

7.

Carbonoduto

O transporte dutoviário pode ser dividido em duas grandes áreas de atuação. Os dutos para gases e os dutos para líquido. Apesar de existir o transporte de fluidos multifásicos e de sólidos em suspensão por dutos (i.e. minerodutos), a esmagadora maioria das dutovias está dividida entre os dois estados físicos. De acordo com o tipo, a filosofia operacional varia muito.

Quando se fala em dutos para transporte de líquidos (de modo geral oleodutos), deve-se considerar sistemas usualmente independentes, dedicados a uma única fonte e um único ponto de entrega. Uma grande exceção a esta regra é o transporte de água, que atende cidades e estados inteiros em diversos pontos, podendo ter mais de uma origem. Existem variações deste modelo, como sangrias, operações em malhas, mas dependem fortemente do produto transportado. Os dutos de líquido são operados através de bombas, que retiram produtos de tanques de armazenamento ou esferas (no caso do GLP). No caso líquido, o duto é apenas um elemento transportador. Como os fluidos são em sua grande maioria pouco compressível, os efeitos de qualquer alteração operacional, considerando o duto cheio – ou coluna fechada (Silva, B.G.; Pires, L.F.G.; Motta, L. – 2007)[46] – é sentida quase imediatamente em todo o duto e nas suas extremidades, demandando um tempo de respostas curto e sistemas de segurança bem projetados.

Nos gasodutos, entretanto, o procedimento é praticamente o inverso. Em sua grande maioria trabalhando em malha, os gasodutos são normalmente utilizados não só como meio de transporte, mas também como local de armazenamento, utilizando-se da compressibilidade do gás para estocar no próprio duto e não nos pontos de entrega. Os efeitos de regimes transientes, por causa disso, são usualmente muito mais lentos. Entretanto, devido ao efeito Joule-Thompson, há uma grande preocupação com a variação da temperatura durante a compressão ou descompressão do gás, o que gera uma maior necessidade de monitoramento destas variáveis não presentes de modo geral nos oleodutos.

Em sua grande maioria, os dutos de transporte de dióxido de carbono transportam o fluido no estado denso, mais especificamente no estado supercrítico (dependendo da temperatura), que é uma experiência única no transporte dutoviário. Como visto no item 2.1, o estado supercrítico depende de um balanço de condições de temperatura e pressão. Abaixo serão apresentadas as peculiaridades e dificuldades de transporte deste gás.

7.1.

Aspecto Técnico

A percepção do público em geral é que já existe uma grande experiência com dutos em geral e que o CO₂ é relativamente benigno. As pessoas na indústria, no entanto, sabem que isso não é verdade e que são necessários projetos especiais a serem implementados quando construindo localidades que tratam, processam e transportam o dióxido de carbono. Uma grande quantidade de informação já foi publicada detalhando os riscos de CO₂ e os perigos representados mesmo por quantidades relativamente pequenas. Ao contrário dos dutos de gás natural que, na eventualidade de um vazamento, ou explodem ou o gás é disperso naturalmente, o CO₂ não se dispersa. Por ser mais denso que o ar, ele procura pequenas depressões ou vales e ficará lá, sem detecção por um bom tempo.

O incidente do Lago Nyos, além de talvez Pompéia, é um dos maiores incidentes naturais envolvendo o dióxido de carbono. Lago Nyos é um lago cratera, no Camarões. Um bolsão de magma localizado em baixo do lago vazou dióxido de carbono na água, sobre-saturando a água. Em Agosto de 1986, provavelmente devido a um deslizamento de terra ou mudança de temperatura, o lago emitiu uma grande nuvem de CO₂, que sufocou 1700 pessoas e cerca de 3500 animais de vilarejos nos arredores. Foi estimado que uma quantidade de 1 Mton de CO₂ foi liberada em um período de 4 horas, e as fatalidades ocorreram até 26 km de distância do lago, de acordo com (Mott, R.W.; Woods, A.W. - 2010)[47].

A grande maioria dos dutos utilizados para o transporte de CO₂ é projetada para condições de fase densa, ou seja, com pressão acima de 7,38 MPa. Isso dá uma alta densidade comparada ao transporte de gás e evita a necessidade de condições criogênicas e materiais resistentes a baixas temperaturas. Quando

utilizado em EOR a pressão de mistura do CO₂ se torna importante. Essa pressão no petróleo é usualmente acima de 8,3 MPa podendo chegar a faixa de 16 a 20 MPa e portanto a pressão de entrega no poço de injeção deve ser relativamente alta, geralmente acima de 10 MPa. Para manter o CO₂ nesta condição, os intervalos típicos operacionais de temperatura e pressão são entre 15 e 30°C e 10 a 15 MPa, de acordo com (Svensson, R. et al. - 2005)[48].

Entretanto, devido às propriedades especiais do CO₂ não é fácil manter o CO₂ nesses intervalos. Dutos sofrem de queda de pressão e para manter a pressão nestes intervalos, é necessário estações de re-compressão ao longo do duto. Além disso, a compressibilidade e a densidade do CO₂ mostram um forte não linearidade na dependência da pressão e da temperatura, como demonstrado na Figura 6, que dificulta a predição do escoamento de CO₂. No ponto crítico, qualquer pequena variação de temperatura ou pressão acarreta uma grande variação na densidade. Portanto, devido ao comportamento do escoamento de CO₂ ser difícil de prever, a sua modelagem se torna extremamente complicada.

A maioria dos projetos de carodutos, entretanto, considera o CO₂ como líquido incompressível, o que pode acarretar em erros grandes de projeto. De acordo com (Vandeginste, V.; Piessens, K. - 2008)[49], por exemplo, assume-se para uma faixa de temperatura de 5 a 27°C e de 8 a 14 MPa uma massa específica de 884 kg/m³ e uma viscosidade de 6,06 x 10⁻⁵ Pa.s. Estes valores são utilizados para calcular o diâmetro do duto em um projeto de caroduto.

Pequenas quantidades de impureza também causam um grande efeito nas propriedades do CO₂, i.e. uma pequena adição de metano (CH₄) afeta diretamente a pressão de vapor da mistura. Outras impurezas que normalmente ocorrem junto ao CO₂ são o H₂S, O₂, N₂ e a água (H₂O), todas mudando as propriedades do CO₂ e, portanto, devem ser reduzidas ao máximo possível antes do transporte do mesmo. A Figura 32 demonstra as alterações das propriedades do CO₂ transportado de acordo com algumas impurezas. Entre as impurezas, água é a impureza mais crítica, já que o CO₂ em equilíbrio com água na forma líquida gera um gás ácido (H₂CO₃) que causa a chamada “corrosão doce” (ou “*sweet corrosion*”) (Brondel, D. et al. - 1994)[50]; o CO₂ também pode formar hidratos (cristais sólidos

similares ao gelo), que podem danificar ou entupir equipamentos e linhas de escoamento, destruir aquecedores, etc.

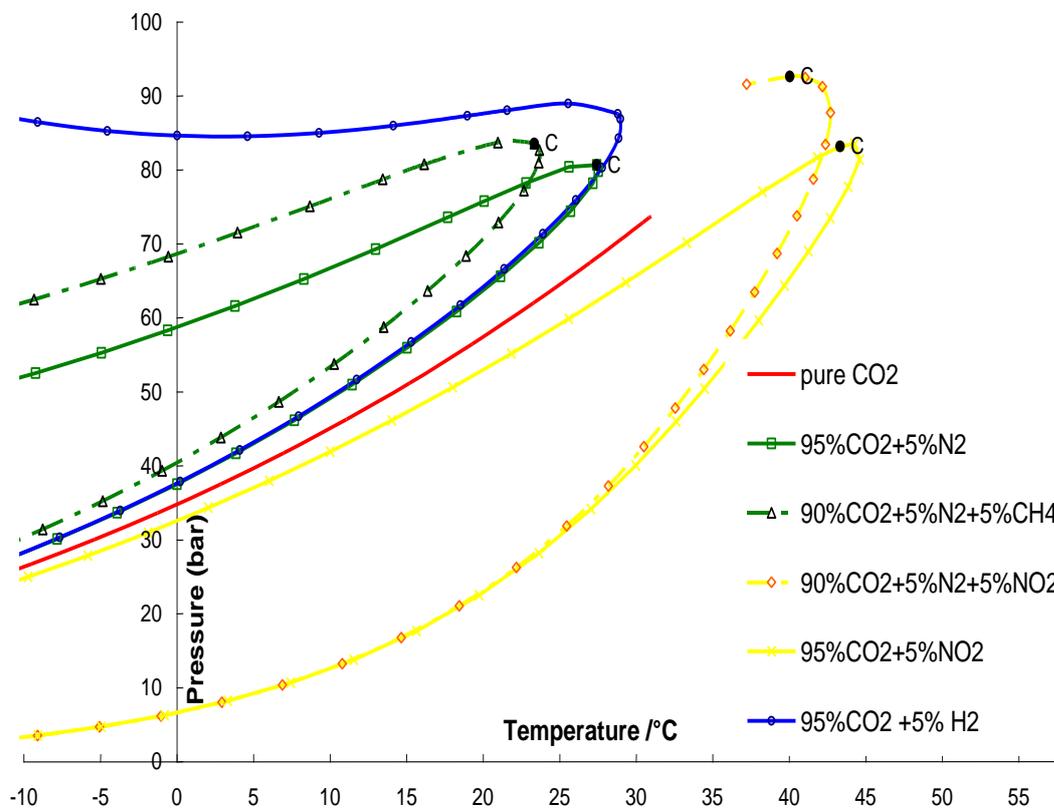


Figura 32 - Efeito das impurezas nas propriedades do CO₂

O primeiro grande duto nos Estados Unidos foi o *Canyon Reef Carriers*, construído em 1970 no Texas. Seus 352 km movem cerca de 12000 toneladas de CO₂ antropomórfico produzidos diariamente (cerca de 4,4 Mton por ano) e é operado pela empresa Kinder Morgan. As especificações para a venda de CO₂ neste duto são as seguintes (IPCC 2005)[19]:

- **Dióxido de Carbono:** O produto deve conter no mínimo 95% moles de dióxido de carbono como medido no ponto de chegada.
- **Água:** Produto não deve possuir nenhuma quantidade de água livre e não deve conter mais que 0,489 m⁻³ na fase vapor.
- **Sulfeto de Hidrogênio (H₂S):** Produto não deve conter mais de 1500 ppm, por peso, de total de enxofre.
- **Temperatura:** Produto não deve exceder a temperatura de 48,9 °C.
- **Nitrogênio:** Produto não deve conter mais de 4% de moles de nitrogênio.

- **Hidrocarbonetos:** produto não deve conter mais de 5% de moles de hidrocarbonetos e o ponto de orvalho do produto (em respeito aos hidrocarbonetos) não deve ultrapassar $-28,9^{\circ}\text{C}$.
- **Oxigênio:** Produto não deve conter mais de 10 ppm, por peso, de oxigênio.
- **Glicol:** Produto não deve conter mais de 4×10^{-5} de Glicol e em nenhum momento tal elemento deve estar presente na forma líquida nas condições de pressão e temperatura do duto.

Essas especificações são bem usuais nos dutos nos EUA e na Europa. Devido às características destes componentes e seus efeitos no duto e no escoamento, a tendência é haver uma padronização do fluido transportado.

As normas utilizadas para a construção de um duto de carbono são as mesmas utilizadas para dutos em geral, como a ASME 31.4. Ainda não existe regulamentação ou normas técnicas específicas para dutos de transporte de CO_2 , mas já existem diversas propostas nesse sentido.

7.2.

Aspecto Econômico

Existem cerca de 6300 quilômetros de dutos dedicados ao transporte de CO_2 apenas nos EUA, primariamente para os projetos de EOR. Muitos desses dutos entregam CO_2 proveniente de fontes naturais acumuladas em baixo do solo, enquanto alguns são originados de fontes não antropogênicas, como o gás natural. Cerca de três quartos destes dutos foram construídos entre os anos de 1980 e 1990, em grande parte devido às preocupações de energia e incentivos fiscais federais americanos voltados ao aumento da produção doméstica de petróleo (Dooleya, J.J. et al. - 2009)[51].

O custo de transporte de CO_2 varia em função do comprimento (entre outros fatores), que por sua vez depende da localização dos locais de uso ou de seqüestro assim como das fontes do CO_2 . No nível internacional e nacional de políticas, existem alta variações no potencial de construção de dutos. Um estudo do MIT diz que “*os custos de dutos de CO_2 são altamente variáveis devido a considerações físicas... e políticas*” (Parfomak, P.W.; Folger, P. – 2008)[52]. De acordo com o IPCC 2005[18], é estimado um custo de mitigação de CO_2 entre US\$ 31 a US\$ 71

por tonelada de CO₂ evitado para uma planta de energia com fonte de carvão, já incluindo os custos de transporte por dutos, incluindo os operacionais e de manutenção, entre aproximadamente 0,01 US\$ e 5 US\$ por tonelada.

Os cenários de transporte para o projeto de carbodutos levam em consideração fatores como: potencial de armazenamento, emissões das plantas de captura e o custo do sistema de transporte. De modo geral, todo projeto tem suas premissas ligadas diretamente ao produto transportado. No caso do CO₂, de acordo com (Koukouzas, N.; Typou, I. - 2009)[53] as premissas mais comuns são:

- CO₂ na fase densa (melhor custo benefício)
- Distâncias entre estações de re-compressão ficariam entre 100 e 250 km.
- Temperaturas ambientes médias entre 12 e 25°C (varia muito com a localização) no *onshore* e 6 a 12°C no *offshore*.
- Temperatura máxima após a compressão de 30°C.
- Pressões máximas *onshore* e *offshore* são de 11 e 30 MPa respectivamente.
- Pressões mínimas de 9 MPa.
- O custo do duto é calculado para terreno sem variação de elevação
- A compressão do CO₂ faz parte do custo da captura.
- O tempo de vida do duto é de mais de 50 anos.

Os custos de um duto podem ser categorizados em 3 itens, de acordo com o projeto (IPCC 2005)[19]:

- Custos de Construção
 - Custos de material/equipamentos (duto, revestimento, proteção catódica, equipamentos de dados, possíveis estações de re-compressão)
 - Custos do empreendimento (mão de obra)
 - Faixa de passagem
- Custos operacionais e de manutenção
 - Monitoramento
 - Manutenção
 - Custos energéticos
- Outros Custos (projeto, seguro, contingências, licenças, etc..)

A composição do CO₂ transportado tem grandes implicações no projeto do duto, que também pode influenciar os custos de transporte. O projeto deve contemplar os regulamentos e padrões da indústria, como pressão (espessura do duto, sistema de controle e segurança do duto), resistência a degradação (corrosão, erosão do solo, etc.), estações de monitoramento e sistemas de segurança, além de considerações de localização do empreendimento.

Por exemplo, em função de prevenir a formação de hidratos e corrosão interna, o transporte de CO₂ deve ser tratado para ter uma quantidade mínima de água. Entretanto, CO₂ seco tem muito baixa capacidade lubrificante, necessitando de projetos especiais para compressores e bombas. Isso pode, portanto, aumentar significativamente o custo do equipamento quando comparado a sistemas de gasodutos e oleodutos.

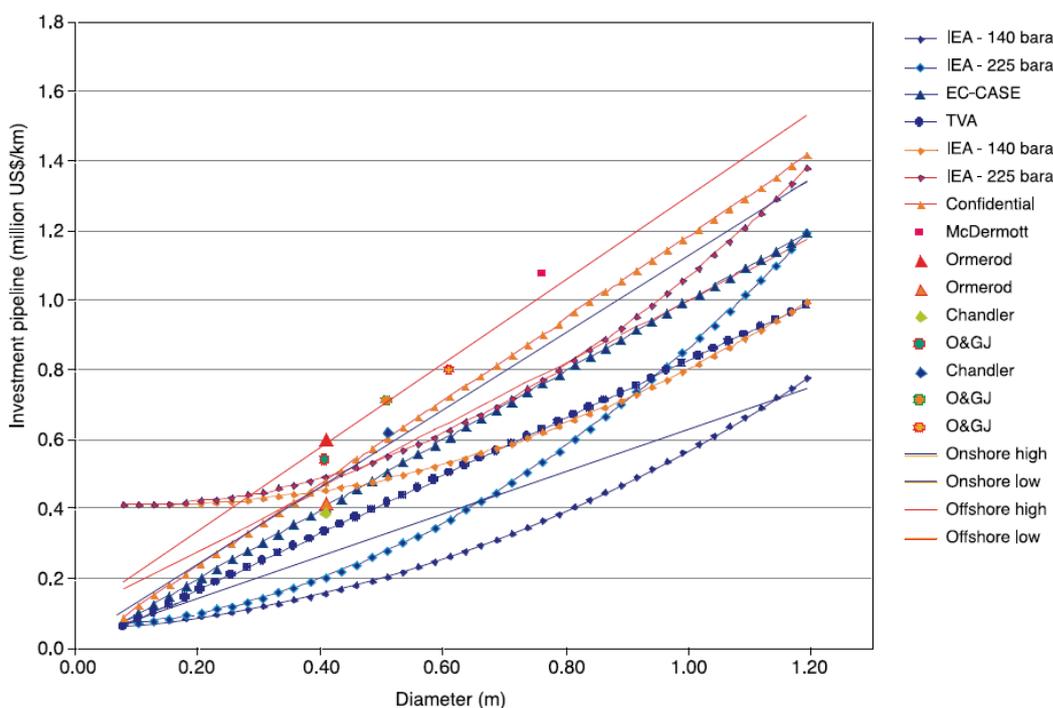


Figura 33 - Relação de custo de investimento de dutos para CO₂ por distância e diâmetro

A Figura 33 (IPCC 2005)[19] apresenta o custo de investimento para carbodutos, de acordo com classe de pressão, se é terrestre ou marítimo, e alguns exemplos pontuais de casos reais. Esses investimentos podem ser maiores quando há necessidade de estações de compressão (ou bombeamento) devido à perda de pressão no duto, dutos muito longos ou terrenos acidentados. Estações intermediárias podem ser evitadas aumentando o diâmetro do duto e reduzindo a

velocidade do escoamento, mas essa ação acarreta num aumento custo do duto, devendo, portanto, ser feito um estudo técnico e econômico para determinar a melhor opção. Outro caso onde há variação nos custos é se a operação atua em terra ou no alto mar. Para utilizar um exemplo real, foi retirado do relatório do IPCC 2005[19] a Tabela 3, editada com apenas os custos para duas possibilidades de trechos para um duto de 16 polegadas no Canadá.

Tabela 3 - Custos estimados para duas alternativas de dutos de CO₂

Item	Propriedades	Custo unitário [US\$/m]	Custo Total [Milhões de US\$]
Duto todo <i>off shore</i>	112 km (<i>off shore</i>) e 16"	1000 a 2250	112 a 252
Duto com trechos mistos	100 km (<i>on shore</i>), 50 km (<i>off shore</i>) e 16"	750 (<i>on shore</i>) e 1000 a 2250 (<i>off shore</i>)	125 a 188

O custo de capital depende em grande parte do terreno. Dutos terrestres podem ter um acréscimo de custo de 50 a 100% se a faixa estiver cheia (outros dutos) ou se passar por lugares de alta concentração populacional. Montanhas, reservas naturais e áreas com obstáculos como rios e estradas dificultam muito o projeto, seja por causa de dificuldade de acesso ou por regras mais rígidas de segurança. Dutos marítimos usualmente operam a maiores pressões e menores temperaturas e podem ser em torno de 40 a 70% mais caros.

É mais barato coletar CO₂ de diversas fontes em um único duto do que transportar montantes menores independentes. Projetos menores sofrerão muito com altos custos de transportes e serão muito dependentes da distância necessária, enquanto um duto de alta capacidade terá um custo específico menor.

Os custos de liquefação são muito variados. A Statoil estimou em 2004 um custo de 35 a 50 milhões de dólares para uma capacidade de liquefação de 1 milhão de toneladas por ano (IPCC 2005)[19]. Entretanto, a Ferus Inc., em Calgary, abriu em junho de 2010 uma unidade de liquefação com capacidade para 285 toneladas de CO₂ por dia (Ferus, Inc. - 2004)[54] – em torno de 0,1 milhões de toneladas por ano – por cerca de 15 milhões de dólares (Canadian Business – 2010)[55]. A Figura 34 apresenta uma foto da planta de liquefação da Ferus.



Figura 34 - Planta de Liquefação de CO₂

A determinação dos lucros referentes a dutos de CO₂ são de alta complexidade, dependendo fortemente da sua aplicação. Em dutos destinados puramente para o armazenamento, o lucro não é obvio, mesmo quando levado em conta os créditos de carbono. Além de interesses políticos, variando com o país onde estão localizados e a falta de legislação específica para o seqüestro de CO₂, ainda há problemas como a quem pertenceria o crédito, se a empresa que captura, a transportadora ou a empresa que cuida do armazenamento.

Quando se trata de EOR, as contas se tornam ainda mais complicadas, pois deve ser calculado o benefício trazido pela injeção no poço, que variará invariavelmente com o tipo de petróleo existentes, custos operacionais de injeção além de diversos outros fatores, como benefícios ambientais, incentivos governamentais, crédito carbono, etc.