

2 Revisão Bibliográfica

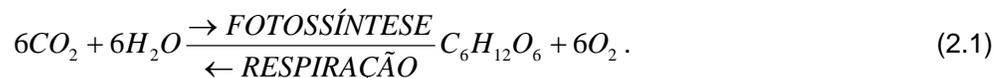
Neste capítulo é apresentada uma revisão das propriedades do CO₂, pesquisas e trabalhos sobre o CO₂, e também é feita uma revisão do estado da arte para o desenvolvimento do sensor de fibra óptica que mede as mudanças de fase do CO₂, objetivo do presente trabalho.

Das pesquisas estudadas foram identificados os tópicos listados abaixo. Estes tópicos forneceram informações importantes para o desenvolvimento desta dissertação.

- Propriedades do CO₂.
- Sensores ópticos.
- Sensores de gás: químicos e ópticos.
- Sensores ópticos para CO₂.
- Trabalhos desenvolvidos sobre sensores de CO₂.

2.1. Propriedades do CO₂

O CO₂ é uma substância importante na vida humana porque envolve processos vitais como a respiração e o ciclo de carbono. Também é usado pelas plantas para realizar a fotossíntese, onde elas transformam a energia luminosa em energia química empregando o CO₂ e água para liberar O₂ na atmosfera como mostra a figura 11. A reação de respiração e fotossíntese pode ser escrita de forma geral como mostra a equação (2.1):



O CO₂ possui características importantes na indústria e sociedade tais como: alta solubilidade na água, sua densidade em estado gasoso é 1,5 vezes maior do que a do ar atmosférico (o que indica que em fase gasosa é mais pesado que o ar) e também é inodoro e incolor. Na tabela 2 são apresentadas as

principais propriedades físicas do CO_2 utilizadas na indústria e em centros de pesquisa em diversos estudos (Holm,1997).



Figura 11 – Processo de fotossíntese (Govindjee,2000).

2.1.1. Propriedades Termodinâmicas do CO_2

As propriedades termodinâmicas do CO_2 podem ser utilizadas para identificar as mudanças de fase e para determinar seu comportamento, quando este é submetido a variações de temperatura de pressão. Essas propriedades possibilitam entender melhor as mudanças nos processos químicos ou físicos. Na tabela 2 são apresentadas as propriedades de maior importância no estudo do CO_2 .

O diagrama de fase do CO_2 , também denominado diagrama de equilíbrio, é mostrado na figura 12. É construído em função de duas grandezas físicas, por exemplo, pressão *versus* temperatura e nele são representados estados termodinâmicos que a substância adquire nas diversas fases.

O diagrama de fase do CO_2 é um diagrama de um só componente, está dividido em três áreas cada uma delas representa uma fase pura, a fase sólida, líquida e gasosa. As linhas cheias ou fronteiras de fases representam os limites das regiões e mostram o valor da pressão e temperatura em que duas fases coexistem em equilíbrio.

Tabela 2 Propriedades físicas do CO₂ (Kauff,1999).

Propriedades Físicas do CO₂			
Propriedade	Temperatura	Pressão	Valor
Calor latente de fusão	-56,6 °C	518 kPa	7,95 kJ/mol
Calor latente de sublimação	-78,45 °C	101,325 kPa	25,23 kJ/mol
Calor molar específico pressão	20°C	101,325 kPa	37,564 J/(mol x K)
Calor molar específico	20 °C	101,325 kPa	28,541 J/(mol x K);
Condutividade térmica	26,85 °C	101,325 kPa	0,0166 W/(m x K);
Densidade absoluta	0°C	101,325 kPa	1,9770 kg/m ³
Densidade crítica			0,468 kg/dm ³
Densidade relativa	0°C (ar =1)	101,325 kPa	1,53
Fator crítico de compressibilidade			274
Peso molecular			44,011
Ponto de sublimação	-78,45 ⁰ C	101,325 kPa	
Pressão crítica		7381,526 kPa	
Pressão de vapor	21,1°C	5826,18 kPa	
Pressão no ponto triplo		517,97 kPa	
Solubilidade em água	0°C	101,325 kPa	0,759 cm ³ /1cm ³ de água
Temperatura crítica	31,04 ⁰ C		
Temperatura no ponto triplo	-56,6 ⁰ C		
Viscosidade gás	26,85 °C	101,325 kPa	0,01501 cP

O diagrama contém informações importantes, tais como o ponto triplo ($T_{pt} = -56.57\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P_{pt} = 518\text{ kPa}$) e o ponto crítico ($T_c = 31.1^{\circ}\text{C}$, $P_c = 7370\text{ kPa}$); O ponto triplo é definido como o estado no qual coexistem as três fases, sólida, líquida e gasosa em equilíbrio (Macintyre,1986). Enquanto no ponto crítico, o líquido e gás são indistinguíveis em todos os aspectos porque não existe uma superfície que os separe.

A construção do diagrama de fase das três fases de equilíbrio (sólido, líquido, gasoso) é baseada no critério da fase de equilíbrio, energia livre de Gibbs e a equação de Clausius- Clapeyron. Para que duas fases estejam em equilíbrio, o potencial químico da substância em ambas as fases deve ser equivalente e estar relacionado pelas equações (2.2), (2.3), (2.4), como é apresentado na figura 13.

$$\mu\alpha = \mu\beta \quad (2.2)$$

$$\mu\alpha = \mu\gamma \quad (2.3)$$

$$\mu\beta = \mu\gamma \quad (2.4)$$

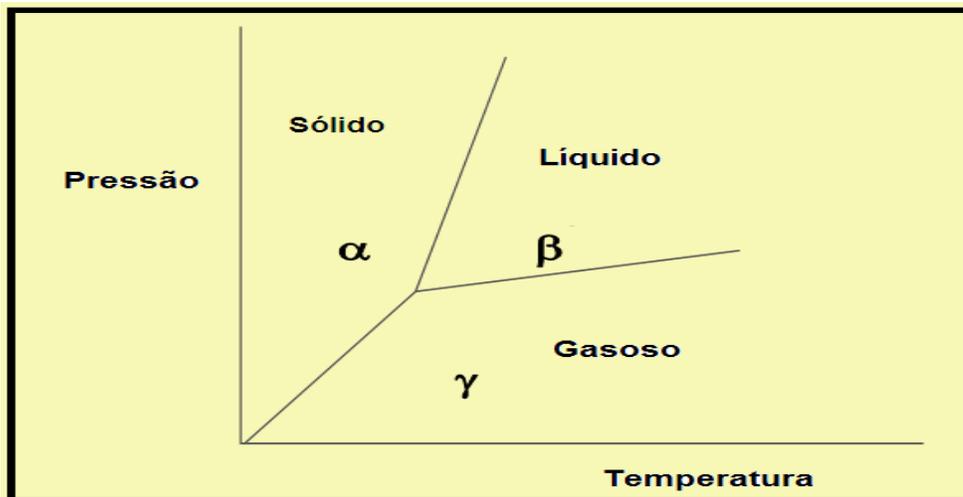


Figura 12 - Diagrama de fase do CO₂ mostra as três fases de equilíbrio do CO₂ (sólido, líquido e gasoso).

Assumindo uma mudança infinitesimal em temperatura e pressão para as duas fases em equilíbrio,

$$\mu(\alpha) + d\mu(\alpha) = \mu(\beta) + d\mu(\beta) \quad (2.5)$$

$$\mu(\alpha) + d\mu(\alpha) = \mu(\gamma) + d\mu(\gamma) \quad (2.6)$$

$$\mu(\beta) + d\mu(\beta) = \mu(\gamma) + d\mu(\gamma) \quad (2.7)$$

Em seguida se aplica a definição de potencial químico que esta representada pelas equações (2.5), (2.6), (2.7), onde S e V representam a entropia e o volume da substância.

$$d\mu(\alpha) = -S(\alpha)dT + V(\alpha)dP \quad (2.8)$$

$$d\mu(\beta) = -S(\beta)dT + V(\beta)dP \quad (2.9)$$

$$d\mu(\gamma) = -S(\gamma)dT + V(\gamma)dP \quad (2.10)$$

Agora se define a transição ou mudança de fase como por exemplo mudança de líquido para gasoso ou líquido para sólido, etc.

$$\alpha \leftrightarrow \beta \quad (2.11)$$

$$\alpha \leftrightarrow \gamma \quad (2.12)$$

$$\beta \leftrightarrow \gamma \quad (2.13)$$

Na figura 13 apresenta o diagrama de fase do CO_2 , onde são exibidas suas fronteiras (linhas de coexistência de fases) e as três fases (líquida, sólida e gasosa) esta linha pode ser obtida pela equação de Clapeyron. Esta equação representa uma maneira de caracterizar a transição de fase entre dois estados da matéria (ex.: líquido gasoso), está representada pela equação (2.14),

$$\left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_{\Delta G} = \frac{\Delta S}{\Delta V} \quad (2.14)$$

Quando as fases estão em equilíbrio entre si em qualquer ponto da linha de fronteira a energia livre de Gibbs para a transição é zero.

$$\Delta G = 0 \quad (2.15)$$

Para o caso de processos isotérmicos temos

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2.16)$$

Substituindo, na equação (2.15) temos

$$\Delta S = \frac{\Delta H}{T} \quad (2.17)$$

Reemplazamos na equação (2.14) obtemos,

$$\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_{\Delta G} = \frac{\Delta H}{T\Delta v} \quad (2.18)$$

As equações (2.14) ou (2.18) são usadas se queremos encontrar a pressão (P) em função da temperatura (T).

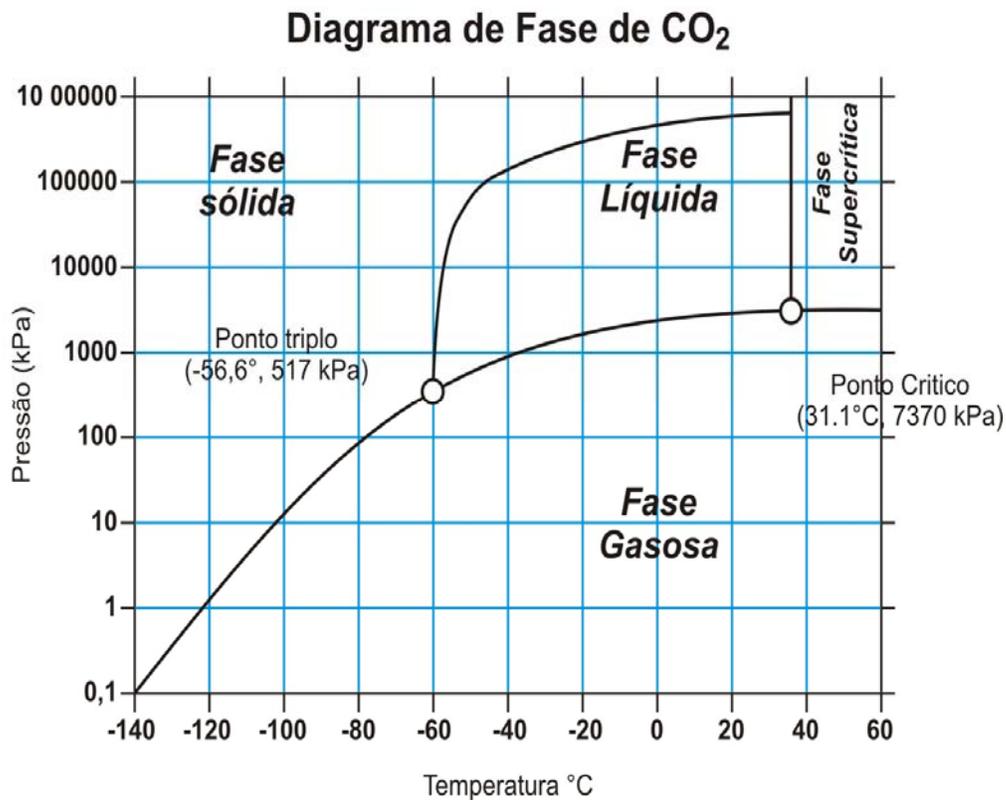


Figura 13 - Diagrama de fase do CO₂ (M Baviere, 1980).

2.2. Fibra Óptica

A fibra óptica é um guia de onda dielétrico e cilíndrico através do qual a luz pode ser transmitida com baixas perdas de transmissão e longa distância, seguindo trajetórias curvas ou retas.

A maioria das fibras ópticas é fabricada em sílica de alta resistência (SiO_2) que é um material dielétrico transparente e apresentam um comportamento elástico. Na tabela 3 são mostrados alguns valores de referência para as propriedades das fibras ópticas.

Tabela 3 Propriedades físicas das fibras ópticas (Schneider et al., 2000).

PROPRIEDADES DAS FIBRAS ÓPTICAS	
Módulo de Elasticidade [Gpa]	0,34 a 0,48
Coficiente de Poisson	0,14 a 0,26
Tensão de Ruptura [Mpa]	5,0
Coficiente de Expansão Térmica [°C]	10^{-7}

A fibra óptica é composta por duas regiões principais, núcleo e casca. O núcleo é a região central da fibra e sua função é transmitir o sinal de luz, seu índice de refração é dado por n_1 . A casca ou “*cladding*” é a região que envolve o núcleo e tem um índice de refração de n_2 .

A causa de quando $n_1 > n_2$ a luz poder ser confinada e transmitida pelo núcleo é o fenômeno de reflexão interna total. Na figura 14 são mostradas as duas regiões principais que formam uma fibra óptica e seu revestimento polimérico que tem como funções principais a proteção ao ingresso da água e proporcionar maior resistência a esforços cortantes para a fibra (Kobayash, 1993).

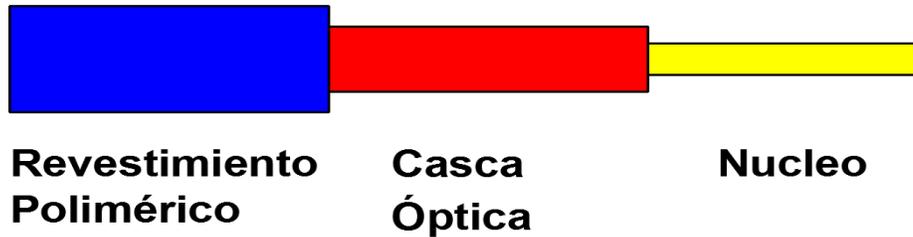


Figura 14 - Diagrama esquemático da fibra óptica.

2.2.1. Sensores a fibra óptica

Os sistemas sensores a fibra óptica (SFO) são capazes de captar sinais físicos ou químicos de seu entorno e transformar em sinais elétricos. A informação transformada pode ser comodamente quantificada, manipulada e processada por sistemas eletrônicos e informáticos, estes sensores apresentam vantagens como:

- Perda de transmissão muito baixa.
- Alta resistência a agentes químicos e variações de temperatura.
- Capacidade de multiplexação.
- Pequeno tamanho e peso.
- Imunidade eletromagnética.

2.2.2. Classificação

As fibras ópticas podem ser classificadas de diferentes modos, um deles é segue o princípio de medição. Elas podem ser usadas estritamente como meio de transporte do feixe de luz até a região sensora, e desta até um receptor remoto, tratando-se de um *sensor extrínseco*.

Sensor intrínseco é denominado quando utiliza as propriedades da própria fibra óptica para converter uma ação externa em modulação do feixe de luz que viaja através dela (UDD, Eric *et. al* 1990).

A figura 15 mostra uma classificação geral dos tipos de sensores de fibra óptica extrínsecos que estão sendo desenvolvidos e as respectivas grandezas medidas.

Sensores de fibra óptica extrínsecos

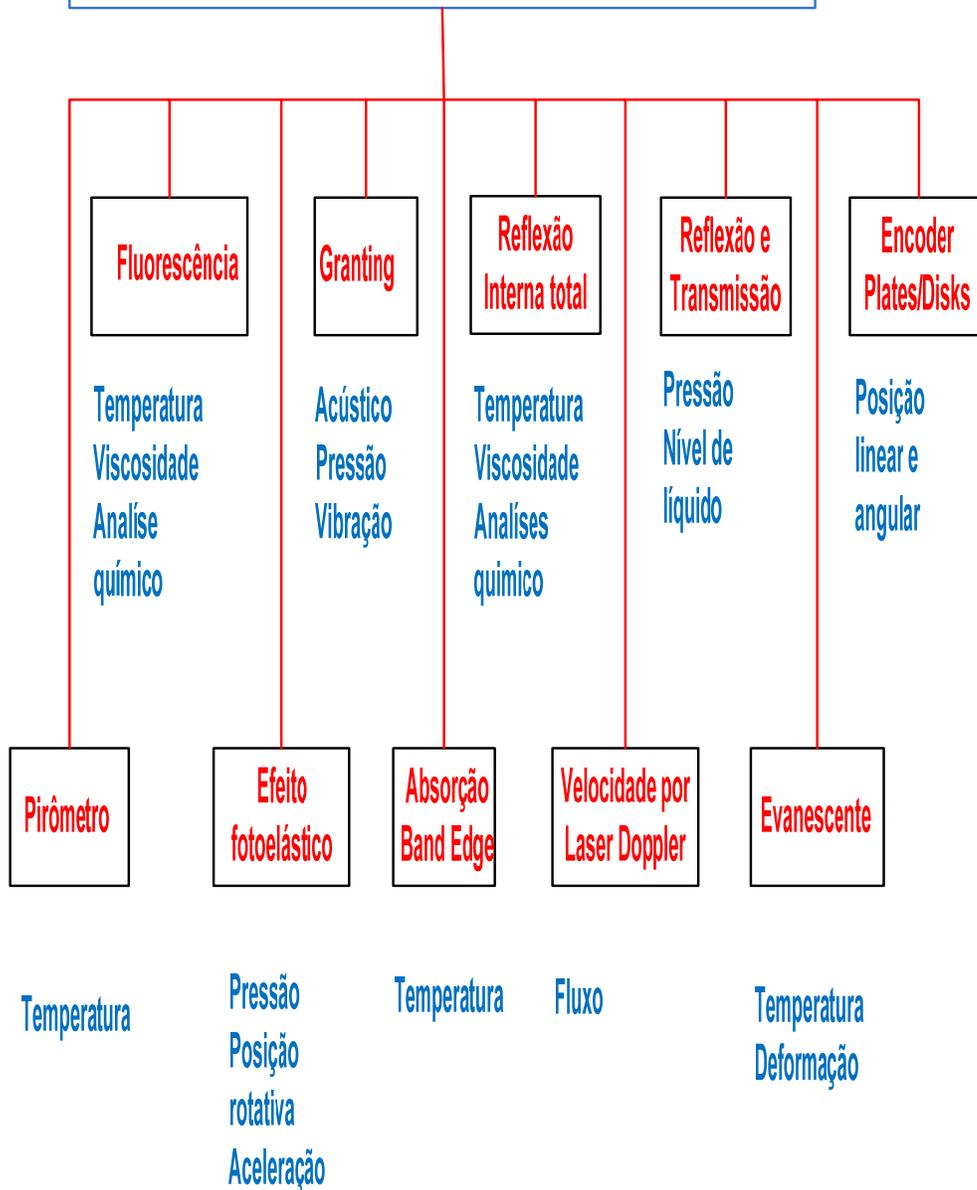


Figura 15- Sensores de fibra óptica extrínsecos (Khazan,1993).

A figura 16 mostra uma classificação geral dos tipos de sensores de fibra óptica intrínsecos e suas respectivas medidas de grandezas:

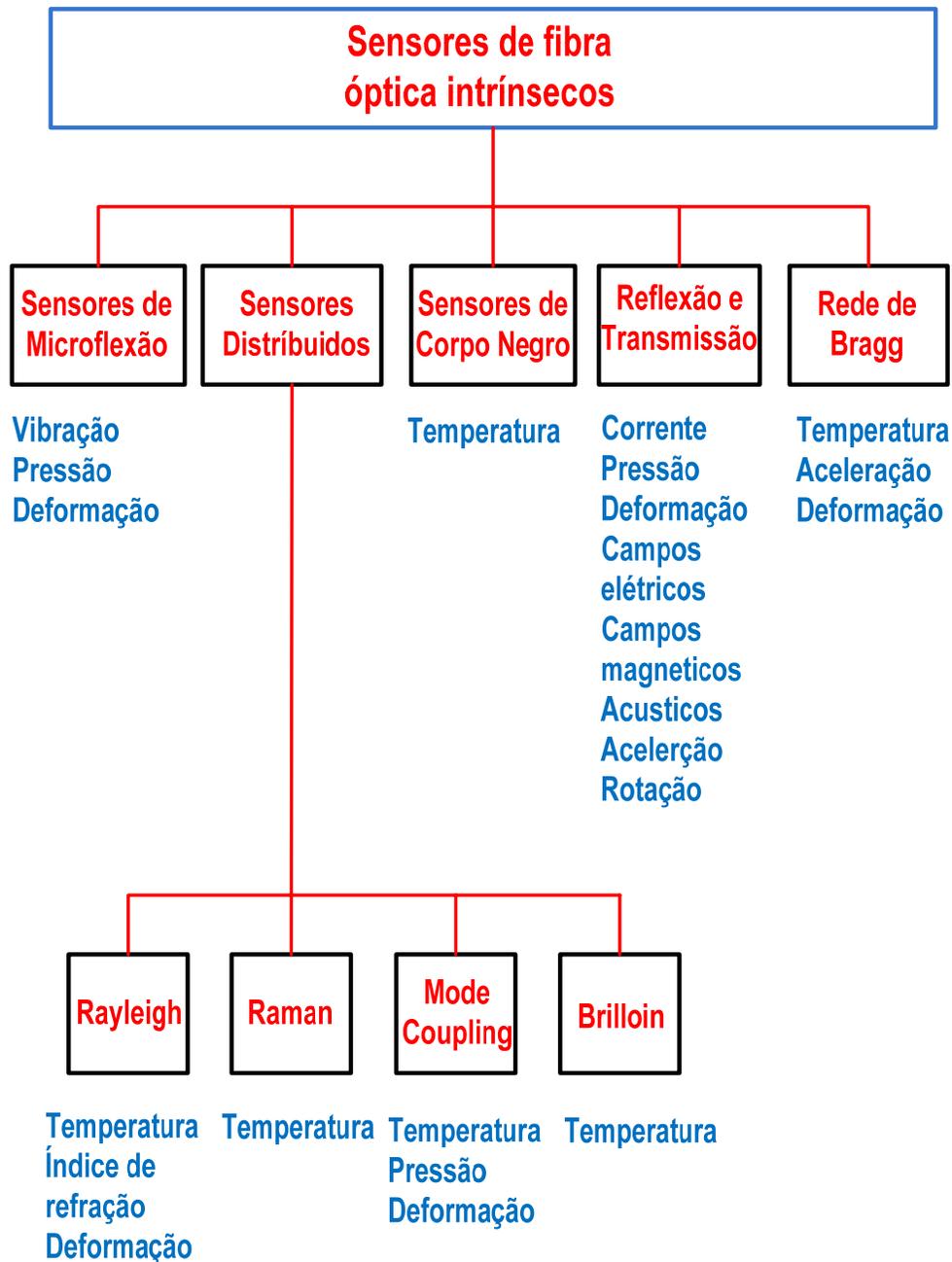


Figura 16 - Sensores de fibra óptica intrínsecos (Khazan,1993).

2.3. Aplicações

Existem diversas aplicações da medição com sensores a fibra óptica, dependendo da grandeza se pode desenvolver, um sensor diferente. Entre as grandezas que podem ser medidas estão: temperatura, pressão, aceleração, amplitude e fase de vibração, intensidade da luz, deslocamento, rotação, deformação, fluxo, nível de líquidos, intensidade de campos elétricos e magnéticos e radiação (KOBAYASHI,1993).

Na atualidade, a tecnologia de fibra óptica esta sendo usada em diversas áreas, tais como nas telecomunicações, na química, na indústria aeroespacial, em aplicações militares e na construção civil, neste caso com aplicações específicas como nas avaliações de corpos de provas e testes não destrutivos de estruturas e materiais (Yuf *et al.* , 2002).

2.3.1. Sensores de gases

Nossa sociedade contemporânea tem a necessidade de mensurar e controlar o aumento de componentes químicos em fase gasosa que fazem parte do ar e são produto de múltiplos processos industriais. O aumento destes componentes químicos desestabiliza o equilíbrio energético existente em nosso planeta e pode produzir o aquecimento global. Para realizar este objetivo são utilizados sensores para a detecção de gases.

Estes dispositivos são tipicamente compostos por uma fonte, um detector capaz de detectar os sinais que provem da fonte e um caminho entre o detector e a fonte que interage com a substância a ser detectada. Eles podem monitorar gases específicos e são principalmente afetados por fatos como: umidade, temperatura, pressão e poeira que prejudicam sua resposta quando se encontra em ambientes *in-situ*.

Como exemplo, encontramos sensores que detectam concentrações de hidrocarbonetos como: hexano (0-1000 ppm), metano (0-5000 ppm) ou propano (0-2000 ppm), mas também existem sensores mais representativos como o sensor Lambda que é baseado no princípio de comparação dos níveis de oxigênio no sistema de escape dos automóveis com aqueles no ar ambiente (Hillier,1996).

Se os níveis de oxigênio no sistema de escape são muito baixos se produz altos níveis de CO e HC, isto mostra que relação ar/combustível no motor é

baixa. Agora caso oposto, os níveis de oxigênio são muito altos e há a produção de altos níveis de NO_x e mostra que a relação ar/combustível no motor é alta (Vesilind et al., 1990).

Embora o Lambda seja um bom sensor, apresenta certas desvantagens, como um tempo curto de vida comparado com a meia vida do automóvel. A causa do tempo de vida ser curto é devido a sua exposição direta com elementos corrosivos do sistema de escape e as altas temperaturas de trabalho.

O dano desse sensor ocasiona perdas econômicas e também ambientais, porque há um aumento da poluição. Para solucionar este problema se desenvolveu outros tipos de sensores baseados em tecnologia de fibra óptica e a um custo relativamente baixo, como será mostrado na próxima sessão.

2.3.2. Sensores químicos

Os sensores químicos surgem como uma solução a necessidade de determinar a presença de substâncias químicas presentes em misturas ou soluções que exigiam um grande número de operações trabalhosas e complexas. A identificação dessas substâncias consistiu de um modo geral, no isolamento da substância ou a eliminação de substâncias que poderá interferir na análise.

O avanço dos sensores químicos para determinar, quase de maneira instantânea, a presença e a quantidade de uma substância determinada num grande número de substâncias, foi graças a desenvolvimentos de tecnologias bases, como a eletrônica e a optoeletrônica. Além da ajuda de *software* adequado que permitem comparar dados padronizados com os que chegam ao computador, permitindo sua determinação.

Os sensores químicos são dispositivos que transformam a informação química em um sinal útil analiticamente, esta informação química pode ser originada de uma reação química da substância ou de uma propriedade física do sistema investigado. Seu objetivo pode ir desde a concentração de um componente específico da amostra até as análises da composição total (Perry et al., 2002).

Um dos objetivos que se procura no desenvolvimento dos sensores químicos também é sua sensibilidade e miniaturização, para atingir ditos alvos se trabalha no micro fabricação de dispositivos que possuam boa sensibilidade química e padrões de revestimento como: espessura adequada, uniformidade,

robustez. Estes padrões requerem serem controlados, através de técnicas de revestimento polimérico. Como o solvente prova.

Exemplo do sensor químico de fibra óptica encapsulado com certa sensibilidade química para a detecção e concentração de gases, como o dióxido de enxofre (SO₂) e o dióxido de nitrogênio (NO₂), os maiores poluentes da atmosfera, a sensibilidade química é usado exclusivamente para gases individuais. A presença e concentração do gás são determinadas pelos câmbios e as razões da intensidade da luz que ocorrem com a reação química entre o gás ser medido e a sensibilidade química do sensor, estas mudanças da intensidade da luz transmitida são detectadas pelo espectrômetro (. McDonagh *et al.*, 1998.).

Para a detecção e concentração do dióxido de enxofre é usada como sensibilidade química a radamina 6G, por sua boa combinação da sulfanilamida (SFA), e um colorante fluorescente que permite a absorção da luz em 530 nm e sua radiação em 560 nm, enquanto a detecção e concentração do dióxido de nitrogênio se usam como sensibilidade química N dimetil-1-Naphthalamine.

O sensor químico capacitivo, para a detecção de CO₂, que consiste num filme fino de silicato organicamente modificado que quando exposto a presença de CO₂ modifica suas propriedades dielétricas alterando assim a capacitância do sensor. Tem uma faixa de temperatura de operação de 30 °C a 100 °C e um desvio padrão menor do que 3.5 % (operando a 70 °C).

Para se obter uma boa resposta em suas medições precisa-se que o sensor apresente uma alta sensibilidade, boa repetitividade e curto tempo de resposta. Essas características são fortemente afetadas pela instabilidade da temperatura, para corrigir esse efeito de uma forma simples, barata e eficiente o sensor é construído sobre uma resistência que ajuda a controlar tal instabilidade necessária para as medições (J.lin, M. Heurich *et al.*,1992).

Como outro exemplo característico se encontra sensores que medem o CO₂ em fase supercrítica, utilizando substâncias químicas como o BTB (Bromothymol azul) que é um indicador seco que lipofiliza um íon que esta formado com amônios quaternário como: dodceyltrimethylammonium, myristyltrimethylammonium, hexadecyltrymethyammonium, tetrahexylammonium. A importância na utilização é que o BTB é insolúvel ao CO₂ em fase supercrítica, embora atue com o etanol como co-solvente, também porque possui um comportamento de linearidade com os amônios quaternários e os hidróxidos livres com os que reage, estes podem ser ser ajustados pela variação da relação da equação (2.19):

$$\frac{(Q^+D^-)}{(Q^+OH^-)}, \quad (2.19)$$

Onde (D^-) é o indicador do ânodo e (Q^+) é o cátodo orgânico quaternário estes são imobilizados junto com o adicional quaternário de hidróxido de amônia (Q^+OH^-) , em uma cadeia de polímero sobre um suporte de poliéster ou vidro. (B.H. Weigl *et al.*, 1994).

2.4. Sensores ópticos de CO₂

Sensores a fibra óptica têm sido usados para monitorar a presença de gases como: CO, CO₂, HC, NO_x e poluentes resultantes dos sistemas de escape dos automóveis, uma vez que os automóveis são as principais fontes móveis de poluição (EU Comissão Diretiva 2001/27/EC).

Devido ao fato que os sensores convencionais não cumprem com os requerimentos cada vez mais rigorosos especificados pela União Européia secção de poluentes Standard, entidade encargada de controlar os níveis de contaminação, de poluentes que entram na atmosfera, é por isso que se está adiantando pesquisas enfocadas na área de monitoramento de gases por tecnologia da fibra óptica (União Européia de emissões standard).

Estes sensores são tipicamente compostos por uma fonte de radiação infravermelha, um detetor capaz detectar a radiação infravermelha e um caminho entre o detetor e a fonte para proporcionar a interação o gás a ser detectado. Eles podem monitorar gases específicos e são principalmente afetados pela umidade, temperatura dos ambientes.

Como cada gás tem características de absorção diferente no espectro óptico e, portanto é possível a determinação e concentração do gás, analisando somente o espectro óptico (L.S. Rothman *et al.*, 2004).

Baseados neste princípio de absorção espectroscópica se pode detectar a maioria dos poluentes e gases do efeito estufa e ao fato que estas linhas de absorção se encontram localizadas na região do infravermelho (M.Degner *et al.*, 2006).

A maioria das fibras ópticas usadas como sensor trabalha na região perto do infravermelho. Nessa região do espectro os componentes são comerciais devido ao fato de serem utilizados com bastante frequência pela indústria de telecomunicações o que permite baixar os custos de *design* e obter uma boa sensibilidade (G.Stewart, *et al.*, 1998).

Com o conhecimento baseado na relação entre a mudança de fase de uma determinada substância e o seu índice de refração, desenvolvem-se ferramentas úteis em várias áreas científicas, como em física, química, aplicações na indústria farmacêutica, de alimentos, refrigerantes e petroquímicas (A.Benerjee, S. Mukherjee, et al., 2007)., Apesar do desenvolvimento destas aplicações, ainda existem certas limitações nos sistemas eletrônicos com respeito à exatidão.

O índice de refração é um importante parâmetro óptico do material. Sua medição desempenha um papel importante nas aplicações físicas e químicas como identificação do material em processos, pureza, reprodutibilidade e variação com a concentração do material.

Atualmente existem diferentes técnicas para determinar o índice de refração de líquidos e dispersão, tais como: métodos interferométricos (Moosmuller H, *et al.*, 1996), mínimo ângulo de desviação, método de autocolimação (Samedov F., *et al.*, 2006), método interface prisma-líquido (Sainov S, Dushkina N. 1990). Na atualidade o refratômetro de Abbe é aplicado como a ferramenta padrão na medida do índice de refração dos líquidos (Kuhler K, Dereniak EL 1991).

O fornecimento de ferramentas desenvolvidas para determinar o índice de refração em tempo real contribui a solução de um grande número de problemas que afronta a indústria petroquímica hoje (Born M, Wolf E. 1999).

Os fluidos supercríticos (SCFs) são quaisquer fluidos que estejam a uma temperatura e pressão acima da temperatura e pressão crítica e é importante ressaltar que nenhuma substância é um fluido supercrítico, mas sim pode atingir esse estado supercrítico aumentando a temperatura e pressão até superar seu ponto crítico.

No estado supercrítico, as propriedades físico-químicas de um fluido assumem valores intermediários do estado líquido e gasoso. Possuem propriedades relacionadas à capacidade de solubilização, como a densidade aproxima-se daquelas típicas de um líquido, enquanto propriedades relacionadas ao transporte de matéria, como a difusibilidade e a viscosidade, alcançam valores típicos de um gás (J.- D. Grunwaldt, et al., 2003).

Sabe-se que os líquidos são excelentes solventes, mas de difusão lenta e alta viscosidade. Os gases, por sua vez, são péssimos solventes, mas se difundem com extrema facilidade e são pouco viscosos. Os solventes supercríticos têm características desejáveis tanto de líquidos quanto de gases, são ótimos solventes, com alta difusibilidade e baixa viscosidade.

Um dos fluidos supercríticos mais usados no mundo é o dióxido de carbono, isto é devido ao fato da sua temperatura crítica ser baixa (31 °C), ser inerte, de ter baixa toxicidade em relação aos outros fluidos e ter alta pureza a custos baixos (Besserrer 1973).

Com o conhecimento das propriedades termodinâmicas e a fase de equilíbrio durante a reação química torna-se material importante para o desenvolvimento e a otimização de novos projetos que envolvem SCFs (Clifford 2001).

Para se realizar a determinação do índice de refração de substâncias misturadas, parte do princípio que o índice de refração de uma mistura é função da diferença dos índices das substâncias puras e de suas concentrações, para assim correlacionar a intensidade da luz refletida com a concentração da mistura (Pandey et al., 1999).

Esta técnica é usada na indústria petroquímica para determinar o índice de refração dos combustíveis e as misturas de combustíveis, devido ao fato de que o índice de refração do biodiesel ser próximo ao índice de refração da fibra óptica usada comumente nestes refratômetros encontrado nas fibras comerciais (C-B. Kim 2004).

Através de técnicas interferométricas é possível medir o índice de refração de líquidos transparentes, soluções aquosas de sal, agentes biológicos, solventes orgânicos, etc, com uma boa exatidão. Seu princípio de medida é baseado na comparação da medida de dois reflectômetros de espelho deslocado, uma para o líquido e outro para o ar, que atua como referência. O equipamento é de fácil construção, baixo custo e com uma pequena fonte de erro (Zocchi G 1996).

Como um exemplo, considera-se dois tipos de refratômetros. Um básico que mede a quantidade de luz refletida pelo meio, este é composto por uma fibra óptica, uma fonte de luz e dois fotodetectores (um que detecta a quantidade de luz que sai da fonte e o outro a quantidade de luz refletida pela substância), como é mostrado na figura 17.

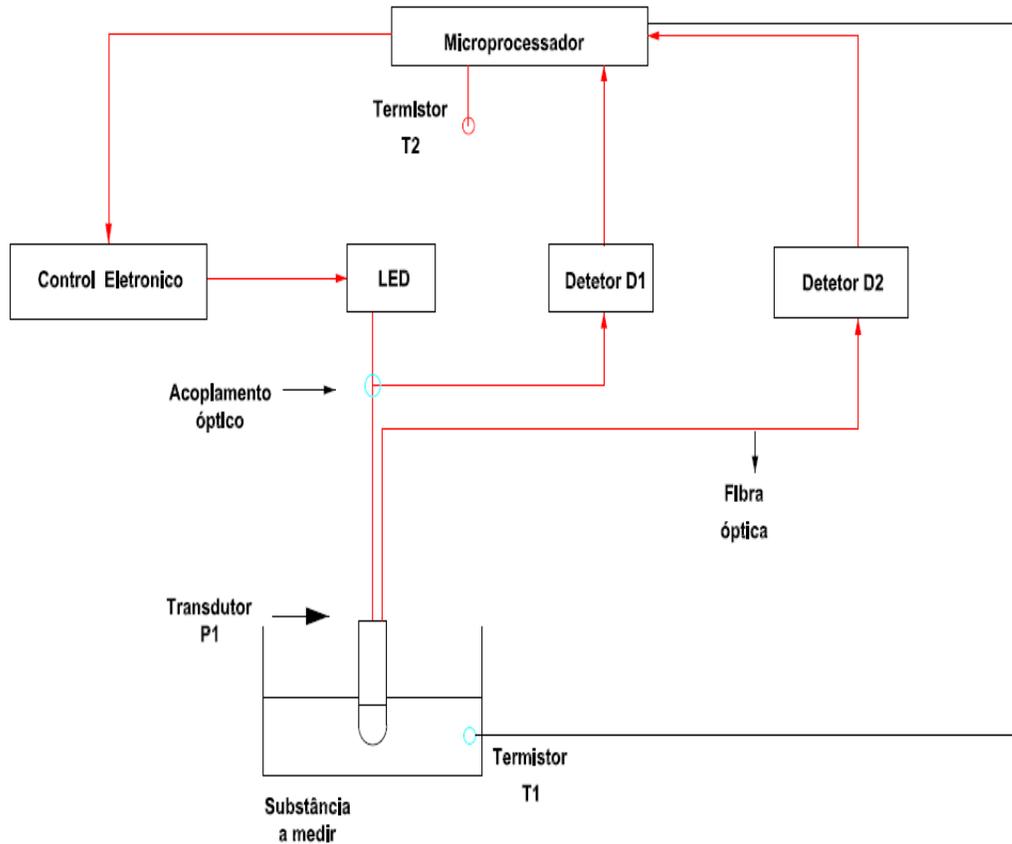


Figura 17 - Desenho óptico e eletrônico do refratômetro básico.

O outro refratômetro é mais evoluído, baseado em técnicas diferenciais que permitem a medição e a comparação do índice de refração de uma substância com outra substância padrão, com uma boa precisão, se emprega para atingir uma alta exatidão e precisão. É formada por duas fibras ópticas, uma que atua como referência do índice de refração e a outra que mede o índice de refração do meio em questão (Turán 2001). O desenho é mostrado na figura 18.

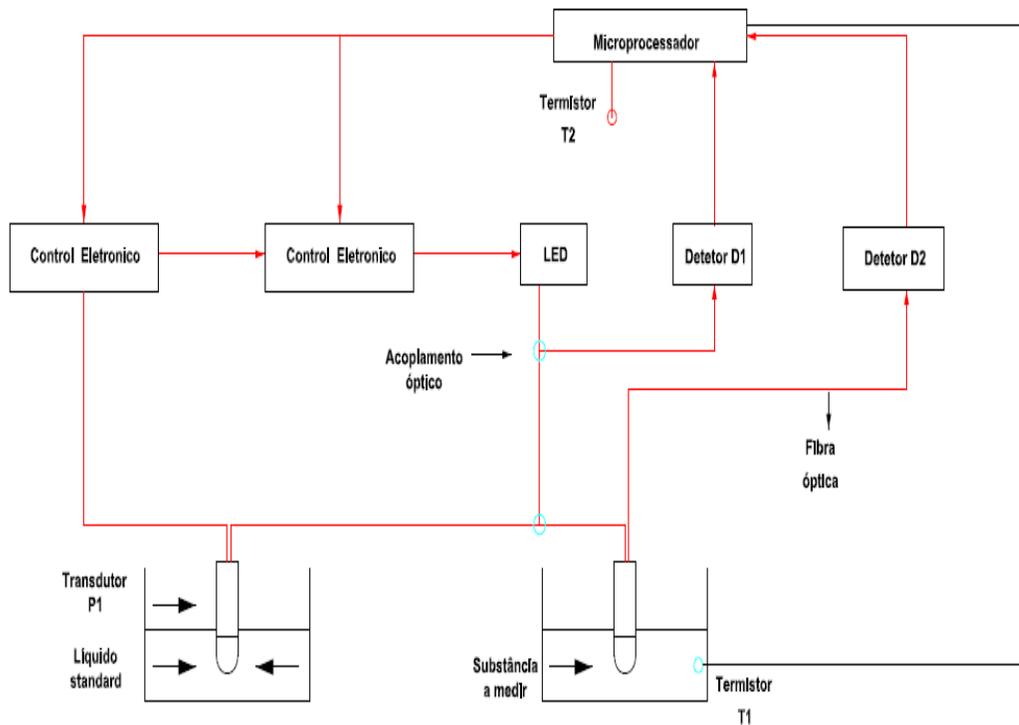


Figura 18 – Desenho óptico e eletrônico do refratômetro diferencial.

Os refletômetros são outras ferramentas usadas para medir índice de refração das substâncias que tem como princípio de funcionamento o fenômeno da reflectividade, que ocorre na interface entre o sensor e a substância a medir. Na ponta de prova do sensor a intensidade da luz refletida é função da diferença entre o índice de refração do sensor e a substância.

Para medir substâncias líquidas puras, soluções aquosas de açúcar e sal, com uma boa resolução, usa-se reflectômetros na faixa entre ultravioleta e infravermelho, com comprimentos de onda de 300 nm a 920 nm (Plucinski 2008).