

O Aspecto Químico da Filtração Industrial

Tito de Almeida Pacheco*

Renner Têxtil Ltda, Cachoeirinha - RS, Brasil

**e-mail: titoap@terra.com.br*

Resumo: As causas de origem química que levam ao entupimento ou alta emissão de particulado num filtro de mangas podem ser adequadamente avaliadas por Simulação Computacional com base em balanços de massa e de energia. A determinação do ponto de orvalho se faz útil para solução dos problemas de entupimento por condensação de água ou ácido. Por outro lado, problemas de ataques químicos, podem ser solucionados pela comparação entre a faixa de temperatura e composição química dos gases filtrados e a faixa de resistências químicas dos elementos filtrantes. Foi demonstrado e exemplificado através de 3 casos práticos reais, a viabilidade de dimensionamento do Projeto do Filtro de Mangas, Especificação dos elementos filtrantes, assim como, das condições operacionais ótimas através da utilização do **Proteus - Simulador de Filtração Industrial**, versão 2.4.

Palavras-chave: *filtração, filtros de manga, meio ambiente*

1. Introdução Teórica

Ao longo do estudo e solução de problemas de centenas de Sistemas de Filtração Industrial foi possível abstrair que as causas de sua falha podem ser agrupadas em 4 categorias:

- Falha na especificação do elemento filtrante¹;
- Falha no projeto do sistema (coifas, tubulações, filtro, ventilador, etc.);
- Falha de operação do sistema; e
- Falha de manutenção do sistema.

Estas causas podem, e devem, ser analisadas sob o aspecto mecânico (dimensionais de chaparias, válvulas, velocidades gasosas, etc.) e sob o aspecto químico (condensações, ataques químicos, etc.).

O aspecto químico normalmente só é lembrado quando o filtro entope ou apresenta seus elementos filtrantes com um aspecto “apodrecido”.

Os fatores que geram estas falhas podem consistir em condensação de água ou ácido, assim como, podem consistir em composições químicas gasosas incompatíveis com o elemento filtrante em uso para dada faixa de temperatura de filtração.

Estas falhas decorrem das características inerentes ao Processo Industrial (Figura 1).

A seguir, alguns exemplos ilustrativos.

Um combustível rico em enxofre pode resultar em gases de combustão com elevado teor de SO₃ (trióxido de enxofre) e conseqüente risco de condensação ácida.

A duplicação da produção da secagem de grãos implicará num aumento do teor de água nos gases filtrados, podendo resultar em condensações e entupimentos das mangas por aglomeração excessiva de particulado.

No caso de resfriamento de gases quentes sem o uso de trocador de calor, ou seja, no resfriamento obtido por entrada de ar ambiente (também chamado de ar-falso) ou por injeção de água haverá, em cada caso, alteração significativa na composição química gasosa, podendo resultar em ataque químico das mangas.

Se o resfriamento for por ar-falso, ainda é necessário observar as condições atmosféricas, pois num dia quente e chuvoso, o gás resfriado apresentará as maiores vazões e umidades possíveis, ao

passo que, num dia frio e seco, apresentará as menores vazões e umidades possíveis.

Se o particulado possui natureza ácida ou alcalina, pode ocorrer ataque do elemento filtrante em presença de umidade condensada, devido à liberação em equilíbrio do ácido ou álcali correspondente.

Para resolver os problemas no Filtro de Mangas com base nas informações do processo Industrial foi adotada uma metodologia comum em Eng. Química, a qual consiste na representação do processo industrial em blocos (volumes de controle), onde o que interessa são os dados de entrada e saída de cada bloco.

Nesta metodologia, balanços de massa e de energia aplicados em cada bloco isoladamente permitem o cálculo da vazão, temperatura e composição química gasosa desde o início do processo até a filtração.

Uma representação simplificada integra os 4 blocos típicos caracterizados por um processo de Queima (Caldeira, Forno, Estufa, Calcinador, etc.), um processo de Produção (Moinho, Secador, Reator Químico, Calcinador, etc.), um processo de Resfriamento e um de Filtração (Figura 2).

Desta forma, com base na concentração de água dos gases, pode ser obtido o “Ponto de Orvalho da Água”, que consiste no “limite de temperatura gasosa acima do qual não ocorre a condensação de água”.

Se os gases filtrados operarem abaixo da curva (Figura 3) haverá condensação de água.

Esta condensação pode levar as mangas ao entupimento devido à aglomeração ou devido ao empedrecimento do particulado (Figura 4).

Se o particulado possuir pH diferente de 7, ou seja, pH alcalino ou ácido, pode ocorrer o ressecamento das fibras de uma manga de Poliéster, por exemplo, caracterizado pela ocorrência de rachaduras, as quais, invariavelmente evoluem para rasgos (Figura 5).

Por outro lado, na existência do gás SO₃, seja proveniente da queima de combustíveis com enxofre, seja proveniente do próprio processo produtivo, haverá a reação deste gás com a umidade dos gases gerando névoa de ácido sulfúrico (H₂SO₄) em concentração fumegante.

Artigo apresentado no “VI Seminário Internacional de Filtração Industrial” ocorrido em 1 a 3 de Setembro de 2004, Gramado - RS. Evento organizado pela Renner Têxtil Ltda.

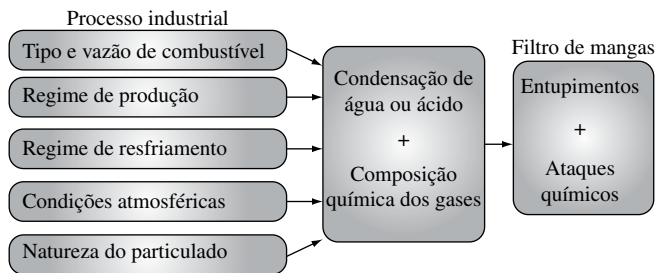


Figura 1. Variáveis do processo industrial com influência no aspecto químico da filtração.

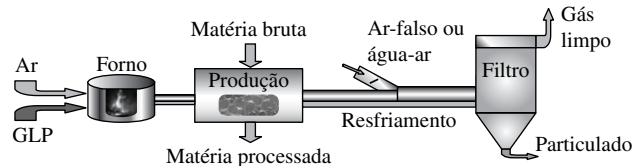


Figura 2. Processos típicos dos sistemas de filtração atmosférica.

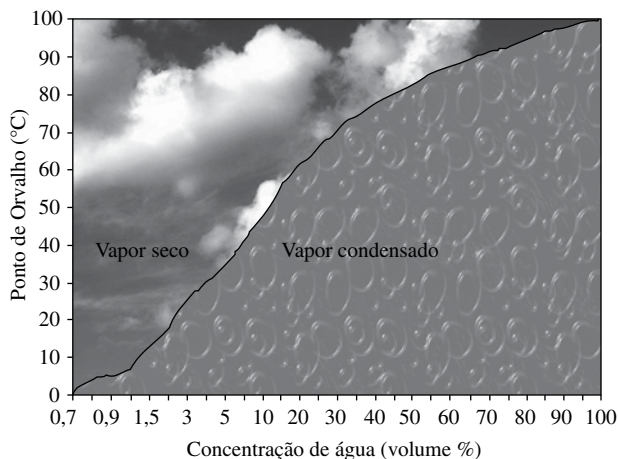


Figura 3. Curva do Ponto de Orvalho da Água.



Figura 4. Efeitos da condensação de água nas mangas filtrantes.

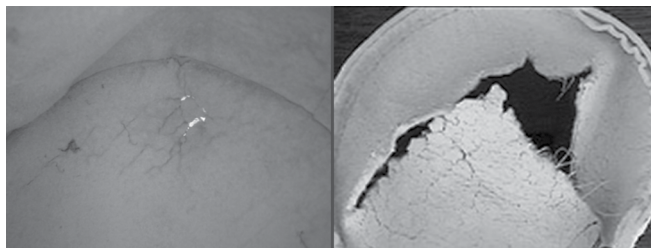


Figura 5. Ataque químico da manga de poliéster.

Neste caso, prevalece o “Ponto de Orvalho Ácido”, o qual consiste no “limite de temperatura gasosa acima do qual não ocorre condensação de ácido sulfúrico”.

É importante observar que a curva do Ponto de Orvalho Ácido é definida não apenas com base no teor de umidade dos gases, mas também no teor do gás SO_3 (Figura 6).

Se os gases filtrados estiverem abaixo da curva (Figura 6), haverá condensação de ácido sulfúrico.

Quando isso acontece, há corrosão precoce das partes metálicas do filtro (como chaparias, gaiolas, etc.).

Por exemplo, na Figura 7, é possível observar o esfrelamento do anel aço-mola de fixação da manga por oxidação, resultando em perda do efeito mola e falha de vedação.

Além disso, o ácido condensado ataca quimicamente o elemento filtrante.

Na Figura 8, em uma primeira análise, seria possível afirmar que houve um forte processo abrasivo; contudo, ao ser verificada a pos-

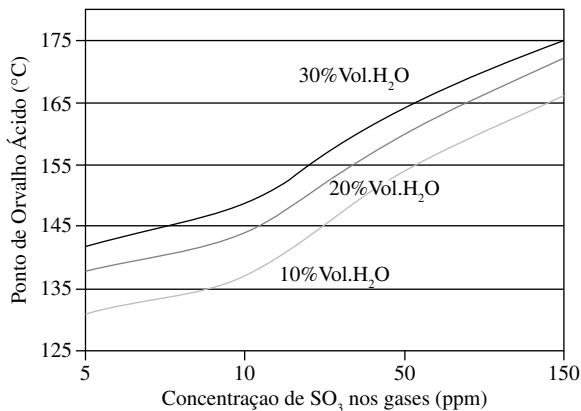
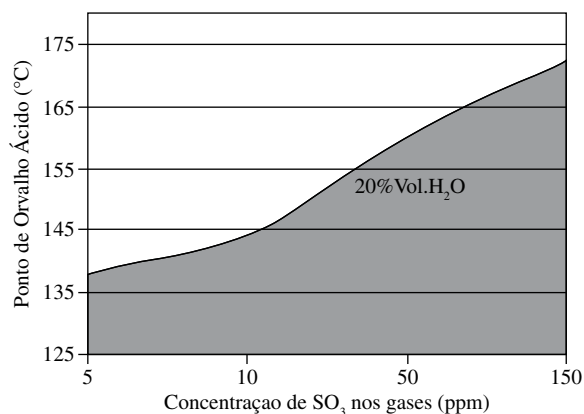
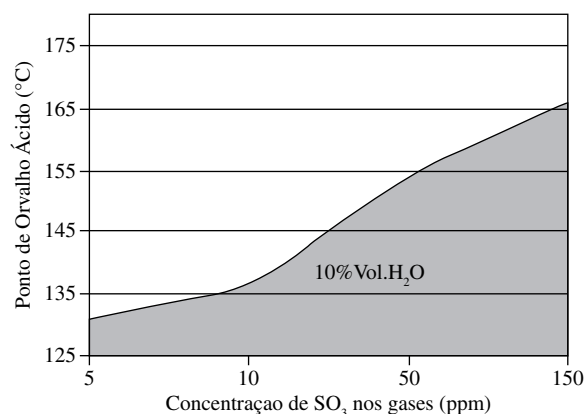


Figura 6. Curvas do Ponto de Orvalho Ácido para concentrações de água de 10, 20 e 30% Volume.



Figura 7. Oxidação acelerada por ataque ácido.

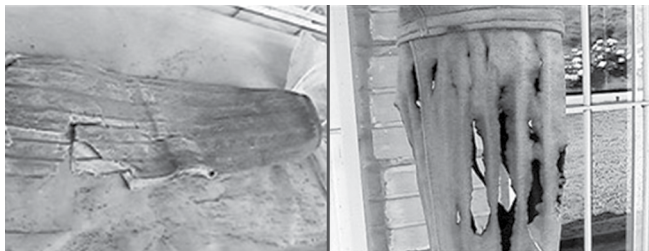


Figura 8. Furos e rasgos precoces por ataque ácido da manga filtrante.

sibilidade de rasgo manual do elemento filtrante, ficou caracterizada a ocorrência de ataque químico.

Independentemente do agente causador do ataque, o resultado é sempre o mesmo: possibilidade de rasgo manual da manga após um curto tempo de uso.

Isso ocorre, porque o ataque químico quebra a cadeia molecular do material da manga (plástico) em pequenos pedaços, diminuindo consideravelmente sua resistência à tração (tipicamente para valores inferiores a 35 daN/5 cm).

Desta forma, para caracterização e compreensão dos principais Agentes de Ataque Químico em Sistemas de Despoluição Atmosférica Industrial é apresentado o esquema da Figura 9.

Seja proveniente de um processo de secagem ou de combustão, um elevado teor de água sob dada temperatura pode causar a hidrólise de alguns materiais de mangas (tipicamente os polímeros obtidos por processos de condensação).

A etimologia do termo hidro = água, lise = separação reforça a idéia de quebra das moléculas por ação da água; portanto, hidrólise aquosa é redundância.

Por exemplo, mangas em Poliéster apresentarão furos e rasgos em menos de 6 meses de operação contínua sob 10% volume de água a 140 °C, devido a hidrólise.

A queima de combustível com enxofre em sua estrutura molecular resulta na oxidação do mesmo, formando o gás SO_2 (dióxido de enxofre), o qual reage com o oxigênio residual dos gases sujos quando a temperatura cai para algo abaixo de 300 °C, formando assim o gás SO_3 .

Por sua vez, devido a forte afinidade por água do gás SO_3 , haverá a formação de ácido sulfúrico.

Tanto o SO_2 em condições secas, como o ácido sulfúrico ataca determinados tipos de materiais de mangas filtrantes por Sulfonação.

Contudo, a formação de ácido sulfúrico tem um agravante, pois ao reagir com o metal da gaiola (zinco, ferro, etc.) há liberação do gás hidrogênio, o qual ataca a manga filtrante.

Em geral, os efeitos deste ataque por Hidrogenação antecedem os efeitos da Sulfonação, sendo que, no ataque por Hidrogenação é possível rasgar o elemento filtrante somente nas marcas da gaiola, mas não em outras regiões fora destas marcas.

Neste tipo de ataque, na maioria dos casos, a manga gruda na gaiola, sendo necessário despedaçá-la para obter a sua separação. Mesmo assim, ainda ficam algumas fibras grudadas na gaiola.

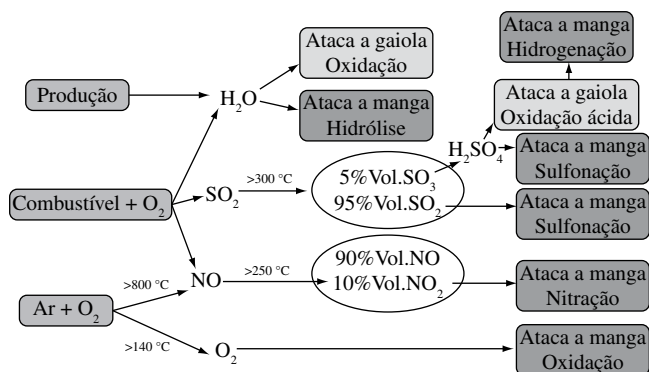


Figura 9. Tipos e origens dos Agentes de Ataque Químico.

Uma proteção da gaiola com pintura antiácida (tipo epóxi ou sili-conizada) em combinação ou não com o uso de aço-inox pode auxiliar na solução deste problema, pois dificulta o contato ácido-metal.

Por outro lado, seja pela queima de combustíveis com nitrogênio em sua molécula, ou seja, pela reação do nitrogênio e oxigênio atmosféricos quando a temperatura do forno ultrapassa os 800 °C, haverá a formação do gás NO (óxido de nitrogênio).

Quando a temperatura dos gases cai para menos de 250 °C haverá reação deste gás NO com o oxigênio residual, gerando então o NO_2 (dióxido de nitrogênio), o qual pode atacar determinados materiais de mangas filtrantes por Nitratação.

Por fim, o próprio oxigênio dos gases filtrados pode atacar o elemento filtrante por Oxidação dependendo da temperatura de filtração.

Por exemplo, mangas em Polifenilsulfeto apresentaram furos e rasgos em menos de 1 ano de operação contínua sob 18% Volume de oxigênio a 180 °C, devido a Oxidação.

Muitas vezes, quando é realizada uma amostragem na chaminé para medição da composição química dos gases, o resultado é expresso em SO_x , ou seja, teor de $\text{SO}_2 + \text{SO}_3$, e NO_x , ou seja, teor de $\text{NO} + \text{NO}_2$.

Entretanto, isso dificulta a avaliação de qual elemento filtrante pode ser utilizado, porque, como pode ser verificado na Figura 9, o que interessa são suas quantidades em separado e não suas quantidades misturadas.

Na Figura 10a são exemplificadas algumas faixas de resistências químicas dos principais plásticos utilizados para confecção de mangas filtrantes.

É possível verificar na identificação da condição de cada ataque químico os parâmetros que devem ser levados em consideração, ou seja, tipo de agente químico, sua **concentração**, **temperatura** e **duração** de ataque químico.

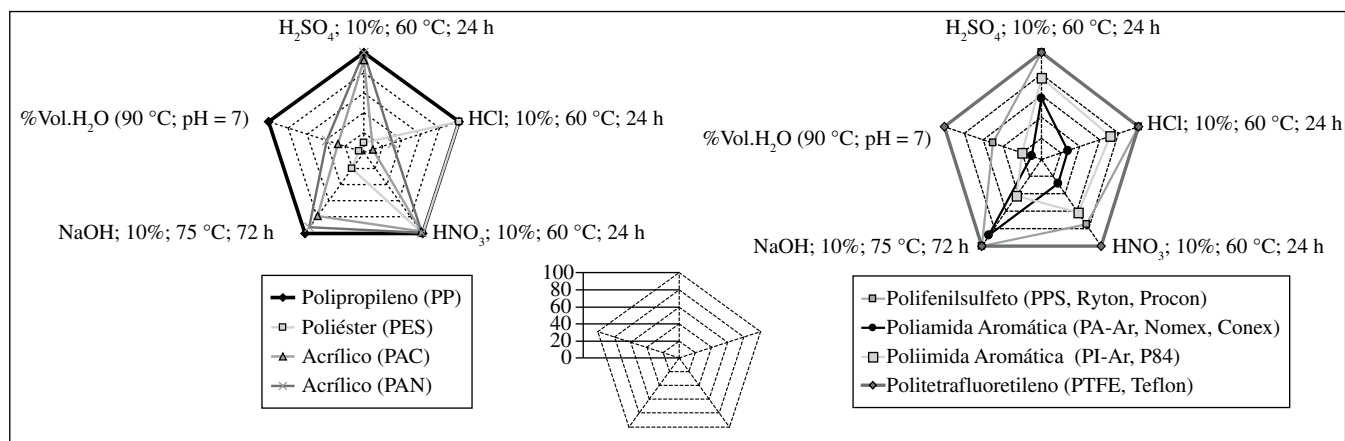
Sob as condições especificadas, os gráficos apresentam o percentual da resistência mecânica original obtido após o ataque químico.

A seguir será investigada a influência no aspecto químico da filtração de alguns parâmetros de processo (Figura 1) através de Casos Práticos referentes a consultas realizadas por Fabricantes de equipamentos de despoluição e Usuários de filtros de mangas.

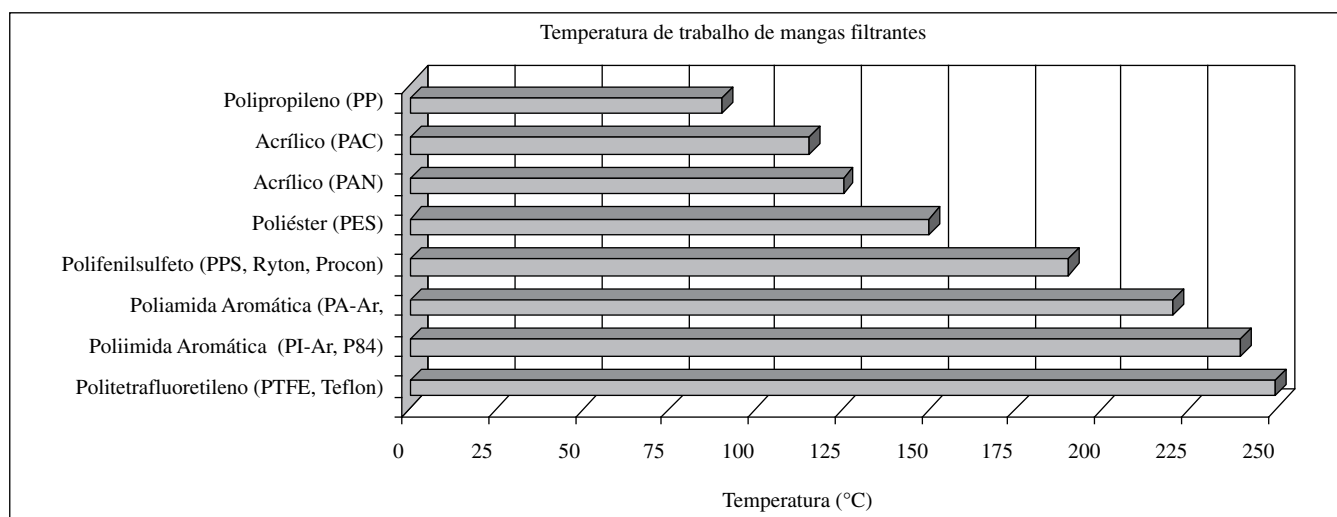
2. Caso Prático 1 – Março/2002: Simulação do Custo-Benefício do Regime de Resfriamento

2.1. Apresentação

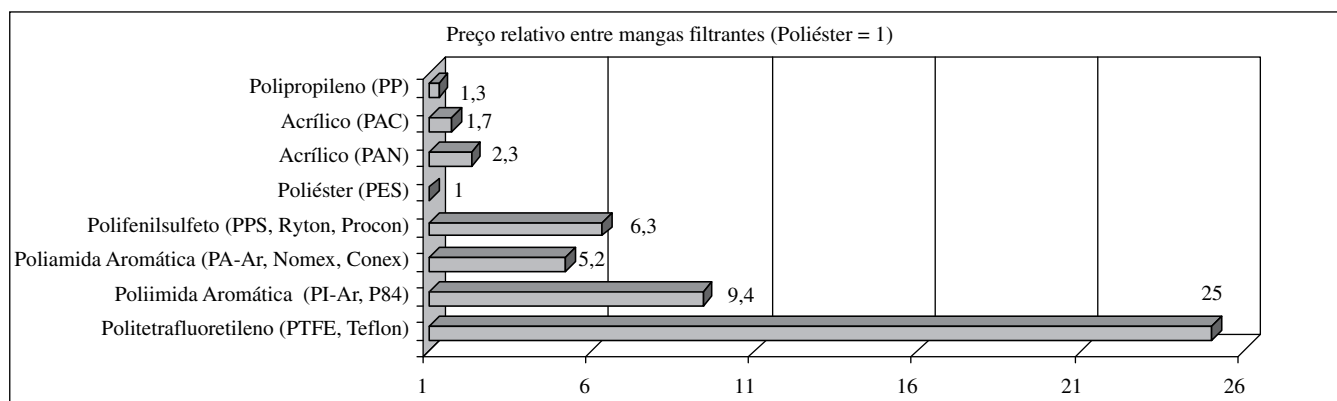
Neste *case*, o Cliente informou a composição, vazão e temperatura dos gases provenientes da queima de óleo, havendo a possibilidade de resfriar os gases quentes tanto por ar-falso a 40 °C e 70% de umidade relativa, como por injeção de água a 40 °C nebulizada



(a)



(b)



(c)

Figura 10. a) Resistências químicas de mangas para baixa temperatura (esquerda) e alta temperatura (direita.); b) Comparativo entre as temperaturas de trabalho de diferentes materiais filtrantes; e c) Comparativo entre os preços múltiplos do Poliéster para diferentes materiais filtrantes.

com ar comprimido tal que, a concentração fosse 81% Peso de água (Figura 11).

Algumas questões foram levantadas:

- Qual o método de resfriamento econômico, ou seja, será a adição de ar-falso ou a adição de água o método que permitirá a menor vazão gasosa, tal que o filtro de mangas seja o menor possível (mais acessível economicamente)?

- Qual a faixa de temperatura tal que possam ser utilizadas as mangas no material mais econômico sob uma operação normal por, pelo menos, 2 anos, ou seja, sem condensações ou ataques químicos?
- Qual a área filtrante necessária para filtração sob a vazão resultante da soma das vazões do gás quente e do gás de resfriamento na temperatura escolhida para operação Ideal?

2.2. Memorial descritivo

Para solução destas questões foi implementada a metodologia anteriormente citada com o **Proteus - Simulador de Filtração Industrial**, versão 2.4 para facilidade dos cálculos nos balanços de massa e de energia.

A estratégia de simulação foi adotar uma temperatura para o gás resfriado (gás mistura) e verificar a composição, Ponto de Orvalho Ácido e vazão resultantes (Tabela 1).

A concentração de O_2 e H_2O então em Volume %, ou seja, 6,2% Volume equivale dizer que existem 6,2 m³ de água (líquida ou gasosa) para cada 100 m³ de gás. Da mesma forma, a concentração de SO_2 está em ppm (partes por milhão em volume), ou seja, 274 ppm equivale dizer que existe 274 mL de SO_2 para cada 1 m³ de gás.

Tendo em vista, que o Ponto de Orvalho Ácido (113 °C) é inferior a temperatura de operação (120 °C), teoricamente, não deveria ocorrer a condensação de ácido. Contudo, deve ser lembrado que as paredes da tubulação, filtro e ventilador não estão a 120 °C, mas estão numa temperatura bastante inferior dependendo da temperatura atmosférica local.

Por isso, tem sido verificado e utilizado com sucesso na coibição de condensações o critério de adotar uma temperatura de trabalho, pelo menos, 15 °C acima do Ponto de Orvalho Ácido para sistemas isolados termicamente e de, pelo menos, 25 °C acima do Ponto de Orvalho Ácido para sistemas não isolados termicamente.

Como sempre, se for atingida uma temperatura na chaminé acima do Ponto de Orvalho Ácido, também podem ser evitados danos no ventilador, chaminé, filtro, etc. Por este motivo, muitas vezes, a temperatura do gás é monitorada tanto na entrada do filtro (para evitar ultrapassar a temperatura de trabalho das mangas – Figura 10b), como na chaminé (para evitar condensações).

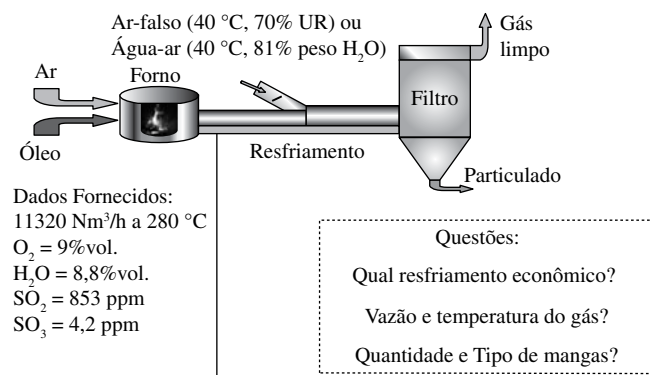


Figura 11. Caracterização da consulta técnica referente ao Caso Prático 1.

Para a faixa de 130 a 150 °C, é possível verificar que o Poliéster (PE/PE) não pode ser escolhido devido ao elevado teor de água nos gases, caso em que, ocorreria a hidrólise deste material.

Embora a manga de Acrílico (AC/AC) resista perfeitamente a este teor de umidade, sua temperatura de trabalho é de apenas 115 °C, por isso ocorreria sua queima/encolhimento a 150 °C.

Por outro lado, embora a manga em Poliamida Aromática ou m-aramida (NO/NO, cujos nomes comerciais podem ser Nomex, Conex, etc.) resista perfeitamente à temperatura e umidade indicadas, o teor de SO_2 está acima de seu limite operacional, também não sendo possível a sua utilização.

Desta forma, foi escolhida a manga em Polifenilsulfeto (PPS/PPS, cujos nomes comerciais podem ser Ryton, Procon, etc.) devido a suas faixas de resistência química apresentarem limites superiores aos limites das faixas de concentrações de composição química deste gás.

Já para a faixa de 160 a 200 °C, o teor de oxigênio é excessivo para o Polifenilsulfeto, uma vez que, sob esta temperatura, a reação de oxidação se apresenta vigorosa.

O uso de manga em Poliimida Aromática (PI/PI, cujo nome comercial é P84) também não seria possível devido ao elevado teor de SO_2 ; contudo, com a utilização do artifício de neutralização química² foi possível reduzir não apenas o teor de SO_2 , mas também o valor do Ponto de Orvalho Ácido. Neste caso, foi utilizada a cal hidratada (hidróxido de cálcio).

Conforme verificado na Figura 6, o Ponto de Orvalho Ácido aumenta com o aumento da umidade.

Isso pode ser constatado no valor deste ponto à 120 °C quando é utilizado o resfriamento por ar-falso (113 °C) e quando é utilizado resfriamento por injeção de água (134 °C) (Tabela 2).

A faixa de operação de 120 a 140 °C não é recomendada devido ao risco condensação de ácido conforme as razões já explicadas anteriormente (Figura 13).

Contudo, como os gases de combustão possuem baixo teor de oxigênio e é utilizado apenas 19% peso de ar para nebulização da água de resfriamento, o teor resultante de oxigênio é baixo, permitindo assim, o uso de mangas de Polifenilsulfeto até temperatura limite de operação (180 °C).

Na faixa de 190 a 200 °C, foi necessária a mesma solução adotada para as mangas em Poliimida Aromática no caso anterior.

2.3. Conclusões

Para cada faixa de temperatura, foi escolhida a maior vazão, tendo sido dividida pela relação ar-pano para obtenção da área filtrante total correspondente. A razão entre a área filtrante total e a área de uma manga corresponde ao total de mangas adequado para a filtração.

Tabela 1. Resfriamento por ar-falso (40 °C, 70% UR). Resultados de Simulação para resfriamento por ar-falso.

Temperatura (°C)	Orv. ácido (°C)	O_2 (vol.%)	H_2O (vol.%)	SO_2 (ppm)	Vazão (m ³ /h)	Qde.	Especificação
120	113	16,4	6,2	274	54042	391	Risco condensação
130	114	16,0	6,4	309	49232	356	PE/PE → Hidrólise!
140	116	15,5	6,5	344	45382	328	AC/AC → Queima!
150	117	15,1	6,7	379	42232	305	NO/NO → Sulfonação! - Renner PPS/PPS -
160	118	14,6	6,8	415	39606	286	pps/pps → Oxidação
170	119	14,2	7,0	450	37383	270	- Renner PI/PI -
180	120	13,7	7,1	486	35477	257	com adição contínua
190	121	13,3	7,3	522	33825	245	50 kg/h $Ca(OH)_2$
200	122	12,8	7,5	558	32379	234	

Relação ar-pano de 1,3 m/min para mangas nas dimensões ϕ 154 x 3658 mm. Resultados obtidos pelo programa "Proteus - Simulador de Filtração Industrial".

Tabela 2. Resfriamento por água-ar comprimido (40 °C, 81% Peso H₂O). Resultados de Simulação para resfriamento por nebulização de água.

Temperatura (°C)	Orv. ácido (°C)	O ₂ (vol.%)	H ₂ O (vol.%)	SO ₂ (ppm)	Vazão (m³/h)	Qde.	Especificação
120	134	8,3	17,6	758	22248	161	Condensação ácida
130	134	8,3	17,0	764	22484	162	
140	133	8,4	16,5	770	22711	164	Risco condensação
150	133	8,4	15,9	776	22930	166	Renner PPS/PPS
160	133	8,5	15,4	782	23141	167	
170	132	8,5	14,8	788	23345	169	
180	132	8,6	14,3	794	23540	170	
190	132	8,6	13,7	800	23729	171	Renner PI/PI
200	131	8,6	13,2	806	23910	173	+ 50 kg/h de Ca(OH) ₂

Relação ar-pano de 1,3 m/min para mangas nas dimensões ϕ 154 x 3658 mm. Resultados obtidos pelo programa "Proteus - Simulador de Filtração Industrial".

Na Figura 12 é possível observar que a combinação de faixa de temperatura e método de resfriamento que gerasse o menor número de mangas (filtro mais econômico) com o material de mangas mais econômico (Figura 10c) corresponde àquela indicada pelo quadro em destaque: 170 mangas em Renner PPS/PPS 551.

Embora o custo do investimento em termos somente de mangas filtrantes esteja indicado, o qual é proporcional ao custo do filtro + ventilador, uma análise completa necessita levar em consideração o custo do investimento, manutenção e operação de cada sistema de resfriamento, para somente então, ser possível uma tomada de decisão conclusiva.

3. Caso Prático 2 – Julho/2001: Simulação do Custo-Benefício da Seleção de Combustível

3.1. Apresentação

Neste *case*, o Cliente somente informou quais os combustíveis que poderiam ser utilizados para secagem de cinzas, as quais, por sua vez, poderiam ser recebidas entre dois extremos de umidade, alterando significativamente a produção de cinzas secas.

As temperaturas após o forno e após o secador foram definidas com base em sistemas similares de mesma tecnologia, conforme informado pelo próprio Cliente (Figura 13).

Algumas questões foram levantadas:

- Qual o combustível econômico, ou seja, qual material queimado (madeira, gás ou óleo) permitirá a menor vazão gasosa, tal que o filtro de mangas seja o menor possível?
- Qual o material das mangas mais econômico sob uma operação normal por, pelo menos, 2 anos, ou seja, sem condensações ou ataques químicos?
- Qual a área filtrante necessária para filtração sob a vazão resultante da soma das vazões do gás de combustão e do gás de proveniente da secagem?
- Qual a influência da umidade da matéria prima no desempenho do filtro de mangas, ou seja, quando a umidade for máxima é esperado entupimento do filtro devido à condensação de umidade?

3.2. Memorial descritivo

Para solução destas questões foi implementada a metodologia anteriormente citada com o **Proteus - Simulador de Filtração Industrial**, versão 2.4 para facilidade dos cálculos nos balanços de massa e de energia.

A estratégia de simulação foi realizar a simulação da composição gasosa, temperatura e vazão dos gases de combustão acrescidos dos gases da secagem para cada um dos 6 cenários possíveis (Tabela 3).

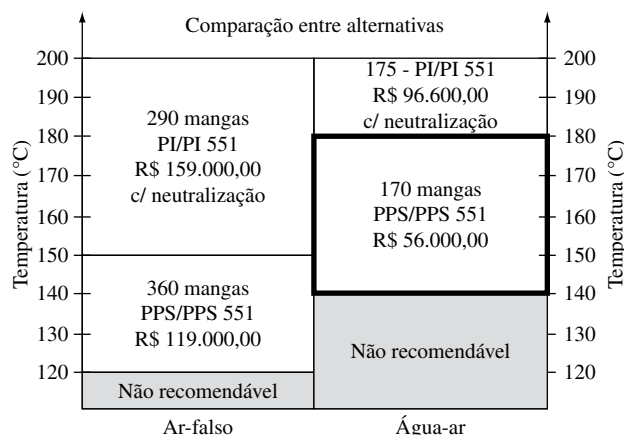
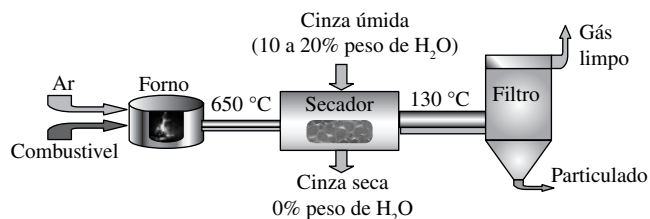


Figura 12. Relação de custo-benefício para o Sistema de filtração com base no método de resfriamento.



Combustível	Produção de cinzas	
	4,5 t/h 20% peso*	9,5 t/h 10% peso*
Madeira acácia (20% peso H ₂ O) 1560 kg/h (bu) - PCI 3296 kcal/kg	Cenário 1	Cenário 4
Óleo 2A (469 kg/h - 3,2% peso de S)	Cenário 2	Cenário 5
Gás natural (396 kg/h)	Cenário 3	Cenário 6

*umidade inicial.

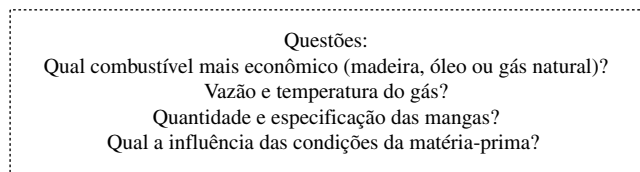


Figura 13. Caracterização da consulta técnica referente ao Caso Prático 2.

Tabela 3. Resultados de Simulação para os 6 cenários de operação possíveis . Avaliação da viabilidade técnica.

Produção de cinzas (combustível)	4,5 t/h (umidade inicial 20% do peso)		9,5 t/h (umidade inicial 10% do peso)	
Madeira acácia 20% peso H ₂ O 1560 kg/h (bu) PCI 3296 kcal/kg	T = 125 °C Torv = 71 °C H ₂ O = 31%Vol. SO ₂ = 0 ppm	18700 m ³ /h DT/DT 551	T = 125 °C Torv = 71 °C H ₂ O = 31%Vol. SO ₂ = 0 ppm	18400 m ³ /h DT/DT 551
Óleo 2A 469 kg/h (bs) 3,2% peso de S	T = 130 °C Tac = 167 °C H ₂ O = 22%Vol. SO ₂ = 1662 ppm	11022 m ³ /h PPS/PPS 551 + 35 kg/h CaO	T = 130 °C Tac = 169 °C H ₂ O = 29%Vol. SO ₂ = 1504 ppm	13457 m ³ /h PPS/PPS 551 + 35 kg/h CaO
Gás natural 396 kg/h (bs)	T = 125 °C Torv = 69 °C H ₂ O = 29%Vol. SO ₂ = 0 ppm	12930 m ³ /h DT/DT 551	T = 125 °C Torv = 71 °C H ₂ O = 35%Vol. SO ₂ = 0 ppm	15560 m ³ /h DT/DT 551

Resultados obtidos pelo programa “Proteus - Simulador de Filtração Industrial”.

Foram considerados os consumos de combustível, tal que fosse liberado o mesmo montante calórico necessário e suficiente para secagem em escala industrial das cinzas úmidas. A produção de cinzas citada refere-se à produção de cinzas secas até uma umidade próxima de 0% peso.

Foi observado que nos cenários onde há queima de madeira ou gás natural não são esperadas condensações, isso porque o ponto de orvalho da água está muito abaixo da temperatura de operação; contudo, o elevado teor de umidade define a utilização de mangas em acrílico tipo homopolímero (DT/DT) ou a indicação de mangas em Polifenilsulfeto (PPS/PPS).

Como o acrílico é mais barato que o polifenilsulfeto, ele foi o escolhido (Figura 10c).

Contudo, devido ao elevado teor de enxofre no óleo, os gases resultantes de sua queima apresentaram elevado Ponto de Orvalho Ácido (167/169 °C), o qual está muito acima da temperatura de operação (130 °C).

Devido ao fato de não ser recomendável a operação contínua de um sistema de filtração sob condensação de ácido sulfúrico, foi utilizado o artifício da neutralização química dos gases ácidos através da adição de pó alcalino².

Neste caso, foi utilizada a cal virgem (óxido de cálcio) para baixar o Ponto de Orvalho Ácido para valores aceitáveis.

É possível observar pequena influência na vazão total dos gases da condição produtiva de maior ou menor umidade inicial de cinzas.

Assim como no caso prático anterior, foi calculada a área filtrante total pela razão da vazão pela relação ar-pano e, sem seguida, foi calculado o total de mangas pela razão da área filtrante total pela área filtrante de uma manga.

3.3. Conclusões

Os resultados obtidos são demonstrados na Tabela 4, onde são apresentados não apenas os custos das mangas, mas também os custos das válvulas solenóides e de seu controlador tipo economizador (limpeza por demanda de pressão).

É possível verificar que a opção de 130 mangas em Renner DT/DT 551 apresentou o menor custo de investimento.

O custo do filtro de mangas será proporcional ao número de válvulas e mangas, uma vez que, foi adotada a mesma relação ar-pano e que as mangas possuem as mesmas dimensões para cada cenário.

Obviamente, a decisão final deverá levar em consideração o custo do consumo de combustível, custo do sistema de neutralização e da cal virgem, custo de aquisição, operação e manutenção do forno adequado para cada combustível.

Tabela 4. Relação de custo-benefício para o Sistema de filtração com base no tipo de combustível. Avaliação da viabilidade econômica.

Madeira acácia 1560 kg/h	160 mangas Renner DT/DT 16 válvulas Renner 1½” + 1 ECO 20	R\$ 22.980,00
Óleo 2A 469 kg/h	120 mangas Renner PPS/PPS 12 válvulas Renner 1½” + 1 ECO 12	R\$ 34.910,00
Gás natural 396 kg/h	130 mangas Renner DT/DT 13 válvulas Renner 1½” + 1 ECO 20	R\$ 19.280,00

Relação ar-pano = 1,3 m/min - Dimensões das mangas ϕ 160 x 3000 mm. Resultados obtidos pelo programa “Proteus - Simulador de Filtração Industrial”.

4. Caso Prático 3 – Março/2004: Simulação do Custo-Benefício do Layout e Condições Atmosféricas

4.1. Apresentação

Neste *case*, o Cliente já informou as temperaturas, vazões e composições químicas gasosas em cada coifa de captação.

Contudo, existem duas coifas que captam ar ambiente.

Como a temperatura do ar ambiente varia de 15 a 35 °C e sua umidade de 55 a 100% de umidade relativa ao longo do ano poderá haver influência das condições ambientais no desempenho do sistema de filtração (Figura 14).

Neste sistema, são apresentados os blocos destacados pelo pontilhado vermelho através de uma planta baixa com a localização das coifas de captação e do filtro de mangas.

Algumas questões foram levantadas:

- Tendo em vista a captação de ar ambiente, há possibilidade de condensação de umidade e entupimento dos dutos ou do filtro em algum momento ao longo da operação?
- Qual o material das mangas será mais econômico sob uma operação normal por, pelo menos, 2 anos, ou seja, sem condensações ou ataques químicos?
- Qual a área filtrante necessária para filtração sob a vazão resultante da soma das vazões do gás de cada coifa de captação?
- São esperadas dificuldades operacionais no filtro de mangas? Se sim, como resolver o problema?

4.2. Memorial descritivo

Para solução destas questões foi implementada a metodologia anteriormente citada com o **Proteus - Simulador de Filtração Industrial**, versão 2.4 para facilidade dos cálculos nos balanços de massa e de energia.

A estratégia de simulação foi calcular a temperatura e o Ponto de Orvalho dos gases em cada junção (J1, J2 e J3) tanto para um dia quente e chuvoso (35 °C e 100%UR), como para um dia frio e seco (15 °C e 55%UR) (Figura 15).

Foi possível concluir que, ao passo que, há risco de condensação de ácido na junção J1 num dia quente e chuvoso, há certeza de con-

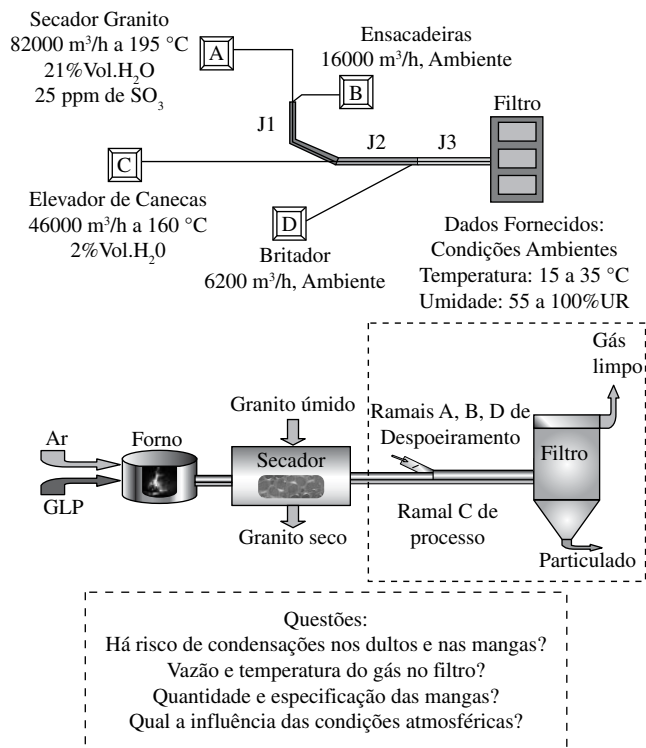


Figura 14. Caracterização da consulta técnica referente ao Caso Prático 3.

densação de ácido sulfúrico num dia frio e seco, uma vez que, o Ponto de Orvalho Ácido está acima da temperatura de operação.

Esta temperatura de operação foi obtida pela mistura dos gases de cada coifa nas temperaturas indicadas na Figura 14.

Desta forma, é esperado o entupimento da tubulação devido a condensação, conforme já verificado em dezenas de casos similares.

Neste caso, haveria a incrustação de material (granito + sulfato de ferro ou zinco) com diminuição da área de passagem gasosa.

Sob esta constrição na tubulação, a velocidade de transporte pneumático poderia facilmente subir de 18 a 20 m/s para valores altos como 30 m/s.

Sob velocidades nesta ordem de grandeza, o particulado facilmente poderia causar abrasão na próxima curva ou mudança de direção da tubulação.

Com isso, poderiam ocorrer furos na tubulação.

Furos provenientes de condensação de ácido, em última instância.

Para resolver este problema, foi sugerida uma reorganização do layout da rede de tubulações (Figura 16).

É possível observar que o problema de condensação ácida na junção J1 foi adequadamente resolvido, pois a temperatura do gás neste local está bem acima do seu Ponto de Orvalho Ácido.

Contudo, dada a proximidade destas temperaturas na junção J3, a junção onde há entrada dos gases no filtro de mangas, é recomendável a instalação de isolamento térmico a partir da junção J2 até a chaminé.

4.3. Conclusões

Não foi verificada diferença significativa entre os dados simulados de vazão e temperatura gasosa para os cenários quente-chuvoso e frio-seco.

Desta forma, foi possível a seleção da mesma especificação e quantidade de mangas filtrantes sem maiores majorações técnicas.

Devido ao fato da temperatura e umidade serem relativamente elevadas, foi selecionada a manga em Polifenilsulfeto, Renner PPS/PPS 551, numa quantidade tal que respeite a relação ar-pano indicada para o dimensional de mangas originalmente solicitado pelo Cliente (Figura 17).

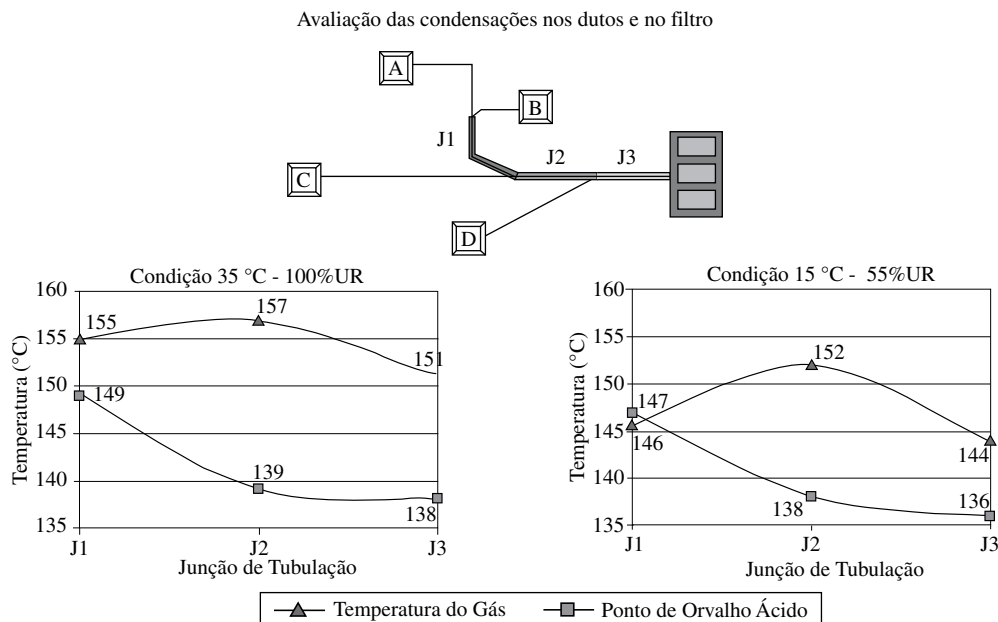


Figura 15. Resultados de Simulação para os dois cenários possíveis.

Solução da condensação no duto

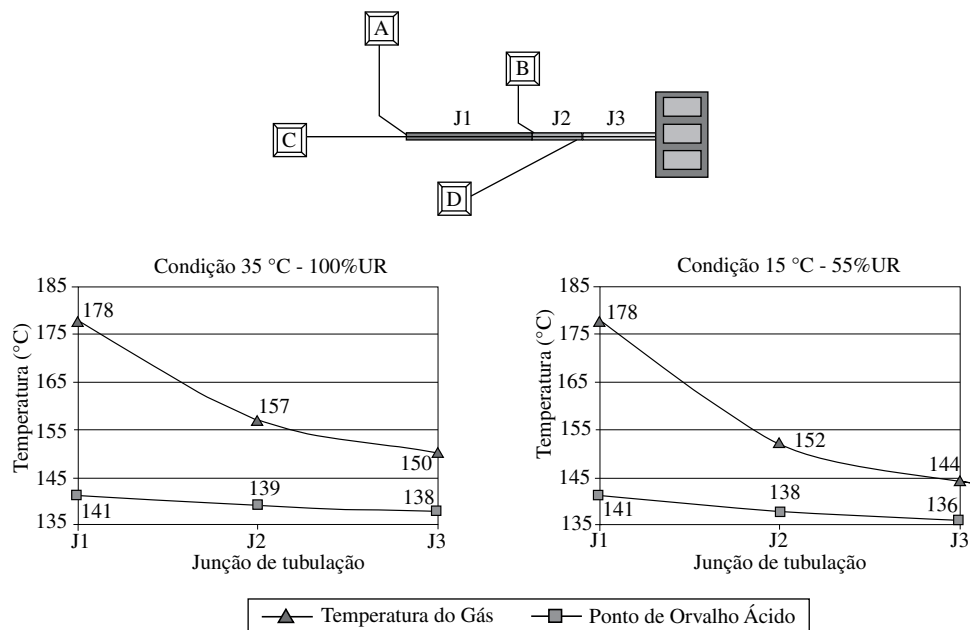


Figura 16. Resultados de Simulação para os dois cenários possíveis após otimização da tubulação.

Dimensionamento do Filtro e Especificação das Mangas

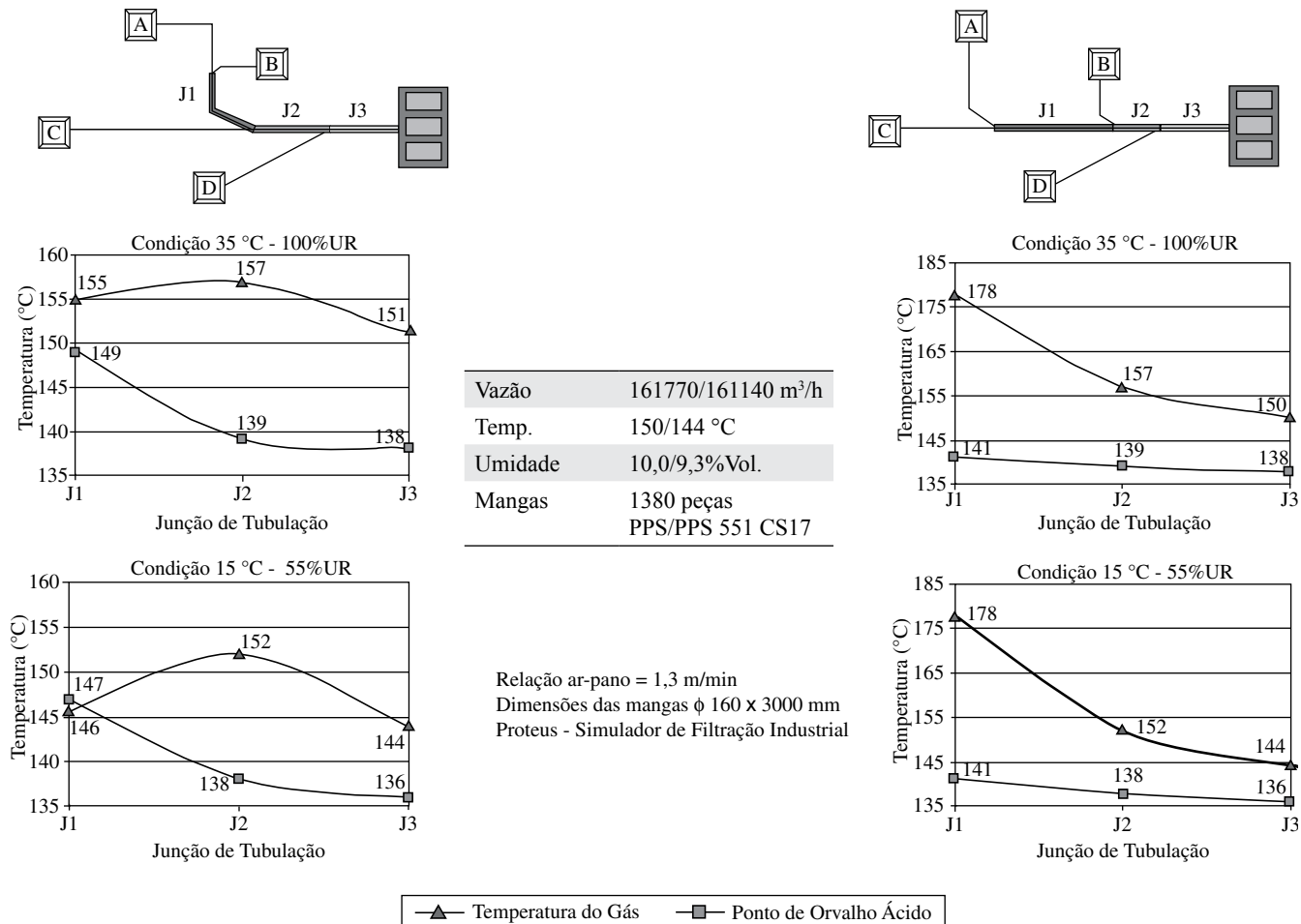


Figura 17. Dimensionamento do Sistema de filtração e rede de dutos com base nas condições ambientais.

5. Conclusões Complementares

A avaliação do aspecto químico da filtração se faz indispensável nas investigações de Falhas de Projetos ou de Solução de Problemas crônicos de Sistemas de Filtração, seja por entupimento, seja por alta emissão de pó devido ao ataque químico dos elementos filtrantes.

No entanto, se faz necessário reforçar que é fortemente recomendável a avaliação concomitante do aspecto mecânico, como por exemplo, dentre muitos itens, a eficiência do sistema de limpeza.

Ao longo dos 3 casos práticos, foi exemplificada a realidade comumente observada em termos de falta de informação da maioria dos Usuários de Filtros quanto às características dos gases filtrados como: vazão, temperatura e composição química na entrada do filtro de mangas.

Por outro lado, sem estes dados, o dimensionamento do equipamento e a especificação do material do elemento filtrante tornam-se tecnicamente inviáveis, ou, no mínimo, pouco confiáveis.

Além disso, tem sido observado que muitos questionários sobre o sistema de filtração, retornados pelos Usuários, apresentavam dados omissos, contraditórios, quando não, absurdos.

Para viabilizar a solução destes problemas do dia-a-dia em Consultoria Industrial foi desenvolvida a tecnologia de Simulação Computacional de Sistemas de Filtração incorporada no programa **Proteus - Simulador de Filtração Industrial** para, a partir dos dados do processo industrial de domínio do Usuário, ser possível a identificação das condições operacionais do filtro de mangas.

Por outro lado, em muitos casos, são realizadas as amostragens da chaminé ou da entrada do filtro para caracterização da vazão, temperatura e composição química gasosa.

Referente a isso é possível fazer uma analogia:

“Enquanto estas amostragens constituem uma “foto” do Processo Industrial, a simulação computacional, constitui um “filme” do Processo Industrial”.

Obviamente, estas amostragens são extremamente úteis para ajuste fino do modelo matemático protagonizado no procedimento de simulação computacional.

Desta forma, com o uso da simulação é possível avaliar adequadamente o aspecto químico da filtração, permitindo a identificação precoce de problemas, determinação de Garantias de Performance confiáveis e Solução de Problemas que por outro método não tenha sido possível.

6. Leitura Complementar

Para receber o arquivo bilíngüe dos slides referentes à apresentação deste Artigo no “VI Seminário de Filtração Industrial” ou para receber os artigos da leitura complementar basta solicitar por e-mail, lembrando de informar seu Nome completo, Telefone, Razão Social e Cidade-UF de sua Empresa.

- Consulte o Artigo: “**Como obter o rendimento máximo do filtro de mangas**” para maiores detalhamentos sobre especificação de elementos filtrantes.

Este artigo foi atualizado com base em artigo homônimo do mesmo autor publicado e apresentado no “V Congresso Brasileiro de Cimento Portland” – ABCP - em Novembro de 1999 – Belo Horizonte/MG.

Esta versão atualizada foi publicada na “Revista Química & Derivados” da edição de Agosto de 2002.

- Consulte o Artigo: “**Lavagem seca do SO₂ através de filtros de Mangas**” para maiores informações sobre a técnica de neutralização química de gases ácidos.

Este artigo foi publicado e apresentado no “I Congresso Interamericano da Qualidade do Ar” - ABES - em Julho de 2003 – ULBRA/RS.

Ele também foi publicado na “Revista Meio Filtrante” da edição de Janeiro-Março de 2004.