

ENG.º JOSÉ M. DE AZEVEDO NETTO

# APROVEITAMENTO DO GÁS DE ESGOTOS



SÃO PAULO

— 1960 —

ERRATA

Página	Linha	Onde está:	Deve ser:
8	5	região, on-	região on-
11	15	m <sup>3</sup> /dia,	m <sup>3</sup> /dia
17	18	prática, o	prática o
19	7	Esgotos,	Esgotos
19	13	motor até	motor, até
23	3	metana	metano
23	9	o pH	o pH,
23	9	columnes	volumes
27	5	estudo	estudo,
27	15	e essas	a essas
28	20	Teoria	Teorias
30	5	que, a	que a
39	2	doa	dos
40	1	apenas, o	apenas o
52	10	but na	butana
53	14	tratamento,	tratamento
54	2	Fe <sub>2</sub> S	Fe <sub>2</sub> S <sub>3</sub>
54	última	do marron	do negro
55	1	negro	marron
56	7	meses	meses,
62	12	servar,	servar
66	4	de gás	do gás
71	7	rém	porém
75	15	Colney	Colne
76	4	difestores	digestores
84	17	problema	problema,
85	12	ao dôbro	o dôbro
91	14	vantagens,	vantagens
91	18	e	e,
98	1	motores, ge-	motores ge-
98	5	motor	motor,
104	9	ou, 2	ou 2
104	12	vados,	vados
104	20	motores	motores,
108	4	CO <sub>2</sub> a	CO <sub>2</sub> e
108	13	p tos	postos
110	11	distribuição	distribuição,
120	12	aquecimento,	aquecimento
124	7	Mundial os	Mundial, os
134	5	150 000	250 000
134	9	contrato	contrato,
139	1	que se	que, se
142	13	ca pode-se	ca, pode-se
144	11	A rigor o	A rigor, o
147	10	2 atm a	2 atm, a

Tese apresentada à Comissão Julgadora do concurso para provimento do cargo de Professor Catedrático de Tratamento de Águas de Abastecimento e Residuárias, da Faculdade de Higiene e Saúde Pública da Universidade de São Paulo.

"By the marvellous adaptation of natural forces to the services of man, the crude and offensive materials discharged from a great industrial area are quickly transformed into innocuous solids and an effluent the purity of which leaves nothing to be desired, while even the gas driven off by the fermentation serves to drive the engine which provides the works with light and power.

I know of no more remarkable or admirable adaptation of Science to the practical problems of civilization".

Ministro Neville Chamberlain, em uma visita às instalações de Birmingham, 1927 .

## INDICE

	Páginas
1- Introdução. Importância do assunto....	5
2- O gás de esgotos.Antecedentes históricos .....	13
3- Digestão. Teorias da formação do gás .	20
4- Produção, composição e poder calorífico .....	33
5- Características do gás.O gás como combustível .....	43
6- Purificação do gás .....	53
7- Variações de produção. Reservação ....	59
8- Perigos nas instalações de gás. Disposi- tivos de segurança .....	66
9- Instalações de gás. Sistemas de coleta. Canalizações .....	79
10- Usos do gás de esgotos.Usos primários.	87
11- Usos secundários.Usos especiais e des- carte .....	117
12- Estudo econômico para São Paulo.....	125
Apêndice .....	138
Referências .....	148

1- INTRODUÇÃO. IMPORTÂNCIA DO ASSUNTO

Atribui-se a Alexandre, o Grande, a prudente predição de que sempre seria necessário limitar-se o tamanho das cidades a 100.000 habitantes, pois seria impraticável a manutenção das condições de saneamento em aglomerações mais populosas.

Não obstante a prudência dessa observação e o ideal de inúmeros estudiosos de questões urbanas, não foi esse o desejo da astuta Clio.

A princípio o imperialismo, depois o colonialismo e em seguida o comércio e a indústria foram os grandes fatores da hipertrofia urbana.

Coube à eletricidade importante parcela de responsabilidade nesse fenômeno de expansão: A instalação de grandes centros de produção e as limitações da técnica de transmissão que caracter

rizaram o início da era da eletricidade, foram incentivos para a aglomeração industrial e, conseqüentemente, muito contribuíram para o rápido crescimento urbano dos núcleos manufatureiros.

Exemplo típico, nós encontramos em nossa própria terra.

Roma, ao tempo de Augusto, já havia ultrapassado 1.000.000 de habitantes. Paris no fim do século XII já contava com 100.000 cidadãos e a grande epidemia de peste levantina de 1.665, cau sou quase cem milhares de vítimas em Londres.

Atualmente, cêrca de 45% da população australiana reside em cidades com mais de 100.000 habitantes. Na Inglaterra e nos Estados Unidos, êsse índice aproxima-se de 39% e 27%, respectivamente. E, em nosso país, uma sexta parte da população reside em cidades dêsse porte ou maiores.

Todavia, não foi descabido o vaticínio de Alexandre: Os problemas citadinos surgiram e se avultaram obrigando-nos a uma luta contínua e sem vitória.

A notável Comissão Real britânica, designada para investigar as condições de vida nas grandes cidades da Inglaterra e do país de Gales, relatava, em 1.845: "So long as the inhabitants of the most neglected and filthy abodes in crowded cities are unable to provide for themselves better and healthier dwellings, sufficient light and air, more open situation, effective cleansing and drainage, and adequate supplies of water, their vigour and health are undermined, and their lives shortened by the deleterious external influences consequent upon the want of efficient arrangements for securing the above objects" (54).

Situação não muito diversa, ainda, é encontrada em bairros pobres e sobretudo na zona periférica das grandes cidades modernas.

O extraordinário progresso alcançado pelo urbanismo e pela engenharia sanitária, daquela época para cá, constitui a segurança de dias melhores.

Esta cidade de Piratininga com todos os seus sucessos e dificuldades, apresenta-se hoje, como um extraordinário campo de observações.

São Paulo é a metrópole industrial ímpar que se expandiu extraordinariamente em um planalto a 750 metros acima do nível do mar.

Assim localizada, a cidade situa-se, praticamente nas cabeceiras do Tietê, em região, onde são exíguos os recursos hídricos.

Dois problemas decorrem diretamente dessa situação particular: As limitações dos mananciais para suprir as demandas sempre crescentes de água, e a insuficiência de descarga nos cursos d'água para a diluição e afastamento dos resíduos da atividade urbana.

Para assegurar o abastecimento futuro de água, estão sendo planejadas importantes obras de aproveitamento de águas das vertentes marítimas mais próximas, mediante a sua reversão para o planalto (15).

Como solução para o segundo problema foi delineado um plano de larga envergadura, compreendendo a construção de 6 grandes estações de tratamento de esgotos:

Quadro 1.1- Estações de Tratamento de Esgotos  
previstas para São Paulo (21)

Estações	1.975		2.000	
	População	Vazão méd.	População	Vazão méd.
V.Leopoldina	907.700	3,64m <sup>3</sup> /s	1.113.000	4,57
Pinheiros	401.800	1,57	495.000	2,02
São Caetano*	689.000	3,09	1.064.000	4,65
Penha	815.150	2,58	1.121.500	3,36
Casa Verde	617.600	2,71	761.500	3,45
Santo Amaro	159.500	0,61	281.000	1.05
Totais	3.590.750	14,20	4.836.000	19,10

\*- Estes valores serão alterados.

A primeira dessas instalações já se encontra em pleno funcionamento, com tratamento - primário, contribuindo para aliviar o Tietê da sua intolerável sobrecarga.

O tratamento de esgotos é uma operação dispendiosa, sobretudo pelo seu elevado custo inicial.

Dois sub-produtos do processo de estabilização da matéria orgânica podem contribuir para a economia do serviço: O lodo digerido e o gás da digestão.

O aproveitamento do lodo digerido tem sido objeto de inúmeras investigações e experiências, existindo a respeito profícua literatura técnica, além de um excelente manual preparado pela "Federation of Sewage Works Associations"\*.

Situação diversa é a que diz respeito à utilização do gás de esgotos. Embora volumosa e diversificada a bibliografia, encontra-se esparsa e na maioria das vezes retrata situações de extrema particularidade.

O assunto geralmente desperta interesse e entusiasmo e em nosso meio já tem sido objeto de diversos trabalhos divulgados (8), (29), (30), (42), (45) e (48).

A importância do assunto pode ser ressaltada pelos dois fatos seguintes:

---

\*- Manual of Practice Nº 2, 1.946.

- 1- No projeto, na construção e na operação das instalações de tratamento de esgotos, os problemas relativos ao gás, merecem especiais cuidados para que sejam mantidas as condições mínimas de segurança;
- 2- A prática tem demonstrado que a utilização adequada dos gases obtidos na digestão pode contribuir, substancialmente, para a economia do serviço.

Este aspecto econômico evidencia-se no caso de São Paulo:

A produção atual de gás na Estação de Tratamento de Esgotos de Vila Leopoldina, pode ser estimada em 14.700 m<sup>3</sup>/dia. Admitindo-se que 4.100 m<sup>3</sup>/dia, sejam utilizados na própria Estação de Tratamento, restariam 10.600 m<sup>3</sup> diários, de gás disponível.

Ao preço vigente para venda em quantidade, de Cr\$ 6,00/m<sup>3</sup>, o valor mensal da produção excedente seria de Cr\$ 1.908.000,00, importância superior a três vezes o estipêndio mensal de todo o pessoal da estação.

A produção de gás estimada para tôdas as estações de tratamento de esgotos previstas, no ano de 1.975, se aproximaria de 70.000 m<sup>3</sup>/dia , correspondente a mais de Cr\$ 400.000,00 diários.

Essa quantidade futura, de gás, seria suficiente para acionar continuamente motores a gás, totalizando mais de 7.000 CV.

As considerações que acabam de ser feitas levaram o autor a investigar mais detidamente o assunto, baseando-se na sua atividade nesse setor técnico, como engenheiro do Departamento de Águas e Esgotos da Capital.

A Tese ora apresentada, consubstancia os resultados do seu trabalho e representa um esfôrço, no sentido de colaborar para a solução mais vantajosa para um dos importantes problemas de São Paulo.

Procurou o autor imprimir a esta Tese, o espírito didático, objetivando com isso, torná-la mais útil, não só para os engenheiros que se dirigem à Faculdade de Higiene e Saúde Pública, à procura de especialização acadêmica, mas também, para inúmeros outros que labutam por todos os recantos pátrios, no afã de bem servir a coletividade.

## 2- O GÁS DE ESGOTOS. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

### 2.1- O gás de esgotos

Da decomposição de substâncias orgânicas, no meio hídrico, resultam produtos gasosos com a predominância do metano e do bióxido de carbono.

Esses compostos quando produzidos pela decomposição da matéria orgânica dos líquidos de esgotos constituem o gás de esgotos\*.

O metano que é o principal constituinte em volume e em calorias é também denominado o "gás dos pântanos" (Volta: 1.778), pela razão de se desprender nos pântanos, em consequência da putrefação de detritos vegetais sob a água. Em circunstâncias semelhantes êle também pode se formar em cemitérios e depósitos de lixo. Esse gás pode, ainda, ser encontrado nas minas de Hulha, onde, em mistura com o ar atmosférico tem sido a causa de perigosas explosões.

Inflamando-se naturalmente, o metano produz o fogo fátuo.

\*- Também denominado gás cloacal e gás de digestão. Em inglês "sludge gas", "sewage gas".

## 2.2- Antecedentes históricos

Produzindo-se naturalmente, à medida que avança o estado séptico em líquidos cloacais ou que progride a digestão de lodos, o gás de esgotos é conhecido e vem sendo estudado desde os primórdios da técnica de esgotamento.

Conta-se que em 1.843, na cidade inglesa de Bradford, os meninos divertiam-se ateando fogo aos gases que se desprendiam de um canal fortemente poluído por esgotos, sob as vistas de terror dos barqueiros, cujas embarcações encontravam-se nas imediações (1).

Com o advento do tratamento de esgotos as questões relativas ao gás produzido, incluindo medidas de proteção e formas de aproveitamento, passaram a constituir maior preocupação para os engenheiros e técnicos empenhados nesse setor técnico.

Donald Cameron, o escocês que, em 1.896, introduziu e aperfeiçoou o tanque séptico na Inglaterra, foi o pioneiro na utilização do gás de esgotos, tendo obtido algumas patentes para essa finalidade.

Na instalação construída em 1.896, no distrito de São Leonardo, Exeter, para servir 1.500 habitantes, os gases foram aproveitados para iluminar o local.

Naquela época a quantidade produzida foi estimada em cerca de 1 pé cúbico diário, por pessoa (28,3 litros).

Nos Estados Unidos as investigações foram iniciadas cinco anos mais tarde, em Worcester, Massachusetts, pelo Dr. L.P. Kinnincutt e pelo engenheiro H.P. Eddy. Com essa finalidade construíram um tanque séptico inteiramente fechado, aproveitando o cilindro de uma caldeira, de 1,53 de diâmetro e 4,27 m de comprimento, com dispositivos necessários de entrada, saída, inspeção, coleta e medição de gás.

As observações mostraram a variação da produção de gás em função da temperatura no decorrer do ano.

Estudos igualmente valiosos foram conduzidos por Clark na famosa Estação Experimental de

Lawrence, cujos resultados foram publicados pelos relatórios do "Massachusetts State Board of Health" dos anos de 1.899 até 1.903.

A primeira instalação para utilização do gás na produção de fôrça, parece ter sido feita em 1.902, por C.C. James, na pequena estação de tratamento de esgotos do Leprozário de Matunga, em Bombaim, onde um pequeno motor de 0,5 CV. foi posto a funcionar com o gás (31).

Já em 1.911, na localidade de Parramatta, New South Wales, foi iniciada a distribuição do gás em parte da cidade.

Nos Estados Unidos a Estação de Tratamento de Esgotos de Peachtree, em Atlanta, foi a pioneira na utilização do gás. Em 1.915, C. Hommon fez a cobertura das áreas destinadas à espuma dos tanques Imhoff e captou o gás para aproveitá-lo para calefação e como combustível, em cozinhas.

O Emschergenossenschaft, Alemanha, em 1.914, introduziu a técnica de aquecimento dos digestores, com a utilização dos gases coletados (20).

Na América essa técnica foi aplicada pela primeira vez, em 1.926, nas instalações de Plainfield, Nova Jersey e Antigo, Wisconsin.

Em 1.921, o Eng<sup>o</sup> Watson, fez a instalação do primeiro motor a gás na tradicional estação de tratamento de Birmingham. Na Alemanha, o aproveitamento do gás para distribuição na rede pública das cidades foi promovida pela primeira vez, em 1.923, nas instalações de Essen - Rellinghansen.

Alguns anos mais tarde, em 1.927, inaugurou-se a importante estação de tratamento de Gross Zieten, onde o gás produzido, além de fornecer toda a energia para as bombas, era suficiente para suprir as necessidades domésticas de um bairro de 8.000 habitantes.

Nesse mesmo ano o Ruhrverband pôs em prática, o reaproveitamento da água de resfriamento dos motores para aquecimento dos digestores.

Foi ainda em 1.927, que o Eng<sup>o</sup> inglês H. C. Whitehead introduziu na instalação

de Birmingham o original sistema de coleta de gás até hoje em funcionamento, e que consiste em estruturas flutuantes de concreto armado. A quantidade de gás inicialmente captada ascendia a 1.250 m<sup>3</sup>/dia.

Sobre essa notável iniciativa escreveu o estadista Chamberlain as palavras que antecipam o presente trabalho.

A grande instalação para o aproveitamento de gás na Estação de Mogden (Inglaterra), foi concluída em 1.935.

Poucos anos mais tarde, os motores a gás dessa instalação foram convertidos em máquinas "dual fuel", aproveitando pela primeira vez a notável invenção inglesa.

Em 1.940, somente nos Estados Unidos os motores a gás instalados excediam a potência de 35.000 CV. Dez anos mais tarde essa potência veio a ser considerada, apenas, nas estações de tratamento de esgotos da cidade de Nova Iorque.

No Brasil, o eng<sup>o</sup> J. P. de Jesus Netto, foi o pioneiro a introduzir, em 1.934, na Instalação Experimental de Tratamento de Esgotos da Ponte Pequena, em São Paulo, um pequeno motor conjugado a um alternador de 6,5 KVA.

Poucos anos depois (1.938), a antiga Repartição de Águas e Esgotos, inaugurava a sua modelar Estação Experimental de Tratamento de Esgotos do Ipiranga, com digestão separada de lodos, gasômetros e um motor adaptado, de 15 CV, acoplado a um alternador de 10 KVA, que fornecia a energia necessária à iluminação da estação e a pequenos usos de emergência. Esse motor até 1941, funcionou durante 10.000 horas.

Outras instalações foram executadas posteriormente no Brasil, incluindo a Estação de Tratamento de Esgotos da Penha, Distrito Federal, equipada com um conjunto de 4 cilindros e 60 CV.

Na pequena estação de tratamento de esgotos do Hospital de São Luiz Gonzaga e Asilo de Velhos do Jaçanã, construída e operada pela R.A. E. (hoje D.A.E.), o gás foi aproveitado, desde 1.938, como combustível nos laboratórios e na cozinha hospitalar.

### 3- DIGESTÃO. TEORIAS DA FORMAÇÃO DO GÁS

#### 3.1- Digestão

A digestão dos lodos é um processo de decomposição anaeróbia, conduzido sob condições controladas, com os objetivos seguintes:

- 1- Reduzir e estabilizar a matéria orgânica dos lodos frescos (muito putrescível);
- 2- Reduzir o volume de lodos, através da liquefação, gaseificação, adensamento e remoção das fases líquida e gasosa;
- 3- Destruir bactérias patogênicas;
- 4- Facilitar a secagem dos lodos resultantes;
- 5- Utilizar os lodos digeridos e estabilizados como fonte de húmus;
- 6- Aproveitar os gases resultantes.

Na ausência de oxigênio livre perecem os organismos aeróbios, que não são capazes de utilizar o oxigênio contido na matéria orgânica. Eles

são substituídos por bactérias anaeróbias que podem aproveitar o oxigênio combinado.

Estabelecem-se, assim, os processos de decomposição anaeróbia, com os conhecidos ciclos do azoto, carbono e enxofre (fig. 3.1)

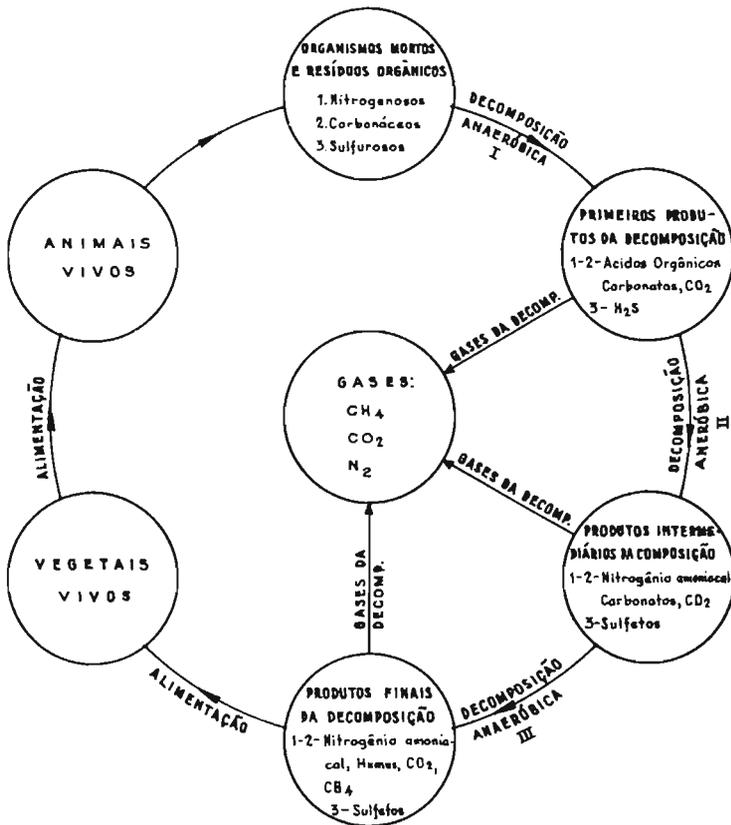
Os produtos finais da decomposição anaeróbia são gases e substâncias nutritivas para as plantas. A utilização destas substâncias pelos vegetais possibilita o aproveitamento posterior pelos animais, fechando-se assim os ciclos.

A produção de gás durante as fases anaeróbias possibilita o controle dos processos e a avaliação da sua velocidade.

Na digestão de lodos frescos, sem a mistura com material previamente digerido e sem a adição de matéria orgânica durante o processo, podem ser distinguidos três estágios.

Cada estágio se caracteriza pela produção de determinadas substâncias, pelas transformações da flora e alterações de cheiro e pH:

FIG. 3.1



I- Período de produção intensiva de ácidos (acidificação):

Inicia-se imediatamente com a "quebra" dos alimentos e compostos de mais fácil decomposição: Compostos nitrogenosos solúveis, amiláceos, gorduras. Grande produção de CO<sub>2</sub>. Produtos: H<sub>2</sub>S, ácidos orgânicos, bicarbonatos. pH na zona ácida: 5,1 a 6,8 (às vezes até 4,7).

II- Período de digestão de ácidos (Regressão, liquefação):

Ataque aos ácidos orgânicos e compostos nitrogenosos. Produção de pequenas quantidades de gás, CO<sub>2</sub>, nitrogênio e hidrogênio. Produção de compostos da amônia e bicarbonatos.

Mau cheiro causado por H<sub>2</sub>S, indol e mercaptans. Grande parte dos sólidos passa a sobre nadar (1/2 a 4/5). O pH se eleva até 6,6 ou mesmo 6,8.

III- Período de digestão intensa ou de fermentação alcalina (estabilização e gaseificação): Digestão de materiais mais resistentes: Proteínas, aminoácidos, celulose etc. são atacados

(além dos compostos nitrogenosos). Produção de amônia, sais de ácidos orgânicos e grandes volumes de gás, principalmente metano, e quantidades menores de CO<sub>2</sub> e nitrogênio. Cheiro de alcatrão. Pequena ou nenhuma quantidade de sólidos sobrenadantes.

O pH passa para a zona alcalina: 6,9 a 7,4. Os lodos apresentam o efeito "buffer", não se alterando o pH mesmo com a adição de grandes volumes apreciáveis de ácidos ou álcalis (lodos ricos em flora e enzimas).

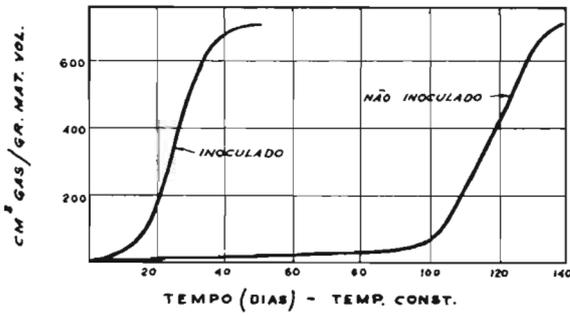
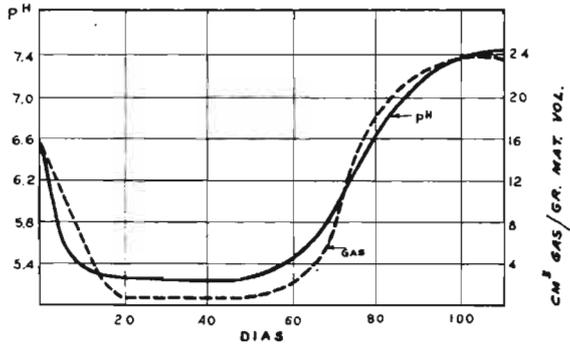
O B.O.D. é rapidamente reduzido.

Os três estágios de digestão podem ser observados pelas alterações de pH e pelas variações de produção de gás (Fig. 3.2).

Esse processo, de operação descontínua, é muito demorado. Na prática ele é acelerado, mediante a introdução e o controle de fatores favoráveis.

Técnicamente a digestão é um processo contínuo com a adição permanente de novas quantidades de lodos frescos produzidos.

FIG. 3.2



(RUDOLFS)

Nas instalações normais todos os três estágios podem ocorrer simultaneamente nos digestores.

Os fatores que influenciam diretamente a digestão, podendo modificar a velocidade de decomposição são: A adição diária de quantidades convenientes de lodos frescos ("semeadura ou inoculação"), o pH, a temperatura e a agitação.

1)- Inoculação: Com a adição diária de lodos frescos em proporções adequadas, ao lodo digerido, pode ser estabelecido o equilíbrio desejável entre os alimentos (matéria orgânica) e os organismos com suas enzimas, indispensáveis a uma digestão mais rápida. Os lodos, em digestão avançada, contém substâncias que exercem o efeito de "tampão" sobre os produtos intermediários da decomposição.

Os efeitos da semeadura estão evidenciados na fig. 3.2.

A quantidade total de gás produzido não é aumentada pela "inoculação", porém a velocidade de produção é alterada, no sentido de dar ao processo maior uniformidade.

2)- pH favorável (zona ligeiramente alcalina):

pH = 7,0 a 7,4. Em certas condições pode se tornar conveniente a adição de álcali para a justagem do pH.

Normalmente, nos digestores bem dimensionados e convenientemente operados, uma vez atingida a fase alcalina ela se mantém pela ação "tam-pão" dos lôdos.

3)- Temperatura conveniente

Os estudos de digestão e gaseificação realiza-dos por Fair e Moore (18) mostraram que exis-tem duas zonas ótimas para o processo:

30 a 40°C - Digestão mesofílica

50 a 57°C - Digestão termofílica

Nos digestores não aquecidos a temperatura ra-ramente ultrapassa 22°C. Em São Paulo, obtive-mos os seguintes dados de leituras feitas no termógrafo do Digestor nº 1 da Estação Experi-mental de Tratamento de Esgôtos do Ipiranga (1.943):

Temperatura média .....	19,9°C
Média das temperaturas mínimas	18,7°C
Média das temperaturas máximas	21,0°C

A variação de temperatura nos tanques Imhoff é pouco mais acentuada devido à influência do líquido em escoamento.

Nos países de inverno rigoroso é necessário o aquecimento dos digestores, e foi esta possibilidade, aliás, uma das razões técnicas - que sugeriram o estabelecimento da digestão separada.

A temperatura considerada ótima na prática geralmente está compreendida entre 30 e 35°C.

Os digestores da Estação de Tratamento de Esgotos de Vila Leopoldina foram projetados e instalados para serem operados a 32°C.

O período de detenção nos tanques, para uma digestão técnica é função da temperatura e corresponde a cerca de 25 dias a 34°C.

#### 4)- Agitação

A mistura do material contido nos digestores (lôdos parcialmente digeridos e lôdos no estágio final de digestão), com os lôdos frescos introduzidos, contribui para acelerar e melhorar o processo de digestão.

A agitação facilita o escapamento dos gases produzidos, da massa em digestão, assegurando continuidade e maior uniformidade na produção de gás.

Um estudo abrangendo 25 instalações, mostrou que nos digestores equipados com agitadores mecânicos a produção de gás é mais elevada do que nos tanques sem agitação. Essa constatação foi confirmada por Heukelekian(35)

Os lodos frescos constituem uma suspensão heterogênea de substâncias orgânicas incluindo gorduras, carboidratos e proteínas em teores variáveis.

A digestão realiza-se com "ataque" de bactérias e essas substâncias, como fonte de energia e de compostos necessários à síntese intracelular.

Nessa atividade, as enzimas exercem importante ação como agentes catalíticos orgânicos.

Com a digestão são obtidas a liquefação, a gaseificação, a mineralização e a humificação da matéria orgânica.

A liquefação compreende a produção e liberação de água, assim como, a transformação de grandes partículas de lodo em substâncias solúveis ou finamente dispersas. Este parece ser um processo extracelular, que depende fundamentalmente da ação enzimática (35).

A gaseificação é um processo intracelular considerado essencial para a digestão. Aliás, a boa operação das instalações consiste justamente no equilíbrio e na harmonia destas duas fases.

A parcela de matéria orgânica que não é convertida em gás apresenta condições de maior estabilidade, sendo excedida pela quantidade de substâncias minerais (mineralização).

O produto final, relativamente estável, sem cheiro ofensivo e de cor escura, assemelha-se ao húmus, isto é, à matéria orgânica encontrada em terrenos onde existem detritos vegetais em decomposição lenta.

### 3.2- Teoria sobre a formação do gás

Embora há quase dois séculos se tenha traçado a origem do metano à decomposição da matéria or

gânica, somente há algumas décadas, passou-se a ter conhecimento mais profundo dos processos biológicos envolvidos na sua produção, assim como, dos fatores que permitem controlá-los.

A técnica do tratamento de resíduos urbanos contribuiu ponderavelmente para essa evolução dos conhecimentos, graças às investigações de pesquisadores como Barker, Buswell, Fair, Moore, Rudolfs, Heukelekian e outros.

Entretanto, os conhecimentos atuais, relativos aos organismos responsáveis pela produção do metano, e ao seu comportamento, ainda podem ser considerados insatisfatórios.

Em 1.906, N. L. Söhngen investigou as atividades de uma cultura impura, de bactérias produtoras de metano e concluiu que alguns ácidos graxos podiam ser transformados em metano e bióxido de carbono, e que este, juntamente com hidrogênio também poderiam, através da fermentação, formar o metano.

Posteriormente, outras investigações vieram mostrar que várias substâncias orgânicas,

como, por exemplo, os carboidratos, proteínas, álcoois etc., também, são fermentáveis com a produção de metano e gás carbônico.

Observações feitas por bacteriologistas - mostraram que, a transformação de carboidratos, proteínas e gorduras em ácidos gordurosos de estrutura mais simples: álcoois e quetonas, pode ser feita através da ação de diversos grupos de bactérias anaeróbias. Todavia, a decomposição - posterior desses produtos intermediários para a formação de metano parece constituir atividade específica de um grupo especial de bactérias não esporuladas, as bactérias "metanogenas" (20).

Entre essas bactérias, incluem-se aquelas que produzem metano a partir do ácido acético : os cocos (*Methanosarcina methanica* e *Methanococcus Mazei*) e bacilos (*Methanobacterium Söhngen*), e as bactérias capazes de atacar o álcool etílico para produção de metano (*Methanobacterium Omelianskii*).

Barker foi o primeiro investigador a conseguir, em 1.940, uma cultura pura de bactérias

metanogenas. Após o seu trabalho pioneiro, três outras espécies puderam ser isoladas em culturas puras, e mais quatro espécies foram estudadas em culturas impuras.

Os conhecimentos atuais dos organismos produtores de metano mostram que:

- (a) são bactérias estritamente anaeróbias;
- (b) exigem a presença de CO<sub>2</sub>;
- (c) são extremamente sensíveis ao pH, sendo mais ativos na zona compreendida entre 6,4 e 7,2.

As 9 espécies conhecidas dessas bactérias estão indicadas no quadro abaixo, do trabalho de Barker (6):

Quadro 3.2- Bactérias produtoras de metano (35)

<u>Bactérias produtoras do metano</u>	<u>Substrato</u>
Methanobacterium formicicum	Formiato, CO, H <sub>2</sub>
Methanobacterium omelianskii	Álcoois primários e secundários, H <sub>2</sub>
Methanobacterium propionicum	Propionato
Methanobacterium sohngeni	Acetato e butirato.
Methanobacterium suboxydans	Butirato, Valerato e Caproato
Methanococcus mazei	Acetato, butirato
Methanococcus vanielii	Formiato, H <sub>2</sub>
Methanosarcina methanica	Acetato, butirato
Methanosarcina barkerii	Metanol, acetato, HCO

Admite-se, atualmente, que o metano possa ser produzido através de dois caminhos diferentes:

- (1) Pela decomposição de produtos intermediários mais complexos, tais como, o ácido acético e o metanol;
- (2) Pela redução de CO<sub>2</sub> na presença de hidrogênio e de produtos intermediários da digestão.

O primeiro mecanismo, exposto por Buswell e seus colaboradores, estabelece que o ácido acético é "quebrado" em metano e CO<sub>2</sub>:



A segunda hipótese, formulada inicialmente por Barker, considera a formação do metano a partir da desidrogenação de compostos orgânicos mais complexos e, simultaneamente, em consequência da redução do CO<sub>2</sub>.

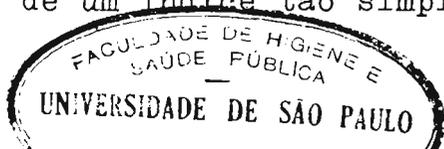
Heukelekian resume o estado atual dos conhe  
cimentos, como segue: "Aparentemente o metano re  
sulta da decomposição de muitos compostos orgâni  
cos, através de numerosas ações e reações inter  
dependentes. Os microorganismos responsáveis por  
essas numerosas reações, até hoje, ainda, não  
são perfeitamente conhecidos" (35).

#### 4- PRODUÇÃO, COMPOSIÇÃO E PODER CALORÍFICO

##### 4.1- Produção de gás

Inicialmente os técnicos que cuidaram da  
produtividade do gás de esgotos nas estações de  
tratamento procuraram relacioná-la ao número de  
pessoas contribuintes com o objetivo de estabele  
cer ao mesmo tempo um denominador comum e um da  
do prático.

Entretanto, a diversidade dos sistemas de  
esgotamento, a variação da concentração de maté  
ria orgânica nos líquidos cloacais e a multipli  
cidade de processos de tratamento de esgotos não  
permitem a fixação de um índice tão simples.



Não obstante, como primeira aproximação, costuma-se indicar os seguintes dados médios:

Produção de gás: Valores médios (litros diários/hab. servido) - Quadro 4.1

Dados	Trat. primário	Trat. prim. e sec.
Americanos, ASCE-FSIWA	22,6	25,5 a 28,3
Americanos, C.E. Keefer	14,2	28,3
Alemães, K. Imhoff	20,0	22,0 a 30,0
Inglêses, G.A. Keep	...	21,2 a 34,0
Italianos, G. Ippolito	15,0	20,0 a 25,0

O volume de gás produzido nos tanques Imhoff é ligeiramente inferior, porque uma parte do CO<sub>2</sub> se dissolve no efluente.

Imhoff e Fair, com base nos valores médios correspondentes ao tratamento primário consideram os seguintes acréscimos aproximados, para o tratamento secundário:

Precipitação química .....	+ 15%
Filtração biológica de baixa capacidade	+ 10%
Filtração biológica de alta capacidade	+ 15%
Lôdos ativados .....	+ 25%

Partindo-se de 20 litros/pessoa para o tratamento primário, encontra-se:

Precipitação química.....	23	litros
Filtração biológica de baixa <u>ca</u> pacidade .....	22	"
Filtração biológica de alta <u>ca</u> pacidade .....	23	"
Lôdos ativados .....	25	"

Para Keefer as produções superiores a 28,3 litros/pessoa, geralmente decorrem de efluentes concentrados, constituindo uma indicação de contribuições industriais ponderáveis.

Sempre que houver um volume considerável de despejos industriais a estimativa de produção de gás poderá se basear na população equivalente.

Além dos fatores inicialmente apontados, influem na quantidade de gás produzido: o tempo e a temperatura de digestão, o regime de alimentação (adição de matéria orgânica ou "inoculação"), a agitação nos digestores, o teor de umidade dos lôdos etc.

Considera-se, mesmo, que a produção de gás em quantidade e qualidade é o melhor índice de operação dos digestores (5).

Um critério mais preciso do que o precedente, consiste em se relacionar a quantidade de gás produzido, à quantidade de matéria volátil encaminhada para os tanques de digestão.

A produção média na Inglaterra tem sido estimada entre 500 e 620 litros/Kg de matéria orgânica, contida nos lodos frescos.

Imhoff indica os valores médios de 500 litros/Kg de matéria orgânica em base seca\*, para os digestores sem aquecimento, e 700 litros/Kg para os digestores aquecidos a 30°C.

Nos Estados Unidos, Keefer apresenta como limites médios 375 e 620 litros.

Babbitt sugere a seguinte regra aproximada para a estimativa da produção de gás em função da temperatura:

$$q = 16t + 285$$

q = produção em litros/Kg de mat.volátil

t = temperatura °C.

---

\*- Os esgotos domésticos, geralmente, contém 39 gramas de matéria orgânica/pessoa, em 24 horas.

Segundo o mesmo autor o valor máximo de  $q$ , raramente excede a 940 litros/Kg. de matéria volátil, introduzida nos digestores.

A quantidade de gás também pode ser avaliada em termos da quantidade de matéria volátil efetivamente "destruída" no processo da digestão.

Neste caso, os valores, geralmente, estão compreendidos entre 650 e 1.400 litros/Kg. Como valor médio, o Manual da A.S.C.E. indica 940 litros/Kg a 15,5°C.

Conhecendo-se a quantidade de matéria volátil contida nos lodos frescos, pode-se calcular a quantidade de gás produzível admitindo-se que 2/3 da matéria orgânica sejam "destruídos", durante a digestão.

As diferenças encontradas nos dados mencionados dão uma idéia das dificuldades que se apresentam para estimativas desta natureza.

A operação de uma estação de tratamento de esgotos mostra como é difícil medir a quantida-

de de matéria orgânica encaminhada diariamente para os tanques de digestão.

#### 4.2- Composição do gás e sua variação

O gás de esgotos, resultando da decomposição anaeróbia em meio hídrico, inclui os produtos gasosos típicos dessa atividade bacteriana: CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>. Além desses componentes, encontram-se com menos frequência e em pequenas quantidades, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S e CO \*.

Com a introdução de ar, eleva-se o teor de N<sub>2</sub> e apresenta-se o O<sub>2</sub>, com possibilidade de formação de misturas explosivas ou inflamáveis.

O quadro 4.2.1, sintetiza os resultados de análises de 32 estações de tratamento de esgotos \*\*.

Quadro 4.2.1- Composição do gás de esgotos

Componente	Teores limites		Valor mediano
CH <sub>4</sub>	54	77%	67%
CO <sub>2</sub>	14	34%	30%
N <sub>2</sub>	0	9%	3%
H <sub>2</sub>	0	11%	3%
O <sub>2</sub>	0	2%	0,4%
H <sub>2</sub> S ***	0,004	0,900	0,01%

\* - Em casos excepcionais têm sido mencionados, amoníaco, etana, propana, pentana etc.

\*\* - Valores arredondados de C.E. Keefer

\*\*\* - Resultados de apenas 7 instalações.

A composição do gás de esgotos produzido nos tanques Imhoff difere um pouco dos dados relativos aos digestores separados, porque nos primeiros, uma parte de CO<sub>2</sub> se dilui no líquido em escoamento, saindo com o efluente.

Imhoff, em seu manual, apresenta os seguintes dados médios, referentes aos componentes principais:

Quadro 4.2.2- Composição normal do gás

	Tanques Imhoff	Digestores
CH <sub>4</sub>	70 - 80%	65 - 70%
CO <sub>2</sub>	20 - 30%	30 - 35%

Os valores médios da composição do gás de esgotos produzido na Estação Experimental de Tratamento de Esgotos do Ipiranga, em São Paulo, encontram-se na parte 5.1, deste trabalho.

4.3- Poder calorífico

O poder calorífico de uma mistura de gases vem a ser a média ponderada dos poderes correspondentes aos gases constituintes.

Considerando-se no gás de esgotos apenas, o metano, o anidrido carboníco e o azôto, o poder calorífico resultará exclusivamente do teor do primeiro constituinte. Neste caso, como o teor de metano geralmente varia de 65 a 70%, o poder calorífico da mistura fica compreendido entre 5.500 e 6.000 Cal/m<sup>3</sup>.

Eventualmente aparecem no gás pequenas quantidades de monóxido de carbono e hidrogênio, ambos de poder calorífico inferior ao do metano. Essa ocorrência, entretanto, não deve ser considerada nos estudos de aproveitamento por ser incerta e imprevisível.

O quadro 4.3 é de grande utilidade para as avaliações térmicas.

Quadro 4.3.A- Características térmicas dos principais componentes do gás de esgotos (23)

Gás	Pêso mole cu- lar	Densida de rela tiva ao ar	Pêso, Kg/m <sup>3</sup> sêco, 1 atm	Temp. a teórica da chama
Metano	16,03	0,5534	0,677	2065°C
CO <sub>2</sub>	44,00	1,5288	1,869	-
H <sub>2</sub>	2,02	0,0695	0,085	2210°C
N <sub>2</sub>	28,02	0,9671	1,184	-

Quadro 4.3.B- Características térmicas dos principais componentes do gás de esgotos (23)

Gás	Poder cal.inf.Kcal/m <sup>3</sup>			Poder cal.sup.Kcal/m <sup>3</sup>		
	Sêco 0°C 1 atm	Sêco 15,5°C 1 atm	Sat.água 15,5°C 1 atm	Sêco 0°C 1 atm	Sêco 15,5°C 1 atm	Sat.água 15,5°C 1 atm
Meta no	8.570	8.116	7.974	9.514	9.006	8.855
CO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-
H <sub>2</sub>	2.580	2.483	2.394	3.052	2.883	2.839
N <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-

## 5- CARACTERÍSTICAS DO GÁS, O GÁS COMO COMBUSTÍVEL

### 5.1- Características do gás

O gás de esgotos, sendo mistura de gases de naturezas diversas, apresenta características resultantes da sua composição.

Sob o ponto de vista térmico, o gás de esgotos classifica-se pouco acima dos gases combustíveis de poder calorífico médio, e bem acima do gás obtido do carvão. Dependendo diretamente do teor de metano presente, o poder calorífico geralmente está compreendido entre 5.000 e 6.500 Kcal/m<sup>3</sup>.

O gás se queima com uma velocidade de propagação da chama de cerca de 0,3 m/seg. e apresenta condições de explosão em uma zona relativamente estreita de mistura com ar: 5,6 a 13,5%.

Com 67% de CH<sub>4</sub>, 30% de CO<sub>2</sub> e 3% de N<sub>2</sub> a sua densidade em relação ao ar é 0,858 e o peso específico a 15,5°C é de 1,05 Kg/m<sup>3</sup>.

O gás, livre de  $H_2S$ , é completamente inodoro e incolor, e pela ausência de hidrocarbonetos de peso molecular elevado produz uma chama pouco luminosa.

O quadro abaixo indica a composição média do gás de esgotos produzido na Estação Experimental de Tratamento de Esgotos do Ipiranga\* e do gás distribuído pela Companhia Paulista de Serviços de Gás de São Paulo.

Quadro 5.1- Comparação do gás de esgotos com o gás de rua em São Paulo

	E.T.E.Ipiranga*	C.P.Serviços de Gás
Metano	65,7%	13,8%
Dióxido de carbono	17,8%	4,3%
Nitrogênio	13,3%	9,8%
Hidrogênio	2,0%	42,2%
Oxigênio	1,2%	0,7%
Monóxido de carbono	-	23,4%
Iluminantes ( $C_nH_m$ )	-	5,8%
Densidade (Ar = 1)	0,8	0,6
Poder calorífico	5.400	4.750

\*- Estação Experimental de Tratamento de Esgotos J.P. de Jesus Netto

## 5.2- O metano

O componente mais importante do gás de esgotos, o combustível mais importante, o gás nobre, por assim chamar, é o metano.

O metano, o mais simples dos hidrocarbonetos (o único que contém um só átomo de carbono em sua molécula) é o primeiro termo da série parafínica e também se denomina "gás-dos pântanos", formena, gás-das-minas e grisú.

É um gás muito estável, incolor, inodoro, muito pouco solúvel na água e que arde no ar com uma chama azul característica, pouco brilhante.

A configuração da estrutura molecular é admitida como a de um tetraedro regular, em que os quatro átomos de hidrogênio estão em posições equivalentes.

No ar encontram-se quantidades insignificantes de metano, que se desprende da decomposição natural de matéria orgânica, principalmente de origem vegetal.

O metano é um combustível de elevado poder calorífico: 8.570 Kcal/m<sup>3</sup> à pressão atmosférica e 0°C.

As características físicas principais do metano levam aos valores seguintes:

Quadro 5.2- Características físicas do metano(23)

Características	Valores
Pêso molecular .....	16,04
Pêso específico a 0°C e 1 atm.,g/l.	0,7168
Pêso específico a 20°C e 1 atm.,g/l	0,668
Densidade em relação ao ar.....	0,5534
Constante do gás, R,Kgm/Kg,°C .....	52,89
Ponto de fusão, °C.....	-184,0°
Ponto de ebulição,°C .....	-164,7°
Temperatura,crítica,°C .....	-82,5°
Pressão crítica,atmosferas.....	45,6
C <sub>p</sub> /C <sub>v</sub> , a 0°C .....	1,31
Temperaturas de inflamação no ar,°C	650-750
Volume de ar necessário à combustão, m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> .....	9,52
Viscosidade absoluta,centipoises, a 1 atm, 20°C .....	0,0110
Viscosidade cinemática,centistokes,a 1 atm, 20°C .....	16,50

O metano a  $-11^{\circ}\text{C}$  somente se liquefaz sob uma pressão de 180 atmosferas.

Em mistura com 90% de ar, o metano se inflama aos  $650^{\circ}\text{C}$ , produzindo uma onda explosiva, cuja velocidade alcança 2.200 m/seg.

O metano combina-se com o cloro produzindo ácido clorídrico e vários produtos clorados de importância industrial, incluindo o metanol (álcool metílico), o clorofórmio ( $\text{CHCl}_3$ ) etc.

É curioso observar que a análise espectroscópica revela a presença de metano em Júpiter.

### 5.3- O bióxido de carbono

O anidrido carbônico é um gás incolor, de cheiro picante e que se dissolve na água formando o ácido carbônico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ).

Sendo um gás inerte, numa mistura combustível, freqüentemente se considera vantajosa a sua remoção, aproveitando-se para esse fim a sua solubilidade na água.

A presença de  $\text{CO}_2$  na água, reduz o pH e eleva a agressividade para os metais.

A porcentagem de gás carbônico presente no gás de esgotos é influenciada pelo grau de digestão e pela qualidade e quantidade de resíduos industriais presentes.

Os valores apresentados a seguir, correspondem às suas principais características:

Quadro 5.3- Características físicas do  $\text{CO}_2$  (23)

Características	Valores
Pêso molecular.....	44,01
Pêso específico a $0^\circ\text{C}$ e 1 atm, g/l..	1,977
Pêso específico a $20^\circ\text{C}$ e 1 atm, g/l	1,842
Densidade em relação ao ar.....	1,5288
Constante do gás, R, kgm/Kg. $^\circ\text{C}$ .....	19,25
Ponto de fusão, $^\circ\text{C}$ .....	-56,6 $^\circ$
Ponto de ebulição, $^\circ\text{C}$ .....	678,5 $^\circ$
Temperatura crítica, $^\circ\text{C}$ .....	31,0
$C_p/C_v$ , a $0^\circ\text{C}$ .....	1,305
Viscosidade absoluta, centipoises, a 1 atm, $20^\circ\text{C}$ .....	0,015
Viscosidade cinemática, centistokes, a 1 atm, $20^\circ\text{C}$ .....	8,14

A densidade relativamente elevada do anidrido carbônico é, muitas vezes, inconveniente para as misturas combustíveis.

#### 5.4- Outros constituintes

Geralmente o metano e o gás carbônico constituem 95% do gás de esgotos em volume, sendo, portanto, os seus componentes principais.

Outros gases, como nitrogênio e o hidrogênio podem se apresentar em pequenas quantidades.

O oxigênio normalmente não deve ser encontrado no gás da digestão e a sua presença eventual deve ser considerada como indicativa de introdução de ar no sistema ou na amostra coletada.

O hidrogênio já tem sido constatado em análises de gás obtido em instalações nacionais.

Os resultados de 8 análises feitas na Estação Experimental de Tratamento de Esgotos do

Ipiranga, relativas ao ano de 1.947 dão o valor médio de 2,1%.

Na Estação de Tratamento de Esgotos da Penha, Rio de Janeiro, foi encontrado em análise feita em 1.942, o valor de 3,0%.

O hidrogênio sendo um gás muito leve e combustível, contribui para pequena redução da densidade do gás e ligeira elevação do seu poder calorífico.

Em quantidades mínimas pode-se encontrar o  $H_2S$ , de efeitos nocivos.

A sua presença reflete em parte o teor de sulfatos das águas de abastecimento. Quantidades anormais (acima de 0,01%) podem decorrer de resíduos industriais, ricos em sulfatos, lançados na rede de esgotos.

#### 5.5- O gás de esgotos como combustível

Ao gás de esgotos podem ser atribuídas as vantagens comuns aos combustíveis gasosos: Con-

dução fácil e econômica, através de tubulações; distribuição simples e prática a um grande número de usuários, simultaneamente, por intermédio de redes distribuidoras; facilidade e eficiência de queima, isto é, de utilização. Essas propriedades asseguram uma situação privilegiada para os gases entre os combustíveis líquidos e sólidos.

É interessante observar que os combustíveis gasosos, com duas exceções, são produtos derivados do carbono. Os compostos de carbono - com mais de 5 átomos são líquidos ou sólidos, em condições normais.

A tecnologia de produção de gás combustível consiste, principalmente, em processos destinados a converter compostos complexos de carbono em substâncias menos complexas, de moléculas mais simples.

O metano é o hidrocarboneto mais simples e o mais importante constituinte das misturas combustíveis. O metano, a etano, o etileno e o hidrogênio são os gases mais desejáveis numa mistura gasosa para combustão.

Todos os gases combustíveis comerciais são misturas em proporções variadas de um certo número de gases constituintes.

G.L. Clark e G.G. Hawley (12) dão a seguinte classificação conveniente para esses constituintes:

- (a) Combustíveis desejados: Hidrocarbonetos com um e dois átomos de carbono; CO; H<sub>2</sub>;
- (b) Combustíveis eventualmente presentes. Hidrocarbonetos com três ou mais átomos de carbono; H<sub>2</sub> em pequenas quantidades;
- (c) Gases inertes: N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>;
- (d) Impurezas: H<sub>2</sub>S, CN, NH<sub>3</sub>.

De acordo com o poder calorífico os citados autores sugerem a seguinte classificação:

- (1) Gases de baixo poder calorífico: Com menos de 2.700 Cal/m<sup>3</sup> (geralmente sub-produtos de processos metalúrgicos);
- (2) Gases de poder calorífico médio: 4.500 a 5.500 Cal/m<sup>3</sup> (produzidos a partir do carvão, do coque ou do petróleo);
- (3) Gases de alto poder calorífico: 8.000 a 9.800 Cal/m<sup>3</sup>, tais como, gases naturais e gases derivados do petróleo;

- (4) Gases pesados, de poder calorífico elevadíssimo: 16.000 a 29.400 Cal/m<sup>3</sup>: principalmente sub-produtos das refinarias de petróleo.

De acordo com essa classificação o gás de esgotos enquadra-se pouco acima dos gases de poder calorífico médio e, com a remoção do CO<sub>2</sub>, ele se aproximaria dos gases de alto poder calorífico.

Na última categoria incluem-se a butana e a propana, geralmente fornecidas para utilização em recipientes metálicos sob pressão elevada.

## 6- PURIFICAÇÃO DO GÁS

### 6.1- Remoção do H<sub>2</sub>S

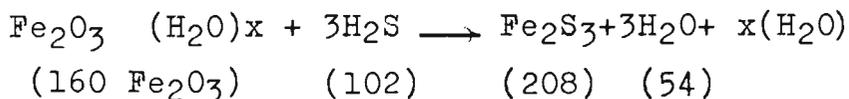
A presença de H<sub>2</sub>S no gás de esgotos, em teores acima de 0,075%, em volume, pode acarretar sérios prejuízos decorrentes da corrosão, em medidores, aparelhos de segurança, caldeiras e motores a gás.

Nos motores a gás, além de causar a corrosão das partes vitais, o H<sub>2</sub>S tem efeitos nocivos sobre a qualidade dos óleos lubrificantes.

A remoção desse gás recomenda-se para teores acima de 0,015%, como medida de proteção para os equipamentos mencionados, sobretudo nas estações de tratamento, equipadas com motores.

As instalações para esta finalidade são relativamente simples e consistem em tanques ou caixas contendo tabuleiros com aparas de madeira, impregnadas de óxido férrico e água.

Fazendo-se o gás atravessar êsse material, o  $H_2S$  se combina com o óxido, formando o  $Fe_2S_3$  :



Depois de algum tempo de uso a instalação perde a sua eficiência, tornando-se necessária a regeneração.

O material é então umidecido e exposto ao ar para a oxidação do  $Fe_2S_3$ . Para esta operação o purificador deve ser posto fora de serviço, esta beleecendo-se a seguinte reação:



O calor desprendido por esta reação pode provocar a queima da madeira utilizada como suporte. A manutenção da temperatura abaixo de limites perigosos pode ser conseguida molhando-se todo o material com a quantidade de água necessá - ria.

O término do processo regenerativo é indicado pela mudança de côr do material, do marron

característico para o negro.

Para continuidade do serviço as instalações são equipadas com duas ou mais unidades, que normalmente podem funcionar em série ou em paralelo.

Geralmente cada purificador funciona de 1 a 5 meses, antes de se tornar necessária a regeneração, suportando 3 ou 4 regenerações.

A temperatura no purificador deve ser mantida abaixo de 20°C.

O projeto das instalações é feito nas bases seguintes: As aparas de madeira impregnadas com uma solução de  $Fe_2 O_3$  geralmente contém 315 Kg. de óxido férrico, por metro cúbico.

Teòricamente, 1 m<sup>3</sup> desse material, contendo os 315 Kg. de  $Fe_2 O_3$ , reage com 200 Kg. de  $H_2 S$ .

Para projeto não se considera o aproveitamento completo, admitindo-se nos cálculos a reação com apenas a metade, ou seja, 100 Kg. de  $H_2 S$ .

Se, por exemplo, uma estação de tratamento de esgotos produzir 5.000 m<sup>3</sup> de gás por dia, com um teor médio de 0,15% de H<sub>2</sub>S em volume (cêrca de 2,3 g/m<sup>3</sup> de gás), a quantidade mensal de gás sulfídrico a remover será de 345 Kg. Para essa quantidade o volume de material para purificação, admitindo-se uma regeneração em cada dois meses será igual a 6,9 m<sup>3</sup>.

Os tanques necessários seriam construídos com um volume maior, tendo-se em consideração os espaços perdidos entre os tabuleiros.

Cada caixa é construída com 2 ou 3 tabuleiros de treliça de madeira, onde são colocadas as aparas preparadas, em camadas de cêrca de 30 cm, por tabuleiro.

Sob o tabuleiro inferior deixa-se um pequeno espaço, ficando também separados entre si os tabuleiros com as suas cargas.

Acima da camada mais alta e logo abaixo da tampa do tanque, instalam-se as canalizações para espargir a água necessária à manutenção das condições de umidade do material.

Admitindo-se a construção de três unidades, cada uma com três tabuleiros, as suas dimensões poderiam ser: 1,40 x 1,80 x 1,50m (altura útil de 0,90 m).

As caixas poderão ser executadas com chapas de aço de 1/4", soldadas e protegidas com pintura anticorrosiva.

Cada unidade deve ser provida de tampa removível, estanque ao gás, e de "by pass".

## 6.2- Remoção do CO<sub>2</sub>

O dióxido de carbono apresenta dois inconvenientes: Em primeiro lugar êle é um gás sem valor calorífico, ocupando espaço sem benefício. Por outro lado, a sua densidade é elevada.

A redução do teor de CO<sub>2</sub>, geralmente, é feita nos casos em que a utilização do gás exige pressões elevadas, como por exemplo, no emprêgo de gás engarrafado para acionar veículos e sempre que houver conveniência em se reduzir a densidade do gás para determinados aproveitamentos.

A remoção de  $\text{CO}_2$  é feita sem grande dificuldade, devido a sua grande solubilidade na água.

A operação é feita em torres de lavagem, atravessadas pelo gás, a contra corrente, sob pressão de 15 a 20 atmosferas. O  $\text{CO}_2$  dissolve-se na água, sendo afastado juntamente com pequenas quantidades de  $\text{H}_2\text{S}$ .

A quantidade de água necessária pode ser estimada entre 6 e 10% do volume de gás a purificar. Quando houver necessidade ou conveniência a água poderá ser substituída pelo próprio efluente final das estações de tratamento de esgotos.

O gás depois de lavado ainda contém cerca de 5% de dióxido de carbono, teor que se considera tolerável.

## 7- VARIAÇÕES DE PRODUÇÃO. RESERVAÇÃO

### 7.1- Variações de produção

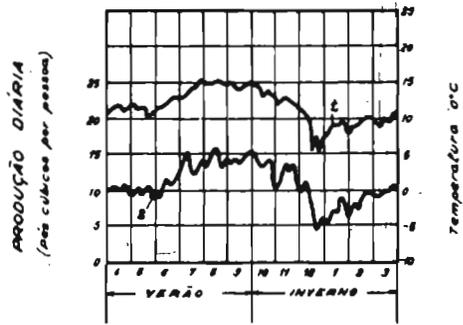
A produção de gás nas estações de tratamento de esgotos está sujeita a variações, sendo influenciada pelas condições em que se processa a digestão dos lodos.

Além das alterações que podem ocorrer na qualidade e na quantidade de lodos, os seguintes fatores podem influir no processo de digestão e, portanto, na produção diária de gás: período de digestão, sistema de alimentação, pH, temperatura e agitação.

A fig. 3.2, mostra a influência do período de digestão e dos efeitos da inoculação (sistema de alimentação).

Na fig. 7.1 estão indicadas as observações feitas na instalação de tanques Imhoff de Munich, onde a temperatura e a produção de gás estão sujeitas a variações sazonais. Neste caso, a temperatura medida nas câmaras de sedimentação variou

FIG. 7.1



(IMHOFF)

entre 5º e 15ºC, com a tendência central pouco superior a 12ºC. Em correspondência a produção de gás por pessoa servida oscilou entre 4 e 16 litros, com a média de 11,3 litros (28).

A experiência tem mostrado que a agitação dos lodos em digestão tem uma ação benéfica para o processo, contribuindo para acelerar a produção de gás.

A agitação freqüente (mistura) dos lodos concorre para maior uniformidade de produção.

Os resultados de operação da Estação de Tratamento de Esgotos de Rahway Valley, Rahway, Estado de Nova Jersey\*, relativos a 1.943, apresentam:

Produção mínima diária	1.700 m <sup>3</sup> /dia	85%
Produção média diária	2.000 m <sup>3</sup> /dia	100%
Produção máxima diária	2.940 m <sup>3</sup> /dia	147%

Poucos dados são encontrados na literatura sobre a variação horária. O recente Manual da Sociedade Americana de Engenheiros Civis dá as indicações que seguem:

\*- Tratamento primário; vazão média de 1,09 m<sup>3</sup>/s.

Produção horária mínima .....	45%
Produção horária máxima .....	200%
Produção instantânea máxima .....	270%

Os valores máximos devem ser considerados no dimensionamento das canalizações de gás, que partem dos digestores.

#### 7.2- Reservação: Volume a acumular

Em consequência das variações que se verificam na produção de gás, deve-se prever uma reserva adequada nas instalações destinadas ao seu aproveitamento permanente.

Os gasômetros empregados para esta finalidade funcionam como verdadeiros volantes, estabelecendo o equilíbrio entre a produção e o consumo.

Nessas condições, a capacidade dos gasômetros poderá ser determinada pelo diagrama de massas, desde que sejam conhecidas a variação de produção e o regime de utilização.

A forma de aproveitamento do gás é um fator importante no dimensionamento dos gasômetros.

Se o gás fôr utilizado apenas para aquecimento, a flexibilidade das caldeiras e do sistema térmico será suficiente para compensar as variações de produção.

Nas instalações equipadas com motores a gás, ao contrário, além das variações de produção deverá ser levado em conta o regime de consumo, e neste caso, o número de horas de trabalho dos motores e a escala de funcionamento constituem fatores importantes.

Na prática verifica-se que o volume a reservar, aproxima-se tanto mais do valor médio diário da produção, quanto maior fôr a porcentagem prevista de utilização. Quando se espera aproveitar praticamente todo o gás produzido em uma instalação, recomenda-se armazenar o volume médio diário.

Se fôr admitido um aproveitamento de 90% , pode-se reduzir a reserva a apenas 40% da produção diária.

Na maioria das instalações o volume dos gases está compreendido entre 20% e 100% da produção média diária.

As menores reservas são feitas nas grandes estações de tratamento, onde há maior flexibilidade e maior controle de operação.

Um estudo interessante relativo ao aproveitamento do gás de esgotos dá importante instalação de Westerley, em Cleveland, para operação de um grande incinerador, mostrou que poderia ser considerada a utilização de 90% da produção anual de gás mediante uma reserva de apenas 1/3 da produção diária (17).

### 7.3- Gasômetros

Nas estações de tratamento de esgotos têm sido empregados os seguintes tipos de gasômetros:

- 1- Gasômetros de baixa pressão
  - 1.1- Com selo hídrico
  - 1.2- Com junta móvel mecânica
- 2- Gasômetros de alta pressão.

Os gasômetros de baixa pressão, semelhantes aos dos serviços de gás são do tipo de flu-

tuação. A pressão interna que é estabelecida pelo peso próprio da estrutura flutuante, geralmente está compreendida entre 7,5 e 30,0 cm. de coluna de água.

Na cúpula de gasômetros deste tipo recomenda-se a instalação de uma válvula de segurança quebradora de vácuo ou de excesso de pressão, com dispositivo de interseção de chamas.

A vantagem dos gasômetros de gravidade está no fato deles assegurarem pressão uniforme nos limites de sua capacidade útil.

Os gasômetros de alta pressão são tanques esféricos que recebem denominações comerciais, como "Hortonsphere" e que são operados com pressões usualmente compreendidas entre 1,5 e 3,5 atmosferas ou até mesmo superiores.

Instalações deste tipo compreendem compressores e equipamentos de comando e de segurança, automáticos e de grande sensibilidade.

Os maiores tanques esféricos chegam a ter capacidade superior a 10.000 m<sup>3</sup>.

Os gasômetros de alta pressão oferecem a vantagem de comprimir o gás a  $1/3$  ou  $1/4$  do seu volume normal, ocupando dêste modo menor espaço.

Na construção de gasômetros empregam-se de preferência chapas de aço doce, de pelo menos 6 mm de espessura, com pintura protetora anti-corrosiva (2).

## 8- PERIGOS NAS INSTALAÇÕES DE GÁS.DISPOSITIVOS DE SEGURANÇA

### 8.1- Perigos nas instalações de gás

As instalações de gás, pela própria natureza dos seus componentes essenciais e pelas características das suas impurezas, oferecem perigos que não devem ser subestimados pelos técnicos responsáveis pelo projeto, construção e operação.

As situações perigosas sempre existem nas estações de tratamento de esgotos, pequenas ou grandes, seja feito ou não, o aproveitamento do gás.

A literatura técnica especializada é copiosa na descrição de inúmeros acidentes ocorridos, muitos dos quais causaram vítimas.

O primeiro acidente de que se tem notícia verificou-se em 1.903, na cidade de Skegness, Inglaterra, com a explosão de um tanque séptico.

Em 1.915, na localidade de Ocean Grove, Estado de Nova Jersey, quando vários visitantes percorriam a estação de tratamento, ocorreu uma vio-

lenta explosão nos tanques sépticos, causando a morte de duas pessoas.

Em 1.932, na cidade de Lima, Estado do Ohio, um engenheiro consultor, encontrou a morte por asfixia, ao procurar salvar a vida de um operador.

Muitos outros acidentes em condições as mais diversas e de conseqüências as mais variadas, encontram-se registrados nas publicações especializadas.

A importância do assunto foi reconhecida há bastante tempo e justamente no ano em curso, completa 20 anos o trabalho realizado pela primeira Comissão Oficial de Peritos, para prevenção de acidentes desta natureza ("Report of Joint Gas Hazards Committee", N.J.S.W.A.)(13).

Os perigos podem ser analisados pelas suas conseqüências, a saber:

(a) Explosões

Têm sido a conseqüência mais comum e mais grave de falhas ou erros nas instalações

de tratamento de esgotos.

Entre outras, podem ser mencionadas as explosões ocorridas em instalações Norte Americanas: Ocean Grove (N.J.), Weonsocket (R.I.) , Collingswo (N.J.), Bristol (N.Y.), Dayton (Ohio), Herkimer (N.Y.) etc.

As experiências feitas pelo "Underwrites' Laboratories Inc.", nos Estados Unidos, mostraram que as explosões com o metano no ar ocorrem com concentrações desse gás compreendidas entre 5,6 e 13,5% em volume, e que a intensidade e velocidade de propagação é uma função da concentração, sendo máxima em torno de 9,6% e mínima para valores próximos daqueles limites indicados.

O engenheiro L.W. Morrill comenta com propriedade: "Qualquer explosão é o resultado da conjugação de 4 fatores: a existência de um gás inflamável, a presença de oxigênio, a mistura em determinadas proporções desses dois elementos e uma fonte ignífera".

É suficiente a eliminação de um desses fatores para evitar as explosões.

## b) Incêndios

Sempre que a porcentagem de metano no ar exceder a 13,5% em volume, o gás queima-se sem efeitos explosivos.

A queima em circunstâncias inesperadas pode ser a causa de incêndios ou de queimaduras, com prejuízos para as instalações e perigo para os operadores.

c) Toxidez

Sob êste aspecto, o principal composto a ser considerado é o  $H_2S$ , de vez que o CO raramente é encontrado e somente se apresenta com teores baixos.

O  $H_2S$  é um gás extremamente tóxico, de efeitos letais comparáveis aos do HCN.

Em concentração de

0,05 a 0,07% pode causar acidentes graves;

0,07 a 0,10% pode causar acidentes fatais.

Acima de 0,10% pode fazer cessar a função respiratória quase que instantaneamente.

A presença do  $H_2S$  pode ser notada em concentrações muito pequenas: 0,001%. Em concentrações acima de 0,01%, o seu cheiro se torna menos sensível.

As inspetorias de serviço público de gás, geralmente, estabelecem, especificamente, os teores máximos toleráveis de  $H_2S$  no gás, quase sempre abaixo de 0,0005%, em volume.

Felizmente a presença de  $H_2S$  nas estações de tratamento de esgotos é ocasional e os teores são relativamente baixos, raramente ultrapassando 0,03%. Nas grandes instalações de Baltimore e Londres (Mogden), os teores máximos encontrados foram respectivamente 0,012 e 0,017%.

Segundo alguns especialistas o  $H_2S$  pode constituir um problema mais comum nas regiões mais quentes (2).

## B) Asfixia

O gás de esgotos geralmente é inodoro, de maneira que a sua presença em ambientes confinados pode não ser rapidamente pressentida.

A presença de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>, em grandes quantidades no ar, reduz a porcentagem normal de oxigênio (20,99% em volume), podendo provocar a asfixia.

Já se pensou em adicionar ao gás de esgotos compostos de cheiro pronunciado, tais como, os mercaptans, porém esta prática não tem sido adotada.

A providência que se recomenda consiste em projetar os compartimentos sujeitos à penetração do gás com boa ventilação e sempre com acesso para o exterior.

## 8.2- Dispositivos de segurança e aparelhos acessórios

Com o objetivo de evitar que prevaleçam condições perigosas nas estações de tratamento de esgotos, as instalações de gás devem ser equipadas com dispositivos especiais de segurança e aparelhos acessórios.

Equipamentos especiais para essa finalidade foram idealizados, a partir de 1.931, e, atualmente são fabricados em série.

Nos Estados Unidos duas grandes companhias especializam-se na sua produção: a Pacific Flush Tank Co. (P.F.T.) e a Vapor Recovery Systems Co. (Varec).

Alguns aparelhos podem ser considerados essenciais, havendo outros, cujo emprêgo é desejável, porém não indispensável. Os dispositivos relacionados, a seguir têm sido instalados:

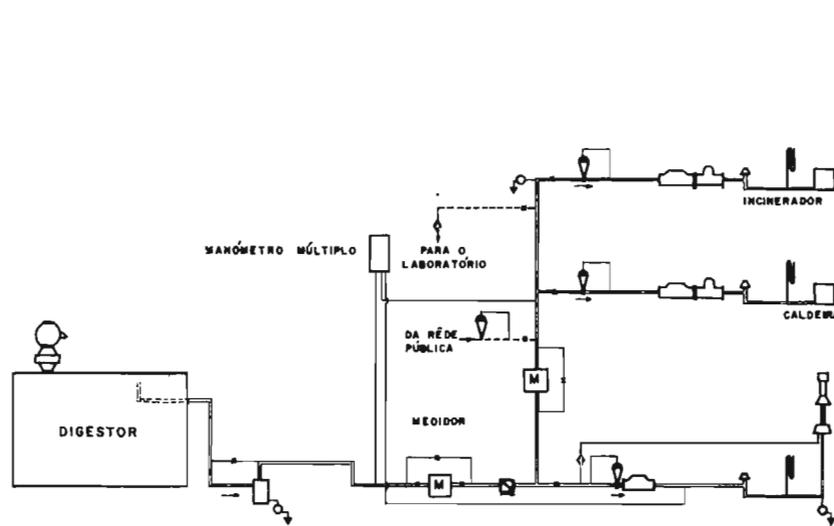
1- De segurança

- 1.1- Válvulas limitadoras de pressão e quebradoras de vácuo; podem ser associadas a interceptores de chamas;
- 1.2- Cortadores de chamas;
- 1.3- Retentores de chamas;
- 1.4- Válvulas de segurança para explosões;
- 1.5- Reguladores de pressão;
- 1.6- Válvulas de retenção.

2- De purificação

- 2.1- Interceptores de sedimentos ("traps");
- 2.2- Purgadores ("Drip Traps");
- 2.3- Purificadores de H<sub>2</sub>S.

## SISTEMA DE GÁS (COM UM DIGESTOR)



### LEGENDA

-  VÁLVULA ALIVIADORA DE PRESSÃO COMBIMADA COM CORTADOR DE CHAMAS.
-  CORTADOR DE CHAMAS
-  REGULADOR DE PRESSÃO
-  REGULADOR DE PRESSÃO
-  PURGADOR
-  VÁLVULA ALIVIADORA P/EXPLOÇÕES
-  RETENTOR DE SEDIMENTO
-  MANÔMETRO SIMPLES
-  QUEIMADOR DE GÁS
-  VÁLVULA ALIVIADORA DE PRESSÃO E QUEBRADORA DE VÁCUO COM INTERCEPTOR DE CHAMAS.
-  RETENTOR DE CHAMAS
-  VÁLVULA DE RETENÇÃO

FIG. 8.1

3- De contrôle (Medidores)

3.1- Manómetros

3.2- Medidores de vazão

4- Queimadores de gás

Os desenhos mostram as posições dessas peças em instalações completas.

Os requisitos indicados a seguir podem ser considerados essenciais em uma boa instalação:

Válvulas limitadoras de pressão e quebradoras de vácuo associadas a interceptores de chamas: Devem ser instaladas nas cúpulas dos digestores e no topo dos gasômetros.

Cortadores de chamas: Devem ser instalados tão próximos quanto possível, dos aparelhos de queima ou de utilização de gás. A distância limite comumente admitida é 9,0 metros (Verificou-se que a chama no interior das canalizações se propaga com aceleração) (5).

Purgadores: Devem ser instalados em todos os pontos baixos das canalizações (As canalizações devem ser assentadas com declividade para estes aparelhos).

SISTEMA DE GÁS (COM DOIS DIGESTORES)

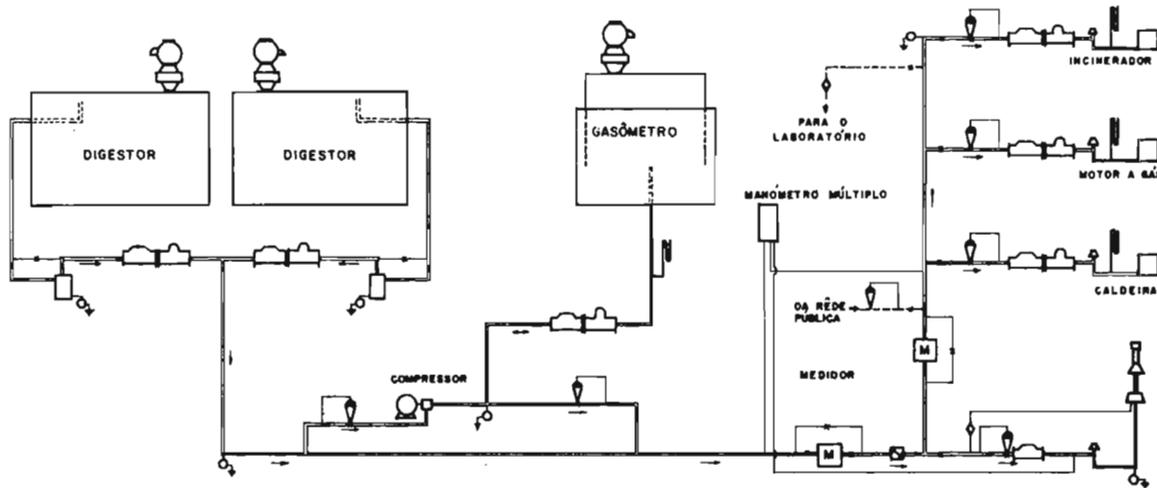


FIG. 8.2

Reguladores de pressão: São instalados nas derivações que alimentam os pontos de consumo elevado (Motores, caldeiras e incineradores).

Purificadores de H<sub>2</sub>S: Devem ser considerados sempre que o teor de H<sub>2</sub>S exceder com frequência o limite de 0,075% em volume.

### Manômetros

Indicam a pressão geralmente em altura de coluna d'água e são necessários para a boa operação do sistema. Os pontos essenciais de instalação são:

- (a) Na canalização principal que provêm dos digestores;
- (b) Após medidores, corta chamas e reguladores de pressão, para indicar perdas de carga;
- (c) Logo à montante de pontos importantes de utilização (motores, caldeiras, incineradores - etc.).

### Medidores de gás

Têm sido adotados os medidores comuns do tipo de diafragma e os medidores rotativos do tipo de deslocamento. Os primeiros são mais usados para medir pequenas quantidades e nem sempre funcionam bem com gás de esgotos (2).

Os medidores devem sempre ser precedidos de purgadores de líquido condensado e devem ser instalados com uma canalização paralela, de emergência ("by pass").

As instalações que fazem o aproveitamento de gás devem ser equipadas pelo menos com 2 medidores, instalados de maneira a permitir a determinação dos volumes produzidos, consumidos e descartados (queimados).

### Detectores

Os detectores de metano, capazes de acusar a presença de pequenas quantidades desse gás no ar, constituem um recurso adicional de segurança.

Um tipo de detector existente na grande estação de tratamento de esgotos de Colney Valley (Inglaterra), baseia-se na reação de um filamento metálico aquecido em presença do metano. A variação de temperatura que decorre dessa reação altera a condutividade do filamento em função da quantidade de metano presente. Em um circuito com uma ponte de Wheatstone é instalado um galvanômetro especialmente calibrado para indicar diretamente a porcentagem de gás presente no ar ambiente.

Esse aparelho inclui ainda dispositivos de alarme luminosos e sonoros.

### Queimadores de gás

Qualquer instalação com difestores fechados deve ser equipada com queimadores de gás, para eliminar o gás excedente.

Os queimadores de gás devem ser localizados a mais de 7,5 metros dos digestores e devem ser precedidos por cortadores de chamas e reguladores de pressão.

Esses dispositivos funcionam automaticamente, existindo uma chama piloto, permanente, alimentada por canalização própria, para dar início à queima.

A abertura automática para a queima do excesso de gás se verifica a uma pressão preestabelecida, pouco inferior (1,0 a 2,5 cm. de coluna de água) à pressão máxima fixada para a câmara de gases nos digestores.

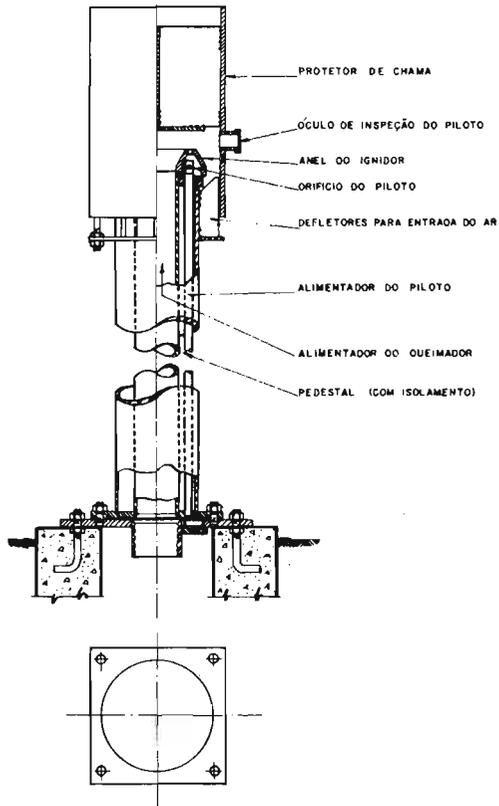
A fig.8.1 mostra a instalação de um queimador de gás de fabricação da Pacific Flush Tank Co.

### Seleção de equipamento

Sendo a pressão nos sistemas de coleta de gás dos digestores limitada a valores que raramente ultrapassam 0,125 a 0,150 m.c.a., e considerando-se a

FIG. 8.1

QUEIMADOR DE GÁS



necessidade de ser mantida uma pressão "residual" de 0,050 a 0,075  $\kappa$  c a para alimentação de caldeiras ou motores, conclui-se que os aparelhos de contrôles e de segurança devem oferecer uma resistência mínima à passagem do gás.

As perdas de carga geralmente toleradas nos medidores, cortadores de chamas, válvulas limitadoras de pressão e queimadores de excesso de gás, geralmente são da ordem de 1,25 cm. de coluna de água, por peça.

Com este critério, podem ser selecionados os tamanhos dos aparelhos:

Quadro 8.2- Tabela de seleção de equipamentos\*

	50 mm (2")	75 mm (3")	100 mm (4")	150 mm (6")
Cortadores de chamas .....	12 l/s	16 l/s	40 l/s	80 l/s
Válvulas limitadoras de pressão	25	55	100	220
Queimadores de gás	16	35	70	160

\*- Perda de carga máxima de 1,25 cm. c.a. (Dados da PFT).

O sistema de canalizações deverá ser projetado para que a perda de carga por escoamento seja compatível com as pressões disponíveis.

Se houver necessidade poderão ser instalados, no sistema, pequenos compressores para elevar a pressão ("boosters"). Estes aparelhos deverão ser obrigatoriamente precedidos de reguladores de pressão para assegurar carga positiva permanente nas canalizações de aspiração.

## 9- INSTALAÇÕES DE GÁS. SISTEMAS DE COLETA. CANALIZAÇÕES.

### 9.1- Instalações de gás

As estações de tratamento de esgotos com digestores fechados, qualquer que seja o seu tamanho ou importância, devem ser equipadas com instalações para o gás.

As instalações mais simples compreendem apenas os equipamentos essenciais de segurança e de descarte. As mais completas incluem todos os aparelhos necessários à utilização do gás em diferentes misteres.

Atualmente, em quase todas as estações de tratamento de esgotos de tamanho capaz de exigir e justificar uma operação adequada, é prevista a utilização dos gases.

De um modo geral, estando previsto o aproveitamento do gás, as instalações incluem:

- a- Sistema de coleta nos digestores;
- b- Aparelhos de segurança;
- c- Canalizações, válvulas, registros e peças especiais;
- d- Purgadores;
- e- Purificadores;
- f- Medidores;
- g- Reguladores de pressão;
- h- Compressores e "boosters";
- i- Gasômetros;
- j- Queimadores.

A coleta do gás para fins de aproveitamento tem sido economicamente vantajosa, não apenas nas grandes estações de tratamento de esgotos, como também em instalações menores, com operação adequada.

#### 9.2- Cuidados especiais

Além das precauções já mencionadas no capítulo anterior, devem ser considerados outros cuidados referentes ao projeto das instalações e aos seus equipamentos elétricos.

Todos os compartimentos de operação e controle, onde houver a possibilidade da presença de gás, devido a fugas acidentais ou escapamentos, deverão ser projetados com acesso livre para o exterior.

As canalizações de gás deverão ser cuidadosamente assentadas e mantidas permanentemente sob pressão, controlando-se qualquer possibilidade de vazamento.

Não são recomendados os dispositivos de segurança que funcionam com sêlo hídrico, pois a experiência tem indicado que a evaporação e a negligência podem possibilitar situações perigosas.

Os equipamentos de segurança instalados em cotas elevadas deverão ficar protegidos contra raios.

As instalações de maior importância deverão ser dotadas de aparelhos para determinação dos teores de  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$  no gás. A queda das porcentagens relativas a êsses componentes, em relação aos seus valores normais, determinará uma verificação das condições do sistema.

Os motores elétricos e chaves de partida, localizados nos compartimentos de controle de gás, deverão ser do tipo à prova de explosão.

As ferramentas empregadas em pontos contíguos aos digestores deverão ser à prova de centelhas.

### 9.3- Sistemas de coleta de gás

Várias são as modalidades de coleta de gás nas unidades de digestão, devendo ser adotada a forma mais conveniente em cada caso.

Nas estações de tratamento de esgotos com tanques Imhoff as câmaras de sedimentação servem como elementos de vedação, reduzindo-se o custo total do sistema. Neste caso, aproveitam-se as áreas destinadas à espuma para a liberação e pequena acumulação de gás, mediante cobertura adequada.

Nas instalações com digestores separados devem ser considerados os seguintes casos:

- 1- Digestores de cúpula fixa;
- 2- Digestores de cúpula flutuante.

No primeiro caso são indispensáveis cuidados especiais para evitar a formação de vácuo parcial, por ocasião das descargas de lodo, de maneira a impedir a entrada de ar. As seguintes disposições são usuais:

- 1.1- Digestor de cúpula fixa com uma ligação direta de gás para um digestor secundário com cúpula móvel;
- 1.2- Digestor de cúpula fixa com uma ligação direta de gás a um gasômetro de gravidade;
- 1.3- Digestor de cúpula fixa, com nível de lodo constante, mantido por bombas que são postas em funcionamento simultaneamente com as descargas de lodo.

Em qualquer dos três casos recomenda-se a instalação de válvulas de segurança para limitar a pressão e quebrar o vácuo, associadas a dispositivos de interseção de chamas.

Os digestores de cúpula flutuante constituem o tipo mais seguro, e mais conveniente, porém, são de custo relativamente elevado.

É por isso freqüente a adoção de digestores primários de cúpula fixa, diretamente ligados a unidades secundárias de cúpula flutuante.

Nos digestores de cúpula flutuante a tomada de gás é feita num zimbório na parte central da cúpula (Fig.11.2) O tópo deste dispositivo deve ficar pelo menos 1,20 m acima do nível máximo de lodo.

A canalização de tomada de gás deverá ter a sua extremidade superior livre do acesso de líquidos e da espuma.

O sistema de coleta de gás deverá compreender equipamentos de segurança e de controle, incluindo purgadores e corta-chamas.

No que diz respeito ao perigo devido ao vácuo parcial interno, os tanques Imhoff não apresentam problema porquanto a vazão do afluente é sempre superior à vazão de descarga dos lodos.

#### 9.4- Canalizações de gás

Como as pressões de trabalho nos sistemas de

coleta e condução de gás são baixas, os encanamentos devem ser projetados e dimensionados de modo a manter as perdas de carga abaixo de limites determinados pelas condições de uso do gás.

Freqüentemente, a carga aproveitável para vencer a resistência ao escoamento nas tubulações é inferior a 2,0 cm de coluna de água.

Nessas condições, o sistema de canalizações deve ser projetado com simplicidade e compacidade, evitando-se curvas e peças desnecessárias.

Tem sido constatado que as perdas de carga nas canalizações podem exceder ao dôbro dos valores teóricos inicialmente calculados, talvez devido à presença de umidade e impurezas, tais como, partículas arrastadas de lodo (17).

Pelas razões expostas, os diâmetros deverão ser liberalmente estabelecidos e as velocidades médias de escoamento serão mantidas aquém de limites relativamente baixos para condutos de gás.

O diâmetro mínimo admissível para essas canalizações é de 50 mm; várias normas americanas

prescrevem, entretanto, o diâmetro mínimo de 2 1/2 polegadas (Estados de Minnesota, Illinois, Texas e outros).

A velocidade média de escoamento deve ser mantida abaixo de 3,60 m/seg para impedir o arrastamento dos líquidos condensados nos interceptores e purgadores, para evitar danos aos medidores e aparelhos de segurança, e sobretudo para reduzir as perdas de carga.

As canalizações deverão ser assentadas com declividades nunca inferiores a 1% e preferivelmente mais elevadas, devendo ser instalados purgadores de líquido condensado nos pontos mais baixos.

Os condutos de coleta de gás deverão ser dimensionados para as vazões máximas de produção, ou seja, cerca de duas vezes a produção média antecipada.

O ferro fundido pode ser considerado um excelente material para as canalizações de gás.

## 10- USOS DO GÁS DE ESGOTOS - USOS PRIMÁRIOS

### 10.1- Modalidades de uso

Ao se considerarem os usos possíveis para o sub-produto que é o gás de esgotos, pode-se adotar a seguinte classificação conveniente:

#### 1- Usos primários

- 1.1- Produção de energia em motores fi  
xos;
- 1.2- Acionamento de veículos;
- 1.3- Fornecimento de gás combustível pa  
ra fins domésticos;
- 1.4- Aproveitamento em fornos indus  
triais;
- 1.5- Utilização em processos indus  
triais de síntese.

#### 2- Usos secundários

- 2.1- Aquecimento dos digestores;
- 2.2- Secagem de lodos;
- 2.3- Incineração de resíduos;
- 2.4- Calefação dos edifícios;

- 2.5- Serviços de laboratório e cozinha;
- 2.6- Iluminação.

### 3- Usos especiais

- 3.1- Agitação nos digestores;
- 3.2- Empregos militares.

### 4- Descarte

- 4.1- Lançamento na atmosfera;
- 4.2- Queima

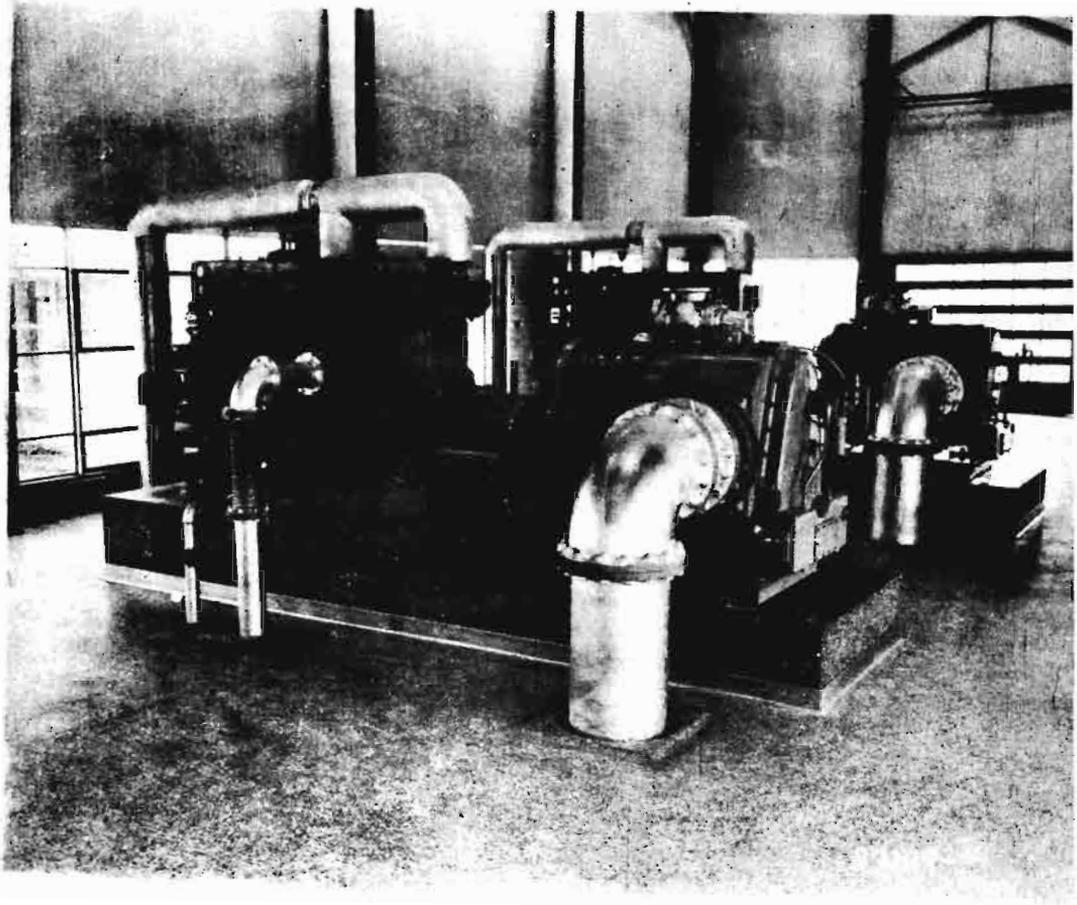
Freqüentemente êsses usos apresentam-se combinados, particularmente quando se enquadram nas duas categorias intermediárias.

Classificam-se entre os usos primários as modalidades de utilização que proporcionam benefício direto, sob forma de receita, para as estações de tratamento de esgotos.

### 10.2- Produção de energia em motores fixos

Atualmente pode-se considerar prática consolidada o aproveitamento do gás em motores de explosão.

A princípio foram utilizados motores de faísca elétrica adaptados ao novo combustível(Bir



mingham, Inglaterra, em 1.921, Plainfield, N.J., Estados Unidos, em 1.926).

Na década seguinte entraram em funcionamento os motores de combustão interna, de compressão elevada, especialmente projetados para o aproveitamento do metano. A grande instalação de Mogden, Inglaterra, com mais de 5.000 CV, foi iniciada em 1.935.

As dificuldades iniciais de aplicação de motores comuns ao gás de esgotos decorriam das próprias características do gás: temperaturas muito elevadas no escapamento, rendimentos muito baixos e potências inferiores às dos motores Diesel de construção semelhante.

Para remover essas dificuldades era indispensável aumentar os limites de compressão de 6:1 para valores muito mais elevados.

Entretanto, a cêrca de 8,5: 1 começavam a surgir os efeitos da "detonação", fenômeno dependente da qualidade do combustível e altamente nocivo para a própria máquina.

A "detonação" ("knocking") se caracteriza por choques sêcos, de sonoridade metálica peculiar, que se verificam no interior dos cilindros. Fenômeno ainda não perfeitamente explicado e atribuído a explosões parciais e antecipadas, que ocorrem na massa dos gases combustíveis, durante a sua compressão (14).

Para vencer esta dificuldade, a solução - que se apresentou consistiu em se alterarem, por artifício, as características do combustível: a inflamação passou a ser feita com injeção de uma pequena quantidade de óleo sob pressão elevada, feita na câmara de combustão, pouco antes do êmbolo atingir a posição mais elevada.

Isto permitiu elevar o limite de compressão até 12:1, ou mesmo mais, reduzindo-se a temperatura dos gases de escapamento e elevando-se o rendimento térmico dos motores.

Surgiram assim os motores a dois combustíveis ou "dual fuel", que podem funcionar com gás e óleo, em porcentagens variáveis.

A introdução e o aperfeiçoamento dos motores "dual fuel" constituem uma notável contribuição

ção da engenharia britânica. A primeira referência ao assunto, de caráter prático, foi feita por J. Riffkin, da Universidade de Birmingham, em 1.937 (32).

A iniciativa de produção de motores desse tipo deve-se a duas importantes organizações industriais inglesas: A National Gas Engine Co. Ltd. e a Harland e Wolff.

Em 1.941 foi concluída a reforma do primeiro motor a gás da instalação de Mogden, para funcionar com os dois combustíveis.

Desde então, inúmeros motores deste tipo vêm sendo aplicados em várias partes do mundo, com muitas vantagens, sobre os motores comuns:

- 1- Aumento de potência (da ordem de 20%);
- 2- Rendimento mais elevado e conseqüente redução no consumo de combustível (10 a 15%)
- 3- Temperaturas mais baixas no escapamento e em decorrência, maior proteção para as válvulas e cabeçotes dos cilindros;
- 4- Redução nos gastos da manutenção;
- 5- Facilidade de acionamento;

- 6- Maior flexibilidade de operação (possibilidade de substituição parcial ou total do gás pelo óleo);
- 7- Possibilidade de melhor aproveitamento das instalações antes de ser atingida a produção prevista de gás.

A mudança de um combustível para outro e a alteração da porcentagem de óleo aplicado podem ser feitas rapidamente sem necessidade de parar os motores, e sem alteração apreciável de velocidade.

Dentro de certos limites práticos pode-se usar qualquer relação de mistura entre os dois combustíveis.

Nos primeiros anos de emprêgo dos motores "dual fuel" a quantidade usual de óleo estava compreendida entre 10 e 15% do valor correspondente ao funcionamento com óleo.

Atualmente, devido aos aperfeiçoamentos alcançados, esse valor geralmente está entre 4 e 8%.

Outro grande aperfeiçoamento para os motores a gás veio com a introdução dos modelos superalimentados, nos quais a admissão do combustível é feita sob pressão de vários metros de coluna d'água.

Essa técnica foi introduzida logo após a Guerra Mundial\* e já se encontra bastante difundida, principalmente nos Estados Unidos.

Na prática, para se obter uma boa combustão nos motores "dual fuel", de aspiração normal, a mistura ar-combustível deve diferir da relação estequiométrica ideal, devendo ser determinada, em cada caso, durante a própria operação.

Esta condição limita a capacidade dos motores de dois combustíveis a valores inferiores aos que corresponderiam ao uso de óleo.

A experiência mostra que a alimentação do combustível gasoso sob pressão elevada possibilita maior flexibilidade na relação ar-combustível, o que constitui uma vantagem dos motores superalimentados.

---

\*- 2ª Guerra Mundial.

No quadro apresentado a seguir encontram-se indicados os consumos usuais nos motores a gás.

Quadro 10.2 A- Consumo de motores a gás. (A plena carga, ao nível do mar)

	Motor a gás (comum)	Dual Fuel asp.normal	Dual Fuel super-alim
Consumo de gás, Cal/CVh	2500-3150	1800-2500	1700-1800
Consumo de óleo, Cal/CVh	-	80- 160	80- 160
Rendimento mecânico	20%- 25%	25%- 35%	35%-37%
Consumo de gás, m <sup>3</sup> /CVh*	0,435-0,545	0,315-0,435	0,300-0,315

\*- Na base de 5.800 Cal/m<sup>3</sup>.

Os valores mais altos do rendimento mecânico sòmente são alcançados em instalações de grande capacidade, equipadas com máquinas de boa qualidade.

O rendimento dos motores funcionando com cargas inferiores às nominais cai, elevando-se o consumo: exemplo típico é dado por Wittwer (55):

Quadro 10.2 B- Variação do rendimento com a carga

<u>% carga</u>	<u>Consumo</u>	<u>Rendimento</u>
100 % (1/1)	2.500 Cal/CVh	25%
83% (5/6)	2.600 "	24%
67% (2/3)	2.800 "	22,5%
50% (1/2)	3.100 "	20,5%

Ao se avaliar as possibilidades de aproveitamento em uma estação de tratamento deve-se ter em mente que raramente os motores funcionarão a plena carga durante longos períodos e que as variações de carga provocam elevações de consumo.

Na grande instalação de Mogden, o rendimento médio global é de 28%.

Por outro lado, os dados apresentados correspondem ao funcionamento de motores novos, instalados ao nível do mar, sob temperaturas inferiores a 30°C e com umidade do ar abaixo de 15 mm (pressão de vapor). Para altitudes maiores deve-se levar em conta uma redução da ordem de 1%, para cada 100 metros.

O consumo de gás, o poder calorífico do

combustível e o rendimento do motor estão relacionados pela expressão de equivalência térmica:

$$\eta = \frac{75 \text{ kgm/s} \times 3.600 \text{ s/h}}{V \times 427 \text{ kgm/Cal} \times C} = \frac{632}{V.C}$$

$\eta$  = Rendimento mecânico do motor

V = Volume do gás consumido por CV,  
m<sup>3</sup>/h.

C = Poder calorífico inferior\* do gás,  
Kcal/m<sup>3</sup>.

Na melhor das hipóteses o aproveitamento no eixo dos motores corresponde ao rendimento de cerca de 35%.

O excesso de calor produzido pelas explosões no interior dos cilindros deve ser continuamente retirado do motor, para se evitar que a elevação de temperatura além de certos limites, possa causar a decomposição do lubrificante.

A água de resfriamento, que deve entrar no motor com uma temperatura entre 45° e 55°(valores máximos), geralmente sai com 60-80°C.

Os gases de escapamento deixam o "manifold" com temperaturas elevadas: 450 a 500°C,  
\*- Como o calor latente do vapor d'água não é utilizado, os cálculos baseiam-se sempre no poder calorífico inferior.

podendo ser resfriados economicamente até cerca de 200°C.

O balanço térmico de um motor a gás sugere o aproveitamento dessas duas "fontes" de calor, para aquecimento de água:

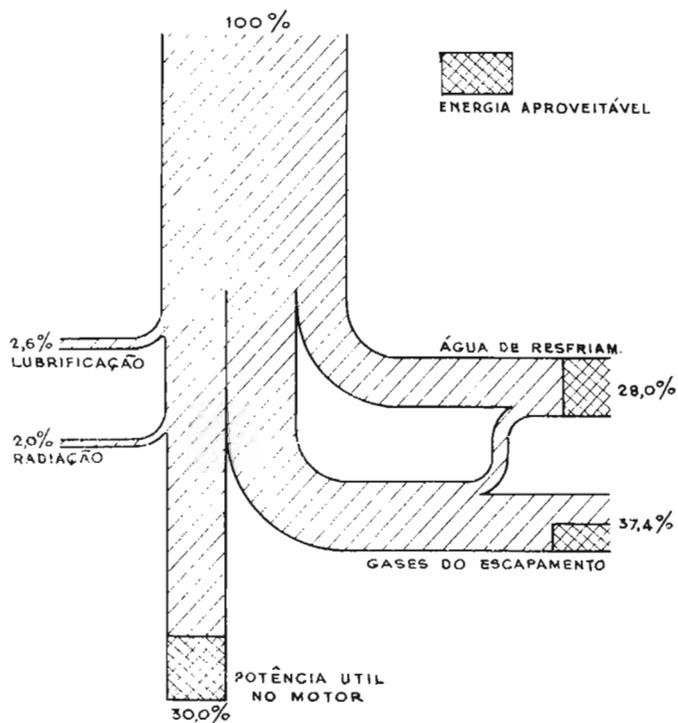
Quadro 10.2 C- Balanço térmico dos motores "Dual Fuel"

		Aproveitamento e recuperação
Calorias fornecidas	100%	
Trabalho útil (no eixo)	25%-35% (30,0%)	25%-35% (30%)
Perdas na água de resfriamento	25%-35% (30,0%)	20%-30% (23,0%)
Perdas nos gases de escap.	20%-40% (30,0%)	15%-25% (20,0%)
Outras perdas**	10%	

\*- Aspiração normal.

\*\* - Óleo lubrificante, radiação e atritos.

Com aproveitamento em todas as partes, chega-se a um rendimento orgânico de 60%-90%, podendo-se concluir que os motores a gás se comportam como verdadeiras caldeiras para aquecimento de água.



MOTORES A GÁS:  
UTILIZAÇÃO DE ENERGIA

O sistema de resfriamento dos motores, geralmente compreende um circuito fechado com um trocador de calor e um tanque de compensação.

A água de resfriamento, admitida na parte inferior do motor passa sob os rolamentos principais, sobe pelas colunas até a parte superior dos cilindros, resfria a tubulação de escapamento e sai para o cambiador de calor.

Para a recuperação do calor dos gases de escapamento são empregados trocadores de calor, do tipo tubular, com aquecimento da água, pela passagem dos gases quentes.

Em instalações deste tipo, já se tem conseguido recuperar 50% ou até mesmo mais, do calor desenvolvido pela combustão na água de resfriamento e nos gases de escapamento.

A água aquecida geralmente é utilizada para calefação de edifícios (nos climas frios) e para aquecimento dos digestores.

Os motores a gás são fabricados em série, desde 60 até mais de 2.000 CV, com velocidades que variam desde 200 até 1.500 rotações por minuto:

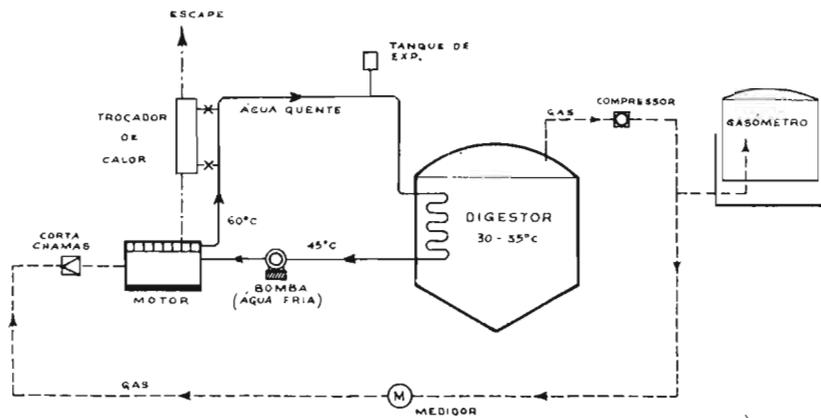


FIG. 10.2

**Quadro 10.2 D- Principais características mecânicas dos motores a gás**

<b>Fabri- cantes</b>	<b>R.P.M</b>	<b>Nº de cil.</b>	<b>Diâm. Cilindros pol.</b>	<b>Curso pol.</b>	<b>Potência H-P</b>
English Electric	450-1500	3-16	6-15	8-20	148-2104
Harland & Wolff*	333-500	5-8	10-16	14-24	340-1920
National*	333-750	3-8	9-17	12-21 1/2	156-2248
Climax**	500-900	6-12	6 1/8-7 1/2	7	60-600
Enterpri- se **	200-1000	3-16	8-17	10-21	73-6162
Worthin- gton**	360-600	5-8	10 3/4-16	14-20	345-1688

\* - Inglêses

\*\* - N. Americanos

Keep, um dos engenheiros de grande experiência na manutenção e operação de motores a gás, é de opinião que os resultados satisfatórios e econômicos são obtidos em motores de 400 CV ou maiores, funcionando com baixa rotação, e que em face dos atuais custos iniciais elevados, as instalações para produção de energia deixam de ser vantajosas para populações servidas inferiores a 50.000 habitantes (32).

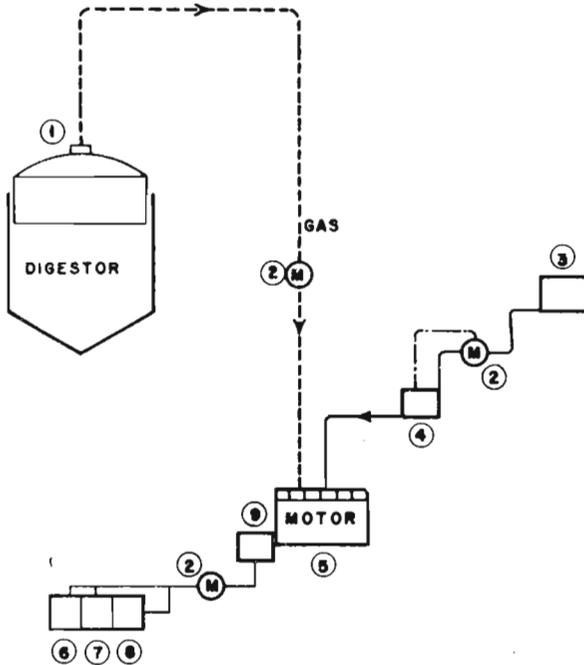
A velocidade dos êmbolos não deve exceder 7,5 m/seg e preferivelmente deverá ser mantida abaixo de 6 m/seg.

O consumo de óleo lubrificante varia proporcionalmente à potência, podendo ser estimado entre 0,001 e 0,003 litro/CV hora.

Os equipamentos complementares de uma instalação de motores a gás compreendem:

- 1- Equipamento de partida: Compressores de ar e tanques de pressão ou acumuladores elétricos (êstes últimos somente para unidades de pequena potência);
- 2- Trocadores de calor: Para reaproveitamento parcial do calor contido nos gases de escapamento;
- 3- Bombas: Para a recirculação de água no sistema de resfriamento e aquecimento dos digestores;
- 4- Sistema de alimentação de gás;
- 5- Sistema de alimentação de óleo combustível - vel;

FIG. 10.3



ESQUEMA DE INSTALAÇÃO DE MOTOR "DUAL FUEL"

- ① - COLETOR DE GAS
- ② - MEDIDORES
- ③ - DEPÓSITO DE ÓLEO
- ④ - TANQUE DE CONSUMO DIÁRIO DE ÓLEO
- ⑤ - MOTOR
- ⑥ - DEPÓSITO DE ÓLEO LUBRIFICANTE SUJO
- ⑦ - DEPÓSITO DE ÓLEO LUBRIFICANTE PURIFICADO
- ⑧ - DEPÓSITO DE ÓLEO LUBRIFICANTE NOVO
- ⑨ - TANQUE DE ALIMENTAÇÃO DE ÓLEO LUBRIFICANTE

- 6- Sistema de alimentação de óleo lubrificante;
- 7- Quadro elétrico;
- 8- Ponte rolante e acessórios diversos.

Nas estações de tratamento de esgotos os motores a gás geralmente são acoplados a:

- 1- Compressores de ar;
- 2- Bombas centrifugas;
- 3- Alternadores.

Nas instalações de lodos ativados, do tipo de ar difuso, o acionamento dos compressores de ar apresenta a vantagem de grande flexibilidade em face de possíveis variações na quantidade de gás disponível.

O emprêgo de motores a gás nas instalações de recalque possibilita a adoção de bombas de velocidade e descarga variáveis, o que também é vantajoso.

Sob o aspecto de flexibilidade a terceira aplicação é a menos conveniente, porque os alternadores exigem uma operação a velocidade cons

tante, requerendo consumos de gás mais elevados nas ocasiões em que a demanda cair abaixo do valor nominal (2).

Uma relação de 107 motores fornecidos pela Companhia Worthington desde 1.934 até 1.950, apresenta as seguintes porcentagens relativas à aplicação:

Compressores de ar .....	45	(42%)
Alternadores .....	43	(40%)
Compressores e alternadores.	4	(4%)
Bombas .....	15	(14%)

As maiores instalações do mundo de motores a gás estão relacionadas no quadro 10.2 B :

Quadro 10.2 E- Grandes instalações de motores a gás\*

Estação	Nº de motor	Pot. total H.P.	Aplicação	Observs.
Hyperion, Los Angeles	10	16880	Alt. & Comp	1948-Worth.
London County	10	11360	Alt.	Eng. El.
Manchester	6	10500	Alt.	Eng. El.
Cul's Head, N.Y.	6	9300	-	-
Mcgden, Inglat.	11	7100	Alt. & Comp	Harland & Wolff
Point of Ayr	5	5500	Alt.	Eng. El.
Colne Valley	6	5196	Alt.	1951 National
Jamaica, N. Y.	3	4320	Alt.	1940-Worth.
Tallmans Island, N.Y.	8	4050	Bomb & Comp	1937-Worth.
Auckland, N.Z.	4	4000	Alt.	1958-National
26th Ward, N.Y.	3	3900	Alt.	1945
Humber Valley, Canada	5	3760	Alt. & Comp	1958-National
Hunts' Point, N.Y.	4	3600	-	-
Fort Huachs, Arizona	3	3000	-	-
Ashbridges Bay, Canada	2	2970	Alt.	1958-National
Nassau C., N.Y.	5	2925	Alt. & Comp	1949-Worth.
Nut Island, Mass.	5	2914	Alt. & Comp	1946-Worth.
Coney Island, N.Y.	3	2760	Alt.	1940-Worth.
Columbus, Ohio	3	2250	Alt.	-
Crawley, Inglat.	3	2160	Alt.	1957-National

\*- Lista parcial. Instalações com 2.000 HP ou mais.

Para que seja mantida nas instalações de motores a gás um elevado índice de aproveitamento térnico, a água de resfriamento das máquinas é sempre utilizada para aquecimento dos digestores. O calor assim reaproveitado, geralmente é suficiente para essa finalidade (20).

Os motores a gás têm uma vida econômica de cerca de 20 anos, exigindo revisões completas, após 8.500 horas de funcionamento ou, 2 anos de trabalho, na base de 12 horas de serviço por dia.

A presença de  $H_2S$  em teores relativamente elevados, poderá, entretanto, abreviar extraordináriamente a sua vida útil.

O gás sulfídrico tem uma grande afinidade pelos metais, com os quais se combina para formar sulfuretos. Na presença de ar úmido o  $H_2S$  pode constituir uma solução fraca de  $H_2SO_4$ , que ataca os metais, causando a sua corrosão.

Os resíduos de metal corroído podem atingir os anéis de segmento dos motores obstruindo-os e provocando novas fontes de atrito. O óleo lubrifi-

cante torna-se sujo e as válvulas do motor movimentam-se com dificuldade (3).

Recomenda -se, pois, o contrôlo sistemático dessa impureza.

A tendência que já se esboça para o futuro é a de emprêgo crescente de turbinas a gás, em substituição aos atuais motores de combustão interna.

A grande desvantagem das turbinas, atualmente, encontra-se no seu rendimento relativamente baixo (15 - 22%). Entretanto, elas são mais compactas e muito mais leves, requerendo bases e fundações mais econômicas e menores áreas de instalação.

### 10.3- Acionamento de veículos

Esta modalidade de emprêgo tem sido adotada em várias cidades, principalmente européias e especialmente durante a guerra, quando era precário o suprimento de derivados do petróleo.

Entre essas cidades incluíam-se Londres, Milão, Estocolmo, Joannesburg, Berlin, Stuttgart,

Halle, Essen, Munich e outras, sendo que, em Lon  
dres, todo o gás excedente da grande estação de  
tratamento de esgotos de Mogden, era utilizado pa  
ra movimentar caminhões da limpeza pública urba-  
na.

Durante os últimos anos da conflagraçã o  
mundial os ônibus de emprêsas particulares de Es  
tocolmo funcionaram com gás de esgotos.

Na Itália êsse combustível foi utilizado  
experimentalmente para movimentar uma locomotiva  
(42).

Na Europa dezenas de milhares de veículos  
são acionados a gás, empregando além do gás de  
esgotos, o gás natural e o gás de coque. Em seu  
número de novembro de 1.942, a revista brasilei-  
ra "Química Industrial", divulgou os seguintes  
dados estatísticos referentes ao ano de 1.941:

Alemanha .....	75.000	veículos
Itália .....	20.000	"
Inglaterra .....	10.000	"
Suécia .....	1.367	"

Para efeito comparativo com a gasolina po  
de-se considerar a equivalência calorífica:

Quadro 10.3- Quantidades equivalentes a 1 m<sup>3</sup> de gás\*

Combustível	Poder calorífico	Quantidade equivalente a 1 m <sup>3</sup> de gás
Butana	5.900 Kgcál. m <sup>3</sup>	1.230 litros
Gás natural	7.950 "	910 "
Gasolina	7.250 Kgcál/litro	1,0 "
Óleo Diesel	8.200 "	0,9 "
Óleo combustível	10.500 "	0,7 "

\*- Gás de esgotos lavado, com 90% de CH<sub>4</sub> e 7.250 Kcal/m<sup>3</sup>.

Nas condições de emprêgo, os resultados podem diferir um pouco dos valores apresentados, em consequência da alteração de características do combustível.

Experiências feitas em Stuttgart mostraram praticamente que 900 litros de metano realizam o trabalho equivalente ao consumo de 1 litro de gasolina nos veículos a motor. Valor quase idêntico foi adotado pelo Dr. Imhoff em um estudo feito sôbre o assunto (26).

A adaptação do veículo não oferece dificuldades: o maior problema está no transporte do carbu

rante.

A utilização do gás de esgotos para esta finalidade requer lavagem prévia, para redução do teor de  $\text{CO}_2$  a remoção do  $\text{H}_2\text{S}$  eventualmente presente.

O gás pode ser conduzido a baixa pressão, em balões de forma conveniente, dispostos sobre o teto dos veículos. Esse sistema somente tem sido adotado na Alemanha, e principalmente para veículos rurais.

Geralmente, o gás é comprimido em reservatórios até cerca de 350 atmosferas.

Um sistema que lembra os pontos de fornecimento de gasolina possibilita o suprimento de gás, a 200 atmosferas, às garrafas cilíndricas ou aos bujões de aço, instalados nos veículos.

Os cilindros normalmente adotados nas instalações alemãs têm 0,23 m de diâmetro, 1,70 m de comprimento e quando vazios pesam 78 Kg.

A 200 atmosferas cada cilindro comporta a quantidade correspondente a 12 m<sup>3</sup> de gás,

o que é equivalente a cêrca de 13 litros de gasolina.

O inconveniente que não pode ser removido decorre do elevado pêsso próprio dos cilindros de pressão.

Essa desvantagem não seria considerável no caso de caminhões, porém a tendência moderna é a de se empregar cada vez mais, motores Diesel nesses veículos de carga.

#### 10.4- Fornecimento de gás combustível para fins domésticos

O fornecimento de gás para utilização em fogões, geladeiras e aparelhos de aquecimento de água e do ambiente, pode ser feito de duas maneiras distintas:

##### (a) Gás engarrafado

O engarrafamento do gás para permitir o seu transporte exige pressões elevadas, geralmente - compreendidas entre 100 e 300 atmosferas para maior aproveitamento do volume útil dos recipientes.

Empregam-se cilindros de aço semelhantes aos que são usados para cloro, acetileno e oxigênio, ou bujões, tais como, os de gás procedente das refinarias de petróleo.

As características térmicas e dinâmicas do metano não favorecem este sistema de fornecimento e, geralmente, o gás de esgotos não apresenta condições para competir com os derivados do petróleo.

(b) Distribuição em canalizações

O aproveitamento do gás para consumo doméstico, em rêsdes de distribuição foi praticado pela primeira vez há cêrca de 50 anos.

De lá para cá várias cidades, principalmente na Alemanha, vêm sendo parcialmente abastecidas com gás de esgotos, vendido às companhias de gás.

Exemplo típico é dado pela estação de tratamento de esgotos de Essen-Rellinghausen (50.000 habitantes) que, desde 1.923, passou a vender gás para a Companhia de Gás de Essen.

Nos Estados Unidos as cidades de Des Moines (Iowa) e Waterloo (no mesmo Estado) firmaram contra

tos com os serviços locais para venda do excesso de gás. Somente no ano fiscal de 1/8/1.940 a 31/7/1.941 a primeira cidade, com uma população de 160.000 habitantes, recebeu US\$ 18.472,00, pela venda do gás disponível (17).

Duas modalidades devem ser examinadas:

- (1) Fornecimento feito independentemente de outro serviço de gás, através de rede própria;
- (2) Uso do gás em uma rede distribuidora - existente e alimentada com gás de outra fonte.

No primeiro caso, apenas se procede à remoção do  $H_2S$ , antes de se comprimir o gás nos gasômetros de distribuição.

Na segunda hipótese, apresentam-se problemas decorrentes das diferenças de densidades, poderes caloríficos e condições de queima entre os gases.

Além da exigência de purificação, com a remoção de  $CO_2$  (redução de volume e de densidade) e  $H_2S$ , poderá se tornar necessária a reforma ou o empobrecimento do gás.

Considerando-se que a produção de gás de esgotos, de um modo geral, corresponde apenas a cerca de 10% das necessidades de gás de uma comunidade, uma solução interessante consiste na entrega do gás à própria usina produtora da cidade, onde ele poderá ser misturado e diluído em maior massa, ajustando-se assim às características do produto a ser distribuído.

Desde que a usina local não esteja a uma distância muito grande da estação de tratamento, essa solução poderá apresentar vantagens práticas e econômicas pelo fato de dispensar investimentos adicionais nas instalações de reforma ou empobrecimento.

Se, entretanto, as condições locais exigirem a introdução do gás de esgotos em pontos extremos da rede distribuidora, deverão ser previstas as instalações adicionais para o ajustamento do poder calorífico e da densidade do gás de esgotos.

Para este fim, poderão ser consideradas, após a remoção do CO<sub>2</sub>, as alternativas seguintes:

- a- Produção de gás azul, em instalação própria, para a mistura com o gás de esgotos;

b- Reforma parcial do gás de esgotos pelo processo catalítico.

Em ambos os casos aumenta-se o volume do gás a ser fornecido: Na primeira hipótese devido à produção adicional de gás azul, de poder calorífico mais baixo, e no segundo, em consequência da "quebra" do gás durante o processo.

A produção de gás azul, devido aos problemas de operação que se apresentam, somente se justifica para grandes volumes de gás.

As instalações de reforma catalítica, de operação relativamente simples e pouco dispendiosa, exigem uma aplicação de capital considerável.

As canalizações distribuidoras geralmente são de ferro fundido, com juntas de chumbo e diâmetro mínimo igual a 100 mm.

A pressão nos sistemas de distribuição de gás é relativamente baixa, raramente excedendo 5 mca.

Os compressores de gás utilizados no sistema podem ser:

- (1) Do tipo de pistão:
  - i - de simples efeito;
  - ii- de efeito duplo.
- (2) Do tipo rotativo;
- (3) Do tipo centrífugo.

#### 10.5- Aproveitamento em fornos industriais

O aproveitamento do gás de esgotos, como combustível, em estabelecimentos industriais, é práticaável somente em casos especiais, condicionados à proximidade de instalações fabris, eventualmente interessadas nessa utilização.

Em fornos industriais usualmente se emprega óleo combustível com 10.500 Cal/Kg. A utilização de gás de esgotos para a mesma finalidade exige a substituição dos maçaricos, o que tècnicamente não oferece dificuldades.

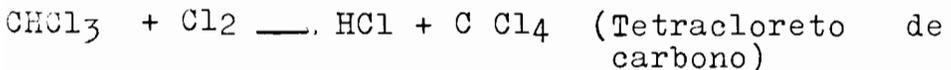
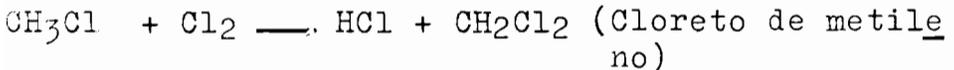
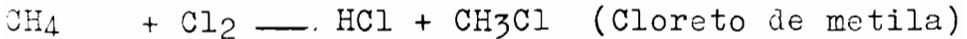
No sentido de interessar o industrial ao uso do novo combustível, é indispensável assegurar condições de fornecimento compatíveis com a utilização

industrial durante um determinado período de con  
trato, assim como estabelecer um preço que ofere  
ça pequena vantagem sôbre o custo do óleo para o  
mesmo fim.

#### 10.6- Utilização em processos industriais de sín tese

Do metano podem ser derivadas várias subs-  
tâncias de valor industrial, incluindo álcoois,  
aldeídos, ácidos, cloretos etc.

O metano reage com o cloro produzindo uma  
série de compostos clorados importantes:



O primeiro composto (cloreto de metila) ,  
por sua vez, constitui o têrmo intermediário da  
transformação do metano em álcool metílico, em  
etana, em álcool etílico e em ácido acético.

O álcool metílico (metanol),  $\text{CH}_3\text{OH}$ , foi descoberto em 1.661 por Boyle. A sua síntese, a par tir de diversos compostos, foi feita em 1.858, por Berthelot.

Além dos compostos mencionados, pode-se também produzir o negro de fumo, pela queima do me tano.

A importância de compostos, tais como, o clorofórmio para a medicina, o tetracloreto de carbono para a indústria, e outros, não precisa ser ressaltada.

## 11- USOS SECUNDÁRIOS, USOS ESPECIAIS E DESCARTES

Consideramos aplicações secundárias aquelas que não trazem uma compensação direta, sob a forma de receita, para as estações de tratamento de esgotos.

### 11.1- Aquecimento dos digestores

Conforme o que já foi indicado, a temperatura é um importante fator no fenômeno da digestão anaeróbia: A experiência mostra que as velocidades de reação e de produção do gás elevam-se com o aquecimento dos lodos em decomposição.

Para que seja mantida uma temperatura conveniente nos digestores deverá ser fornecida uma quantidade de calor suficiente para:

- (1) Compensar as perdas através das paredes, do fundo e da cobertura dos tanques;
- (2) Elevar a temperatura dos lodos frescos adicionados;
- (3) Cobrir as perdas no sistema de aquecimento.

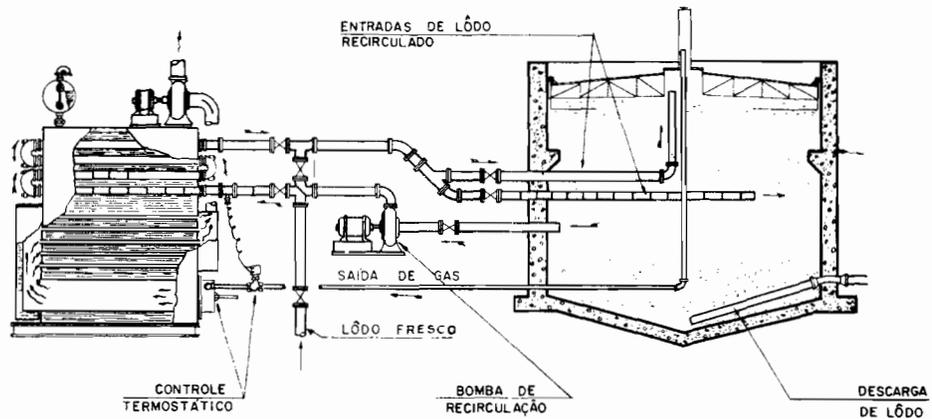
Dois sistemas principais são empregados para o aquecimento dos lodos:

- 1- Aquecimento interno nos digestores, por meio de serpentinas;
- 2- Aquecimento externo do lodo recirculado, em trocadores de calor.

No primeiro caso emprega-se água quente a cerca de 60°C, tendo sido constatado que temperaturas mais elevadas podem chamuscar o lodo, causando a formação de crostas aderentes às paredes das canalizações. Essa acumulação de lodo seco prejudica a transmissão do calor das canalizações para a massa de lodos em digestão.

O aquecimento em aparelhos externos requer a retirada e o retorno do lodo, em um sistema fechado, com o emprêgo de bombas (fig.1.2).

Nas instalações equipadas com motores a gás aproveita-se a água de resfriamento e o calor do gás de escapamento para aquecimento dos digestores. A quantidade de calor assim reaproveitada, geralmente é suficiente para as necessidades.



AQUECIMENTO DE LODO

Nas estações de tratamento que não utilizam o gás em motores, o aquecimento é feito com o emprego de caldeiras especiais, alimentadas com gás ou com óleo.

A quantidade de gás necessária para essa finalidade, geralmente está compreendida entre 25 e 45% da quantidade de gás produzido.

As caldeiras e trocadores de calor são fabricados em série desde a capacidade de 25.000 até cerca de 400.000 Kcal/hora.

O aquecimento dos digestores constitui atualmente a utilização mais comum dos gases de esgotos (39).

#### 11.2- Secagem de lodos e incineração de resíduos

A secagem térmica dos lodos de esgotos até cerca de 10% de umidade é feita nas instalações destinadas a aproveitá-los industrialmente.

Essa operação constitui também a fase de preparação dos lodos para a sua incineração.

Dois tipos de secadores são usualmente adotados:

- (a) Fornos rotativos semelhantes aos que são utilizados na indústria do cimento;
- (b) Secadores rápidos equipados com ciclones.

As instalações podem ser projetadas para fazer a secagem dos lodos até que seja obtido um baixo teor de umidade e, sempre que houver conveniência, para prosseguir até a queima completa do material.

Para economia térmica do processo, usualmente se procede previamente à secagem parcial dos lodos em filtros à vácuo.

A secagem dos lodos por aquecimento, apresenta a grande vantagem sanitária de destruição de ovos de vermes.

Os lodos não digeridos, após a secagem mecânica, apresentam condições próprias para serem queimados, sem necessidade permanente de combustível auxiliar.

Os lodos digeridos, entretanto, não dispensam uma fonte de calor para a sua incineração.

O gás de esgotos é o combustível mais indicado para promover a secagem ou a queima dos lodos.

Além da incineração dos lodos, pode-se considerar também, a queima do material retido nas grades, da espuma e do material retirado das caixas de gordura e dos tanques de remoção de óleo.

O rendimento térmico dos aparelhos de secagem e incineração, geralmente, está compreendido entre 45 e 70% (19).

### 11.3- Utilização nos edifícios das estações de tratamento.

Nas estações de tratamento de esgotos o gás poderá ser aproveitado para finalidades menos importantes, tais como:

- Calefação dos edifícios (nas regiões de clima frio);
- Serviços de laboratório (alimentação de bicos de Bunsen, estufas, aquecedores, fornos etc);
- Funcionamento de refrigeradores;
- Serviços de cozinha (alimentação de fogões);
- Iluminação de áreas livres e pavilhões.

Salvo casos especiais, a quantidade de gás consumida nessas aplicações corresponde a uma pequena porcentagem da produção total.

#### 11.4- Usos especiais e descarte

Infelizmente, o metano tem uma temperatura crítica extremamente baixa, que dificulta a sua liquefação.

Não obstante, a firma especializada "Constock International Methane Ltd." construiu, em 1.956, a primeira instalação industrial de liquefação, operada a  $-162^{\circ}\text{C}$  e funcionando à pressão atmosférica.

Foram construídos dois depósitos para metano líquido, um na localidade americana de Lake Charles (Luisiana) e outro em Londres.

O navio-tanque "Methane Pioneer" fez a primeira viagem em 1.959, transportando para Londres 32.000 barrís de metano líquido.

Essa iniciativa pode ser considerada uma verdadeira revolução no mercado dos combustíveis líquidos (52).

Modernamente os gases de esgotos têm sido utilizados para promover a mistura intensa na massa de lodos em digestão, mediante o processo de recirculação.

Para êsse fim o gás é injetado sob pressão na parte inferior dos digestores.

A recente técnica da digestão acelerada ("high rate digestion") baseia-se na mistura contínua e completa de todo o material em digestão.

Com essa mistura são alcançados três objetivos:

- a- os alimentos ficam distribuídos uniformemente;
- b- os organismos ativos são mantidos em contato permanente com os alimentos disponíveis;
- c- as substâncias residuárias e os produtos inibitórios são diluídos em toda a massa, mantendo-se em concentrações toleráveis\*.

---

\*- "Fundamental Considerations in High Rate Digestion", C.N. Sawyer e J.S. Grumbling, Journal of the Sanitary Engineering Division, Vol. 86, Nº SA2, Part 1.49 (março 1.960).

Com essas condições mais vantajosas, o processo biológico de decomposição torna-se mais eficiente, permitindo reduções substanciais no período de detenção, possibilitando, conseqüentemente, consideráveis economias estruturais.

É interessante mencionar que, durante a última Guerra Mundial os gases de esgotos foram utilizados para a fabricação de bombas incendiárias. Foi devido à essa utilização para fins militares, que a grande estação depuradora inglesa de Mogden (Londres), foi bombardeada pelos alemães.

Por menor que seja uma estação de tratamento de esgotos, e mesmo que não tenha sido prevista a utilização do gás, merecem atenção especial as condições de segurança da instalação: O gás não aproveitado de verá ser convenientemente afastado e queimado.

O emprêgo de queimadores de gás oferece maior segurança do que os sistemas de descarga na atmosfera.

As capacidades nominais dos queimadores de fabricação da P.F.T., para perdas de carga de 12,5mmca são as seguintes:

Coluna de alimentação	m <sup>3</sup> de gás/dia
50 mm (2")	1.350
75 mm (3")	3.050
100 mm (4")	6.100
150 mm (6")	13.500

## 12- ESTUDO ECONÔMICO: SOLUÇÃO PARA SÃO PAULO

### 12.1- Considerações preliminares

Em 1.943 Jesus Netto assim apreciava a questão do aproveitamento do gás:

"Uma instalação de tratamento de esgotos não é uma indústria, da qual se pretende auferir lucros imaginários: é obra de higiene e saneamento, e como tal deve ser orientada na sua construção. Não quer isto dizer, entretanto, que se despreze o valor intrínseco de certos subprodutos do tratamento. O seu aproveitamento entra obrigatoriamente na economia das modernas estações de tratamento de esgotos"(29)

Em vista das múltiplas possibilidades de aproveitamento do gás, deve-se fazer para cada caso, um estudo comparativo técnico e econômico, no qual deverão ser consideradas as condições locais, o custo dos equipamentos e o valor das utilidades.

A respeito da instalação de motores a gás para a produção de energia elétrica, encontra-se a se-

guinte observação feita pelo Eng<sup>o</sup> Wittwer (55):

"Deve-se assinalar que a única justificativa para a aplicação de capital em instalações destinadas à produção de força em substituição ao fornecimento de energia externa, baseia-se na economia real a ser obtida. As considerações a favor ou contra instalações dessa natureza devem ser feitas em bases financeiras, uma vez que a produção de energia própria não traz benefícios para a operação ou para os resultados das estações de tratamento de esgotos".

Um problema econômico dessa natureza apresentou-se recentemente com a operação da Estação de Tratamento de Esgotos de Vila Leopoldina, nesta Capital, cuja produção de gás já excede 10.000 m<sup>3</sup>/dia, devendo atingir a estimativa de 14.700 m<sup>3</sup>/dia, com o aquecimento dos digestores a 32°C.

A produção de gás prevista para o ano de 1.975, nessa Estação, é de 17.500 m<sup>3</sup> diários, correspondendo a cerca de 19 litros por pessoa servida.

Os engenheiros projetistas da Estação de Tratamento de Esgotos de Vila Leopoldina especificaram o aquecimento dos lodos em unidade externa, aproveitando uma parte da produção de gás para essa finalidade. Inicialmente poderão ser consumidos na caldeira 4.100 m<sup>3</sup>/dia, quantidade que se elevará para 6.000 m<sup>3</sup>/dia ao fim de 15 anos, com o tratamento primário.

Após uma investigação preliminar das condições locais foi iniciado um estudo econômico das três soluções mais indicadas:

- 1- Produção de energia elétrica;
- 2- Utilização em fornos industriais;
- 3- Venda à Companhia de Gás para aproveitamento na rede pública.

Foi admitido o tratamento primário dos esgotos até o ano de 1.975 (hipótese mais desfavorável).

## 12.2- Produção de energia elétrica

Para 1.975 a produção de gás foi estimada em 17.500 m<sup>3</sup>/dia, ou seja, 730 m<sup>3</sup>/hora. Considerando-se o aproveitamento de 85% da produção média diá

ria, e admitindo-se o consumo de 0,4 m<sup>3</sup>/CVh, encontra-se:

$$\frac{0,85 \times 730}{0,4} = 1.550 \text{ CV}$$

A produção inicial de 14.700 m<sup>3</sup>/dia corresponderia, nas mesmas condições, a 1.300 CV.

Podiriam ser instalados três motores, a dois combustíveis, cada um de 775 CV, sendo uma unidade de reserva.

Esses motores seriam diretamente acoplados a alternadores de 550 KW, com o fator de potência de 0,8.

Uma estimativa de orçamento para a instalação completa, aos preços atuais, compreenderia:

3 grupos motores-alternadores:

US\$ 330.000,00 ..... Cr\$ 82.500.000,00

Painéis elétricos

US\$ 10.000,00 ..... Cr\$ 2.500.000,00

Accessórios

US\$ 7.500,00 ..... Cr\$ 1.500.000,00

Ponte rolante ..... Cr\$ 3.000.000,00

Gasômetro (3.000 m<sup>3</sup>) ..... Cr\$ 12.000.000,00

Montagem das instalações .. Cr\$ 10.000.000,00

Pavilhão das máquinas

(10,00 x 15,00) ..... Cr\$ 2.250.000,00

total

Cr\$ 117.750.000,00

As despesas previstas, de operação, são as seguintes:

Pessoal (por mês)

3 operadores de máquinas.....	Cr\$	36.000,00
2 auxiliares .....	Cr\$	16.000,00
1 mecânico .....	Cr\$	15.000,00
1 eletricista.....	Cr\$	15.000,00

Material

Óleo combustível (auxiliar)*		
0,013 Kg x 1.550 x 24 x 30x\$4,00~	Cr\$	58.000,00
Óleo lubrificante(0,002 litro/CVh)		
0,002 x 1.550 x 24 x 30 x \$4,00~	Cr\$	90.000,00

Manutenção

Peças e reparos.....	~ Cr\$	150.000,00
Soma	Cr\$	380.000,00
Administração 10%		38.000,00
Amortização, 20 anos - 11%	~ Cr\$	1.174.000,00
\$ 113.750.000,00 x 0,01032		
Total	Cr\$	1.592.000,00

\*- Na base de 7% do consumo total de óleo (cêrca de 0,180 Kg/CVh).

A produção mensal de energia poderia atingir:

$$2 \times 550 \times 24 \times 30 = 792.000 \text{ kwh}$$

O valor por kwh resultaria igual a

$$\frac{\text{Cr\$ } 1.592.000,00}{792.000} \cong \text{Cr\$ } 2,00$$

isto se fôr atribuído valor nulo para o gás consumido.

Considerando-se que o custo médio de energia elétrica fornecida à Estação de Tratamento de Esgotos de Vila Leopoldina é inferior a Cr\$ 0,50/kwh, conclui-se que esta modalidade de emprêgo do gás não é vantajosa.

Uma investigação semelhante feita há alguns anos, quando se estudava o destino dos esgotos de Santos e São Vicente, levou à mesma conclusão.

Em nosso meio, o custo relativamente baixo da energia hidro-elétrica e o preço bastante elevado dos motores e das peças de reposição não estimulam economicamente essa forma de aproveitamento.

Em países altamente industrializados algumas instalações têm produzido energia com um custo inferior ao da eletricidade, fornecida por fontes externas.

Na instalação de Mogden, Inglaterra, o custo de operação em 1.957/58, por kwh, foi:

Pessoal.....	0,109	pence	(Cr\$ 0,22)
Óleo combustível..	0,057	"	(Cr\$ 0,11)
Óleo lubrificante.	0,021	"	(Cr\$ 0,04)
Materiais diversos	0,011	"	(Cr\$ 0,02)
Peças e reparos ..	0,207	"	(Cr\$ 0,41)
Adminis. e amortiz.	0,338	"	(Cr\$ 0,68)
			<hr/>
Totais	0,743	"	(Cr\$ 1,48)/kwh

Na Estação de Tratamento de Owls Head, Nova Iorque, o valor médio do kwh produzido em 1.955, aproximou-se de US\$ 0,009, ou seja, praticamente, Cr\$ 1,80, em nossa moeda.

Esses custos, apesar de não levarem em conta o valor do gás consumido, podem ser considerados elevados em relação às tarifas nacionais de energia elétrica, para consumo industrial.

### 12.3- Utilização em fornos industriais

Outra possibilidade para o aproveitamento econômico do gás produzido em Vila Leopoldina, consiste no fornecimento às grandes indústrias metalúrgicas.

Localizada nas proximidades da confluência dos rios Tietê e Pinheiros, a Estação de Vila Leopoldina encontra-se em situação privilegiada para estender canalizações ao longo das avenidas marginais, onde já se desenvolve grande atividade industrial.

De um contato preliminar com indústrias situadas na região, concluiu-se que pelo menos uma grande companhia estaria interessada em consumir toda a disponibilidade atual de gás produzido na estação.

Verificou-se, porém, que essa empresa está empregando em seus fornos, óleo combustível de 10.200 Kcal/Kg., adquirido ao preço de Cr\$ 4,00/Kg.

Admitindo-se para o gás de esgotos um poder calorífico médio de 6.000 Kcal/m<sup>3</sup>, o va

lor do gás correspondente à equivalência térmica seria de Cr\$ 2,35/m<sup>3</sup>.

Deveria ser considerada, porém, uma bonificação de 10% sôbre êsse valor, para interessar o industrial na substituição do combustível.

O valor reputado para o gás, cairia, então, para Cr\$ 2,10/m<sup>3</sup>.

Êsse valor é muito inferior ao preço do gás de rua em São Paulo (cêrca de Cr\$ 6,00/m<sup>3</sup> na fonte de produção e Cr\$ 9,00/m<sup>3</sup> a domicílio).

#### 12.4- Venda à Companhia de Gás para aproveitamento na rêde pública.

A cidade de São Paulo é parcialmente servida por gás de rua desde o século passado, quando tôda a iluminação urbana era feita com lampeões que queimavam êsse combustível.

A concessionária do serviço, a The San Paulo Gas Co., Ltd., atualmente denominada Companhia Paulista de Serviços de Gás, não pôde acompanhar o extraordinário surto de desenvolvimento da grande metrópole brasileira.

Em consequência o serviço de gás ficou re-  
strito à parte mais antiga da cidade, onde existem  
105.000 prédios ligados.

A produção atual de gás, pouco superior a  
150.000 m<sup>3</sup> diários, não permite qualquer amplia-  
ção da r $\hat{e}$ de distribuidora, e tende a se tornar in-  
suficiente à medida que se verifica o crescimento  
vertical da regi $\tilde{a}$ o beneficiada pelo serviço.

A Companhia, em fase final de contrato n $\tilde{a}$ o  
tem possibilidade de ampliar as instalaç $\tilde{õ}$ es de  
produção para atender à demanda crescente do ser-  
viço.

Pode-se estimar para a cidade de São Paulo  
um consumo potencial de mais de 20.000.000 de me-  
tros cúbicos de gás, por mês.

Eis porque a introdução de uma quantidade  
apreciável de gás no sistema distribuidor existen-  
te poderia beneficiar grande parte da populaç $\tilde{a}$ o  
paulistana.

A utilizaç $\tilde{a}$ o de nova parcela de gás na r $\hat{e}$ -  
de pública existente dispensaria a invers $\tilde{a}$ o de no-  
vos capitais em obras e instalaç $\tilde{õ}$ es de distribui-  
ç $\tilde{a}$ o.

A introdução de gás de esgotos diretamente em ponto próximo da rêde distribuidora da companhia não poderia ser feita sem o ajustamento das suas características, o que exigiria uma instalação dispendiosa de reforma catalítica.

Entretanto, como a quantidade de gás produzido nas estações de tratamento de esgotos é relativamente pequena em face da produção de gás de rua, é admissível a sua entrega, na Usina de Gás, onde êle poderia ser submetido às operações que se tornarem necessárias e onde haveria a possibilidade de mistura com grande massa de gás.

Para reduzir o volume e a densidade do gás de esgotos êle seria submetido à lavagem prévia na própria estação de tratamento de esgotos, reduzindo-se o teor de CO<sub>2</sub> para cêrca de 5%.

Essa operação é, contudo, relativamente simples e pouco dispendiosa.

As instalações necessárias para essa forma de aproveitamento compreenderiam:

- Gasômetro de baixa pressão;
- Lavador para remoção de CO<sub>2</sub>;
- Instalação de compressores;
- Medidores;
- Canalização de recalque.

A Estação de Tratamento de Esgotos de Vila Leopoldina encontra-se a cerca de 15 km da Usina de Produção de Gás da Companhia.

Uma estimativa de custo para as instalações indispensáveis foi feita:

Gasômetro (3.000 m <sup>3</sup> ).....	Cr\$ 12.000.000,00
Instalações de purificação ..	Cr\$ 5.000.000,00
Compressores, medidores e diversos .....	Cr\$ 5.000.000,00
Montagem das instalações ....	Cr\$ 3.000.000,00
	<hr/>
	Cr\$ 25.000.000,00
Tubulação até a Usina de gás	<u>Cr\$ 22.500.000,00</u>
Total	Cr\$ 47.500.000,00

Esse capital seria amortizado em 20 anos, com 11% de juros por mensalidades de Cr\$ 490.200,00

As despesas de operação seriam relativamente baixas, podendo-se estimar em Cr\$ 550.000,00 por mês o dispêndio total.

Nessas condições o custo por metro cúbico de gás fornecido resultaria igual a:

$$\frac{550.000,00}{11.500 \text{ m}^3/\text{d} \times 30} \cong \text{Cr\$ } 1,60/\text{m}^3$$

Considerando-se que o atual valor médio de produção de gás na Usina da Companhia é de aproximadamente Cr\$ 6,00/m<sup>3</sup>, o saldo mensal seria:

$$11.500 \text{ m}^3/\text{d} \times 30 \times (6,00 - 1,60) = \\ = \text{Cr\$ } 1.518.000,00$$

Verifica-se, portanto, que além de servir à cidade, esta solução traria considerável lucro para a estação de tratamento de esgotos.

Foi esta a solução proposta às Autoridades do Estado, encontrandô-se atualmente em fase final de estudo para vias de concretização.

APENDICE

Escoamento de gases. Perdas de carga

O peso específico dos gases varia diretamente com a pressão a que estão submetidos e inversamente com a temperatura absoluta, de acôrdo com a equação dos gases perfeitos:

$$\gamma = \frac{p}{RT}$$

$\gamma$  = peso específico, kg/m<sup>3</sup>  
 $p$  = pressão, kg/m<sup>2</sup>  
 $T$  = temp. absol. =  $t + 273^{\circ}$   
 $R$  = constante do gás

O escoamento de gases praticamente sempre é acompanhado de variação de pressão e, conseqüentemente, de alteração de peso específico.

Para os gases a equação da continuidade deve ser escrita em termos de peso ou massa:

$$\gamma_1 S_1 V_1 = \gamma_2 S_2 V_2$$

Constata-se, portanto, que se em um conduto de secção circular com diâmetro uniforme e sob temperatura constante a pressão absoluta cair à metade do valor inicial, o peso específico do gás também será reduzido à 50% e conseqüentemente a velocidade deverá elevar-se ao dõbro.

Sempre que a variação de pressão de um ponto para outro não fôr elevada, a alteração de peso específico será pequena, podendo-se aplicar as expressões gerais de resistência, estabelecidas para o escoamento de fluidos incompressíveis.

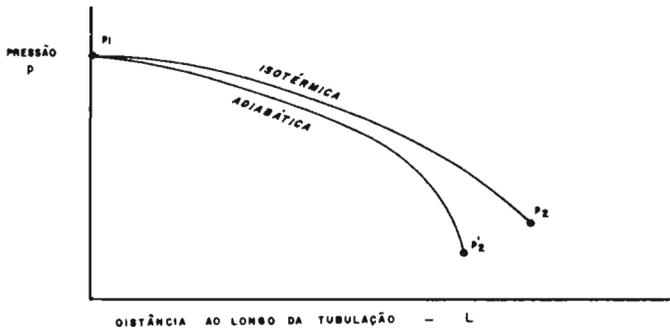
Este é um caso que freqüentemente se verifica em canalizações curtas ou em condutos de baixa velocidade onde

$$\frac{p_2}{p_1} > 0,90$$

Com maior rigor poder-se-ia limitar a variação de pressão a apenas 4% ( $p_2 = 0,96 p_1$ ), o que traria um êrro da ordem de 2% nos resultados.

Em tais condições a linha de carga é admitida como sendo retilínea (fig. A.1), sendo aplicável

FIG. 5 A.1 e A.2



a fórmula universal do escoamento de fluídos incompressíveis.

Os problemas neste caso são resolvidos de maneira idêntica à que se adota para as questões relativas ao escoamento de líquidos, podendo-se admitir o peso específico constante, e se desejarmos maior precisão, levar em conta o seu valor médio.

O valor de  $h_f$  será dado em metros de coluna de um "líquido imaginário", de peso específico idêntico ao do gás.

A rugosidade relativa será a mesma indicada para o movimento dos líquidos nas tubulações, mantendo-se praticamente constantes os valores de  $N_R$  e de  $f$ .

O diagrama de Rouse aplica-se igualmente aos fluídos compressíveis ou incompressíveis.

Se, ao contrário do que vem sendo admitido, a queda de pressão fôr acentuada, as expressões da hidráulica não poderão mais ser aplicadas, exigindo o problema um tratamento mais complexo. Neste caso, a linha de carga será represen

tada por uma curva (fig. A.2).

Tal é o caso das tubulações em que a perda de carga ( $p_1 - p_2$ ) representa uma porção importante da pressão inicial  $p_1$ , o que geralmente ocorre nos condutos longos e nas canalizações com pressões e velocidade elevadas.

Para a solução desse problema poder-se-ia subdividir, para efeito de cálculo, a tubulação dada em trechos para os quais pudesse ser aplicado o critério precedente. Isto corresponderia à "substituição" da curva representativa de linha de carga, por inúmeros trechos retos. Em cada um desses trechos seria admissível adotar valores médios para o peso específico e para a velocidade média de escoamento.

Este método de cálculo, contudo, além de ser aproximado poderá se tornar bastante trabalhoso no caso de tubulações de grande extensão.

O estudo geral do escoamento de gases, sob o ponto de vista teórico, abrange dois casos extremos:

- 1- Escoamento isotérmico- Tubulações não protegidas tèrmicamente, onde prevalece a temperatura ambiente considerada uniforme;
- 2- Escoamento adiabático- Tubulações perfeitamente protegidas, onde não ocorrem trocas de calor.

Na prática, o escoamento de gases aproxima-se mais das condições isotérmicas, uma vez que as tubulações metálicas são instaladas sem proteção especial.

Admitindo, portanto, a expansão isotérmica pode-se deduzir a expressão seguinte\*:

$$h_f = \frac{p_1 - p_2}{\gamma} = \frac{fL V_1^2}{D \cdot 2g} \frac{2 p_1}{p_1 + p_2}$$

Essa expressão difere da anterior apenas pelo fator  $\frac{2p_1}{p_1 + p_2}$

---

\*- Ralph W. Powell, "An Elementary Text in Hydraulics and Fluid Mechanics", The Macmillan Co., N.Y., 1.951, pp 166-167.

A partir dela pode-se verificar as diferenças que resultariam da aplicação da primeira expressão aos problemas em consideração:

$$\text{Se } p_2 = 0,96 p_1 : \frac{2 p_1}{p_1 + 0,96 p_1} = 1,02 (\text{erro de } 2\%)$$

$$\text{Se } p_2 = 0,90 p_1 : \frac{2 p_1}{p_1 + 0,9 p_1} = 1,05 (\text{erro de } 5\%)$$

Deve-se observar que para a gama de pressões correntes a que estão submetidos os gases, o coeficiente de viscosidade absoluta é praticamente constante. Como a velocidade varia inversamente com o peso específico, o número de Reynolds permanece constante ao longo das tubulações e consequentemente o coeficiente de atrito se mantém com o mesmo valor.

A viscosidade cinemática varia inversamente com as pressões.

O escoamento em condições adiabáticas ocorre na prática somente nos casos em que se torna conveniente o isolamento térmico das tubulações. Os casos mais comuns são os dos condutos de vapor d'água e de fluidos refrigerantes, como por exemplo a amônia

Como na maioria dos casos correntes os encaunamentos são relativamente curtos, as perdas de pressão são reduzidas, podendo-se, mais uma vez aplicar as expressões já mencionadas.

Todavia, há casos em que esse tratamento simplificado do problema não pode ser admitido.

Uma análise simples, porém bem feita das condições de escoamento em tais casos, encontra-se na Mecânica dos Fluidos de R.C. Binder (Prentice Hall Inc., New York, 1.947, pp 189-197).

A rigor o escoamento de um gás pode não ser adiabático e nem realmente isotérmico. Para que as condições fossem isotérmicas seria necessário que as trocas de calor se fizessem com uma determinada velocidade e de acôrdo com uma lei preestabelecida.

As condições da prática aproximam-se mais do escoamento isotérmico quando a temperatura ambiente excede a temperatura do fluido.

Assim como existem para as questões de escoamento da água fórmulas práticas simplificadas,

para os condutos de gás foram propostas e têm sido aplicadas diversas expressões. Incluem-se entre estas a fórmula de Biel:

$$f = \frac{0,0637 \mathcal{U}^{0,148}}{Q^{1,125}}$$

$\mathcal{U}$  = visc. cinem., m<sup>2</sup>/s  
Q = vazão, m<sup>3</sup>/s  
f = coef. atrito

A fórmula de Aubery (para escoamento de gás de iluminação em canalizações de ferro fundido).

$$h_f = \frac{1.625 Q^{1,85}}{D}$$

$h_f$  em mm de água km  
Q m<sup>3</sup>/h  
D diâm. em cm

A Companhia Paulista de Serviços de Gás adota a fórmula do Dr. Pole, para os cálculos relativos às canalizações de baixa pressão da rede de distribuição:

$$Q = 0,6659 \sqrt{\frac{D^5 \cdot h}{d \cdot L}}$$

sendo:

- Q = vazão de gás, em m<sup>3</sup>/h
- D = Diâmetro da canalização, em cm
- h = Perda de carga, em mm de col. de água
- d = Densidade do gás em relação ao ar
- L = Extensão da canalização, em m

Fluido	Dens. em rel. ao ar	Pêso esp. Normal (a 1 atm - 0°C)	Pêso esp. a 1 atm 20°C	Viscos. cinem. a 1 atm - 20°C	Constante k
		Kg/m <sup>3</sup>	Kg/m <sup>3</sup>	m <sup>2</sup> /s	
Metano	0,5545	0,7168	0,6680	0,0000165	52,89
CO <sub>2</sub>	1,5291	1,9768	1,8420	0,0000081	19,25
Hidrogênio	0,0695	0,0899	0,0838	0,0001090	420,68

Obs. 
$$= \frac{\gamma_{\text{gás}}}{\gamma_{\text{ar}}}$$

$$\gamma_1 = \gamma_{\text{Normal}} \cdot \frac{p_1}{p_{\text{Normal}}} \cdot \frac{T_{\text{Normal}}}{T_1}$$

p = pressão absol.

T = Temp. absol.

### Velocidades práticas

Assim como acontece para a água, observa-se que na prática a velocidade média de escoamento dos gases nas tubulações restringe-se a uma gama relativamente estreita.

Em geral, velocidades mais elevadas correspondem a pressões de trabalho maiores.

Nas instalações prediais de gás as velocidades geralmente estão em torno de 1 m/s ou pouco acima desse valor.

Nas estações de tratamento de esgotos procura-se manter velocidades abaixo de 3,60 m/s para evitar o arrastamento da água de condensação, assim como, para reduzir as perdas de carga.

Em canalizações mais longas, com pressões até 2 atm a velocidade, geralmente, está compreendida entre 4 e 20 m/seg.

Para pressões ainda mais elevadas, podem ser admitidas velocidades superiores a este último limite.

\*

REFERÊNCIAS

1. ADAMNS, J.H.: Modern Sewage Disposal and Hygienics, Spon Ltd., Londres, 1939.
2. A.S.C.E. e F.S.I.W.A.: Sewage Treatment Plant Design. Manual of Engineering Practice Nº 36, New York, 1959.
3. ASHDOWN, W.L. e C.K. Cornilsen: Experiences in Gas Purification. Water Works & Sewerage, 86, 250, 1939.
4. AZEVEDO NETTO, J.M.: Cronologia dos Serviços de Esgotos, com especial menção ao Brasil. Revista do DAE, Ano 20, nº 33, 15, 1959.
5. BABBITT, H.E. e BAUMANN, E.R.: Sewerage and Sewage Treatment, 8ª ed., John Wiley & Sons, Nova Iorque, 1958.
6. BARKER, H.A.: Biological Formation of Methane, Industrial Engineering Chemistry, 48, 1438, 1956.
7. BINDER, R.C.: Fluid Mechanics. Prentice-Hall Inc., Nova Iorque, 1947.

8. BRAGA, V.: O problema da energia dirigida. São Paulo, 1940.
9. BROWN, T. e PRESTON, G.: Operating Engines on Sewage Sludge Gas. Water Works & Sewerage, 89, 228, 1942.
10. BUSWELL, A.M.: Microbiology and Theory Anaerobic Digestion, Sewage Works Journal, 19, 28, 1947.
11. CHAPIN, W.H.: Second Year College Chemistry, 5ª ed., John Wiley & Sons, Nova Iorque, 1949.
12. CLARK, G.L. e Hawley, G.G.: The Encyclopedia of Chemistry. Reinhold Pub. Corp., Nova Iorque, 1957.
13. COMMITTEE ON HAZARDS OF THE NEW JERSEY WORKS ASSOCIATION: Gas Hazards - Methods of Reducing such at Sewage Treatment Plants. Water & Sewage Works, 93, R-199, 1946.
14. CORRÊA, E.D. e BACELLAR, R.H.: Manual do Engenheiro. Livraria do Globo, Porto Alegre, 1939.
15. C.P.G.A. (Comissão Coordenadora do Plano Geral de Abastecimento de Água - São Paulo) Relatório Final. Revista do DAE, 19, 32, 1958.

16. DAUGHERTY, R.L. e INGERSOLL, A.C.: Fluid Mechanics with Engineering Applications. McGraw-Hill Book Co., Nova Iorque, 1954.
17. ENGINEERING DEPARTMENT OF THE P.F.T.: Elimination of Gas Hazards at Sewage Plants. Water Works & Sewerage, 89, 217, 1942.
18. FAIR, G.M. e MOORE, E.W.: Heat and Energy Relations in the Digestion of Sewage Solids. Sewage Works Journal, 4, 242, 428, 589, 728, 1932.
19. FAIR, G.M. e GEYER, J.C.: Water Supply and Waste-Water Disposal. John Wiley & Sons, Nova Iorque, 1954.
20. FEDERATION OF SEWAGE WORKS ASSOCIATIONS: Modern Sewage Disposal, Langdon Pearse, Editor, Nova Iorque, 1938.
21. GREELEY & HANSEN: Relatório sôbre o Tratamento e Destino dos Esgotos e Resíduos Industriais de São Paulo. Revista do DAE, 19, 31, 2, 1958.
22. HARDENBERGH, W.A.: Sewerage and Sewage Treatment, 2ª ed., International Text-book Co., Seranton, 1946.

23. HODGMAN, C.D.: Handbook of Chemistry and Physics. 28<sup>a</sup> ed., Chemical Publishing Co., Cleveland, 1944.
24. IMHOFF, K.: Taschenbuch der Stadtenwae-  
ssering. 16<sup>a</sup> ed., Munique, 1956.
25. IMHOFF, K.: Manual de Saneamiento Urbano.  
Trad., Obras Sanitarias de la Naci3n,  
Buenos Aires, 1941.
26. IMHOFF, K.: Sludge Gas as Fuel for Motor  
Vehicles. Trad. Water & Sewage Works,  
99, 7, 284, 1952.
27. IMHOFF, K e FAIR, G.M.: Sewage Trea-  
tment. John Wiley & Sons Inc., Nova  
Iorque, 1940.
28. IMHOFF, K., MULLER, W.J. e THISTLETHWAYTE,  
D.K.B.: Disposal of Sewage and Other  
Water-Borne Wastes. Butterworths Scien-  
tific Publications, Londres, 1956.
29. JESUS NETTO, J.P.: O gas de esgotos. En-  
genharia, 1, 267, 1943.
30. JESUS NETTO, J.P.: O gas de esgotos. Bo-  
letim da RAE, 1, 1, 1936.
31. KEEFER, C.E.: Sewage Treatment Works, Mc  
Graw-Hill Book Co., Nova Iorque, 1940.

32. KEEP, G.A.: Some Notes on Dual - Fuel Engines and Pumps. Journal and Proceedings, I.S.P., Part I, 1959.
33. LANGE, N.A.: Handbook of Chemistry, Handbook Publishers Inc., Sandusky, Ohio, 1956.
34. LANGFORD, L.L.: Safety Considerations in the Design of Gas Utilization Facilities Sewage Works Journal, 17, 66, 1945.
35. MC CABE, BROTHER JOSEPH e ECKENFELDER Jr, W. W.: Biological Treatment of Sewage and Industrial Wastes. Vol. II, Reinhold Publ. Corp., Nova Iorque, 1958.
36. METCALF, L e EDDY, H.P.: Sewerage and Sewage Disposal. A Textbook. 2<sup>a</sup> ed., McGraw-Hill Book Co., Nova Iorque, 1930.
37. NADRUZ, N. e AZEVEDO NETTO, J.M.: A Estação de Tratamento de Esgotos de Vila Leopoldina. Revista do DAE., 19, 31, V, 1958.
38. NORMAS PARA PROJETOS DE REDES DE ESGOTOS SANITÁRIOS E ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTOS (tradução dos "Standards for Sewage Works of the Mississippi River Board of Public Health Engineers and

- Great Lakes Board of Health Engineers),  
Revista do BAE, 20, 33, 1959.
39. NORRIS, H.D.: Scrubling Sewage Gas, Water  
Works & Sewerage, 90, 2, 61, 1943.
40. ONIGA, T.: Calcul des tuyaux. Matemime-  
France, Paris, 1959.
41. PAZDERA, O.: Construcción de una planta  
Central para la depuración de aguas re-  
siduales del alcantarillado, destinada  
para 400.000 habitantes. Indústria Pe-  
sada Checoslovaca, nº 5, 1959.
42. PERA, A.F.: Estudo sôbre o aproveitamen-  
to do gás gerado nas câmaras de diges-  
tão dos lodos de esgotos. Estudo feito  
para o Departamento das Municipalida-  
des, São Paulo, 1943.
43. P.F.T. (Pacific Flush Tank Co.): Diversos  
boletins e catálogos. Chicago, Estados  
Unidos.
44. PHEIFFER, W.P.: Sludge Gas Utilization at  
Aurora, Illinois. Water and Sewage Wor-  
ks, Reference Edition, 1959.
45. PINHO, ELZA: Contribuição do Laboratório  
de Análises e Tratamento de Águas e Es-  
gotos do Serviço Federal de Águas e Es

Esgotos, ao I Congresso Nacional de Carburantes. Boletim do Serviço Federal de Águas e Esgotos, 7, 49, 1943.

46. REVUE UNIVERSELLE DES MINES, DE LA METALLURGIE DES TRAVAUX PUBLICS. Ano 82, XV, 12, 1939.
47. RUDOLFS, W.: Principles of Sewage Treatment Lime Association, Washington, D.C., 1955.
48. TAMEIRÃO, H.P.: Gás de esgoto, sua utilização. Trabalho apresentado ao II Congresso Nacional de Química, 1943.
49. THE ENCYCLOPEDIA AMERICANA. Americana Corp., New York, 1951.
50. THE OIL ENGINE AND GAS TURBINE. Economical Sewage Pumping Service at Southend, 1943.
51. THE VAPOR RECOVERY SYSTEMS CO. ("Varec"): Diversos boletins e catálogos, California, Estados Unidos.
52. THE WATER TOWER: XLVI, 4, 6, 1960.
53. WEST, E.D.: Gas Engines for Operation by Sewage Gas. Water Works & Sewerage, 86,3, 114, 1939.
54. WHO: Who Chronicle. 14, 5, 173, 1960.
55. WITWER, N.C.: Principles of Power Generation with Sewage Gas Engines. Water Works & Sewerage, 93,4, R-259- 1946.
56. WORTHINGTON CORP, HARRISON, N.J.: Engine Power Plant Guide. An evaluation of plant engineering, operation and maintenance.