AMBIENTE - MO	50 %	BAIXO	70 %	- Obs2 do cenário 2 (compartimentos: poço)	3
						PESSOAS - MO	40 %	BAIXO	64 %			
						IMAGEM - MO	40 %	BAIXO	64 %			
						INSTALAÇÕES - MO	40 %	BAIXO	64 %			
						FINANCEIRO - MO	40 %	BAIXO	64 %			

ANEXO A – Informações e parâmetros mais importantes dos Campos cedidos pela ANP para o Projeto Campo Escola (PCE)

Campos	QUIAMBINA	FAZENDA MAMOEIRO	CARACATU	RIACHO SESMARIA	BELA VISTA
Data da descoberta	7/4/1983	26/10/1982	29/11/1982	29/1/1983	24/6/1984
Período de Produção	1983-1989	1982-1987	1983-1984	1983-1988	1984-1996
	1995-1997				
	2003-2007				
Área (km ²)	1,4	4,7	1,6	2	2,1
Número de poços/profundidade	8 – (04A - 637 m)	1 (3.622 m)	2 (3.054 m e 2.670 m)	1 (2.120 m)	7
Formação do reservatório (arenitos)	Candeias	Água Grande	Candeias, Itaparica e Sergi	Candeias	Candeias, Água Grande, Itaparica e Sergi
Volume original <i>in situ</i> de óleo	975 mil bbl	19,3 milhões de bbl	3,53 milhões de bbl	5,52 milhões de bbl	9,7 milhões de bbl
Volume original <i>in situ</i> de gás	3,14 milhões de m ³	1,28 milhões de m ³	48,57 milhões de m ³	66,6 milhões de m ³	63,4 milhões de m ³
Fluido Principal	Óleo leve de 28,4° API	Óleo leve de 36° API	Óleo leve de 40° API	Óleo leve de 41° API	Óleo leve de 28,4° API
Produção acumulada de óleo / Fator de Recuperação (FR)	59 mil bbl (FR = 6,0%)	99 mil bbl (FR = 0,8%)	3,33 mil bbl (FR = 0,1%)	44 mil bbl (FR = 0,8%)	170 mil bbl (FR = 1,8%)
Produção acumulada de gás / Fator de Recuperação (FR)	136 mil m ³ (FR = 4,3%)	16,65 mil m ³ (FR = 2,0%)	22,6 mil m ³ (FR = 0,05%)	790 mil m ³ (FR = 1,2%)	2,4 mil bbl (FR = 3,8%)

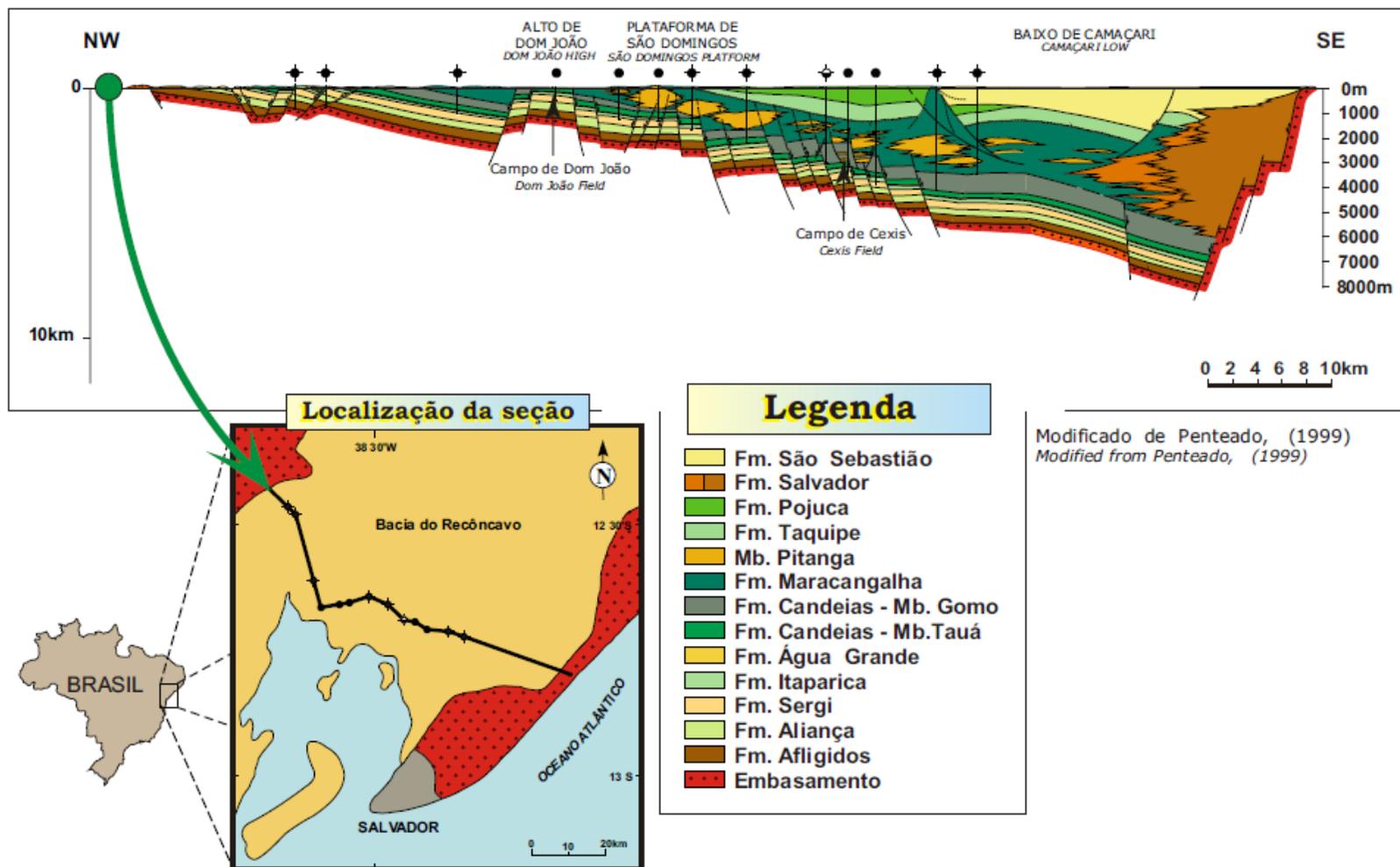
Fonte: Oliveira Júnior (2009)

ANEXO B – Coluna Estratigráfica da Bacia do Recôncavo



Fonte: ANP. 2º Rodada. 2000. Disponível em <http://www.anp.gov.br/brasil-rounds/round2/Pdocs/Pbacias/PBframe05.htm>. Acesso em: 15 mai. 2012.

ANEXO C – Seção Geológica Esquemática da Bacia do Recôncavo



Fonte: ANP (2002) - 3ª Rodada. Modificado de PENTEADO, H. L. B. **Modelisation compositionnelle 2D de la genèse, expulsion et migration de petróleo dans le compartiment sud du bassin de Recôncavo**, Brésil. Tese de Doutorado - Universidade de Paris 6 - 1999 - 233 pgs. Disponível em <http://www.anp.gov.br/brasil-rounds/round3/downloads/sg_reconcavo.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2012.

ANEXO D – FICHA DE INFORMAÇÃO DO PRODUTO QUÍMICO (FISPQ) CO₂

Ficha de Informação de Produto Químico		
IDENTIFICAÇÃO		Help
Número ONU	Nome do produto	Rótulo de risco
1013	DIÓXIDO DE CARBONO	
Número de risco 20	Classe / Subclasse 2.2	
Sinônimos GÁS CARBÔNICO ÁCIDO ; ANIDRIDO CARBÔNICO		
Aparência GÁS COMPRIMIDO LIQÜEFEITO OU SÓLIDO; GÁS SEM COLORAÇÃO OU SÓLIDO BRANCO; SEM ODOR; O SÓLIDO AFUNDA E FERVE NA ÁGUA; PRODUZ NUVEM DE VAPOR VISÍVEL.		
Fórmula molecular CO ₂	Família química ÓXIDO	
Fabricantes Para informações atualizadas recomenda-se a consulta às seguintes instituições ou referências: ABIQUIM - Associação Brasileira da Indústria Química : Fone 0800-118270 ANDEF - Associação Nacional de Defesa Vegetal : Fone (11) 3081-5033 Revista Química e Derivados - Guia geral de produtos químicos , Editora QD: Fone (11) 3826-6899 Programa Agrofit - Ministério da Agricultura		
MEDIDAS DE SEGURANÇA		Help
Medidas preventivas imediatas EVITAR CONTATO COM O LÍQUIDO E O SÓLIDO. MANTER AS PESSOAS AFASTADAS. PARAR O VAZAMENTO, SE POSSÍVEL.		
Equipamentos de Proteção Individual (EPI) USAR LUVAS E BOTAS DE COURO, ROUPAS DE PROTEÇÃO E MÁSCARA DE RESPIRAÇÃO AUTÔNOMA PARA ALTAS CONCENTRAÇÕES.		
RISCOS AO FOGO		Help
Ações a serem tomadas quando o produto entra em combustão NÃO É INFLAMÁVEL. ESFRIAR OS RECIPIENTES EXPOSTOS, COM ÁGUA.		
Comportamento do produto no fogo OS RECIPIENTES PODEM EXPLODIR, QUANDO AQUECIDOS.		
Produtos perigosos da reação de combustão NÃO PERTINENTE.		
Agentes de extinção que não podem ser usados NÃO PERTINENTE.		
Limites de inflamabilidade no ar Limite Superior: NÃO É INFLAMÁVEL Limite Inferior: NÃO É INFLAMÁVEL		
Ponto de fulgor NÃO É INFLAMÁVEL		
Temperatura de ignição NÃO É INFLAMÁVEL		
Taxa de queima NÃO É INFLAMÁVEL		

Taxa de evaporação (éter=1)
DADO NÃO DISPONÍVEL

NFPA (National Fire Protection Association)
NFPA: NÃO LISTADO

PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E AMBIENTAIS

[Help](#)

Peso molecular 44,0	Ponto de ebulição (°C) SUBLIMA	Ponto de fusão (°C) -56,6 °C A 5,2 atm
Temperatura crítica (°C) 31	Pressão crítica (atm) 72,9	Densidade relativa do vapor 1,53
Densidade relativa do líquido (ou sólido) 1,56 A -79 °C (SÓLIDO)	Pressão de vapor 760 mmHg A -78,2 °C	Calor latente de vaporização (cal/g) 83
Calor de combustão (cal/g) NÃO PERTINENTE	Viscosidade (cP) 0,1 A 0 °C	
Solubilidade na água 0,141 g/100 mL DE ÁGUA A 25 °C	pH NÃO PERT.	

Reatividade química com água
NÃO REAGE.

Reatividade química com materiais comuns
NÃO REAGE.

Polimerização
NÃO OCORRE.

Reatividade química com outros materiais
IMCOMPATÍVEL COM METAIS QUIMICAMENTE ATIVOS COMO SÓDIO, POTÁSSIO E TITÂNIO.

Degradabilidade
PRODUTO VOLÁTIL (GÁS).

Potencial de concentração na cadeia alimentar
NENHUM.

Demanda bioquímica de oxigênio (DBO)
NENHUMA.

Neutralização e disposição final
LIBERAR PARA A ATMOSFERA. RECOMENDA-SE O ACOMPANHAMENTO POR UM ESPECIALISTA DO ÓRGÃO AMBIENTAL.

INFORMAÇÕES ECOTOXICOLÓGICAS

[Help](#)

Toxicidade - limites e padrões

L.P.O.: NÃO PERTINENTE

P.P.: NÃO PERTINENTE

IDLH: 40.000 ppm

LT: Brasil - Valor Médio 48h: 3.900 ppm

LT: Brasil - Valor Teto: 4.290 ppm

LT: EUA - TWA: 5.000 ppm

LT: EUA - STEL: 30.000 ppm

Toxicidade ao homem e animais superiores (vertebrados)

M.D.T.: DADO NÃO DISPONÍVEL

M.C.T.: SER HUMANO: LCLo=100.000ppm (OBS.1)

Toxicidade: Espécie: RATO

Via Respiração (CL50): LCLo (15 min) = 656 ppt

Toxicidade: Espécie: CAMUNDONGO

Toxicidade: Espécie: OUTROS

Toxicidade aos organismos aquáticos: PEIXES : Espécie

Toxicidade aos organismos aquáticos: CRUSTÁCEOS : Espécie

Toxicidade aos organismos aquáticos: ALGAS : Espécie
Toxicidade a outros organismos: BACTÉRIAS
Toxicidade a outros organismos: MUTAGENICIDADE
Toxicidade a outros organismos: OUTROS

Informações sobre intoxicação humana

Tipo de contato VAPOR	Síndrome tóxica SE INALADO, CAUSARÁ TONTURA OU DIFICULDADE RESPIRATÓRIA.	Tratamento MOVER PARA O AR FRESCO. SE A RESPIRAÇÃO FOR DIFICULTADA, DAR OXIGÊNIO.
Tipo de contato LÍQUIDO	Síndrome tóxica CAUSARÁ ENREGELAMENTO.	Tratamento LAVAR AS ÁREAS AFETADAS COM MUITA ÁGUA. NÃO ESFREGAR AS ÁREAS AFETADAS.

DADOS GERAIS

[Help](#)

Temperatura e armazenamento
AMBIENTE.

Ventilação para transporte
SÓLIDO - ABERTA (OBS.2)

Estabilidade durante o transporte
ESTÁVEL.

Usos
SÍNTESES DE URÉIA, GELO SECO, EXTINTOR DE INCÊNDIO E SÍNTESES ORGÂNICAS.

Grau de pureza
99,995% (PESQUISA).

Radioatividade
NÃO TEM.

Método de coleta
DADO NÃO DISPONÍVEL.

Código NAS (National Academy of Sciences)
NÃO LISTADO

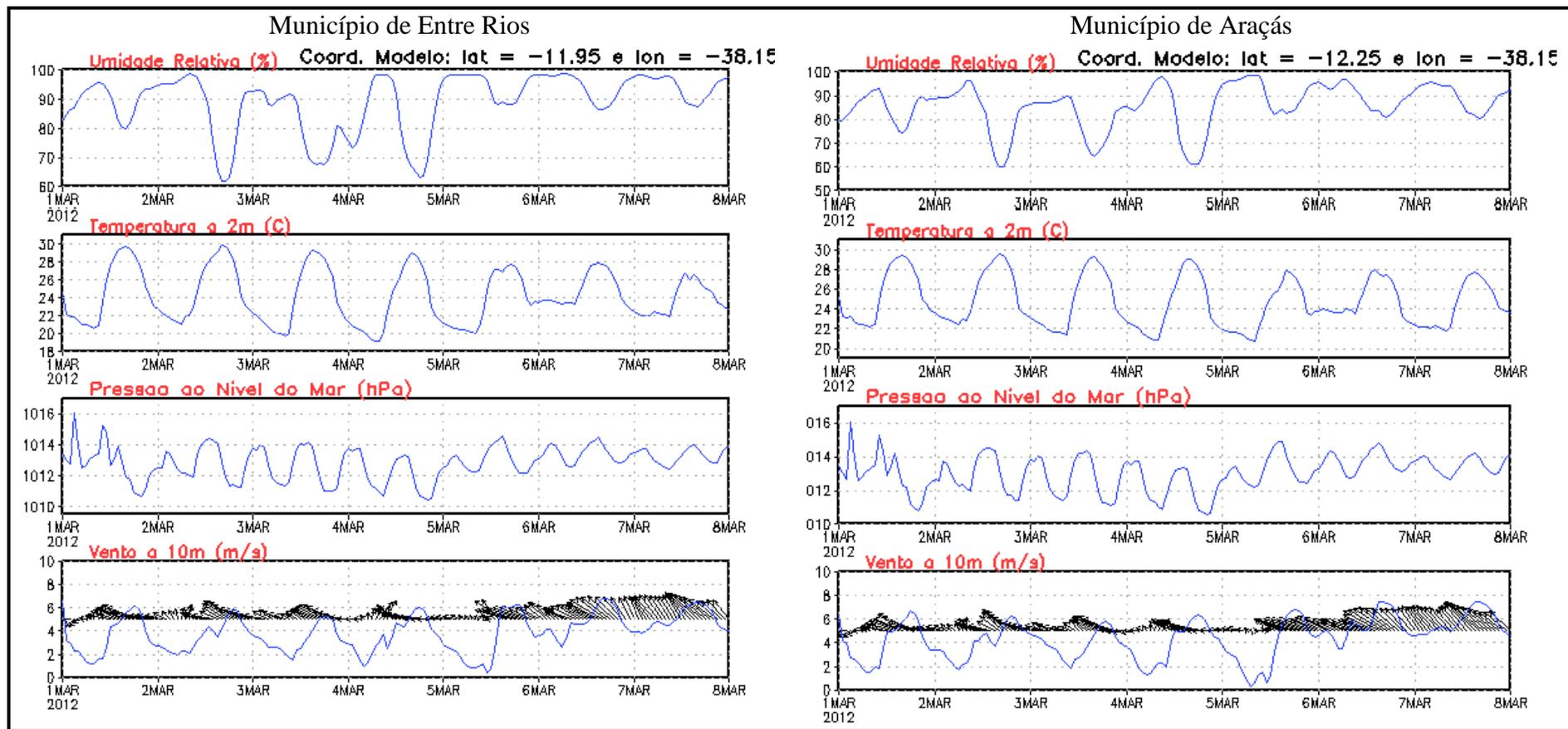
OBSERVAÇÕES

[Help](#)

1) M.C.T.:SER HUMANO: TCLo = 2.000 ppm (EFEITO TÓXICO PULMONAR). ECOTOXICOLOGIA ORGANISMOS AQUÁTICOS: CL EM VÁRIOS ORGANISMOS DE ÁGUA CONTINENTAL = 100 A 200 mg/L - PERÍODO DE TEMPO NÃO ESPECIFICADO. 2) VENTILAÇÃO PARA TRANSPORTE: LÍQUIDO - VÁLVULA DE ALÍVIO POTENCIAL DE IONIZAÇÃO (PI) = 13,77 eV

Fonte: CETESB (2012). Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/>>. Acesso em: 17 mai. 2012.

ANEXO E – Meteograma dos municípios próximas ao poço do Campo Fazenda Mamoeiro: Entre Rios e Araçás



Fonte: CPTEC (2012)

UFBA
UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL - PEI

Rua Aristides Novis, 02, 6º andar, Federação, Salvador BA
CEP: 40.210-630
Telefone: (71) 3283-9800
E-mail: pei@ufba.br
Home page: <http://www.pei.ufba.br>

