

JOÃO LUIZ PONCE MAIA

**SEPARAÇÃO E CAPTURA DO DIÓXIDO DE CARBONO
EM INSTALAÇÕES MARÍTIMAS DE PRODUÇÃO DE PETRÓLEO**

**São Paulo
2007**

JOÃO LUIZ PONCE MAIA

**SEPARAÇÃO E CAPTURA DO DIÓXIDO DE CARBONO
EM INSTALAÇÕES MARÍTIMAS DE PRODUÇÃO DE PETRÓLEO**

**Tese apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para
obtenção do Título de Professor Doutor
junto ao Departamento de Engenharia
Hidráulica e Sanitária**

**São Paulo
2007**

JOÃO LUIZ PONCE MAIA

**SEPARAÇÃO E CAPTURA DO DIÓXIDO DE CARBONO
EM INSTALAÇÕES MARÍTIMAS DE PRODUÇÃO DE PETRÓLEO**

**Tese apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para
obtenção do Título de Professor Doutor
junto ao Departamento de Engenharia
Hidráulica e Sanitária**

**Área de Concentração:
Engenharia Hidráulica, Recursos
Hídricos**

**Orientador: Prof. Livre-Docente
Prof Dr. Mario Thadeu L. de Barros**

**Co-Orientadora: Profa. Livre-Docente
Profa. Dra. Patrícia H. L. dos Santos
Matai**

**São Paulo
2007**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E A DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTES TRABALHOS, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

FICHA CATALOGRÁFICA

Maia, João Luiz Ponce

**Separação e captura do dióxido de carbono em instalações marítimas de produção de petróleo / J.L. P. Maia. -- São Paulo, 2007.
216 p.**

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária.

1.Efeito estufa 2.Dióxido de carbono 3.Petróleo 4.Separação de CO₂ 5.Captura de CO₂ 6.Emissão atmosférica 7.Armazenamento geológico I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária II.t.

DEDICATÓRIA

Dedico esta tese aos meus pais, irmãos, esposa e minha filha, pelo incentivo, compreensão e paciência que tiveram comigo, ao longo destes últimos três anos.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Mario Thadeu L. M. Barros pelo seu incentivo e visão, que me foram muito úteis para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

À Profa. Dra. Patrícia H. L. dos Santos Matai também pelo incentivo, apoio e pelos comentários realizados nos últimos dois anos.

Aos meus pais Jorge Maia da Silva e Maria Helena Ponce Maia da Silva, minha esposa Beatriz Tavares Pereira Ponce Maia e minha filha Helena Ponce Maia, pelo carinho e incentivo que me deram, e a todos que colaboraram direta ou indiretamente, na execução desta tese.

RESUMO

A necessidade atual do mercado brasileiro para aumentar a oferta de gás incentiva a comunidade científica nacional no desafio de desenvolvimento de novas rotas tecnológicas, visando aumentar o aproveitamento do gás natural. Tal desafio é acompanhado por uma demanda mundial dos países signatários do Protocolo de Quioto¹ (ratificado em 2005) para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Apesar de o Brasil não apresentar nenhuma meta de redução, no primeiro período deste Protocolo (2008 a 2012), o setor do petróleo (atividade de E&P), através de suas companhias operadoras, que atuam no país, já estabeleceram metas corporativas para emissão evitada de gases de efeito estufa, em suas instalações de produção (maior predominância das unidades marítimas de produção).

O presente trabalho aborda a análise técnica e econômica de um processo proposto de separação e captura de dióxido de carbono (CO₂), através de estudo de caso (Primeira e Segunda Proposição) de simulação de processo, em uma instalação marítima de produção de petróleo, comparativamente a sua ausência (Caso Base).

A Primeira Proposição considera a separação e a captura do CO₂ oriundo tanto do gás natural produzido, quanto do gás de queima de uma turbina a gás.

A Segunda Proposição considera a separação e a captura do CO₂ oriundo somente do gás natural produzido.

Até o momento, no Brasil, ainda não foram desenvolvidas tecnologias adequadas para a captura do CO₂, em instalações marítimas de produção de petróleo. Adicionalmente a regulação atual (Portaria nº104/2002 da ANP²) limita o potencial de utilização do CO₂ que existe na composição do gás natural comercializado no país, pelo fato de não diferenciar em sua especificação técnica, os usos deste importante combustível.

Os resultados obtidos nesta tese, com a utilização de simulador de processo de uso comercial mostraram emissões evitadas de CO₂ para atmosfera de 55 % (caso Segunda Proposição que apresentou maior viabilidade econômica), em relação ao resultado obtido para o Caso Base. Este relevante resultado equivale a uma emissão evitada de aproximadamente 241 x 10³ t/ano, para uma única unidade piloto proposta.

¹ Acordo a nível internacional por parte de 175 países signatários no mundo, que visando a estabilização da concentração de gases de efeito estufa (GEE) na terra, estabeleceu, em seu primeiro período de vigência (2008-2012), para países desenvolvidos metas de redução de suas emissões de GEE.

² Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.

De acordo com o estudo de análise econômica apresentado, a Segunda Proposição (VPL US\$ 15,3 x 10⁶) foi melhor do que a da Primeira Proposição (VPL: US\$ 13,9 x 10⁶) ambos usando o Caso Base como referência.

Dentre os ganhos esperados com o uso desta nova tecnologia destacam-se: redução do consumo interno e das perdas de gás natural, emissão evitada de CO₂ e hidrocarbonetos para a atmosfera, além do aumento das práticas de armazenamento de gás e CO₂, em reservatórios geológicos depletados³ de petróleo.

Estima-se que num cenário futuro, com a implantação deste novo processo proposto, em instalações marítimas de produção de petróleo, uma relevante contribuição de emissões evitadas de gases de efeito estufa possa ocorrer na área de E&P de petróleo no Brasil.

³ Estado em que o reservatório de petróleo apresenta baixa energia de pressão, o que leva a interrupção da sua produção, considerando as tecnologias de recuperação implantadas no projeto.

ABSTRACT

The current Brazilian market needs to increase the natural gas supply to incentive the national scientific community to the challenge of developing new technologies routes aiming increase the utilization of the produced natural gas. Such challenge is followed by a world demand from signatory countries of the Kyoto Agreement (ratified in 2005) to reduce the greenhouse gas emissions. In spite of, the Brazil does not have any reduction goal, in the first period (2008 to 2012) the oil sector (E&P activity), by their oil operators companies that works in our country, has already established corporative goals to avoided greenhouse gas emissions in their production facilities (bigger predominance of offshore production unities).

The present work approaches the economic and technical evaluation of a carbon dioxide (CO₂) separation and capture proposal process (First and Second Proposal Case) comparatively your absence (Base Case).

The First Case consider the CO₂ separation and capture both the produced gas and exhausted gases of one turbine driven by gas.

The Second Case consider only the CO₂ separation and capture from the produced gas.

At the present, in Brazil, it has not been developed yet suitable technologies, for such use, and the CO₂ is normally disposal to the atmosphere. Moreover, the present Regulation (104/2002 ANP Decree) limit the potential of CO₂ use existing in the gas composition that is marketed in the country, due to not differentiate the uses of this important fuel.

The results obtained of this thesis, by using a process simulator of commercially use showed CO₂ avoided emissions of 55 % to the atmosphere (Second Proposal Case that shows the best economic evaluation) related to the result obtained from the Base Case. This relevant result is equivalent in mass flow, to the avoidance emission of roughly 241×10^3 tons per year, for a single pilot unity proposal.

According the economic evaluation study, the Second Proposal Case (VPL:US\$ $15,3 \times 10^6$) was better than the First Case (VPL: US\$ $13,9 \times 10^6$), using the Case Base as reference.

Within the benefits expected with the use of this new technology are the following: reduction both the internal gas consumption and natural gas losses (atmospheric disposal), emissions avoided of CO₂ and hydrocarbons, beyond the increase of CO₂ and gas storage practices in offshore depleted oil fields.

It is estimated, in future scenery, with the implantation of this new proposal process in offshore production unities, relevant contribution of avoided greenhouse gases emissions can occur in oil E&P tasks in Brazil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Reservatório produtor de óleo e de gás	41
Figura 2.2- Distribuição percentual do forçamento radioativo dos GEE	47
Figura 2.3- Emissões e Previsões de CO ₂ no mundo de origem fóssil (10 ⁶ m ³) no período de 2003 a 2030.....	48
Figura 2.4- Diagrama de blocos da estrutura global de produção de gás no Brasil.....	49
Figura 2.5- Emissões de GEE da Petrobras (2004-2006) em t CO ₂ eq. por ano.....	50
Figura 2.6- Distribuição percentual das emissões de CO ₂ equivalente da Petrobras por atividades (2004)	50
Figura 2.7- Processo de Transferência de RCE	54
Figura 2.8- Estrutura esquemática do ciclo de um projeto MDL	56
Figura 3.1- Estrutura básica do Processo de Captura e Armazenamento de CO ₂	66
Figura 4.1- Representação esquemática de uma turbina a gás natural	70
Figura 4.2- Processo de pós-combustão	75
Figura 4.3- Processo de pré-combustão	75
Figura 4.4- Processo de oxi-combustão (denitrificação)	76
Figura 4.5- Estrutura molecular de aminas comerciais	78
Figura 4.6- Fluxograma esquemático do processo de absorção com aminas	79
Figura 4.7- Representação esquemática de uma membrana polimérica	82
Figura 5.1- Estrutura esquemática de um sistema marítimo de produção de petróleo.....	84
Figura 5.2- Estrutura esquemática de processo de uma unidade marítima de produção de petróleo	85
Figura 5.3- Fluxograma da Planta de Gás	87
Figura 5.4- Vent de gás	91
Figura 5.5- Sistema de alívio	92
Figura 5.6- Desenho esquemático de um ejetor para recuperação de CO ₂ com fluido motriz gás natural	100
Figura 5.7- Modelo da tela de resultado do programa Ejetor	101
Figura 5.8- Configuração básica de um sistema de compressão de gás	102
Figura 6.1- Emissão de gases de combustão (turbina a gás natural)	104
Figura 6.2- Emissão atmosférica na unidade de remoção de CO ₂	104

Figura 6.3- Representação esquemática da malha de transferência e recebimento de gás	106
Figura 6.4- Representação esquemática da cadeia do gás natural e a aplicação da Portaria nº104/2002 da ANP.....	110
Figura 7.1- Representação esquemática do local para implantação do projeto	117
Figura 7.2- Fluxograma esquemático do caso base	125
Figura 7.3- Fluxograma esquemático do sistema de geração de energia elétrica. (Simulador Hysys)	126
Figura 7.4- Fluxograma esquemático do sistema de separação do CO ₂ com uma torre contactora (simulador Hysys)	128
Figura 7.5- Distribuição percentual das emissões atmosféricas globais (Caso Base)	130
Figura 7.6- Fluxograma esquemático do Caso Primeira Proposição (1ª Parte)	134
Figura 7.7- Fluxograma esquemático do Caso Primeira Proposição (2ª Parte)	135
Figura 7.8- Fluxograma esquemático do sistema de captação e pré-tratamento dos gases de combustão	137
Figura 7.9- Fluxograma esquemático do sistema de separação híbrida do CO ₂ da Primeira Proposição	138
Figura 7.10- Fluxograma esquemático do sistema de armazenamento do CO ₂	140
Figura 7.11- Distribuição percentual volumétrica das emissões atmosféricas globais da Primeira Proposição	142
Figura 7.12- Fluxograma esquemático do Caso Segunda Proposição (1ª Parte)	145
Figura 7.13- Fluxograma esquemático do Caso Segunda Proposição (2ª Parte)	146
Figura 7.14- Fluxograma esquemático do sistema de separação híbrida do CO ₂ da Segunda Proposição	147
Figura 7.15- Distribuição percentual volumétrica das emissões atmosféricas globais da Segunda Proposição	149
Figura 7.16- Emissões atmosféricas por fonte emissora (10 ³ t CO ₂ eq./ano)	150
Figura 7.17- Emissões atmosféricas dos Casos Base, Primeira e Segunda Proposição (10 ⁵ t CO ₂ eq./ano)	150
Figura 8.1- Estrutura básica de um Programa de Análise Econômica	152
Figura 8.2- Curva da produção do gás produzido e de gás lift da Primeira Proposição.....	154
Figura 8.3- Estrutura do balanço de massa da Primeira Proposição	155

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Componentes do gás natural	42
Tabela 2.2- Emissões atmosféricas na indústria do petróleo	45
Tabela 2.3- Valores de GWP dos gases de efeito estufa em função do tempo	46
Tabela 2.4- Custos de transação inerente ao ciclo de projetos MDL	60
Tabela 2.5- Custos mínimos de transação associados com o ciclo de um projeto MDL	60
Tabela 3.1- Resultados comparativos do custo evitado e da taxa de captura do CO ₂ entre duas alternativas de geração termelétrica a gás natural	69
Tabela 4.1- Composição típica de gases de combustão de uma turbina a gás	72
Tabela 4.2- Fatores de emissão	73
Tabela 5.1- Estimativa da evolução das emissões de CO ₂ nas instalações marítimas de produção de petróleo do Rio de Janeiro no período 2002-2006.....	94
Tabela 5.2- Blocos de entrada do simulador de processo Hysys	96
Tabela 6.1- Especificação proposta para consumo próprio (uso energético) em instalações marítimas de produção de petróleo	111
Tabela 6.2- Especificação proposta para consumo próprio (uso não energético) em instalações marítimas de produção de petróleo	112
Tabela 7.1- Dados de entrada da simulação do Caso Base	122
Tabela 7.2- Emissões atmosféricas globais do Caso Base	130
Tabela 7.3- Dados de entrada do caso Primeira Proposição	131
Tabela 7.4- Principais correntes e respectivas variáveis do sistema de captação e pré-tratamen- to dos gases de combustão	137
Tabela 7.5- Emissões atmosféricas globais do caso Primeira Proposição	142
Tabela 7.6- Dados de entrada da simulação do caso Segunda Proposição	143
Tabela 7.7- Emissões atmosféricas globais do caso Segunda Proposição	149
Tabela 8.1- Estimativa do custo total de investimento do caso Primeira Proposição (CAPEX)	153
Tabela 8.2- Estimativa do custo operacional global do caso Primeira Proposição (OPEX) ..	154
Tabela 8.3- Dados comparativos de vazão entre o caso Base e a Primeira Proposição para o 1º ano.....	156
Tabela 8.4- Estimativa do custo total de investimento do caso Segunda Proposição (CAPEX)	157

Tabela 8.5- Estimativa do custo operacional global do caso Segunda Proposição (OPEX).	158
Tabela 8.6- Resultados econômicos da Primeira Proposição	160
Tabela 8.7- Resultados econômicos da Segunda Proposição	161

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Taxa de Atividade
ACB	Vazão de Gás Combustível (Isento CO ₂) Queimado nas Turbinas a Gás
ACQ	Vazão de gás (isento de CO ₂) de contingência queimado
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
AND	Autoridade Nacional Designada
B	Vazão volumétrica de gás combustível de alta pressão para uso energético, Isento de CO ₂
BA	Bahia
BP	British Petroleum
BEN	Balanco Energético Nacional
BM&F	Bolsa de Mercadorias & Futuros
BVRJ	Bolsa de Valores do Rio de Janeiro
CAPEX	Capital Expenditure
CCS	Carbon Dioxide Capture and Storage
CCP	Carbon Dioxide Capture Project
CDM	Clean Develop Mechanism
CER	Certified Emissions Register
CSLF	Carbon Sequestration Leadership Fórum
CSLF	Carbon Sequestration Leadership Fórum
COP3	3ª Reunião da Conferência das Partes
CO ₂ ecap	Emissões de CO ₂ no Cenário de Captura,
CO ₂ eref	Emissões de CO ₂ no Cenário de Referência
COEcap	Custo da Eletricidade Gerada Com a Captura do CO ₂
COEref	Custo da Eletricidade Gerada Sem a Captura do CO ₂
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COFINS	Contribuição Federal
CAPEX	Custo de Investimento de Capital
DCP	Documento de Concepção de Projeto
DEA	Dietanolamina
DJSI	Down Jones Sustainability Index
E	Emissões
ECO ₂	Emissão do CO ₂

ECGEE	Emissão Gasosa do Componente de Gás de Efeito Estufa
EGEE	Emissões Atmosféricas dos Gases de Efeito Estufa
EgáscombsCO ₂ alb	Emissão do Gás Combustível, Uso Não Energético, Isento de CO ₂ Queimado no Sistema de Alívio, no Caso Base
EgáscontsCO ₂ alb	Emissão do CO ₂ Gerado pela Combustão do Gás Combustível, Isento CO ₂ , no Sistema de Alívio, em situações de Contingência, no Caso Base
<i>EgelsCO₂b</i>	Emissão Gerada pela Combustão do Gás Combustível de Uso Energético, Isento de CO ₂ , no Caso Base
<i>EgelsCO₂p1</i>	Emissão do CO ₂ Gerada pela Combustão do Gás Combustível de Uso Energético, Isento de CO ₂ , na Primeira Proposição
EgelCO ₂ b	Emissão do CO ₂ Existente no Gás Combustível de Uso Energético do Caso Base
<i>EgelCO₂p1</i>	Emissão do CO ₂ Existente na Composição do Gás Combustível de Uso Energético, da Primeira Proposição
EgnealCO ₂ p1	Emissão do CO ₂ Existente no Gás Combustível de Uso Não Energético, para o Sistema de Alívio, da Primeira Proposição
EgnealsCO ₂ p1	Emissão do CO ₂ a partir da Combustão do Gás Combustível de Uso Não Energético, Isento de CO ₂ , da Primeira Proposição
Ehcgásselvab	Emissão de Hidrocarbonetos, Isento de CO ₂ do Gás de Selagem dos Compressores, Ventilado para Atmosfera, no Caso Base
Ehcgásnesvab	Emissão de Hidrocarbonetos, Isento de CO ₂ do Gás Combustível Não Energético, Ventilado para Atmosfera, no Caso Base
EIA	Energy Information Administration
EOD	Entidade Operacional Designada
ECO ₂ gáscombalb	Emissão do CO ₂ Existente na Composição do Gás Queimado em Situação de Contingência, no Caso Base
ECO ₂ gásnevab	Emissão do CO ₂ oriundo do gás combustível não energético para vent atmosférico, no Caso Base
ECO ₂ gáscontalb	Emissão do CO ₂ Existente na Composição do Gás Queimado em Situação de Contingência, no Caso base
ECO ₂ gásselvab	Emissão de CO ₂ Oriundo do Gás de Selagem para Vent Atmosférico, no Caso Base

ECO ₂ gásexpp1	Emissão Estimada do CO ₂ em Instalações de Produção, Externa a Área de Concessão do Projeto, na Primeira Proposição
EOR	Enhanced Oil Recovery
EOD	Entidade Operacional Designada
E&P	Exploração e Produção
EPA	Environment Protect Agency
ETS	Emissions Trading Scheme for Greenhouse Gases
Etotvab	Emissão Total do Sistema de Vent Atmosférico, no Caso Base
Etotgel	Emissão Total de CO ₂ do Sistema de Geração de Energia Elétrica no Caso Base
Etotgelp1	Emissão Total de CO ₂ do Sistema de Geração de Energia Elétrica da Primeira Proposição
EtotUCO ₂ b	Emissão Total de CO ₂ do Sistema de Remoção de CO ₂ , no Caso Base
Etotalp1	Emissão Total de CO ₂ Equivalente do Sistema de Alívio, na Primeira Proposição
Etotalb	Emissão Total de CO ₂ Equivalente do Sistema de Alívio, no Caso Base
EVTE	Estudo de Viabilidade Técnico e Econômico
f	Fator de Emissão do Gás Natural
fd	Fator de Disponibilidade da Torre Contactora da Unidade de Remoção de CO ₂
feop	Fator de Eficiência Operacional da Turbina que Possui Sistema de Captação de Gases de Combustão
fgn	Fator de Emissão do Gás Natural
GLP	Gás liquefeito de Petróleo
GEE	Gases de Efeito Estufa
GA	Gás Associado
GN	Gás Natural
GNA	Gás Não-Associado
GNV	Gás Natural Veicular
GRI	Global Reporting Index
GTSP	Global Energy Technology Strategy
GWP	Global Warming Potential
GWP_{CH_4}	Potencial de Aquecimento Global do Metano

HCs	Hidrocarbonetos
HCNM	Hidrocarbonetos Não Metano
HFC	Hidrofluorcarbono
HFC-23	Hidrofluorcarbono 23
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IOR	Improved Oil Recovery
ICMS	Imposto sobre Circulação de Serviços e Mercadoria
LGN	Líquido de Gás Natural
MBRE	Mercado Brasileiro de Emissões
MM	Massa Molar do Gás Natural
MMC	Massa Molar do Carbono
MMCO ₂	Massa Molar do Dióxido de Carbono
MMCH ₄	Massa Molar do Componente Metano
MEA	Monoetanolamina
MDEA	Metildietanolamina
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MCT	Ministério das Ciências e da Tecnologia
MBRE	Mercado Brasileiro de Emissões
MDIC	Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior
MMgáscombb	Massa Molar do Gás Combustível, no Caso Base
MME	Ministério das Minas e Energia
MP	Material Particulado
NAE	Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República
NIST	National Institute of Standards and Technology
OECD	Organização para a Cooperação e para o Desenvolvimento Econômico
O&M	Operação e Manutenção
ONU	Organização das Nações Unidas
OPEX	Operational Expenditure
PP	Preparação do Projeto
PASEP	Programa de Formação do Patrimônio do Servidor Público
PIS	Programas de Integração Social
PCI	Poder Calorífico Inferior do Gás Natural

PCIb	Poder Calorífico Inferior do Gás Natural, no Caso Base
PCIp1	Poder Calorífico Inferior do Gás Combustível da Primeira Proposição
PFC	Perfluorcarbono
P_i	Pressão Parcial do Componente i
P	Pressão Total do Sistema
Q	Vazão Mássica do Gás Combustível
Q1	Vazão Volumétrica de Gás Produzido e de Gás Lift, na Primeira Proposição
Q1	Vazão Volumétrica do Gás Produzido
Q2	Vazão Volumétrica do Gás Produzido e de Gás Lift
Q3	Vazão Volumétrica de Condensado (Gás Equivalente)
Q4	Vazão Volumétrica Total de Gás Combustível (Consumo Próprio)
Q5	Vazão Volumétrica Referente às Perdas (Sistema de Vent) e Queima de Gás
Q6	Vazão Volumétrica de Gás Produzido Exportado
Q7	Vazão Volumétrica de Gás Armazenado Exportado
Q8	Vazão Volumétrica do Gás Lift
Q9	Vazão Volumétrica Total de Gás Exportado
Qap1	Vazão Volumétrica do Gás de Selagem dos Compressores Ventilado pelo Sistema de Vent Atmosférico, na Primeira Proposição
Qap2	Vazão Volumétrica do Gás de Selagem dos Compressores Ventilado pelo Sistema de Vent Atmosférico, na Segunda Proposição
Qbp1	Vazão Volumétrica de Gás na Corrente de Vent da Unidade de Remoção de CO ₂ , na Primeira Proposição
Qbp2	Vazão Volumétrica de Gás na Corrente de Vent da Unidade de Remoção de CO ₂ na Segunda Proposição
Qcp1	Vazão Volumétrica de CO ₂ na Corrente de Alívio do Sistema de Gás Combustível de Uso Não Energético, na Primeira Proposição
Qcp2	Vazão Volumétrica de CO ₂ na Corrente de Alívio do Sistema de Gás Combustível de Uso Não Energético, na Segunda Proposição
Qcombneb	Vazão Volumétrica Total de Gás Combustível de Uso Não Energético no Caso Base
Qcombnep1	Vazão Volumétrica Total de Gás Combustível de Uso Não Energético na Primeira Proposição

Qcombnep2	Vazão Volumétrica Total de Gás Combustível de Uso Não Energético na Segunda Proposição
Qcombnep1	Vazão Volumétrica Total de Gás Combustível de Uso Energético, na Primeira Proposição
QCO ₂ entUCO ₂ p2	Vazão Volumétrica de CO ₂ que Alimenta uma das Torres Contactora, na Segunda Proposição
QCO ₂ capentUCO ₂ p1	Vazão Volumétrica de CO ₂ Existente no Gás de Combustão Capturado, que Alimenta uma das Torres Contactora, na Primeira Proposição
QCO ₂ entUCO ₂ b	Vazão Volumétrica de CO ₂ Presente na Entrada de Uma das Torres Contactora, no Caso Base
QCO ₂ tenUCO ₂ p1	Vazão Volumétrica Total de CO ₂ que Alimenta as Duas Torres Contactoras de CO ₂ , na Primeira Proposição
QCO ₂ gáscombalb	Vazão Volumétrica de CO ₂ do Gás Combustível Queimado, no Sistema de Alívio no Caso Base
QCO ₂ gáscontalb	Vazão Volumétrica de CO ₂ no Gás de Contingência, no Sistema de Alívio, no Caso Base
QCO ₂ contres1p1	Vazão Volumétrica de CO ₂ do Gás de Contingência Re-injetado no Reservatório Geológico 1, na Primeira Proposição
QCO ₂ contres1p2	Vazão Volumétrica de CO ₂ do Gás de Contingência Re-injetado no Reservatório Geológico 1, na Segunda Proposição
QCO ₂ gnealp1	Vazão Volumétrica Anual de CO ₂ , Existente no Gás Combustível de Uso Não Energético, na Primeira Proposição
QCO ₂ gelb	Vazão Volumétrica Anual de CO ₂ Existente no Gás Combustível de Uso Energético, no Caso Base
QCO ₂ gelp1	Vazão Volumétrica Anual de CO ₂ Existente no Gás Combustível de Uso Energético, na Primeira Proposição
QCO ₂ pentUCO ₂ p1	Vazão Volumétrica de CO ₂ Existente no Gás Produzido que Alimenta uma das Torres Contactora, na Primeira Proposição
QCO ₂ tentUCO ₂ p1	Vazão Volumétrica Total de CO ₂ que Alimenta as Duas Torres Contactoras de CO ₂ , na Primeira Proposição
QCO ₂ cpentUCO ₂ p1	Vazão Volumétrica de CO ₂ Existente no Gás de Combustão Capturado, que Alimenta uma das Torres Contactoras de CO ₂ , na Primeira Proposição

QCO ₂ saidacopinj	Vazão Volumétrica de CO ₂ Existente na Saída do Compressor de Injeção
QCO ₂ saidaUCO ₂ p1	Vazão Volumétrica Total de CO ₂ na Saída das Duas Torres Contactora, na Primeira Proposição
QCO ₂ psaidaUCO ₂ p1	Vazão Volumétrica de CO ₂ Existente no Gás Produzido de Saída de uma das Torres Contactora, na Primeira Proposição
QCO ₂ cpsaidaUCO ₂ p1	Vazão Volumétrica de CO ₂ Existente no Gás de Combustão Capturado, de Saída de uma das Torres Contactora de CO ₂ , na Primeira Proposição
QCO ₂ pentUCO ₂ p2	Vazão Volumétrica de CO ₂ Existente no Gás Produzido que Alimenta Uma das Torres Contactora, na Segunda Proposição
QCO ₂ psaidaUCO ₂ p2	Vazão Volumétrica de CO ₂ Existente no Gás Produzido de Saída de Uma das Torres Contactora, na Segunda Proposição
QCO ₂ gásexpp1	Vazão Volumétrica Anual de CO ₂ Emitido em Instalações de Produção Externa a Área de Concessão do Projeto, na Primeira Proposição
QCO ₂ entbtp1	Vazão Volumétrica Total de CO ₂ na Entrada do Compressor Booster na Primeira Proposição
QCO ₂ entbtp2	Vazão Volumétrica de CO ₂ na Entrada do Compressor Booster na Segunda Proposição
QCO ₂ entUCO ₂ b	Vazão Volumétrica do CO ₂ Presente na Entrada De Uma das Torres Contactora, no Caso Base
QCO ₂ saídaUDES p1	Vazão Volumétrica de CO ₂ na Saída da Unidade de Desidratação na Primeira Proposição
QCO ₂ saídaUDES p2	Vazão Volumétrica de CO ₂ na Saída da Unidade de Desidratação na Segunda Proposição
QCO ₂ saídabtp1	Vazão Volumétrica de CO ₂ na Saída do Compressor Booster, na Primeira Proposição
QCO ₂ saídabtp2	Vazão Volumétrica de CO ₂ na Saída do Compressor Booster, na Segunda Proposição
QCO ₂ saídacpinjp1	Vazão Volumétrica de CO ₂ na Saída do Compressor de Re-Injeção na Primeira Proposição
QCO ₂ saídacpinjp2	Vazão Volumétrica de CO ₂ na Saída do Compressor de Re-Injeção na Segunda Proposição

$Q_{CO_2,saídaUCO_2,b}$	Vazão Volumétrica de CO ₂ na Saída de Cada Uma das Torres Contactora, no Caso Base
Qcond1stb	Vazão Volumétrica de Condensado do 1º Estágio dos Compressores, do Caso Base
Qcond2stb	Vazão Volumétrica de Condensado do 2º estágio dos Compressores, do Caso Base
Qcond1stp1	Vazão Volumétrica de Condensado do 1º Estágio dos Compressores, da Primeira Proposição
Qcond2stp1	Vazão Volumétrica de Condensado do 2º estágio dos Compressores, da Primeira Proposição
Qcond1stp2	Vazão Volumétrica de Condensado do 1º Estágio dos Compressores, da Segunda Proposição
Qcond2stp2	Vazão Volumétrica de Condensado do 2º estágio dos Compressores, da Segunda Proposição
$Q_{descCO_2,b}$	Vazão Volumétrica de CO ₂ Ventilado pela Torre Regeneradora no Caso Base
QdesUCO ₂ p1	Vazão Volumétrica de Gás que Desvia de Uma das Torres Contactora da Unidade de Remoção de CO ₂ , da Primeira Proposição
QdescUCO ₂ p2	Vazão Volumétrica de CO ₂ na Saída da Torre Regeneradora, na Segunda Proposição
QdescUCO ₂ p1	Vazão Volumétrica de CO ₂ na Saída da Torre Regeneradora, na Primeira Proposição
Qentbtp1	Vazão Volumétrica Total de Gás na Entrada do Compressor Booster na Primeira Proposição
Qentbtp2	Vazão Volumétrica Total de Gás na Entrada do Compressor Booster na Segunda Proposição
Qentcopinjp1	Vazão Volumétrica Total de Gás na Entrada do Compressor de Re-injeção na Primeira Proposição
Qentcopinjp2	Vazão Volumétrica Total de Gás na Entrada do Compressor de Re-Injeção na Segunda Proposição
Qentrada	vazão volumétrica de gás de entrada na Primeira Proposição
$Q_{entradaCO_2}$	Vazão Volumétrica CO ₂ na Entrada das Torres Contactoras

Qgáscapelp1	Vazão Volumétrica do Gás de Combustão Capturado, Oriundo de uma das Turbinas de Geração de Energia Elétrica, da Primeira Proposição
QgáscbnealsCO ₂ p1	Vazão Volumétrica Anual de Gás Combustível, de Uso Não Energético, Isento de CO ₂ , na Primeira Proposição
Qgáscombalb	Vazão Volumétrica de Gás Combustível de Uso Não Energético Queimado no Sistema de Alívio, no Caso Base
Qgáscombalp1	Vazão Volumétrica de Gás Combustível de Uso Não Energético Queimado no Sistema de Alívio, na Primeira Proposição
Qgáscombalp2	Vazão Volumétrica de Gás Combustível de Uso Não Energético Queimado no Sistema de Alívio, na Segunda Proposição
QgáscombsCO ₂ alb	Vazão Volumétrica de Gás Combustível de Uso Não Energético, Isento de CO ₂ Queimado, no Caso Base
Qgáscombneab	Vazão Volumétrica de Gás combustível de Uso Não Energético Aliviado para atmosfera, no Caso Base
Qgáscombneb	Vazão Volumétrica de Gás Combustível Não Energético, queimado no sistema de alívio, no Caso Base
Qgáscontres1p1	Vazão Volumétrica Média de Gás de Contingência Re-Injetado em Reservatório Geológico 1, Por Ano, na Primeira Proposição
Qgáscontres2p1	Vazão Volumétrica Média de Gás de Contingência Re-Injetado em Reservatório Geológico 2, Por Ano, na Primeira Proposição
Qgáscontres1p2	Vazão Volumétrica Média de Gás de Contingência Re-Injetado em Reservatório Geológico 1, Por Ano, na Segunda Proposição
Qgáscontres2p2	Vazão Volumétrica Média de Gás de Contingência Re-Injetado em Reservatório Geológico 2, Por Ano, na Segunda Proposição
QgásentUCO ₂ p1	Vazão Volumétrica de Gás Produzido na Entrada de uma das Torres Contactora, na Primeira Proposição
QgáspsaidaUCO ₂ b	Vazão Volumétrica do Gás Produzido na Saída de uma Das Torres Contactora, no Caso Base
QgáspsaidaUCO ₂ p1	Vazão Volumétrica do Gás Produzido na Saída de uma das Torres Contactora da Unidade de Remoção de CO ₂ , na Primeira Proposição
QgáscpsaídaUCO ₂ p1	Vazão Volumétrica do Gás de Combustão Capturado, na Saída de uma das Torres Contactora da Unidade de Remoção de CO ₂ , na Primeira Proposição

QgáspsaidaUCO ₂ p2	Vazão Volumétrica do Gás Produzido na Saída de uma das Torres Contactora da Unidade de Remoção de CO ₂ na Primeira Proposição
QgásentUCO ₂ p1	Vazão Volumétrica de Gás Produzido na Entrada da Unidade de Remoção de CO ₂ , na Primeira Proposição
Qgásliftp1	Vazão Volumétrica de Gás Lift da Primeira Proposição
Qgáscpelp1	Vazão Volumétrica do Gás de Combustão Capturado, Oriundo de uma das Turbinas de Geração de Energia Elétrica, da Primeira Proposição
QgáscontsCO ₂ alb	Vazão de Gás Queimado, Isento de CO ₂ , em Situações de Contingência, no Caso Base
Qgáscontalb	Vazão de Gás Queimado em Situações de Contingência, no Caso Base
QgásentUCO ₂ b	Vazão Volumétrica do Gás na Entrada de uma das Torres Contactoras da Amina da Unidade de Remoção de CO ₂ , do Caso Base
QgáscentUCO ₂ p1	Vazão Volumétrica de Gás Capturado, na Entrada da Unidade de Remoção de CO ₂ , na Primeira Proposição
Qgásprodb	Vazão Volumétrica do Gás Produzido, do Caso Base
Qgásprodp1	Vazão Volumétrica do Gás Produzido, da Primeira Proposição
Qgásprodp2	Vazão Volumétrica do Gás Produzido, da Segunda Proposição
Qgásselfab	Vazão Volumétrica de Gás de Selagem dos Compressores Ventilado pelo Sistema de Vent Atmosférico, no Caso Base
Qgásliftb	Vazão Volumétrica de Gás Lift , do Caso Base
Qgásliftp1	Vazão Volumétrica de Gás Lift da Primeira Proposição
Qgásliftp2	Vazão Volumétrica de Gás Lift da Segunda Proposição
Qgáscontres1	Vazão Média Diária de Gás de Contingência Armazenado em Reservatório Geológico 1, por Ano
Qgáscontres2	Vazão Média Diária de Gás de Contingência Armazenado em Reservatório Geológico 2, por Ano
QgelsCO ₂ p1	Vazão Volumétrica Anual do Gás Combustível, de Uso Energético, Isento de CO ₂ , na Primeira Proposição
Qgásselfab	Vazão Volumétrica de Gás de Selagem, Isento de CO ₂ , Ventilado para Atmosfera, no Caso Base
QgelsCO ₂ b	Vazão Volumétrica Anual de Gás Combustível, de Uso Energético, Isento de CO ₂ , no Caso Base
QgelsCO ₂ p1	Vazão Volumétrica Anual de Gás Combustível, de Uso Energético, Isento de CO ₂ , na Primeira Proposição

Qgáscombal	Vazão de Gás Combustível de Uso Não Energético Queimado no Sistema de Alívio
Qgáscapel	Vazão de Gás de Combustão Capturado, oriundo de uma das Turbinas de Geração Elétrica
QgáspsaídaUCO ₂ p1	Vazão Volumétrica do Gás Capturado na Saída de uma das Torres Contactora da Unidade de Remoção de CO ₂ , na Primeira Proposição
QgáspsaídaUCO ₂ p1	Vazão Volumétrica do Gás Produzido, na Saída de uma das Torres Contactora da Unidade de Remoção de CO ₂ , na Primeira Proposição
QgáspsaídaUCO ₂ p2	Vazão Volumétrica do Gás Produzido, na Saída de uma das Torres Contactora da Unidade de Remoção de CO ₂ , na Segunda Proposição
Qgáscontres1	Vazão Média Diária de Gás de Contingência Armazenado em Reservatório Geológico 1, por Ano
QgásentradaUCO ₂ b	Vazão Volumétrica de Gás Presente na Alimentação das Torres Contactoras de CO ₂ , do Caso Base
<i>QgássaidaUCO₂b</i>	Vazão Volumétrica de Gás na Saída das Torres Contactoras de CO ₂ , no Caso base
QHCsaídaUDESp1	Vazão Volumétrica de Hidrocarbonetos na Saída da Unidade de Desidratação na Primeira Proposição
QHCentbtp1	Vazão Volumétrica de Hidrocarbonetos na Entrada do Compressor Booster na Primeira Proposição
QHCentbtp2	Vazão Volumétrica de Hidrocarbonetos na Entrada do Compressor Booster na Segunda Proposição
QHCgásnesvab	Vazão volumétrica de hidrocarbonetos existentes no gás combustível não energético ventilado, isento de CO ₂ no Caso Base
QHCgásselvab	Vazão volumétrica de hidrocarbonetos existentes no gás de selagem, isento de CO ₂ no Caso Base,
QHClíqbtp1	Vazão Volumétrica de Hidrocarbonetos Presentes na Fase Líquida, Retirada no Compressor Booster, na Primeira Proposição
QHCsaídabtp1	Vazão Volumétrica de Hidrocarbonetos na Saída do Compressor Booster, na Primeira Proposição
QHClíqbtp1	Vazão Volumétrica de Hidrocarbonetos Presente na Fase Líquida Retirada no Compressor Booster, na Primeira Proposição
QHClíqbtp2	Vazão Volumétrica de Hidrocarbonetos Presentes na Fase Líquida, Retirada no Compressor Booster, na Segunda Proposição

QHCap2	Vazão Volumétrica de Hidrocarbonetos na Corrente de Vent Atmosférico, na Segunda Proposição
QHCbp2	Vazão Volumétrica de Hidrocarbonetos na Corrente de Vent da Unidade de Remoção de CO ₂ , na Segunda Proposição
QHCcp1	Vazão Volumétrica de Hidrocarbonetos na Corrente de Alívio do Sistema de Gás Combustível de Uso Não Energético, na Primeira Proposição
QHCcp2	Vazão Volumétrica de Hidrocarbonetos na Corrente de Alívio do Sistema de Gás Combustível de Uso Não Energético, na Segunda Proposição
QHCsaídaUDESsp2	Vazão Volumétrica de Hidrocarbonetos na Saída da Unidade de Desidratação na Segunda Proposição
QHCsaídabtp2	Vazão Volumétrica de Hidrocarbonetos na Saída do Compressor Booster, na Segunda Proposição
QHCentbtp2	Vazão Volumétrica de Hidrocarbonetos na Entrada do Compressor Booster na Segunda Proposição
QHCsaídacpinjp1	Vazão Volumétrica de Hidrocarbonetos na Saída do Compressor de Re-Injeção, na Primeira Proposição
QHCsaídacpinjp2	Vazão Volumétrica de Hidrocarbonetos na Saída do Compressor de Re-Injeção, na Primeira Proposição
QHClíqcpinjp1	Vazão Volumétrica de Hidrocarbonetos Líquidos Removidos pelo Compressor de Re-Injeção na Primeira Proposição
QHClíqcpinjp2	Vazão Volumétrica de Hidrocarbonetos Líquidos Removidos pelo Compressor de Re-Injeção na Segunda Proposição
QHCgásselvab	Vazão Volumétrica de Hidrocarbonetos Existentes no Gás de Selagem, Isento de CO ₂ no Caso Base
QH ₂ Oentbtp1	Vazão Volumétrica de H ₂ O na Entrada do Compressor Booster na Primeira Proposição
QH ₂ Oentbtp2	Vazão Volumétrica de H ₂ O na Entrada do Compressor Booster na Segunda Proposição
QH ₂ Olíqbtp1	Vazão Volumétrica de Água Presente na Fase Líquida, Retirada no Compressor Booster, na Primeira Proposição
QH ₂ Olíqbtp2	Vazão Volumétrica de Água Presente na Fase Líquida, Retirada no Compressor Booster, na Segunda Proposição

QH ₂ Osaídabtp2	Vazão Volumétrica de H ₂ O na Saída do Compressor Booster, na Segunda Proposição
QH ₂ OsaídaUDES _p 2	Vazão Volumétrica de Água na Saída da Unidade de Desidratação na Segunda Proposição
QH ₂ Osaídabtp1	Vazão Volumétrica de H ₂ O na Saída do Compressor Booster, na Primeira Proposição
QH ₂ OsaídaUDES _p 1	Vazão Volumétrica de Água na Saída da Unidade de Desidratação na Primeira Proposição
QH ₂ Olíqbtp1	Vazão Volumétrica de Água Presente na Fase Líquida, retirada no Compressor Booster, na Primeira Proposição
QH ₂ Oentbtp2	Vazão Volumétrica de H ₂ O na Entrada do Compressor Booster na Segunda Proposição
QH ₂ Oap1	Vazão Volumétrica de H ₂ O na Corrente de Vent Atmosférico, na Primeira Proposição
QH ₂ Oap2	Vazão Volumétrica de H ₂ O na Corrente de Vent Atmosférico, na Segunda Proposição
QH ₂ Obp1	Vazão Volumétrica de H ₂ O na Corrente de Vent da Unidade de Remoção de CO ₂ , na Primeira Proposição
QH ₂ Obp2	Vazão Volumétrica de H ₂ O na Corrente de Vent da Unidade de Remoção de CO ₂ , na Segunda Proposição
QH ₂ Ocp1	Vazão Volumétrica de H ₂ O na Corrente de Alívio do Sistema de Gás Combustível de Uso Não Energético, na Primeira Proposição
QH ₂ Ocp2	Vazão Volumétrica de H ₂ O na Corrente de Alívio do Sistema de Gás Combustível de Uso Não Energético, na Segunda Proposição
Qlíqbtp1	Vazão Volumétrica de Líquido Retirado no Compressor Booster na Primeira Proposição
Qlíqbtp2	Vazão Volumétrica de Líquido Retirado no Compressor Booster na Segunda Proposição
QmsaídaCO ₂	Vazão Mássica de Descarte do CO ₂ na Torre Regeneradora
Qsaída	Vazão Volumétrica de Gás de Saída na Primeira Proposição
Qsaídabtp1	Vazão Volumétrica de Gás na Saída do Compressor Booster, na Primeira Proposição
QsaídaUDES _p 1	Vazão Volumétrica de Gás na Saída da Unidade de Desidratação na Primeira

QsaídaUDES _{p2}	Vazão Volumétrica de Gás na Saída da Unidade de Desidratação, na Segunda Proposição
Qsaídacopin _{jp1}	Vazão Volumétrica de Gás na Saída do Compressor de Re-Injeção, na Primeira Proposição
Qsaídacopin _{jp2}	Vazão Volumétrica Total de Gás na Saída do Compressor de Re-Injeção na Segunda Proposição
Qsaídabtp ₁	Vazão Volumétrica de Gás na Saída do Compressor Booster, na Primeira Proposição
Qsaídabtp ₂	Vazão Volumétrica de Gás na Saída do Compressor Booster, na Segunda Proposição
<i>QsaídaCO₂</i>	Vazão volumétrica de CO ₂ na Saída da Torre Contactora
Qtotrein _{res1}	Vazão Média Diária Total de Re- Injeção em Reservatório Geológico 1, por Ano
Qtotrein _{res1p1}	Vazão Volumétrica Média Diária Total de Gás de Contingência Re-Injetado em Reservatório Geológico 1, por Ano, na Primeira Proposição
Qtotrein _{res2p2}	Vazão Volumétrica Média Diária Total de Gás de Contingência Re-Injetado em Reservatório Geológico 2, por Ano, na Segunda Proposição
Qtotg _{nealp1}	Vazão Volumétrica Total Anual de Gás Combustível de Uso Não Energético do Sistema de Alívio na Primeira Proposição
Qtotg _{nealp1}	Vazão Volumétrica Total Anual de Gás Combustível Não Energético Enviado para Sistema de Alívio, na Primeira Proposição
Qtotcontactota	Vazão Volumétrica Total de Gás a ser Tratado na Torre Contactora
Qtotgel _b	Vazão Volumétrica Anual Total de Gás Combustível de Uso Energético, no Caso Base
Qtotgel _{p1}	Vazão Volumétrica Total Anual de Gás Combustível de Uso Energético na Primeira Proposição
Qtotgel _{p2}	Vazão Volumétrica Total de Gás Combustível de Uso Energético na Segunda Proposição
Qtotg _{cb}	Vazão Volumétrica Total de Gás Combustível no Caso Base
Qtotg _{cp1}	Vazão Volumétrica Total de Gás Combustível na Primeira Proposição
Qtotg _{cp2}	Vazão Volumétrica Total de Gás Combustível na Segunda Proposição
Qventva	Vazão de Gás de Selagem para Vent Atmosférico

R	Radical CH ₂
RCE	Redução Certificada de Emissão
RIO-92	Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento Realizado no Rio de Janeiro em 1992
$T_{CH_4}^b$	Fração Molar do Componente Metano no Gás Ventilado para a Atmosfera, no Caso Base
TEA	Trietanolamina
TIR	Taxa Interna de Retorno
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
TCO ₂ ap1	Teor de CO ₂ na Corrente de Vent Atmosférico, na Primeira Proposição
TCO ₂ ap2	Teor de CO ₂ na Corrente de Vent Atmosférico, na Segunda Proposição
TCO ₂ bp1	Teor de CO ₂ na Corrente de Vent da Unidade de Remoção de CO ₂ , na Primeira Proposição
TCO ₂ bp2	Teor de CO ₂ na Corrente de Vent da Unidade de Remoção de CO ₂ , na Segunda Proposição
TCO ₂ cp1	Teor de CO ₂ na Corrente de Alívio do Sistema de Gás Combustível de Uso Não Energético, na Primeira Proposição
TCO ₂ cp2	Teor de CO ₂ na Corrente de Alívio do Sistema de Gás Combustível de Uso Não Energético, na Segunda Proposição
TCO ₂ cpelp1	Teor de CO ₂ existente no Gás de Combustão Capturado, oriundo de uma das Turbinas de Geração de Energia Elétrica, na Primeira Proposição
TCO ₂ gáscbnealp1	Teor de CO ₂ Existente no Gás Combustível de Uso Não Energético na Primeira Proposição
TCO ₂ gáscontalb	Teor de CO ₂ do Gás de Contingência que é Queimado pelo Sistema de Alívio, no Caso Base
TCO ₂ gásseivab	Teor de CO ₂ Existente no Gás de Selagem Ventilado pelo Sistema de Vent Atmosférico, no Caso Base
TCO ₂ gásccapp1	Teor de CO ₂ existente gás de combustão capturado, oriundo de uma das turbinas de geração elétrica, na Primeira Proposição
TCO ₂ gáscombneb	Teor de CO ₂ do Gás Combustível Não Energético Queimado no Sistema de Alívio, no Caso Base
TCO ₂ entUCO ₂ b	Teor de CO ₂ do gás que alimenta as Torres Contactoras, no Caso Base

TCO ₂ entUCO ₂ p1	Teor de CO ₂ Existente no Gás Produzido de uma das Torres Contactora da Unidade de Remoção de CO ₂ , na Primeira Proposição
TCO ₂ cpsaídaUCO ₂ p1	Teor de CO ₂ existente no Gás Capturado na Saída de uma das Duas Torres Contactoras, da Unidade de Remoção de CO ₂ , na Primeira Proposição
TCO ₂ gáscombneb	Teor de CO ₂ do Gás Combustível de Uso Não Energético, no Caso Base
TCO ₂ gáscombnep1	Teor de CO ₂ do Gás Combustível de Uso Não Energético Queimado no Sistema de Alívio, na Primeira Proposição
TCO ₂ gáscombnep2	Teor de CO ₂ do Gás Combustível de Uso Não Energético Queimado no Sistema de Alívio, na Segunda Proposição
TCO ₂ gáscontp1	Teor de CO ₂ do gás de Contingência Queimado pelo Sistema de Alívio na Primeira Proposição
TCO ₂ gáscontp2	Teor de CO ₂ do gás de Contingência que é Queimado pelo Sistema de Alívio na Segunda Proposição
TCO ₂ gáscontres1p1	Teor de CO ₂ existente no gás de contingência re-injetado no reservatório geológico 1, na Primeira Proposição
TCO ₂ gáscontres1p2	Teor de CO ₂ existente no gás de contingência re-injetado no reservatório geológico 1, na Segunda Proposição
TCO ₂ gássselvab	Teor de CO ₂ Existente no Gás de Selagem Ventilado pelo Sistema de Vent Atmosférico, no Caso Base
TCO ₂ gásturbelp1	Teor de CO ₂ existente no Gás Combustível de Uso Energético Consumido pelas Turbinas de Geração de Energia Elétrica, na Primeira Proposição
TCO ₂ gelb	Teor de CO ₂ Existente no Gás Combustível de Uso Energético, no Caso Base
TCO ₂ gelp1	Teor de CO ₂ Existente no Gás Combustível de Uso Energético, na Primeira Proposição
TCO ₂ psaídaUCO ₂ b	Teor de CO ₂ existente no Gás de Saída de uma das Torres Contactora
TCO ₂ psaídaUCO ₂ p1	Teor de CO ₂ existente no Gás de Saída de uma das Torres Contactora da Unidade de Remoção de CO ₂ , na Primeira Proposição
TCO ₂ res1p1	Teor de CO ₂ Existente no Reservatório Geológico 1 na Primeira Proposição

TCO ₂ res1p2	Teor de CO ₂ Existente no Reservatório Geológico 1 na Segunda Proposição
TCO ₂ saidaUCO ₂ b	Teor de CO ₂ na Saída das Torres Contactoras de CO ₂ , no Caso Base
TCO ₂ saídacopinjp1	O teor de CO ₂ existente na composição do gás de saída do compressor de Re-injeção na Primeira Proposição
TCO ₂ saídacopinjp2	Teor de CO ₂ Existente na Composição do Gás de Saída do Compressor de Re-injeção na Segunda Proposição
TH ₂ Oap1	Teor de H ₂ O na Corrente de Vent Atmosférico, na Primeira Proposição
TH ₂ Oap2	Teor de H ₂ O na Corrente de Vent Atmosférico, na Segunda Proposição
TH ₂ Obp1	Teor de H ₂ O na Corrente de Vent da Unidade de Remoção de CO ₂ , na Primeira Proposição
TH ₂ Obp2	Teor de H ₂ O na Corrente de Vent da Unidade de Remoção de CO ₂ , na Segunda Proposição
TH ₂ Ocp1	Teor de H ₂ O na Corrente de Alívio do Sistema de Gás Combustível de Uso Não Energético, na Primeira Proposição
TH ₂ Ocp2	Teor de H ₂ O na Corrente de Alívio do Sistema de Gás Combustível de Uso Não Energético, na Segunda Proposição
THCap1	Teor de Hidrocarbonetos na Corrente de Vent Atmosférico, na Primeira Proposição
THCbp1	Teor de Hidrocarbonetos na Corrente de Vent da Unidade de Remoção de CO ₂ , na Primeira Proposição
THCcp1	Teor de Hidrocarbonetos na Corrente de Alívio do Sistema de Gás Combustível de Uso Não Energético, na Primeira Proposição
THCap2	Teor de Hidrocarbonetos na Corrente de Alívio do Sistema de Gás Combustível de Uso Não Energético, na Segunda Proposição
THCbp2	Teor de Hidrocarbonetos na Corrente de Vent da Unidade de Remoção de CO ₂ , na Segunda Proposição
THCcp2	Teor de Hidrocarbonetos na Corrente de Alívio do Sistema de Gás Combustível de Uso Não Energético, na Segunda Proposição
UE	União Européia
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
UKETS	United Kingdom Emissions Trading Scheme
UPGN	Unidade de Processamento do Gás Natural

VGCBE	Vazão de Consumo Diário do Gás Combustível de Baixa Pressão de Uso Energético
VGCenergCO ₂	Vazão Volumétrica Anual de CO ₂ Queimado
VGC	Vazão Anual de Gás de Contingência Queimado
VGCenergHC	Vazão Volumétrica Anual de Queima de Gás Combustível isento de CO ₂
V	Volume Molar do Gás Natural
VventGC	Vazão de Gás Combustível Ventilado
VventSL	Vazão de Gás de Selagem dos Compressores
VventHC	Vazão Anual de Gás (Isento CO ₂) Emitido no Sistema de Vent Atmosférico
VventGS	Volume Anual de Gás de Selagem (Isento CO ₂) Ventado para Atmosfera
VGCAE	Vazão de Consumo Diário do Gás Combustível de Alta Pressão para Uso Energético
VGCenerg	Vazão Volumétrica de Queima de Gás Combustível de Uso Não Energético
VPL	Valor Presente Líquido
WCO ₂ UCO ₂	Emissão Evitada de CO ₂ do Sistema de Geração de Energia Elétrica, no Caso Base
WCO ₂ UCO ₂ p1	Emissão Evitada de CO ₂ do Sistema de Geração de Energia Elétrica, na Primeira Proposição
WCO ₂ CPp1	Vazão Volumétrica do CO ₂ capturado na Primeira Proposição
WdescCO ₂	Vazão Mássica de CO ₂ na Saída da Torre Regeneradora
Wgee	Massa Emitida do Componente Gasoso de Gás de Efeito Estufa

LISTA DE SÍMBOLOS

CF_4	Perfluormetano
CHF_3	Clorofluorcarbono
CFC	Clorofluorcarbono
CH_4	Metano
C_2H_6	Etano
C_3H_8	Propano
C_4H_{10}	Butano
C_5H_{12}	Pentano
C_6H_{14}	Hexano
C_7H_{16}	Heptano
C_8H_{18}	Octano
C_9H_{20}	Nonano
$\text{C}_{10}\text{H}_{22}$	Decano
C_1	Metano
C_2	Etano
C_3	Propano
$i\text{C}_4$	Isobutano
$n\text{C}_4$	Normalbutano
$i\text{C}_5$	Isopentano
$n\text{C}_5$	Normalpentano
C_6	Hexano
C_7	Heptano
C_8	Octano
C_9	Nonano
C_{10}	Decano
CHF_3	Trifluormetano
CF_4	Tetrafluormetano
CO	Monóxido de Carbono
CO_2	Dióxido de Carbono
COS	Sulfeto de Carbonila
CS_2	Dissulfeto de Carbono

CO_3^-	Radical Carbonato
ϵ	Eficiência de Redução de Emissão
e_a	Fração que Representa Excesso de Ar
ϵ_c	Eficiência de Conversão
H_2	Hidrogênio
H_2O	Água
HCl	Ácido clorídrico
H_2S	Gás Sulfídrico
Hg	Mercúrio
He	Gás Hélio
H_i	Constante de Henry
HCO_3^-	Radical Bicarbonato
H^+	Radical Próton
NO	Óxido Nítrico
N_2	Nitrogênio
NH_3	Amônia
N_2O	Óxido Nitroso
NO_x	Óxido de Nitrogênio
O_2	Oxigênio
O_3	Ozônio
OH^-	Radical Hidroxila
RNH_2	Amina Primária
$(\text{RNH}_3)_2\text{CO}_3$	Sal de Amina Intermediário
$(\text{RNH}_3)\text{CO}_3$	Sal de Amina
SO_2	Dióxido de Enxofre
SO_x	Óxido de Enxofre
SF_6	Hexafluoreto de Enxofre
x_i	Fração Molar do Componente “i” na Fase Líquida
y_i	Fração Molar do Componente “i” na Fase vapor
ϕ_i^v	Coefficiente de Fugacidade da Fase Gasosa
γ^l	Coefficiente de Atividade na Fase Líquida

LISTA DE UNIDADES

atm	Atmosfera
bar	Pressão Barométrica
bpd	Barris por Dia
€/t CO ₂	Euro por Tonelada de Dióxido de Carbono
GtC/ano	Giga Tonelada de Carbono por Ano
kg	Quilograma
kg/d	Quilograma por Dia
kg/h	Quilograma por Hora
kg/s	Quilograma por Segundo
kgf/cm ²	Quilogramaforça por Centímetro Quadrado
kcal/m ³	Quilo Caloria por Metro Cúbico
kg/d	Quilograma por dia
kmol	Quilomol
kg/kmol	Quilograma por Quilomol
kPa	Quilo Pascal
kPa g	Quilo Pascal Manométrico
lb/MMscf	Libra por Milhão de Pé Cúbico na Condição Standard
m ³ /d	Metros Cúbicos por Dia
mg/m ³	Miligrama por Metro Cúbico
MW	Mega Watt
<i>P</i>	Pressão Total do Sistema
ppm vol	Parte por Milhão Volumétrico
t C/TJ	Tonelada de Carbono por Tera Joule
t CO ₂ /ano	Tonelada de Dióxido de Carbono por Ano
t CO ₂ eq./ano	Tonelada de Dióxido de Carbono Equivalente por Ano
tep	Tonelada Equivalente de Petróleo
TJ/m ³	Tera Joule por Metro Cúbico
TJ/d	Tera Joule por Dia
t CO ₂	Tonelada de Dióxido de Carbono
t CO ₂ eq.	Tonelada de Dióxido de Carbono Equivalente
t CO ₂ /TWh	Tonelada de Dióxido de Carbono por Tera Watt Hora
t /h	Tonelada por Hora

t /mês	Tonelada por Mês
t/ano	Tonelada por Ano
t CO ₂ eq.	Tonelada de Dióxido de Carbono Equivalente
t CO ₂ /TJ	Tonelada de Dióxido de Carbono por Tera Joule
t CO ₂ eq./TJ	Tonelada de Dióxido de Carbono Equivalente por Tera Joule
t C-CO ₂ /TWh	Tonelada de Carbono Expresso em Dióxido de Carbono por Tera Watt-Hora
US\$	Dólar Americano
US\$/t C	Dólar Americano por Tonelada de Carbono
US\$/t CO ₂	Dólar Americano por Tonelada de Dióxido de Carbono
US\$ /bbl	Dólar Americano por barril
US\$/boe	Dólar Americano por Barril de Óleo Equivalente
US\$/kWh	Dólar Americano por Quilo Watt Hora
US\$ /m ³	Dólar Americano por Metro Cúbico
°C	Graus Celsius
% CH ₄	Percentagem Volumétrica do Metano no Gás Natural
% C	Percentagem Mássica de Carbono no Gás Natural.
% vol	Percentagem volumétrica
%	Percentagem
£	Libra
ε /t CO ₂	Euro por Tonelada de Dióxido de Carbono

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	
AGRADECIMENTOS	
RESUMO	
ABSTRACT	
LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE TABELAS	
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	
LISTA DE SÍMBOLOS	
LISTA DE UNIDADES	
1. INTRODUÇÃO	38
1.1. Objetivo	38
1.2. Originalidade do tema no meio acadêmico e benefícios da pesquisa	38
2. CONCEITOS BÁSICOS	40
2.1- O gás natural	40
2.1.1- Composição química do gás natural	41
2.2- Gerenciamento das emissões de CO ₂	43
2.2.1- Questão ambiental das emissões atmosféricas	43
2.2.2- Evolução das emissões de CO ₂ no mundo	47
2.2.3.- Estimativa das emissões de CO ₂ em instalações de produção de petróleo no Brasil	48
2.2.4- A questão das emissões de CO ₂ e a Comunidade Internacional	51
2.2.5- Mercado de carbono	61
3. ESTADO DA ARTE EM SEPARAÇÃO E CAPTURA DE CO₂	64
4. TECNOLOGIAS DE SEPARAÇÃO E CAPTURA DE CO₂	70
4.1- Combustão do gás natural em turbinas	70
4.1.1- Princípios de funcionamento e construção de turbinas a gás	71
4.2- Fator de emissão	72
4.3- Tipos de processos de combustão do gás natural	74
4.4- Tecnologias de separação e captura de CO ₂	76
4.4.1- Absorção química	77
4.4.2- Absorção física	80
4.4.3- Adsorção	81

4.4.4- Destilação a baixa temperatura	81
4.4.5- Membrana	82
5. METODOLOGIA DO MODELO DE SIMULAÇÃO	84
5.1- Descrição sumária da instalação marítima de produção de petróleo	84
5.1.1- Descrição sumária do processo de produção	86
5.2- Descrição do problema do aumento do teor de CO ₂ no gás produzido em instalações marítimas de produção de petróleo	93
5.3. Metodologia do modelo de simulação	95
6. PROCESSOS PROPOSTOS	104
6.1. Descrição dos processos propostos	104
6.2- Usos propostos para o CO ₂	109
7. ESTUDO DE CASO	117
7.1- Descrição do local	117
7.2- Elementos técnicos para o estudo das emissões	118
7.3- Resultados obtidos	122
7.3.1- Caso Base	122
7.3.2- Primeira Proposição	131
7.3.3- Segunda Proposição	143
8. VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA	151
8.1. Introdução	151
8.2- Dados econômicos e técnicos da Primeira Proposição	153
8.3- Dados econômicos e técnicos da Segunda Proposição	157
8.4- Premissas e variáveis de entrada do Programa de Análise Econômica	159
8.5. Resultados	160
8.5.1- Primeira Proposição	160
8.5.2- Segunda Proposição	161
9. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	162
9.1. Conclusões gerais	162
9.2. Sugestões para trabalhos futuros	169
REFERÊNCIAS	170
ANEXOS	177
MEMÓRIA DE CÁLCULO	180