



# DOSSIÊ TÉCNICO

Eficiência Energética em Processos de Combustão  
– ganhos ambientais e econômicos

Stefan Nicolas Richetti Paunescu

SENAI-RS  
Escola de Educação Profissional SENAI Nilo  
Bettanin

Agosto  
2007

## Sumário

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>3</b>
<b>2 OBJETIVO .....</b>	<b>4</b>
<b>3 ENERGIA .....</b>	<b>4</b>
<b>3.1 Matriz e Balanço Energético .....</b>	<b>7</b>
<b>4 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA .....</b>	<b>8</b>
<b>5 COMBUSTÃO.....</b>	<b>9</b>
<b>5.1 Análise dos gases da combustão.....</b>	<b>13</b>
<b>5.2 Analisadores de gases de combustão .....</b>	<b>16</b>
<b>6. EFICIÊNCIA EM PROCESSOS DE COMBUSTÃO .....</b>	<b>21</b>
<b>7. A IMPORTÂNCIA DA QUALIFICAÇÃO DE PESSOAL .....</b>	<b>23</b>
<b>Referências .....</b>	<b>24</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>25</b>

## Título

Eficiência Energética em Processos de Combustão – ganhos ambientais e econômicos

## Assunto

Eletricidade, gás e água

## Resumo

A eficiência dos processos de geração de energia através da queima de combustíveis fósseis tem impacto direto sobre diversos setores da sociedade, entre eles o econômico e o ambiental. A necessidade de processos de combustão afinados é importante no momento em que as reservas de combustíveis fósseis são tidas como finitas e de acesso cada vez mais difícil, o que acarreta na elevação do preço dos combustíveis, pressionados também por instabilidades geo-políticas. Também no momento em que se discutem questões relacionadas ao meio-ambiente a ação do homem é comprovadamente conhecida e a eficiência na queima de combustíveis fósseis tem estreita relação com a preservação da atmosfera que nos cerca. Assim sendo, a eficiência, em qualquer área, necessita obrigatoriamente de dois itens: equipamentos adequados e pessoal qualificado.

## Palavras-chave

Combustão; eficiência energética; meio ambiente

## Conteúdo

### 1 INTRODUÇÃO

A queima de combustíveis com finalidade da geração de energia térmica é ampla e tradicionalmente realizada por grande parte da sociedade, seja para aplicação industrial, comercial, residencial, geração de energia elétrica ou outro qualquer. Desde que o homem passou a ter domínio sobre o fogo, isto é, produzi-lo, mantê-lo e utiliza-lo eficazmente, esta forma de energia tem sido essencial para o seu desenvolvimento.

A utilização eficiente dos combustíveis fósseis possui diversos apelos, a saber:

- disponibilidade de grandes quantidades, compatível com a demanda: a necessidade de energia cresce acompanhando o desenvolvimento econômico das nações e deve haver combustível suficiente para atender a demanda. Quanto mais eficiente o uso, menos se necessita consumir;
- economia nos gastos com energia: a geração de energia representa grande parte dos custos dos setores produtivos e da sociedade como um todo. O uso eficiente diminui estes custos;
- meio ambiente: o uso eficiente, além de reduzir as emissões atmosféricas dos processos de combustão por queimar menos combustível produzindo o mesmo trabalho, também gera menos substâncias agressivas ao meio ambiente.

Estes e outros itens fazem parte da justificativa da razão pela qual se deve conduzir processos de combustão com eficiência, e ainda trás para a discussão a importância da qualificação de pessoal capacitado para operar e gerenciar estes processos, que não são facilmente encontrados no mercado.

## **2 OBJETIVO**

O objetivo deste documento é apresentar ao leitor o que é a energia térmica produzida através de sistemas de combustão e o conceito de eficiência energética aplicada a tais sistemas. A partir deste conceito, apresentar algumas vantagens provenientes do uso eficiente dos combustíveis e discutir a importância da existência de pessoal qualificado a atuar de maneira operacional e gerencial em processos de combustão.

## **3 ENERGIA**

Qualquer atividade produtiva só se realiza a partir do consumo de energia. Existem diversas formas de energia e segundo a Primeira Lei da Termodinâmica, embora a energia assuma diversas formas, a quantidade total de energia é constante e, quando energia em certa forma desaparece, ela reaparece simultaneamente em outra ou outras formas. O tipo de energia que interessa aos processos produtivos são aquelas que podem ser colocadas à disposição da sociedade para ser utilizada de forma fácil e a qualquer momento.

A transformação de energia em outras formas é feita de acordo com a necessidade do consumo, da tecnologia disponível, da disponibilidade do insumo a ser utilizado e da logística de transporte. Assim, por exemplo, a energia térmica pode ser produzida a partir da energia química que une os átomos nas moléculas das substâncias que compõem um determinado combustível. A queima deste combustível reorganiza os átomos, formando novas moléculas (outras substâncias) e energia térmica é liberada. Também se pode obter energia térmica a partir de reações termonucleares, que ocorrem no interior de reatores de fissão nuclear, onde substâncias radioativas (como o urânio enriquecido) são levadas a um estado reacional específico, formando novas substâncias e também liberando enorme quantidade de energia térmica.

A energia térmica pode ser então utilizada diretamente em algum tipo de processo produtivo como na geração de vapor por uma caldeira ou aquecimento de uma carga em um forno; ou então, transformada em energia elétrica, em centrais termoelétricas, que utilizam a energia térmica da combustão ou de reações nucleares para mover elementos mecânicos como palhetas de turbinas (a gás ou a vapor), pistões em cilindros de motores ou outros mecanismos, que por sua vez geram a energia elétrica através das leis do eletromagnetismo. A energia elétrica pode também ser produzida a partir de outras fontes de energia, como a energia potencial armazenada em grandes quantidades de água em níveis elevados. Esta água, ao cair, move turbinas hidráulicas que por sua vez, também seguindo as leis do eletromagnetismo, geram energia elétrica. Esta energia elétrica pode ser então distribuída por longas distâncias e ser utilizadas por todos os setores da sociedade, inclusive para acender uma lâmpada em casa. Esta lâmpada, cujo objetivo é promover a iluminação, é um dispositivo utilizado para transformar a energia elétrica em luminosidade. Porém, esta luminosidade só é obtida mediante a geração de calor, produzido quando a corrente elétrica atravessa o filamento metálico da lâmpada, aquecendo este filamento que em determinada temperatura emite energia através de ondas eletromagnéticas dentro do espectro da luz visível. Assim, fica claro que a energia transforma-se de uma forma para outra, ou outras formas, intencionalmente ou não, obedecendo a 1º Lei da Termodinâmica.

A FIG. 1 apresenta o complexo mecanismo de possíveis transformações das formas de

energia, suas fontes e utilizações, assim como alguns mecanismos de transformação, naturais ou desenvolvidos pelo homem.

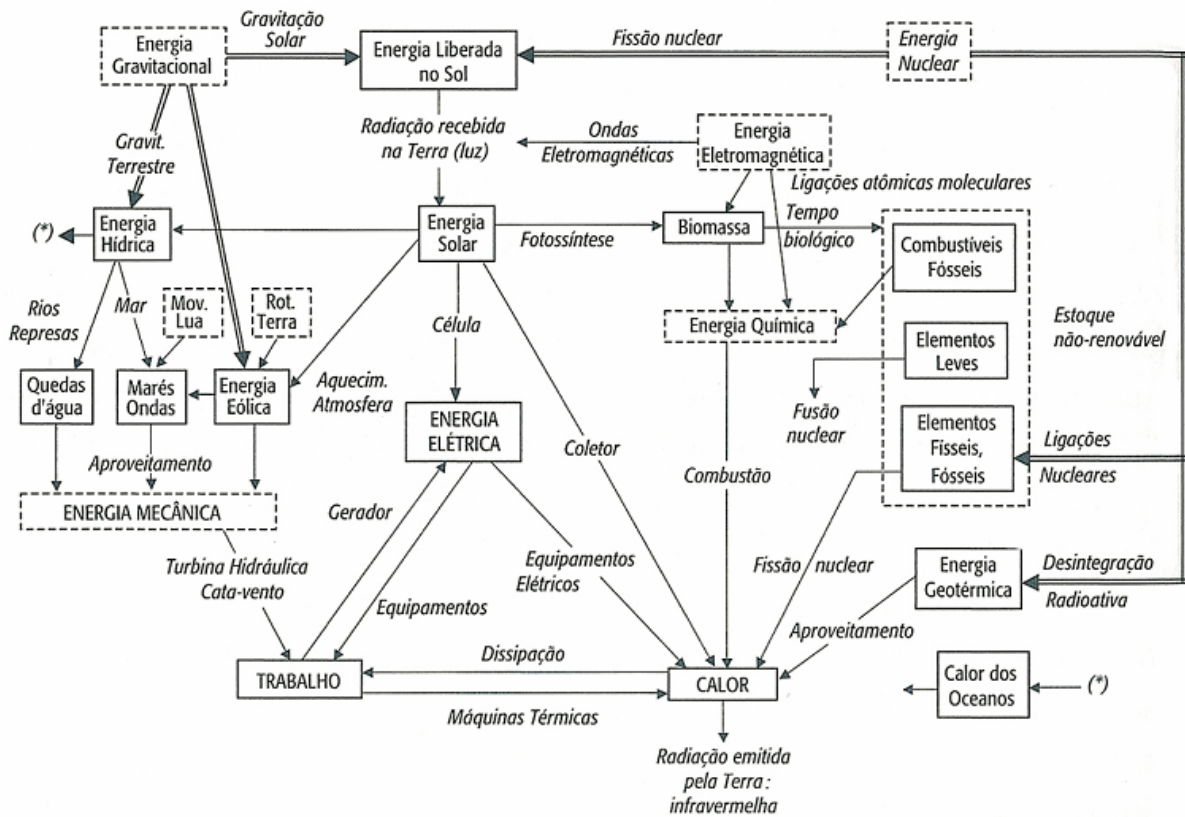


Figura 1 - formas básicas de energia no planeta.  
Fonte: GARCIA, 2002.

Nesta figura, toma-se como ponto de partida a energia gravitacional, nuclear e eletromagnética. Estas, por sua vez, são transformadas em todas as outras formas de energia através dos mais diversos processos, naturais ou não, convertendo-se nas formas de energia que são utilizáveis pela sociedade para a realização de trabalho e produção de calor. A energia liberada pelo sol, por exemplo, é proveniente da ação da gravidade do sol que produz uma massa gasosa de densidade muito elevada onde ocorrem reações entre os núcleos dos átomos e, a partir de processos de fusão nuclear, átomos de hidrogênio transformam-se em átomos de hélio, liberando enorme quantidade de energia, que por sua vez, chega até a terra através de ondas eletromagnéticas e é transformada em todos os tipos de energia que temos disponíveis no nosso planeta.

As setas na FIG. 1 representam os mecanismos utilizados para as transformações das formas de energia. A fotossíntese, por exemplo, é o mecanismo biológico responsável pela transformação de energia solar em energia química, necessária para a existência da biomassa; um gerador elétrico é usado para a transformação de trabalho em energia elétrica. O processo de transformação de energia que é o assunto em questão neste trabalho, a combustão, é utilizado para a transformação da energia química presente na biomassa e nos combustíveis fósseis em calor.

As fontes primárias de energia podem ser classificadas em não renováveis e renováveis. As energias não renováveis, o tipo mais utilizado para suprir a demanda de consumo energético mundial, têm essa denominação pois são recursos energéticos encontrados de forma natural na terra, que levaram milhões de anos para serem produzidos (a partir de outras fontes de energia) e suas taxa de consumo é infinitas vezes maior que sua taxa de formação ou

reposição. Isto quer dizer que os recursos energéticos não renováveis tornam-se cada vez mais escassos e tendem a acabar em algumas dezenas ou centenas de anos.

Os recursos energéticos não renováveis são os seguintes:

- Petróleo e seus derivados;
- Carvão e seus derivados;
- Gás natural;
- Substâncias radioativas (urânio, tório, plutônio, etc.).

Dentre estes, o petróleo, o carvão e o gás natural são considerados combustíveis fósseis, pois são oriundos de matéria orgânica que sofreu diversas transformações, em locais muito específicos da crosta terrestre, ao longo de milhões e milhões de anos, até atingirem a composição final que conhecemos hoje. Estes três recursos energéticos são compostos principalmente por carbono e hidrogênio e são utilizados em processos de combustão para a geração de energia térmica. O urânio e as outras substâncias radioativas, por sua vez, não provêm da decomposição de matéria orgânica, mas são elementos gerados na crosta terrestre, encontrado em estado natural em jazidas. Para a geração de energia, são utilizados em usinas nucleares como combustível, principalmente na forma de *pellets* de dióxido de urânio (UO<sub>2</sub>).

Os recursos energéticos renováveis são assim chamados, pois, por mais que sejam utilizados, sua velocidade de reposição pela natureza é tão rápida ou mais do que a velocidade com que são consumidos. São também aquelas fontes energéticas cujo manejo pelo homem pode ser efetuado de forma compatível com as necessidades de sua utilização, tal qual a biomassa.

As energias renováveis mais importantes são:

- Energia solar: térmica e voltaica;
- Energia hidráulica;
- Energia eólica;
- Energia oceânica: marés, ondas e gradiente térmico;
- Energia geotérmica da Terra;
- Energia da biomassa: florestas nativas e plantadas, biocombustíveis não florestais e resíduos urbanos e agrícolas;
- Energia do Hidrogênio.

Fazendo um breve resumo sobre estes tipos de energia, a energia solar pode ser usada diretamente como energia térmica, sendo captada por equipamentos dedicados a esta função. Também se pode usar o efeito fotovoltaico que transforma energia luminosa diretamente em energia elétrica. A energia solar não gera nenhum tipo de resíduo, sendo extremamente limpa.

A energia hidráulica utiliza-se da água como recurso energético, mais precisamente da energia potencial existente em uma determinada massa de água entre o nível no curso de um rio a montante e a jusante de uma turbina hidráulica, ou em menor escala, em uma roda d'água. Também é uma forma de energia extremamente limpa, apresentando interferência no ecossistema no caso de grandes represas, que alteram a fauna e a flora de determinada região.

A energia eólica é a energia obtida a partir do movimento de grandes correntes de ar, os ventos. Grandes cata-ventos, chamados de aerogeradores, são utilizados para gerar energia elétrica quando o vento, sob determinada velocidade faz girar às pás das hélices destes aerogeradores. É uma fonte de energia extremamente limpa e possui potencial compatível com a demanda de consumo, dependendo apenas da escolha certa do local de implantação dos aerogeradores.

A energia oceânica é enorme, pois aproximadamente 70% da Terra é coberta por água oceânica. Dos oceanos pode-se aproveitar a energia das marés, das ondas e do gradiente térmico existente. As marés são resultados da interação da força gravitacional da lua, da Terra e do Sol sobre os oceanos. A movimentação dessa massa monstruosa de água pode ser aproveitada para a geração de energia. Utilizam-se turbinas para este tipo de aproveitamento de energia. As ondas, resultado da ação dos ventos sobre as águas dos oceanos. Estas ondas podem ser interceptadas com equipamentos apropriados e assim gerar energia. Também o gradiente térmico, que é a diferença de temperatura existente entre a superfície dos oceanos e a água fria nas profundidades. Este tipo de energia é difícil de ser operacionalizado, devido a pequena diferença de temperatura (no máximo 20°C) e da necessidade de se bombear água fria para a superfície, mas a grande quantidade de água existente torna o evento possível de ser realizado.

A energia geotérmica da Terra é obtida a partir do calor oriundo do subsolo terrestre. Projetos existentes utilizam campos de “Geysers” (água quente que jorra da terra). Um recurso geotérmico possui três importantes características: um aquífero contendo água acessível por perfuração, uma estrutura rochosa que retenha o fluido térmico e uma fonte de calor, a própria Terra.

A energia a partir da biomassa possui diversas vertentes e é a energia renovável de maior aplicação. Todas as formas de biomassa são utilizadas para se gerar energia através da conversão da energia química existente nas moléculas em energia térmica, através da combustão. A grande diferença desta combustão para a combustão de materiais fósseis é que todo o dióxido de carbono gerado na queima da biomassa é retirado da atmosfera no ciclo de crescimento de novas plantas que darão origem a nova biomassa, criando um ciclo fechado para o CO<sub>2</sub>, além de ser renovável, ou seja, pode-se sempre produzir biomassa de acordo com a necessidade e outros fatores controláveis pelo homem. Na outra mão, a combustão de combustíveis fósseis retira o carbono que está enterrado com o petróleo, carvão ou gás natural e o transforma em CO<sub>2</sub>, que por sua vez não é novamente recuperado, aumentando-se assim a concentração desta substância na atmosfera. Também não se pode produzir petróleo ou carvão mineral de acordo com a necessidade.

E por fim, a energia a partir do hidrogênio é considerada a energia do futuro, pois as reações do hidrogênio que podem gerar energia, ou seja, a combustão ou a reação eletroquímica, ambas geram como sub-produto água. O hidrogênio pode ser obtido a partir de diversos processos, entre eles, a hidrólise da água, que separa o hidrogênio e o oxigênio, também como subproduto de processos de reforma de diversos combustíveis.

Assim, com este capítulo, busca-se dar uma visão superficial sobre as formas com que se pode obter a energia que necessitamos para nossas atividades e para um desenvolvimento sustentável. O aprofundamento no assunto é possível consultando-se as referências utilizadas na confecção deste texto.

### **3.1 Matriz e Balanço Energético**

A matriz energética procura representar ao longo do tempo, de forma quantitativa e ordenada, a relação entre os energéticos com sua cadeia de produção e consumo, ou seja, desde a utilização de recursos naturais até o uso final. Ela é importantíssima para a execução de planejamento de projetos industriais ou a nível governamental, para o estabelecimento de políticas e estratégias quando elaboradas para cenários futuros acima de 20 anos.

É importante ressaltar a diferença que existe entre matriz energética e balanço energético no Brasil. O Balanço Energético Nacional (BEN), apresentado anualmente pelo Ministério de

Minas e Energia ([www.mme.gov.br](http://www.mme.gov.br)) mostra a matriz energética brasileira, porém voltada para o passado, ou seja, o que foi produzido e consumido de energia no país no ano que passou. Na Matriz Energética, busca-se construir um banco de dados periódicos, com as perspectivas para um determinado intervalo de tempo, considerando-se diversos cenários que influenciam diretamente na matriz e que promovem as incertezas relacionadas ao setor. O Brasil tem-se preocupado com sua Matriz Energética de longo prazo apenas recentemente, diferente do Balanço Energético, que permite a análise do histórico energético ocorrido nos últimos 28 anos, desde 1976.

A confecção da Matriz Energética é elaborada em cima de softwares específicos que implementam modelos com relações adequadas permitem a análise e cálculo prospectivo da oferta e demanda por energia. Esses softwares consideram as particularidades de cada tipo de energético e de cada setor da sociedade, como o industrial, residencial, comercial, rural, público e transportes. Alguns consideram os impactos ambientais gerados pelas fontes de energia.

Dentre os modelos aplicados a softwares utilizados no Brasil pode-se citar os modelos de balanço energético da Secretaria de Energia Nacional e de outras Secretarias de Energia dos órgãos estaduais; modelos de prospecção de mercado para elaboração dos planos de ação da ELETROBRAS e PETROBRAS e modelos desenvolvidos no âmbito de universidades e institutos de pesquisa e consultores (geralmente simplificados). O acesso a essas matrizes energéticas é mais difícil do que o acesso ao BEN.

O aprofundamento no assunto é possível consultando-se as referências utilizadas na confecção deste texto.

#### **4 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

A partir do conceito de energia e entendendo que a energia, ao atender a 1ª Lei da Termodinâmica se conserva transformando-se em outras formas, o conceito de eficiência energética pode então ser aplicado nas três etapas existentes na cadeia energética: a produção, o transporte e o uso final.

O assunto é extremamente rico em cada uma das etapas. Falaremos superficialmente sobre as duas primeiras para manter o foco na eficiência energética no uso final da energia, e, nos próximos capítulos, sobre a eficiência energética em processos de combustão.

Como ponto de partida, pode-se definir qual a necessidade de se obter e utilizar energia de modo eficiente. Os fatores que agem diretamente sobre esta necessidade são: a disponibilidade/escassez do energético, as questões econômicas e as questões ambientais. Também se deve levar em consideração quem é o interessado na economia do energético, se o produtor ou o consumidor da energia.

Na questão sobre disponibilidade e/ou escassez do energético, deve-se considerar o tipo de energia primária utilizada. Se os recursos são renováveis, a necessidade de conservação e de eficiência é teoricamente menor, pois a fonte é inesgotável. Se os recursos energéticos são não renováveis, a necessidade de conservação é óbvia, com é o caso atualmente do petróleo. Lógico que questões relativas à tecnologia da produção ou outras como a sazonalidade, que interferem na produção de energias renováveis tal qual a energia hidroelétrica (as represas podem apresentar níveis de água baixos em determinadas épocas do ano, apesar das represas) ou a biomassa (a entre-safra da cana de açúcar diminui a disponibilidade de álcool, por exemplo), fazem parte da cadeia produtiva das energias consideradas renováveis, obrigando estas a preocuparem-se com a questão da produção e uso eficiente da energia



Sobre as questões econômicas, a eficiência energética é talvez o mais importante item a se considerar. A utilização de menor quantidade de energia, para se realizar o mesmo trabalho é a essência do uso eficiente. As diferenças entre o consumidor e o produtor sobre o uso eficiente, num primeiro momento, parecem antagônicas, ou seja, o consumidor quer ter um processo eficiente consumindo menos energia e gastando menos recursos financeiros; já o produtor vende mais energia se o consumidor usa ineficientemente. Porém, esta não é a posição assumida pela maioria das empresas fornecedoras de energia, principalmente das principais fornecedoras nacionais: a PETROBRAS e a ELETROBRAS. Estas e outras empresas de energia investem vultosas quantidades de recursos em programas de uso eficiente de seus energéticos, pois sabe que se o cliente usa bem a energia, tem saúde financeira para crescer e consumir mais, além da questão da capacidade de fornecimento das mesmas, que não é infinita, mesmo para o recurso renovável da energia hidroelétrica.

No Brasil, o setor energético desenvolve diversos programas voltados ao combate do desperdício, ao uso racional e à conservação de energia. A PETROBRAS coordena o programa CONPET (Programa Nacional de Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural), programa do governo federal que tem o objetivo de incentivar o uso eficiente do Gás Natural e Petróleo no transporte, nas residências, no comércio e na indústria. No setor elétrico a ELETROBRAS coordena o PROCEL (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica). Estes programas atuam no combate ao desperdício através de ações educacionais, pesquisa em equipamentos mais eficientes, projetos que contemplem o uso racional da energia, entre outras ações.

Acerca das questões ambientais, o uso eficiente da energia também tem reflexos. Tanto as fontes renováveis quanto as não renováveis tem algum tipo de impacto ambiental, sendo menor o impacto das fontes renováveis. Com as fontes não renováveis o problema é maior e mais complicado. Materiais radioativos utilizados em usinas nucleares geram o chamado “lixo radioativo”. Quanto maior o consumo de energia, maior é a necessidade de geração da mesma e conseqüentemente maior é a geração deste lixo. Combustíveis fósseis, quando queimados geram diversas substâncias agressivas ao meio ambiente. Se o consumo é maior, a geração destas substâncias é maior. O uso eficiente dos energéticos reduz a quantidade de poluentes mantendo-se o nível de atividade e, no caso de aumento das atividades e conseqüente aumento do consumo de energia, a influência no ambiente é minimizada, reduzindo-se o impacto ambiental.

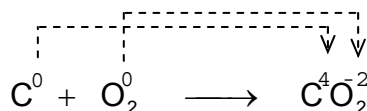
O aprofundamento no assunto é possível consultando-se as referências utilizadas na confecção deste texto.

## 5 COMBUSTÃO

A combustão é, antes de tudo, uma reação química entre substâncias específicas sob determinadas condições, onde há a formação de novas substâncias e a liberação muito rápida de energia na forma de calor quase sempre acompanhada de intensa luminosidade. Nesta reação, ocorre a rápida combinação de uma substância chamada comburente ou oxidante com outra chamada combustível, as quais se transformam em outras substâncias que juntas são chamadas de produtos ou gases da combustão.

combustível + comburente  $\longrightarrow$  gases da combustão

A reação de combustão é na realidade uma reação de oxi-redução, uma classificação para as reações químicas onde os elementos que compõem as substâncias, ao se re-arranjarem após a reação, têm o número de oxidação alterado. Não nos deteremos sobre o conceito de número de oxidação (Nox), mas, em poucas palavras, ele indica a carga eletrônica aparente que possui o elemento químico em uma molécula. Veja:



Equação 1

Na equação química acima, o Nox do carbono passou de 0 para 4, ou seja, o Nox do elemento aumentou, indicando que o carbono perdeu elétrons, tornando-se mais “positivamente carregado”. Ao contrário, no oxigênio o Nox passou de 0 para -2 indicando que o oxigênio ganhou elétrons, tornando-se mais “negativamente carregado”.

Como observado acima, e assim é em qualquer reação de oxi-redução, sempre que uma substância ganha elétrons, outra deve doar (perder) estes elétrons. Assim nas reações de oxi-redução, diz-se que a substância que perde elétrons sofre a oxidação e a substância que ganha elétrons sofre a redução. Então, a substância que se oxidou é necessariamente a substância que provocou a redução na outra e assim é chamado de agente redutor ou substância redutora. Por outro lado, a substância que se reduziu é necessariamente a substância que provocou a oxidação na outra, sendo, portanto, o agente oxidante ou substância oxidante.

Voltando a equação 1, pode-se identificar que a substância oxidante é o oxigênio (O<sub>2</sub>) e a substância redutora é o carbono (C). Deste modo, em uma reação de combustão, o comburente é sempre a substância oxidante (que provoca a oxidação da outra substância, reduzindo-se) e o combustível é a substância redutora (que provoca a redução da outra substância, oxidando-se). Assim, definimos que o combustível é oxidado, ou, mais comumente, é queimado.

O comburente (agente oxidante) mais facilmente encontrado é o oxigênio, pois está presente no ar que nos cerca, sendo facilmente utilizado. Os comburentes também podem ser sólidos (como o perclorato de amônio, usado em alguns foguetes), líquidos (como o peróxido de hidrogênio).

Na TAB. 1, está representada a composição do ar para diversas temperaturas e umidades relativas. Para efeitos de cálculos aproximados, usa-se a composição de 21 % de O<sub>2</sub> e 79 % de N<sub>2</sub> em percentual volumétrico, e 23,2 % de O<sub>2</sub> e 76,8 % de N<sub>2</sub> em percentual mássico. Tanto em massa como em volume, nas reações em que se usa o ar atmosférico como comburente, considera-se na percentagem de N<sub>2</sub> as quantidades dos outros compostos presentes no ar diferentes do O<sub>2</sub>, pois eles, tal qual o N<sub>2</sub>, são inertes na reação, ou seja, não tem nenhuma influência na composição final dos produtos da combustão.

Tabela 1 – Composição do ar em diferentes temperaturas e umidades relativas

	Temperatura de Bulbo Seco (tbs) e Umidade Relativa (ur)				
	15,5°C tbs 0% ur	15,5°C tbs 80% ur	15,5°C tbs 100% ur	32,2°C tbs 0% ur	32,2°C tbs 0% ur
<b>Oxigênio (O<sub>2</sub>)</b>	20,99 <b>23,20</b>	20,696 <b>22,997</b>	20,623 <b>22,944</b>	20,99 <b>23,20</b>	19,991 <b>22,496</b>
<b>Nitrogênio (N<sub>2</sub>)</b>	78,03 <b>75,46</b>	76,938 <b>74,806</b>	76,665 <b>74,631</b>	78,03 <b>75,46</b>	74,317 <b>73,170</b>
<b>Argônio (Ar)</b>	0,94 <b>1,30</b>	0,927 <b>1,288</b>	0,924 <b>1,285</b>	0,94 <b>1,30</b>	0,895 <b>1,260</b>
<b>Outros (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, Ne, He)</b>	0,04 <b>0,04</b>	0,039 <b>0,045</b>	0,039 <b>0,45</b>	0,04 <b>0,04</b>	0,038 <b>0,044</b>

<b>Água</b>	0,00 <b>0,00</b>	1,399 <b>0,872</b>	1,749 <b>1,096</b>	0,00 <b>0,00</b>	4,758 <b>3,024</b>
-------------	---------------------	-----------------------	-----------------------	---------------------	-----------------------

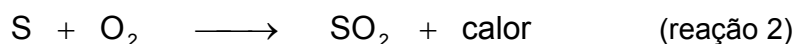
Fonte: Fryling, 1967.

Os elementos químicos mais utilizados como combustíveis são o carbono e o hidrogênio, nas formas atômica no caso do carbono (C), molecular no caso do hidrogênio (H<sub>2</sub>) e também combinados, formando os mais diversos combustíveis como apresentado anteriormente nos capítulos 1, 2 e 3. O enxofre também tem as características de um combustível, pois reage rapidamente com o oxigênio e libera grande quantidade de energia, porém, ao queimar, forma o SO<sub>2</sub>, substância prejudicial ao meio ambiente.

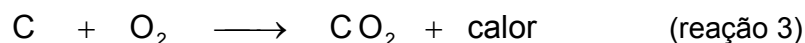
Assim, as reações de combustão mais simples, utilizando-se como comburente oxigênio puro são:



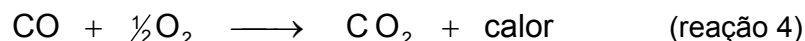
**1 mol de H<sub>2</sub> reagem com 1/2 mol de O<sub>2</sub> formando 1 mol de H<sub>2</sub>O**



**1 mol de S reagem com 1 mol de O<sub>2</sub> formando 1 mol de SO<sub>2</sub>**



**1 mol de C reagem com 1 mol de O<sub>2</sub> formando 1 mol de CO<sub>2</sub>**

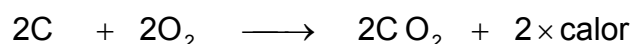


**1 mol de CO reagem com 1/2 mol de O<sub>2</sub> formando 1 mol de CO<sub>2</sub>**

As reações acima, apresentadas sob a forma de *equações químicas*, mostram que as substâncias combustíveis estão reagindo com uma quantidade fixa e determinada de oxigênio, resultando na formação de outras substâncias, também em quantidade fixa e determinada. Os números que aparecem na frente das substâncias químicas são chamados de *coeficientes estequiométricos* e determinam a quantidade de cada substância que participa da reação, em mol. Por exemplo, na reação 1, deve-se ler que 1 mol de hidrogênio (H<sub>2</sub>), reagiram com meio mol de oxigênio (O<sub>2</sub>), formando 1 mol de água (H<sub>2</sub>O) e liberando calor.

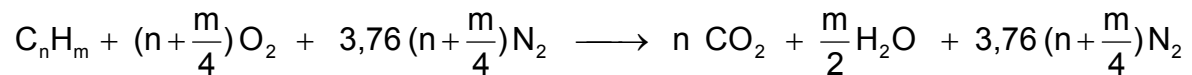
Quando a quantidade de combustível e de oxidante fornecida ao processo de combustão é a quantidade definida pelas proporções dos coeficientes estequiométricos das reações anteriores, dizemos que a reação está estequiometricamente balanceada. O balanceamento de uma reação química deve sempre ser feito para que a lei de Lavoisier ou lei da conservação de massa seja respeitada:

Por exemplo, se a quantidade de carbono, em quantidade de matéria, na reação 3 for de 2 mol, a quantidade de O<sub>2</sub> necessária para se manter o balanceamento estequiométrico da equação é 2 mol de O<sub>2</sub>, e a quantidade de CO<sub>2</sub> formada será de 2 mol:



Outro exemplo: na reação 1, se a quantidade de H<sub>2</sub> for de 4,8 mol, a quantidade de O<sub>2</sub> necessária para manter o balanceamento estequiométrico da reação é (1/2 x 4,8), ou seja, 2,4 mol de O<sub>2</sub>, e a quantidade de H<sub>2</sub>O formada será de 4,8 mol.

A combustão genérica de um hidrocarboneto, utilizando ar como comburente, é dada pela seguinte equação geral:



Esta equação, aplicada ao metano (CH<sub>4</sub>), temos que a quantidade de CO<sub>2</sub> produzida é de 1 mol e de H<sub>2</sub>O é de 2 mol. A quantidade de O<sub>2</sub> necessária para a combustão estequiométrica é de 2 mol de O<sub>2</sub>.

O ar estequiométrico representa a quantidade de ar que deveria ser fornecida ao sistema de combustão para que se queimasse completamente uma determinada quantidade de combustível. Porém, como a maioria dos sistemas físicos e químicos, esta é uma situação ideal, teórica, e não ocorre na prática. Para que o valor calculado de ar estequiométrico fosse capaz de produzir uma combustão completa, as seguintes condições deveriam ocorrer principalmente:

- Mistura perfeita entre combustível e comburente, ou seja, todas as moléculas do combustível entrariam em contato e reagiriam com a quantidade exatamente necessária de moléculas de oxigênio;
- Toda a mistura reacional deve alcançar a temperatura de ignição antes de sair fora da zona da reação de combustão.

Estes requisitos constituem o que se costuma chamar de “os três tês (3 T’s)”, que são temperatura, turbulência e tempo de permanência na zona de combustão. Na prática, estas condições são muitíssimo improváveis de ocorrer, ocasionando então o que chamamos de combustão incompleta:

### Combustão incompleta



A combustão incompleta ocorre quando algum dos requisitos citados acima não é atendido ou então quando não é fornecido ar suficiente para a combustão completa. Como principal produto desta combustão incompleta ocorre a formação do monóxido de carbono (CO). Esta substância é extremamente perigosa, pois possui afinidade química com a hemoglobina do sangue muito maior do que o oxigênio, causando envenenamento e podendo levar a morte quando inalada em quantidades elevadas.

A combustão incompleta é uma situação com a qual não se deve trabalhar, pois além da geração de um composto perigoso (CO), ela gera menos calor, pois não se aproveita o calor da combustão do CO. Em alguns casos, a combustão pode ser tão incompleta que ocorre a formação de fuligem (carbono na forma elementar, C) e pode ocorrer até a presença do combustível original não queimado.

Na realidade, podemos ter muitos outros componentes compondo os gases de exaustão, entre eles: hidrogênio, aldeídos, hidrocarbonetos insaturados, óxidos de enxofre (SO<sub>2</sub> e SO<sub>3</sub>) e óxidos de nitrogênio (NO e NO<sub>2</sub>). O surgimento destes compostos depende de fatores como temperatura, pressão e características construtivas dos queimadores e da câmara de combustão e relação ar/combustível.

Alguns compostos existentes nos produtos da combustão não dependem da combustão ser completa ou incompleta, mas sim da temperatura atingida pela chama, pela constituição do

combustível e outros fatores mais específicos.

A formação de  $\text{NO}_x$  ( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ) por exemplo, que são compostos altamente nocivos ao meio ambiente, é realizada de duas maneiras distintas:

- Fixação térmica: é a reação que ocorre entre o nitrogênio e o oxigênio do ar a altas temperaturas. Este fenômeno é altamente dependente da temperatura da chama e da quantidade de excesso de ar. Quanto mais ar e maior a temperatura, maior a probabilidade de formação de  $\text{NO}_x$ ;
- Presença de nitrogênio no combustível: pode ocorrer a oxidação do nitrogênio presente no combustível, da mesma maneira que ocorre a formação de óxidos de enxofre ( $\text{SO}_x$ ). Estes contaminantes são muito pouco encontrados nos gases combustíveis como o GN e o GLP, pois estes gases possuem uma quantidade limitada destes contaminantes. Em combustíveis líquidos ou sólidos, como óleo e carvão, estes tipos de contaminantes são bem mais acentuados.

A maneira de se evitar a formação destes compostos é a redução da temperatura de chama e procurar uma quantidade ótima de excesso de ar. Portanto, as emissões de compostos poluentes e de produtos incompletos da combustão como os já citados anteriormente, estão associadas a condições inadequadas de combustão, entre elas:

- baixa turbulência, ou seja, insuficiente superfície de contato entre o combustível e o comburente, como ocorre em uma má atomização de óleo combustível ou em queimadores que não proporcionem uma boa homogeneização da mistura ar/gás;
- baixo tempo de permanência da mistura combustível/comburente nas condições de ignição;
- rápida queda da temperatura da chama antes da combustão se completar, fenômeno este chamado de congelamento da chama;
- insuficiência de comburente, também chamada de mistura rica, pois existe mais gás do que deveria haver em condições estequiométricas;
- excesso demasiado de ar de combustão, resultando uma mistura pobre em demasia, promovendo a formação de compostos poluentes;
- temperatura muito alta de chama.

## 5.1 Análise dos gases da combustão

O modo mais exato de se determinar a composição dos gases da combustão que se desprendem pela chaminé e, portanto, analisar a eficiência da combustão, tanto qualitativamente quanto quantitativamente, é realizando uma análise dos gases liberados na combustão utilizando-se aparelhos analisadores.

Os gases da combustão podem ser analisados durante todo o período de funcionamento do sistema. Isto fornece uma noção exata ao operador das correções que devem ser feitas, a partir dos valores lidos, otimizando o processo.

A função dos analisadores é a de fornecer dados para que, através da intervenção do homem ou do controle automático, seja possível:

- Otimizar a eficiência de combustão;
- Manter a segurança das pessoas;
- Melhorar/manter a qualidade de produtos fabricados quando estes dependem dos gases da combustão;
- Reduzir gastos com combustível não consumido;
- Monitorar as condições ambientais.

Uma das informações mais importantes para o controle da operação de fornos e caldeiras é a percentagem real de excesso de ar fornecido ao equipamento. A forma mais exata de se determinar esse percentual é a análise dos gases de combustão que saem do sistema. Esta análise está intrinsecamente relacionada à determinação dos teores de O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> em base seca. Com estes teores, podemos determinar o excesso de ar e a eficiência do equipamento, parâmetros essenciais para sua boa operação. Um sistema de combustão no qual calor é produzido pela queima de um combustível pode ser considerado como um processo que tem combustível e ar como alimentação e gases de combustão como descarga (FIG. 2).

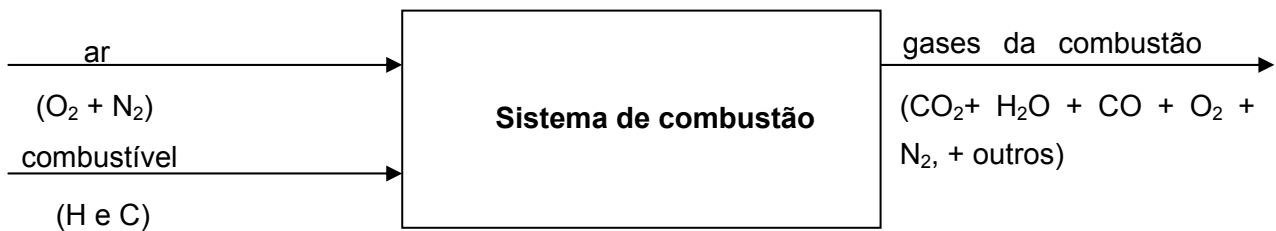
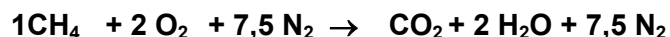


Figura 2 - Processo de combustão.  
Fonte: Fryling, 1967.

A maioria dos combustíveis utilizados são compostos que contêm os elementos hidrogênio e carbono, muito embora alguns combustíveis tenham em sua composição outros constituintes que não são usualmente importantes para o processo de queima. Como já visto anteriormente, o hidrogênio, na queima, forma vapor de água; o carbono dá origem a dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) ou a uma mistura de dióxido e monóxido de carbono (CO). O ar contém nitrogênio e oxigênio. O nitrogênio não toma parte do processo, exceto pela formação eventual de pequenas quantidades de óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>). A maior parte dos constituintes do exausto de um sistema de combustão são mesmo vapor d'água, CO<sub>2</sub>, CO, N<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> (este proveniente do excesso de ar não utilizado no processo). Nem todos estes constituintes estão presentes em todos os momentos.

Vamos tomar como exemplo a combustão do metano (CH<sub>4</sub>):



A tabela abaixo mostra os produtos da combustão de uma unidade de volume ou um mol de metano (CH<sub>4</sub>). Os valores na coluna *abs* significam valores absolutos, ou seja, para cada unidade de volume de metano queimada sob condições estequiométricas, é produzida uma unidade de volume de CO<sub>2</sub>, duas unidades de H<sub>2</sub>O e sobram 7,52 unidades de volume de N<sub>2</sub> que não reagem. Os valores na coluna % significam o percentual da substância na mistura.

Nesta tabela têm-se alguns dados importantes. O valor de % CO<sub>2</sub> para a combustão estequiométrica com análise em base seca é de 11,74 %. Este valor, o % CO<sub>2</sub> em combustão estequiométrica analisado em base seca, é o máximo percentual que pode ser obtido em qualquer processo de combustão para determinado combustível, e será chamado no decorrer do texto de % CO<sub>2max</sub>.

Na TAB. 2 têm-se também os valores para a combustão do metano com um excesso de ar de 20%. Podemos notar que a quantidade de O<sub>2</sub> aumentou em 20%, assim como também a quantidade de N<sub>2</sub>. Porém, o mais importante agora é observarmos que nos gases da combustão agora existe outro componente, que é o O<sub>2</sub> fornecido em excesso e que não reagiu, aparecendo como %O<sub>2</sub>. Formam-se nesta combustão do metano com 20% de excesso de ar os seguintes compostos:

Tabela 2 – Produtos de combustão

Tipo de reação	PRODUTOS DA COMBUSTÃO							
	CO <sub>2</sub>		H <sub>2</sub> O		N <sub>2</sub>		O <sub>2</sub>	
	abs	%	abs	%	abs	%	abs	%
Estequiométrica	1,0	9,51	2,0	19,01	7,52	71,48	0,0	0,0
Estequiométrica base seca	1,0	11,74	2,0	0,0	7,52	88,26	0,0	0,0
20% excesso de ar	1,0	8,05	2,0	16,10	9,02	72,63	0,4	3,22
20% excesso de ar base seca	1,0	9,59	2,0	0,0	9,02	86,57	0,4	3,84

Fonte: Glassman, 1977.

Conclui-se que para um valor de  $Ar_{\text{excesso}} = 20\%$ , formou-se nos produtos secos da combustão uma quantidade de  $O_2 = 3,84\%$ . Denominaremos de  $\% O_{2 \text{ medido}}$  este valor. Com a entrada de um novo componente nos produtos secos da combustão, é lógico pensarmos que o percentual dos outros componentes tenha diminuído. Desta maneira, vemos que o  $\% CO_2$  caiu para  $\% CO_2 = 9,6$ . Esta nova percentagem de  $CO_2$  é a quantidade que chamaremos de  $\% CO_{2 \text{ medido}}$ .

A partir das equações químicas de combustão e de relações matemáticas, chegou-se a simples, porém úteis, equações que nos permitem a determinação de quantidades percentuais de produtos da combustão, excesso de ar, eficiência da combustão entre outros dados. Estas equações possibilitam que a quantidade de certo composto presente nos gases de combustão seja determinada, entrando-se na equação como valor da quantidade de um outro composto, que pode ser medida com aparelhos analisadores de gases de combustão. Estes aparelhos analisadores são equipados com células de detecção de gases baseados em vários princípios físicos e químicos, e, através de variações de uma propriedade que seja sensível à concentração de um composto, determina-se a concentração das substâncias presentes na amostra.

Para o cálculo de  $\% O_2$ , tem-se a seguinte expressão:

$$\%O_2 = 21 \left( 1 - \frac{\%CO_{2(\text{medido})}}{\%CO_{2(\text{max})}} \right)$$

onde o  $\%CO_{2(\text{medido})}$  é a determinada pelo aparelho analisador e  $\%CO_{2(\text{max})}$  é a quantidade máxima de  $CO_2$  gerada na combustão estequiométrica do combustível em questão. Se o combustível for metano, a quantidade é aquela expressa no exemplo anterior. Caso seja propano, butano, GLP, GN, ou qualquer outro combustível será necessário saber qual a produção estequiométrica de  $CO_2$  para a determinação do cálculo. Costuma-se fazer aproximações caso a composição do combustível seja em sua maior parte um componente determinado, por exemplo, para gás natural, se os cálculos não exigem maior exatidão, supõem-se que seja metano puro. Portanto, medindo-se a quantidade  $\%CO_{2(\text{medido})}$ , pode-se chegar a quantidade de  $\%O_2$  presente nos gases da combustão.

Porém, a maioria dos analisadores de gases de combustão trabalha medindo a quantidade de oxigênio. Assim, basta isolar o termo  $\%CO_2$  e em função do oxigênio medido temos este valor. A equação fica:

$$\%CO_2 = \%CO_{2(\text{estequiométrico})} \left( 1 - \frac{\%O_{2(\text{medido})}}{21} \right)$$

Também foi deduzida uma expressão para o cálculo de excesso de ar tanto em função da quantidade de oxigênio como em função da quantidade de dióxido de carbono. Caso a quantidade de oxigênio tenha sido medida, calcula-se a quantidade de CO<sub>2</sub> do modo que foi descrito acima. Com este valor em mãos, calcula-se a quantidade de nitrogênio nos gases da combustão:

$$\%N_2 = 100 - [\%CO_2 + \%O_2]$$

Temos então, que o excesso de ar pode ser calculado da seguinte maneira:

$$\lambda = \frac{0,21 \times \%N_2}{0,21 \times \%N_2 - 0,79 \times \%O_2}$$

Existem analisadores bastante sofisticados, que além das concentrações de oxigênio, gás carbônico e excesso de ar da combustão, nos informam também a quantidade de monóxido de carbono (CO, maior indicativo de ineficiência da combustão), a presença e quantidade de dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) e os óxidos de nitrogênio (NO e NO<sub>2</sub>, representados geralmente por NO<sub>x</sub>). Existem equipamentos que também fornecem a eficiência da combustão baseados nos ábacos de combustão (este assunto é um pouco mais complexo e serve como aprofundamento do conteúdo).

A análise dos gases do exausto pode ser realizada com o uso de analisadores contínuos ou de amostragem periódica. A amostra deve ser tomada tão proximamente da saída da câmara de combustão quanto possível, para reduzir erros causados por infiltração de ar. Alguns analisadores medem o teor de O<sub>2</sub> e indicam ou registram os resultados. Outros medem o teor de CO<sub>2</sub> e ainda existem os que determinam a presença de combustíveis, dos quais o principal é CO, mas também podem estar incluídos alguns combustíveis não queimados em estado gasoso. Se um analisador contínuo não estiver disponível, uma amostra de gás pode ser retirada e analisada com o emprego de um analisador descontínuo. Algumas considerações sobre esses métodos de análise serão apresentadas a seguir.

## 5.2 Analisadores de gases de combustão

- Analisadores descontínuos

Os analisadores descontínuos são utilizados geralmente em sistemas de pequeno porte, ou então para ratificação de resultados em sistemas que possuem analisadores contínuos. Trataremos a seguir apenas o aparelho de Orsat, mencionando seu funcionamento e características. Outros tipos de analisadores descontínuos não serão abordados.

O princípio do aparelho de Orsat é baseado na absorção em pipetas ou combustão dos gases provenientes da chaminé, observando-se a diminuição de um volume determinado de gás de combustão antes e após a operação.

O aparelho de Orsat consiste em uma série de pipetas permanentemente ligadas a uma bureta de gás, em uma caixa portátil (Fig. 3). As comunicações entre as pipetas de absorção e a bureta são feitas por meio de tubos providos de torneiras de vidro.



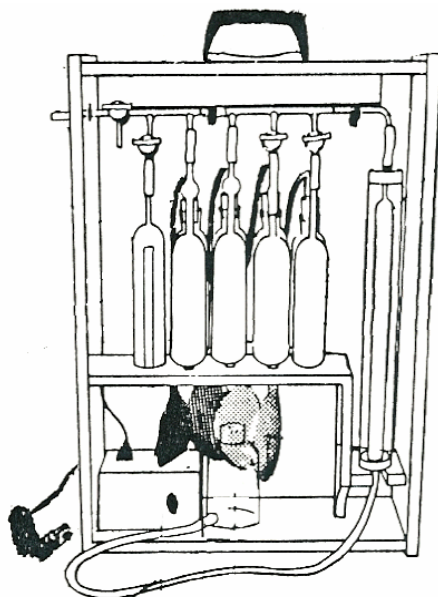


Figura 3 - Analisador de Orsat  
Fonte: Carvalho, 2004.

Os gases de uma solução que podem ser analisados pelo aparelho de Orsat são:

- Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ );
- Monóxido de carbono ( $\text{CO}$ );
- Oxigênio ( $\text{O}_2$ );
- Hidrogênio e Hidrocarbonetos ( $\text{C}_n\text{H}_{2m}$ );
- Nitrogênio ( $\text{N}_2$ ), por volume residual.

O aparelho apresenta uma bureta de gás, quatro pipetas de absorção para dióxido de carbono, hidrocarbonetos não saturados, oxigênio e monóxido de carbono, respectivamente, e uma pipeta de combustão. A bureta tem uma capacidade de 100 mL e, para economizar espaço, a sua parte superior tem a forma de bulbo; a parte inferior é graduada em divisões de 0,2 mL.

O analisador de Orsat determina a percentagem volumétrica de  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$  e  $\text{CO}$  nos gases da chaminé (também chamado exausto). A análise de Orsat é feita tomando-se 100mL de uma amostra do gás em um frasco de vidro graduado (bureta), sofrendo a seguir absorção do  $\text{CO}_2$ , insaturados,  $\text{O}_2$  e  $\text{CO}$ , anotando-se a redução do volume do gás na bureta em cada absorção. O gás residual é o  $\text{N}_2$ , que não é absorvido pelas soluções.

A análise de Orsat tem limitações quanto a sua incerteza, repetibilidade e reprodutibilidade. Os erros apresentados são causados pelos seguintes fatores:

- Sensibilidade do resultado da análise à maneira de executá-la;
  - Temperatura de amostragem do gás (variações na temperatura ambiente ( $\pm 1^\circ\text{C} \rightarrow 1\%$  de erro));
  - Saturação dos reagentes (principalmente o de  $\text{O}_2$ );
  - Tempo de absorção insuficiente;
  - Tempo de drenagem da amostra insuficiente;
  - Vazamentos nas válvulas dos reagentes.
- 
- Analisadores contínuos

O analisador contínuo é um equipamento relativamente sofisticado, de operação automática e independente, que tem a finalidade de medir uma ou mais características de uma amostra do processo, que por ele flui continuamente. Em um processo industrial onde ocorre uma etapa contínua de combustão, existe a necessidade de análise contínua dos gases liberados na queima, sendo desta forma necessária uma instrumentação adequada para as medidas das emissões na saída da chaminé. Como normalmente as células de análise são projetadas de forma a identificar a quantidade de apenas um componente, é necessária a preparação adequada da amostra a ser enviada para o analisador, em virtude de certos componentes poderem prejudicar o funcionamento das células de análise. A presença de particulados, compostos de enxofre e outros componentes na mistura gasosa analisada pode resultar em danificação do sistema de análise (devido a processos de mudança da resistência dos materiais e oxidação, entre outros). Com exceção do analisador de óxido de zircônio, a análise da composição de  $O_2$  precisa passar por processos de retirada de impurezas em virtude do erro causado pela presença de outros compostos na câmara de medição. Este processo de preparação da amostra é tão importante quanto a própria análise, sendo o equipamento responsável pelo tratamento da amostra tão custoso quanto os próprios analisadores (FIG. 4).

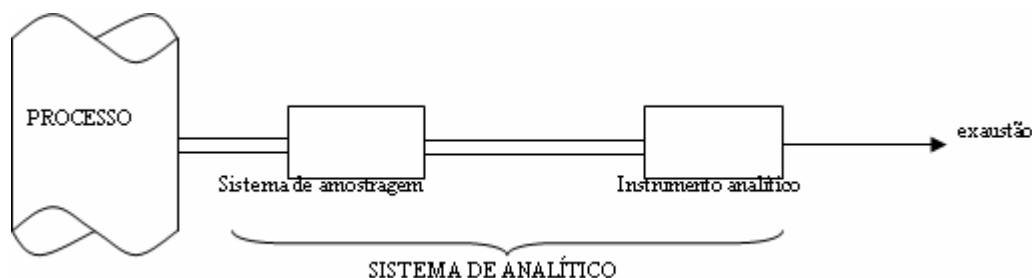


Figura 4 - Sistema de análise em um processo contínuo  
Fonte: Shreve; Brink, 1997.

- Analisador por absorção de radiação infravermelha (analisador de  $CO_2$ )

O analisador por absorção de radiação infravermelha (analisador infravermelho), do tipo industrial, é um instrumento que permite determinar, de forma contínua, a concentração de um ou mais componentes em uma mistura de gases.

O princípio de detecção é específico, pois está baseado na propriedade que possuem os gases de absorver, de forma seletiva, a energia de um feixe de radiação infravermelha, isto é, para um determinado tipo de gás puro, somente certas faixas do espectro (frequência) de radiação são absorvidas.

- Analisador por célula eletroquímica (analisador de  $CO$ ,  $NO_x$ ,  $SO_x$  e  $O_2$ )

A célula eletroquímica é basicamente constituída por um recipiente que contém dois condutores metálicos (eletrodos) imersos separadamente em uma solução eletrolítica (que conduz eletricidade). O princípio de célula eletroquímica baseia-se no estabelecimento de uma diferença de potencial em uma célula contendo o gás em análise, que por sua vez é responsável por uma reação química e liberação de elétrons (célula eletrolítica). Na presença de um gás oxidável, uma reação de oxidação-redução acontece com a célula, criando um sinal de saída do sensor na forma de uma corrente que flui entre o eletrodo de comparação e o eletrodo de medição. A resposta da célula é afetada pela temperatura e pela presença de  $H_2S$  na amostra. No caso da temperatura, efetua-se a compensação eletronicamente.

Este tipo de célula é descartável, pois variações na membrana, no eletrodo de platina, entre outros, diminuem a resposta da célula com o tempo

- Analisador de óxido de zircônio (analisador de  $O_2$ )

Os analisadores de oxigênio são instrumentos muito importantes utilizados no controle da combustão, face ao custo dos combustíveis e ao aumento obtido na eficiência do forno, quando os sinais dos analisadores são usados para controlar a relação ar/ combustível.

A célula de análise é constituída de um eletrólito sólido de óxido de zircônio estabilizado por meio de adições de pequenas quantidades de outros óxidos. A temperatura é controlada geralmente por controladores eletrônicos de ótima estabilidade, utilizando-se termopares ou termoresistências como sensores junto à célula. Se a célula assim constituída for mantida numa temperatura suficientemente elevada ( $\sim 800\text{ }^\circ\text{C}$ ), a cerâmica se torna um condutor eletrolítico devido à mobilidade dos íons de oxigênio constituintes do óxido.

As superfícies opostas do disco são revestidas de platina porosa, que constituem assim os dois eletrodos da célula. Se houver uma diferença na concentração de oxigênio dos dois lados do disco, é gerada uma voltagem entre os eletrodos (Fig. 5).

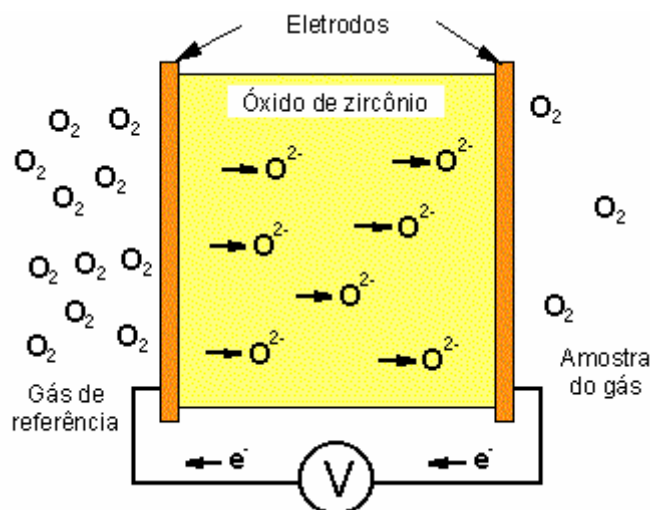


Figura 5 - Geração de voltagem entre os eletrodos.  
Fonte: Fryling, 1967

Para o uso, essa célula é instalada sobre um diafragma flexível em um corpo rígido, o que o torna resistente tanto a choques térmicos quanto mecânicos

A célula de zircônio pode ter também a forma de um tubo de ensaio, sendo que a atmosfera de referência fica geralmente na parte interna (FIG. 6). A amostra é captada por meio de uma sonda que, eventualmente, possui um filtro de partículas na extremidade localizada dentro da tubulação que transporta os gases de combustão. Sob ação de um ejetor operado a ar comprimido, a maior parte da amostra circula em um circuito de alta velocidade, retornando ao processo geralmente no mesmo local da captação. Uma parte pequena da amostra é desviada deste circuito e circula pela parte externa da célula de zircônio, onde ocorrerá a análise. Todo o bloco onde se situa a célula é mantido, por meio de um forno elétrico, a uma temperatura constante e controlada.

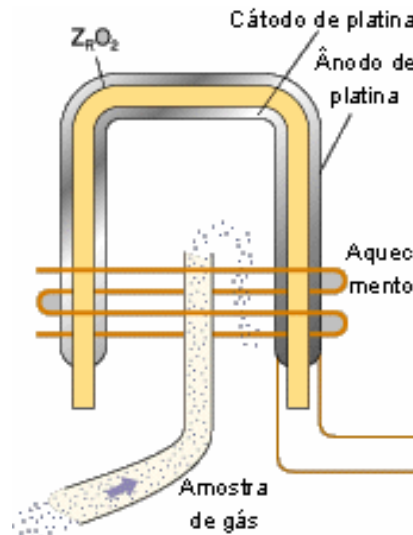


Figura 6 - Célula de óxido de zircônio em forma de tubo de ensaio.  
 Fonte: Incropera; DeWitt, 1998.

Quando os dois eletrodos estiverem em contato com gases na mesma pressão normal e com diferentes teores de oxigênio, sendo um conhecido (gás de referência), o teor de oxigênio do outro gás (amostra da chaminé) será indicado diretamente pela tensão de saída da célula sensora.

A voltagem desenvolvida pela célula é amplificada por circuito eletrônico de alta impedância de entrada, que a converte em um sinal padronizado (1 a 5 V). Este circuito geralmente incorpora uma seção linearizadora, que garante uma escala linear em termos de concentração de oxigênio na amostra (FIG. 7).

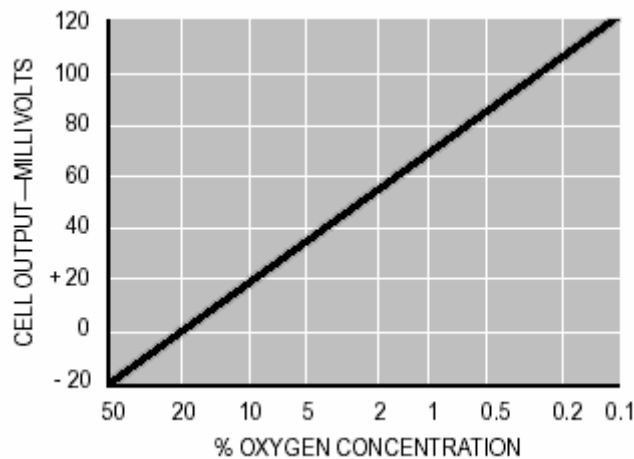


Figura 7 - Linearização da tensão de saída em função da [O<sub>2</sub>].  
 Fonte :Kern, 1980.

A equação de Nerst, que rege o funcionamento de toda célula eletroquímica, estabelece que a condução dos íons de oxigênio (o sinal de saída da célula sensora) é dada por:

$$\epsilon = \frac{RT}{4F} \times \ln \frac{pO_1}{pO_2}$$

Onde:

R – constante universal dos gases

T – temperatura absoluta do gás

F – constante de Farad

$pO_1$  – pressão parcial do oxigênio no eletrodo de referência

$pO_2$  – pressão parcial do oxigênio no eletrodo de medição

- Analisador com campo magnético (analisador de  $O_2$ )

As maiorias dos gases são fortemente diamagnéticos, isto é, não são praticamente afetados por um campo magnético. O oxigênio, entretanto, é um dos poucos gases paramagnéticos e pode ser atraído por um campo magnético. Esta força de atração magnética diminui com o aumento da temperatura.

Essa propriedade paramagnética do  $O_2$  é usada para obter medidas rápidas e precisas do teor de oxigênio em misturas gasosas. Aplicações típicas incluem o uso em plantas de processo de gases industriais químicos, petroquímicos e farmacêuticos.

Os analisadores termomagnéticos se fundamentam na utilização do efeito de convecção termomagnética dos gases paramagnéticos, que surge em presença de um campo magnético e de um corpo aquecido, que dá origem a um gradiente térmico.

Pode-se fazer uma analogia entre a convecção termomagnética e a convecção térmica natural. Esta última surge ao lado de uma superfície quente rodeada de um gás em um campo gravitacional. Quando um determinado volume gasoso entra em contato com a superfície quente, o gás se aquece, sua temperatura aumenta em comparação ao restante da massa gasosa e sua densidade diminui. Como consequência da diferença de densidade entre as partículas aquecidas e as partículas frias do gás, surge uma força sob cuja ação as partículas aquecidas se dirigem para cima, ou seja, em sentido contrário ao da força gravitacional. O lugar desse volume que se eleva é ocupado por outras partículas frias que também se aquecem e ascendem. O surgimento e a intensidade da convecção natural são determinados pelas condições térmicas do processo e dependem do tipo de fluido, da diferença de temperatura entre o fluido e a superfície quente e do espaço disponível para que esse processo se desenvolva. Numa mistura gasosa, a variação da resistência será tão mais intensa quanto maior a concentração de  $O_2$ . Pode-se construir uma curva de calibração a partir de amostras gasosas de concentração conhecida. É preciso ter em conta ainda que a força de atração que atua sobre a substância paramagnética diminui com o aumento da temperatura.

O assunto sobre analisadores é extenso e complexo. Literatura especializada é recomendada para quem necessitar de maior aprofundamento.

## 6. EFICIÊNCIA EM PROCESSOS DE COMBUSTÃO

A eficiência aplicada a processos de combustão causa certa confusão. A combustão, enquanto método de conversão de energia química em energia térmica tem como produto principal a geração de calor. Já a combustão vista como reação química, tem como produto principal os produtos da combustão.

Assim, podemos tratar de duas eficiências distintas. Uma é dada pelo grau de conversão dos reagentes da combustão em seus produtos. A outra diz respeito a quantidade de calor gerada e aproveitada no processo. A primeira considera apenas a reação de combustão e não considera as condições do equipamento ou do processo. A segunda, além das condições da reação de combustão, deve considerar o processo de transferência de calor que ocorre entre

os produtos da combustão e a carga a ser aquecida.

Assim, definiremos como eficiência da combustão o grau de conversão atingido pela reação química. Para a análise desta eficiência da combustão é necessário que se tenha em mãos a análise dos gases da combustão. Esta análise deve conter obrigatoriamente os valores das concentrações do %O<sub>2</sub>, %CO<sub>2</sub> e CO ppm. Uma análise quantitativa desta eficiência pode ser feita, mas não tem muita aplicabilidade. Porém, uma avaliação qualitativa da eficiência da queima, com referencia à análise dos gases da combustão pode ser feita e é de grande valia para se operar um processo de combustão de modo eficiente.

Para que uma reação química seja eficiente, deve-se obter a maior conversão possível dos reagentes nos produtos desejados. No processo de combustão, como visto, queremos que haja a maior oxidação possível das substâncias combustíveis. O carbono (C) existente nos combustíveis deve estar todo na forma de CO<sub>2</sub>, que é seu estado de oxidação máximo. Assim, se existe CO ou até mesmo fuligem, que é composta quase que totalmente de C, nos gases da combustão, isto significa que parte do C existente no combustível não está totalmente oxidado e isto é sinal de ineficiência da queima. Portanto, na combustão de gases, não deve haver a formação de fuligem e a quantidade de CO presente na análise em base seca da combustão, para um referencial de 0% de O<sub>2</sub> nos gases da combustão, deve ser de até 100ppm, também em função das questões ambientais.

Assim, mantendo-se o processo de combustão nestes valores de CO, a ineficiência na reação de combustão é desprezível. Podemos então analisar a eficiência da combustão quanto a sua função principal, que é gerar calor aproveitável.

Uma equação empírica, chamada de equação de *Siebert*, é utilizada para se determinar a eficiência da combustão através do método indireto, ou seja, a eficiência determinada a partir das perdas do processo de combustão. Esta equação desconsidera perdas por radiação, perdas por queima ineficiente e outras que possam existir no processo. Ela leva em consideração apenas as perdas relacionadas com a quantidade de calor que os gases da combustão carregam consigo quando deixam o processo através da chaminé, as perdas convectivas, que são realmente a maior parcela. Esta perda de calor é chamada de perdas pela chaminé, do inglês, *stack loss*.

$$S_L = (T_{\text{gas}} - T_{\text{amb}}) \times \left( \frac{A1}{CO_2} + B \right)$$

Onde:

S<sub>L</sub> – (stack loss). É o percentual do calor produzido na combustão que é perdido com os gases da combustão;

T<sub>gas</sub> – temperatura dos gases na chaminé;

T<sub>amb</sub> – temperatura do ar na entrada da combustão;

CO<sub>2</sub> – o valor do %CO<sub>2</sub> nos gases da combustão;

A1 e B – fatores característicos de para cada combustível.

Assim, baseado na perda na chaminé, pode-se estimar a eficiência do processo de combustão:

$$\eta = 100 - S_L$$

Onde η – eficiência da combustão.

Este cálculo é feito pela maioria dos analisadores portáteis de gases da combustão. É importante lembrar que a eficiência calculada assim possui diversas simplificações. Um tratamento mais aprofundado pode ser dado, porém exigindo maior conhecimento sobre o processo a ser analisado. A norma ASME PTC 4.1 normaliza os métodos de abordagem para a

determinação da eficiência. Outras fontes podem ser consultadas para o aprofundamento no assunto (2000 Ashrae Handbook, 2000).

Tabela 3 – Fatores para aplicação na fórmula de Siegert

Combustível	CO <sub>2max</sub>	O <sub>2</sub> ref	A1	B	Poder calorífico
Óleo leve	15,4%	3%	0,500	0,007	37,80 MJ/kg
Óleo pesado	15,9%	3%	0,610	0,000	39,90 MJ/kg
Metano	11,7%	3%	0,370	0,009	37,35MJ/m <sup>3</sup>
Propano	13,7%	3%	0,475	0,000	93,60 MJ/m <sup>3</sup>
Butano	14,1%	3%	0,475	0,000	128,00MJ/m <sup>3</sup>

Fonte - ¿???????????

## 7. A IMPORTÂNCIA DA QUALIFICAÇÃO DE PESSOAL

Tendo em vista os aspectos a cima citados, é notória a importância da necessidade de qualificação do pessoal envolvido nos processos de combustão.

O pessoal que lida diretamente com a operação do processo de combustão deve estar consciente de quais são os parâmetros importantes que devem estar sendo monitorados e controlados. Logicamente que nem toda planta industrial possui instrumentação suficiente para uma análise completa, e assim, nestes casos mais do que outros, o operador assume papel de primordial importância, pois deve atuar de forma mais crítica e com maior conhecimento.

As pessoas no nível de gestão energética, dentro de qualquer esfera da sociedade, devem estar atentas as questões relativas aos diversos energéticos disponíveis, aos impactos ao meio ambiente, à viabilidade técnico-econômica e principalmente às tecnologias disponíveis para o uso eficiente do energético como queimadores apropriados, trocadores de calor bem projetados, analisadores, etc.

### Conclusões e Recomendações

A implementação de um modelo baseado no desenvolvimento sustentável passa obrigatoriamente pelos assuntos relacionados ao setor energético. Todos os aspectos da energia como a disponibilidade dos recursos naturais, a geração, o transporte e distribuição e o uso final são de fundamental importância nesta ótica.

Os combustíveis fósseis, utilizados em sistemas de combustão para a geração de energia, têm grande impacto tanto na economia quanto no meio ambiente. Enquanto seu uso for necessário, deve ser feito de forma eficiente buscando minimizar os impactos.

O conceito de eficiência em combustão é de grande valia para se estimar a qualidade de processos de queima, buscando a manutenção ou o crescimento de produção com a menor quantidade de combustível consumida. A forma apresentada para se estimar a eficiência energética em processos de queima apresentada neste trabalho é útil para o dia-a-dia. Métodos mais sofisticados e exatos existem, mas exigem maior dedicação e conhecimentos específicos sobre o processo. As fontes utilizadas para a elaboração deste trabalho trazem maiores informações.

A questão acerca da qualificação de pessoal envolvido em processos de combustão é essencial em frente aos desafios que um processo afinado necessita. Operação e gestão qualificada são essenciais.

## Referências

- 2000 ASHRAE HANDBOOK. **Heating, Ventilating and Air-Conditioning Systems e Equipment**. 2000.
- 2001 ASHRAE HANDBOOK. **Fundamentals**. 2001
- ABREU, Percy Louzada de. **Gás Natural: o combustível do novo milênio**. Porto Alegre: Plural Comunicação. 1999
- ATTARI, Amir; KLASS, Donald L. **Natural Gas Energy Measurement**. Elsevier Applied Amsterdam: Science Publishers; Institute of Gas Technology, 2001.
- BEGA, Egídio Alberto. **Instrumentação aplicada ao controle de caldeiras**. 3.ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.
- BRASIL, Nilo Indio do. **Introdução à Engenharia Química**. Rio de Janeiro: Interciência/PETROBRAS. 1999
- CAMACHO, Fernando Tavares. **Regulação da Indústria de Gás Natural no Brasil**. Rio de Janeiro: Interciência. 2005
- CARVALHO Jr, João Andrade de. **Princípios de Combustão: Aplicações em Engenharia**. Rio de Janeiro: Interciência, 2004.
- EL-MAHALLAWY, Fawzy; HABIK, Saad El-Din. **Fundamentals and Technology of Combustion**. Amsterdam: Elsevier. 2002
- FRYLING, Glenn R. **Combustion engineering**. New York: Combustion Engineering Inc, 1967
- GARCIA, Roberto. **Combustíveis e combustão industrial**. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, PETROBRAS. 2002
- GAYDON, A.G.; WOLFHARD, H.G. **FLAMES - Their structure, radiation and temperatura**. London: Chapman & Hall, 1953
- GILCHRIST, J.D. **Fuels, Furnaces and Refractories**. Oxford: Pergamom Press, 2001.
- GLASSMAN, Irvin. **Combustion**. New York: Academic Press, 1977
- INCROPERA, Frank P.; DeWITT, David P.; **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 4.ed. Rio de Janeiro:LTC. 1998
- KERN, Donald Q.; **Processos de Transmissão de Calor**. Rio de Janeiro: Interciência, 1980
- LORA, Electo Eduardo Silva. **Prevenção e Controle da Poluição nos Setores Energético, Industrial e de Transporte**. 2.ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2002
- PERRY, Robert H.; GREEN, Don W. **Perry's Chemical Engineer's Handbook**. 7.ed. New York: McGraw-Hill. 1999
- REIS, Lineu Bélico dos; FADIGAS, Eliane A. Amaral; CARVALHO, Cláudio Elias;. **Energia, Recursos Naturais e a Prática do Desenvolvimento Sustentável**. Barueri, São Paulo: Manole, 2005



RUSSEL, John Blair. **Química Geral**. 2.ed. São Paulo: Makron Books. 1994

SANTOS, Edmilson Moutinho dos. **Gás Natural - estratégias para uma energia nova no Brasil**. São Paulo: Annablume, FAPESP, PETROBRAS. 2002.

SCHMIDT, Frank W, HENERSON, Robert E.; WOLGEMUTH, Carl H. **Introdução às Ciências Térmicas - Termodinâmica, Mecânica dos Fluidos e Transferência de Calor**. 2.ed. São Paulo: Edgard Blucher. 2004.

SENAI-SP. **Analisadores para Processos Industriais**. Por Benedito Lourenço Costa Neto e Carlos Helvécio Brossi. Santos, 1985.

SENAI-SP. **Analisadores para Processos de Fabricação de Gases do Ar**. Por Benedito Lourenço Costa Neto. Santos, 1990.

SHREVE, R. Noris; BRINK Jr, Joseph A. **Indústrias de Processos Químicos**. 4.ed. Rio de Janeiro: Guanabara. 1997.

SMITH, J. M.; VAN NESS, H. C.; ABBOTT, M. M.; **Introdução a Termodinâmica da Engenharia Química**. 5.ed. Rio de Janeiro: LTC. 2002.

SONNTAG, Richard E.; VAN WYLEN, Gordon J.; BORGNAKKE, Claus. **Fundamentos da Termodinâmica**. 6.ed. São Paulo: Edgard Blüher. 2003.

TORREIRA, Raul Peragallo. **Fluidos Térmicos**. Curitiba: Hemus. 2002.

## Anexos

### Teoria alerta para crise global de petróleo

*Ponto máximo de produção mundial pode desencadear alta permanente de preços*

Uma das teorias sendo discutida com o crescente aumento do preço do petróleo é a do Pico de Hubbert, também conhecida como Peak Oil, o “Pico do Óleo”. Ao contrário das teses pessimistas da década de 70, dizendo que as reservas mundiais estavam perto de acabar, a teoria do Peak Oil é mais realista, porém igualmente grave. O pico de Hubbert não representa o fim do óleo, mas sim o momento em que a produção mundial de petróleo chegará ao máximo: a exploração de 50,1 % das reservas existentes. A partir deste ponto, a produção só poderá decair e o preço, aumentar.

Como resultado, as reservas restantes irão aumentar de preço rapidamente e serão de qualidade pior, situadas em locais de difícil exploração ou politicamente instáveis. A teoria foi formulada pelo geofísico americano Marion King Hubbert, pesquisador da Shell e uma das maiores autoridades do setor petrolífero, no ano de 1956. Na época, Hubbert predisse que a produção americana de petróleo iria chegar ao máximo no começo dos anos 70. Ridicularizado a princípio, o cientista teve suas teses reavaliadas quando a estimativa se confirmou, durante a primeira Crise do Petróleo.

O Peak Oil não é o fim do petróleo, mas o fim do petróleo barato. O jornalista e escritor James Kunstler é um pesquisador deste fenômeno. Autor do livro *The Long Emergency* (“A Longa Emergência”, ainda sem tradução no Brasil), ele analisa e estuda os efeitos de uma falta sustentada de energia barata, principalmente de petróleo, sobre a sociedade mundial, e falou ao JB sobre o período de ajuste que aguarda o mundo caso a previsão esteja correta.

### Teoria controversa

Críticos da teoria apontam que a produção mundial passa por altos e baixos, enquanto a tecnologia se ajusta para explorar jazidas mais profundas, e que mesmo no caso de uma escassez total de petróleo, ainda existem as reservas de xisto petrolífero, que podem estender a produção por muitas décadas mais. Mas o xisto petrolífero é muito mais difícil de extrair e transportar do que o petróleo, e imensamente mais poluente. Além disso, seu processamento é tão trabalhoso (é preciso processar cerca de 2 toneladas de xisto para obter 1 barril de petróleo) que consome 40% da energia que gera. Outra fonte em potencial de reservas de petróleo, as areias betuminosas, são ainda mais difíceis de operar em larga escala, e 80% das reservas mundiais se encontram em apenas dois países, Canadá e Venezuela.

Mesmo que estas alternativas se provem viáveis a curto prazo, a tese sustentada por Kunstler e outros defensores do Peak Oil é a de que uma sociedade extremamente dependente em automóveis como meio de transporte irá necessariamente exaurir suas alternativas. Como o petróleo é um recurso não-renovável, o Pico vai acontecer. A questão é saber quando. Nos Estados Unidos, a situação é ainda mais séria, devido ao modelo urbano dos subúrbios; enormes conjuntos residenciais de alto padrão e baixo preço, situados a dezenas de quilômetros dos centros urbanos onde se concentram os empregos e serviços. Desta forma, o cotidiano do americano médio envolve longas viagens diárias em veículos com baixíssimo rendimento de combustível. O aquecimento de casas e prédios no inverno também depende de fontes fósseis de energia, piorando o problema.

Além disso, o petróleo não é apenas um combustível. Muitos dos fertilizantes usados na agricultura são baseados em óleo, assim como a fabricação de plásticos e outros materiais. As outras fontes de energia que podem ser exploradas (álcool, usinas hidrelétricas, etc.) também dependem de maquinário e materiais que dependem de petróleo. Foi isso que o Brasil descobriu durante o Próalcool, ao constatar que os tratores que aravam o solo das plantações e os caminhões que distribuíam o álcool produzido dependiam de óleo diesel cada vez mais caro. A falta irá encarecer tanto operações industriais como o cultivo de alimentos em larga escala. “O petróleo nos deixou mal-acostumados”, expõe Kunstler; “é relativamente fácil de exportar, pode ser transportado em larga escala através de oleodutos, e possui um número impressionante de utilidades. A mudança para outras alternativas será um período de crise para a comunidade global”.

## **Era de conflitos**

A nacionalização do gás boliviano feita por Evo Morales é um sintoma dos novos tempos, um desmantelamento das antigas relações de comércio em busca de novos arranjos, baseados em um reconhecimento do valor crescente da energia. Outros sinais preocupantes foram registrados recentemente. Quando o furacão Katrina devastou as instalações portuárias e de refino do sudeste americano em setembro de 2005, a Arábia Saudita afirmou que simplesmente não tinha como aumentar a produção de seus campos para compensar a escassez gerada pela crise; seus poços já estavam operando em capacidade máxima. Mais recentemente, em abril deste ano, um porta-voz da Aramco, companhia petrolífera saudita, revelou que seus campos mais antigos estavam declinando em produção a uma taxa de 8% ao ano, e a extração em geral a um ritmo de 2%. Outros países como o Canadá, a Argentina e a França já admitem abertamente terem passado de seus picos de capacidade produtiva. Para Kunstler, a Longa Emergência será uma era de atritos e ajustes por vezes dolorosos. A China está buscando expandir suas fontes de energia de forma agressiva, inclusive através de acordos com países que já foram os principais fornecedores dos EUA; o Canadá e a Venezuela. Isso pode levar a conflitos em um futuro próximo. O escritor acredita que estamos vivendo o pico de produção atualmente, e que ainda existe uma certa abundância que, junto com a alta dos preços, tem garantido lucros fantásticos para as empresas do setor.

A produção, tanto de mercadorias como de alimentos, deve adotar um molde mais local; uma era de combustíveis caros não permitirá que produtos chineses viajem quinze mil quilômetros

para seus mercados consumidores.

Kunstler costuma ser criticado pelo tom catastrofista de seus escritos, mas acredita que a seriedade do tema não admite meias palavras. Além disso, ele vê a reorganização do sistema global como algo natural e que acontece com mais frequência do que percebemos. A vida humana já foi alterada com a invenção do rádio, a descoberta da penicilina, a possibilidade de aniquilação total durante a Guerra Fria; é inocência achar que novas mudanças não ocorrerão. “E mesmo após as crises mais graves, existe a possibilidade de desenvolvimento e do surgimento de novas alternativas. A Peste Negra devastou a Europa de uma forma terrível; mas oitenta anos depois, o continente recuperou-se sob uma forma diferente, baseada em um molde mercantilista em vez da estrutura feudal, durante o Renascimento”. Temos a vantagem de contar com um aviso prévio em relação a uma crise energética, se soubermos identificá-lo”, finaliza o escritor.

Jornal do Brasil, 21/05/06. Disponível em: <[www.gasnet.com.br](http://www.gasnet.com.br)>. Acesso em: 02 out. 2006.

#### **Nome do técnico responsável**

Stefan Nicolas Richetti Paunescu

#### **Nome da Instituição do SBRT responsável**

SENAI-RS / EEP SENAI Nilo Bettanin

#### **Data de finalização**

23 ago. 2007