

■ ■ ■ ■ ■

## Controle das Emissões Atmosféricas Trocadores Gás & Gás

**Planta de Ácido Sulfúrico**  
**Caraiba Metais S/A**

Luís Henrique R. Monteiro – Caraiba Metais  
George Miller – Aker Kvaerner Chemetics

■ ■ ■ ■ ■

## Índice

- Introdução
- Evolução da Capacidade de Ácido Sulfúrico
- Fluxograma Processo Original
- Eficiência da Planta
- Análise dos problemas Operacionais
- Modificações de Projeto

■ ■ ■ ■

A Caraíba Metais dispõe de uma planta de ácido sulfúrico projetada pela Natron Engenharia com capacidade de 1.870 tpd para recuperação dos gases da fundição de cobre em Dias d'Ávila – Bahia. A partir do start-up da planta de ácido sulfúrico (1982) houve uma série de modificações que permitiram a expansão da capacidade de produção para 2.475 tpd.

Na medida em que houve um gradual aumento da capacidade de produção, ocorreram vários problemas operacionais, relacionados com o arraste de gotas de ácido sulfúrico e/ou deficiência de secagem dos gases que resultaram na corrosão dos trocadores de calor gás & gás e incremento das emissões pela chaminé do sulfúrico.

■ ■ ■ ■

Em 2006, conforme análise dos problemas operacionais, optou-se por uma substancial modificação da tecnologia aplicada originalmente, objetivando evitar falhas operacionais nos trocadores de calor gás & gás e manter sob controle as emissões atmosféricas.

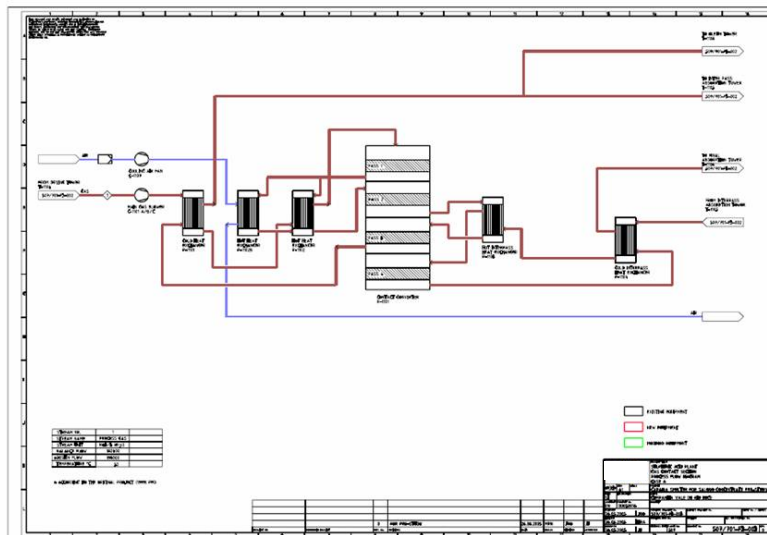
## Evolução da Capacidade de Acido Sulfúrico

COBRAS V – Salvador, BA - 2007

1. Projeto Original - 1982
  1. Purificação de gases: 150.000 Nm<sup>3</sup>/h
  2. Absorção e Conversão: 193.000 Nm<sup>3</sup>/h e 9,0 % SO<sub>2</sub>
  3. Capacidade de Produção: 1.870 t/dia
2. Projeto Atual - 2000
  1. Purificação de gases: 190.000 Nm<sup>3</sup>/h
  2. Absorção e Conversão: 210.000 Nm<sup>3</sup>/h e 11,0 % SO<sub>2</sub>
  3. Capacidade de Produção: 2.475 t/dia
3. Projeto Futuro – 2011
  1. Purificação de gases: 190.000 Nm<sup>3</sup>/h
  2. Absorção e Conversão: 245.000 Nm<sup>3</sup>/h e 12,0 % SO<sub>2</sub>
  3. Capacidade de Produção: 3.150 t/dia

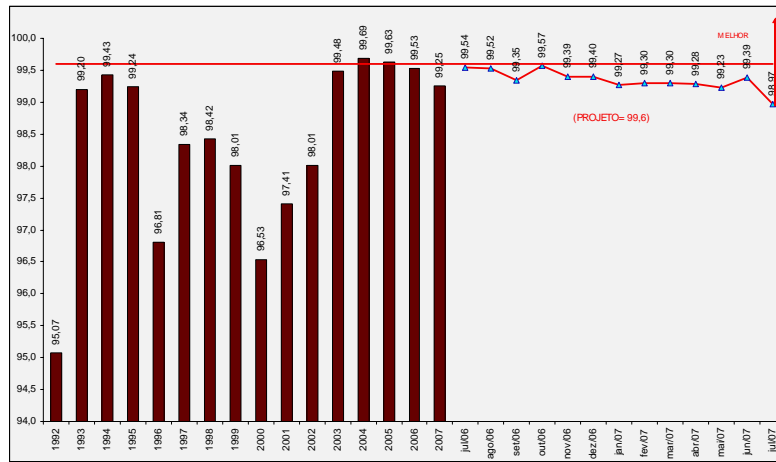
## Fluxograma Original de Processo

COBRAS V – Salvador, BA - 2007



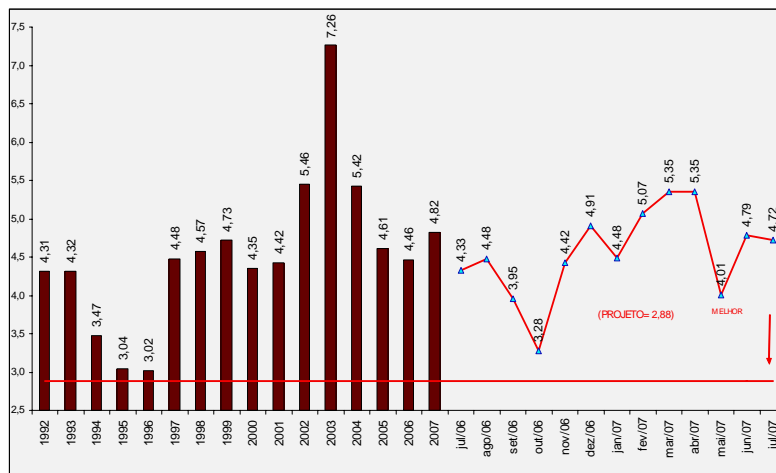
### Eficiência da Planta

#### Rendimento de enxofre c/ água ácida – sulfúrico



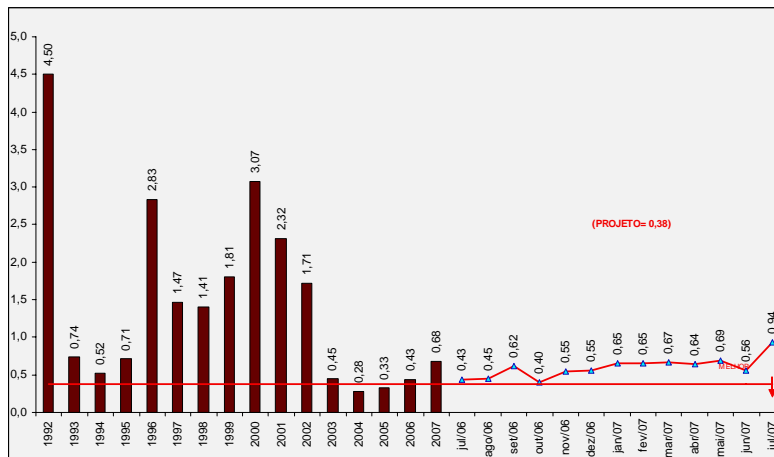
### Eficiência da Planta

#### Perda de enxofre na água ácida - sulfúrico



## Eficiência da Planta

### Perda de enxofre pela chaminé - sulfúrico



CARAIBA METAIS

Page 9

CARAIBA METAIS S.A. AKER KVÆRNER  
GRUPO PARANAPANEMA

## Análise dos problemas operacionais – trocadores gás & gás

### 1989 – COLD REHEAT EXCHANGER – P1104

- Baixa eficiência dos eliminadores de névoa da torre intermediária;
- Arraste de gotas de ácido sulfúrico e névoa para o trocador de calor, ocasionando acúmulo de sulfato c/ ácido sulfúrico no espelho superior e chicanas do lado do casco c/ corrosão dos tubos;
- Ações corretivas:
  - Ampliação dos eliminadores de névoa da torre intermediária.

### 1991 – COLD HEAT EXCHANGER – P1101

- Baixa eficiência dos eliminadores de névoa da torre secagem;
- Arraste de gotas de ácido sulfúrico e névoa para o trocador de calor, ocasionando acúmulo de sulfato c/ ácido sulfúrico no espelho superior e chicanas do lado do casco c/ corrosão dos tubos;
- Ações corretivas:
  - Ampliação dos eliminadores de névoa da torre intermediária.

CARAIBA METAIS

Page 10

CARAIBA METAIS S.A. AKER KVÆRNER  
GRUPO PARANAPANEMA

## Análise dos problemas operacionais – trocadores gás & gás

### 1997 – COLD HEAT EXCHANGER – P1101

- Baixa eficiência dos precipitadores eletrostáticos do forno flash, ocasionando excesso de material particulado no sistema de purificação de gases ;
- Obstrução dos trocadores de placas da torre de lavagem, ocasionando elevação da temperatura;
- Excesso de umidade na corrente gasosa, ocasionando diluição da torre de secagem, queda do eliminador de névoas e arraste de gotas de ácido sulfúrico para o trocador de calor, ocasionando acúmulo de sulfato no espelho superior e chicanas do lado do casco c/ corrosão dos tubos;
  - Parada da fundição para plugueamento dos tubos ( 5 dias );
  - Perda de 25% dos tubos do trocador de calor;
  - Perda dos tubos do hot exchanger;
- Ações corretivas:
  - Redução do trip da torre de lavagem;
  - Instalação de analisador de concentração na torre de secagem c/ alarme;
  - Controle da eficiência dos precipitadores do forno flash baseado no teor de cobre na água ácida;
  - Substituição do cold heat exchanger ( 2002 );
  - Retubagem do hot exchanger ( 2003 ).

## Eliminadores de névoa – torre intermediária



## Substituição do cold heat exchanger 2002

COBRAS V – Salvador, BA - 2007



CARAIBA METAIS  
Page 13

CARAIBA METAIS S.A. **AKER KVÆRNER**  
Grupo ARANAPANEMA

## Substituição do cold heat exchanger 2002

COBRAS V – Salvador, BA - 2007



CARAIBA METAIS  
Page 14

CARAIBA METAIS S.A. **AKER KVÆRNER**  
Grupo ARANAPANEMA

## Substituição do cold heat exchanger 2002

COBRAS V – Salvador, BA - 2007



CARAIBA METAIS  
Page 15

CARAIBA METAIS S.A. **AKER KVÆRNER**  
Grupo PARANAPANEMA

## Substituição do cold heat exchanger 2002

COBRAS V – Salvador, BA - 2007



CARAIBA METAIS  
Page 16

CARAIBA METAIS S.A. **AKER KVÆRNER**  
Grupo PARANAPANEMA

## Análise dos problemas operacionais – trocadores gás & gás

### 2002 – COLD HEAT EXCHANGER – P1101

- Excesso de umidade na corrente gasosa ocasionou diluição da torre de secagem, queda do eliminador de névoas e também corrosão da cúpula de aço carbono;
- Entrada de ar úmido c/ formação de ácido sulfúrico e condensação nas chicanas do lado do casco e corrosão dos tubos;
  - Parada da fundição para plugueamento dos tubos ( 5 dias );
  - Perda de 25% dos tubos do trocador de calor;
  - Elevação das emissões pela chaminé do sulfúrico;
- Ações corretivas:
  - Substituição da cúpula de aço carbono p/ inox;
  - Aumento da troca de ácido sulfúrico entre torre de secagem e intermediária;
  - Retubagem parcial ( 25% ) do cold heat exchanger ( 2003 );

## Corrosão da cúpula – torre de secagem



## Eliminadores de névoa – torre de secagem

COBRAS V – Salvador, BA - 2007



CARAIBA METAIS  
Page 19

CARAIBA METAIS S.A.  
Grupo ARANAPANEMA  
**AKER KVÆRNER**

## Eliminadores de névoa – torre de secagem

COBRAS V – Salvador, BA - 2007



CARAIBA METAIS  
Page 20

CARAIBA METAIS S.A.  
Grupo ARANAPANEMA  
**AKER KVÆRNER**

## Eliminadores de névoa – torre de secagem

COBRAS V – Salvador, BA - 2007



CARAIBA METAIS  
Page 21

AKER KVÆRNER™

## Análise dos problemas operacionais – trocadores gás & gás

COBRAS V – Salvador, BA - 2007

### 2006 – COLD HEAT EXCHANGER – P1101

- Corrosão da curva de descarga da bomba de circulação da torre de secagem, ocasionando baixa eficiência de secagem c/ condensação de ácido sulfúrico nas chicanas do lado do casco e corrosão dos tubos;
  - Parada da fundição para plugueamento dos tubos ( 5 dias );
  - Perda de 25% dos tubos do trocador de calor;
  - Elevação das emissões pela chaminé do sulfúrico;
  - Perda parcial dos tubos do cold reheat exchanger.
- Ações corretivas:
  - Instalado trip de temperatura nas torres de secagem e absorção;
  - Instalada medição de vazão na circulação de ácido sulfúrico nas torres de secagem e absorção;
  - Instalado opacimetro nas saída dos precipitadores eletrostáticos;
  - Substituição do cold reheat exchanger ( 2007 );
  - Substituição do cold heat exchanger ( 2007 );
  - **Alteração do projeto dos trocadores de calor gás & gás;**

CARAIBA METAIS  
Page 22

CARAIBA METAIS S.A.  
Grupo PARANAPANEMA  
AKER KVÆRNER™

### Descarga da bomba circulação furada - torre de secagem



CARAIBA METAIS  
Page 23

CARAIBA METAIS S.A. **AKER KVÆRNER**  
Grupo ARANAPANEMA

### Corrosão dos tubos - casco do cold heat exchanger



CARAIBA METAIS  
Page 24

CARAIBA METAIS S.A. **AKER KVÆRNER**  
Grupo ARANAPANEMA

## Corrosão dos tubos - casco do cold heat exchanger

COBRAS V – Salvador, BA - 2007



CARAIBA METAIS  
Page 25

CARAIBA METAIS S.A. Grupo ARANAPANEMA AKER KVÆRNER™

## Corrosão dos tubos – cold heat exchanger

COBRAS V – Salvador, BA - 2007



CARAIBA METAIS  
Page 26

CARAIBA METAIS S.A. Grupo ARANAPANEMA AKER KVÆRNER™

## Corrosão dos tubos – cold reheat exchanger

COBRAS V – Salvador, BA - 2007



CARAIBA METAIS  
Page 27

CARAIBA METAIS S.A.  
Grupo ARANAPANEMA  
AKER KVÆRNER™

## Cabeçote inferior – cold heat exchanger

COBRAS V – Salvador, BA - 2007



CARAIBA METAIS  
Page 28

CARAIBA METAIS S.A.  
Grupo ARANAPANEMA  
AKER KVÆRNER™

## Condensação Ác. Sulfúrico – cold reheat exchanger

COBRAS V – Salvador, BA - 2007



CARAIBA METAIS  
Page 29

CARAIBA METAIS S.A. Grupo ARANAPANEMA **AKER KVAERNER**

## Espelho superior – cold heat exchanger

COBRAS V – Salvador, BA - 2007



CAR  
Page 30

CARAIBA METAIS S.A. Grupo ARANAPANEMA **AKER KVAERNER**

## NOVO PROJETO

COBRAS V – Salvador, BA - 2007

### Alteração do projeto dos trocadores gás & gás

#### MATERIAIS - PESO:

- Projeto Original: tubos e casco em aço carbono c/ peso de 240 toneladas exigindo guindaste de 1.000 toneladas para troca do equipamento;
- Projeto Aker Kvaerner Chemetics: até 450 °C pode ser usado o aço carbono! Acima de 450 °C é recomendado o uso de aço inox 304 H;
- Cold Heat Exchanger: a troca do material de aço carbono para inox proporcionou uma redução no peso de 240 p/ 125 toneladas, exigindo um guindaste de apenas 450 toneladas;
- Cold Reheat Exchanger: apesar da aplicação do aço carbono ao invés de aço inox houve uma redução no peso de 240 p/ 180 toneladas em função do projeto dos tubos.

## NOVO PROJETO

COBRAS V – Salvador, BA - 2007

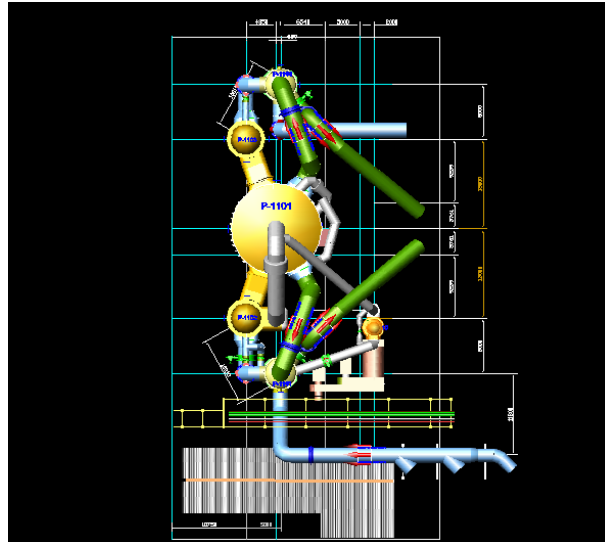
### Alteração do projeto dos trocadores gás & gás

#### ARRANJO DO FLUXO:

- Projeto Original:
  - Tubos: gases da torre de secagem descendente pelos tubos, ocasionando acúmulo de sulfato e ácido sulfúrico no espelho superior;
  - Casco: gases do terceiro leito do reator ascendentes pelo casco, ocasionando condensação de ácido sulfúrico nas chicanas;
- Projeto Aker Kvaerner Chemetics:
  - Tubos: gases do terceiro leito do reator descentes pelos tubos, evitando condensação de ácido sulfúrico no espelho superior e/ou tubos. Caso haja condensação de ácido sulfúrico nos tubos, o material seria expelido pela corrente gasosa até o cabeçote inferior para drenagem;
  - Casco: gases da torre de secagem ascendentes pelo casco com câmara de separação de gotas, evitando arraste de gotas de ácido sulfúrico. Caso haja passagem de mist as gotas de ácido sulfúrico são vaporizadas e/ou condensadas e drenadas para câmara de separação de gotas, evitando ~~corrosão dos tubos do lado do casco.~~

## Rearranjo dos trocadores gás & gás

COBRAS V – Salvador, BA - 2007

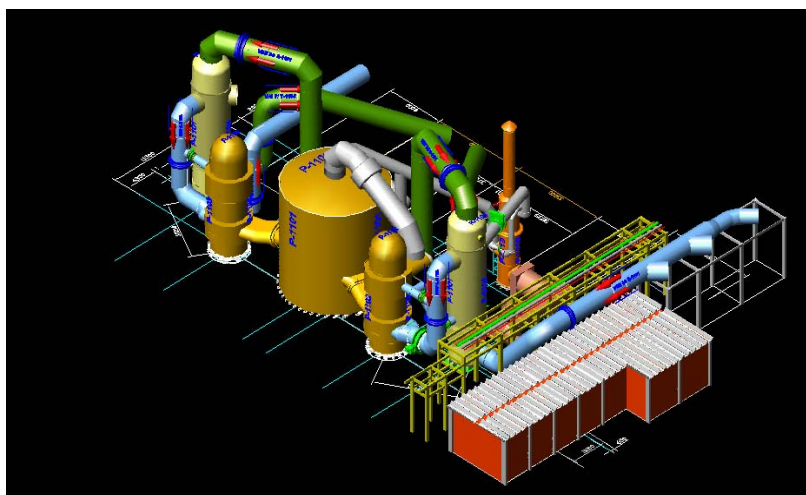


CARAIBA METAIS  
Page 33

CARAIBA METAIS S.A. Grupo ARANAPANEMA AKER KVÆRNER™

## Rearranjo dos trocadores gás & gás

COBRAS V – Salvador, BA - 2007



CARAIBA METAIS  
Page 34

CARAIBA METAIS S.A. Grupo ARANAPANEMA AKER KVÆRNER™

**NOVO PROJETO****Alteração do projeto dos trocadores gás & gás****PROJETO DO EQUIPAMENTO:**

- Projeto Térmico:
  - Tubos: possuem fluxo radial c/ arranjo dos tubos com um pitch mais moderno que o tradicional pitch triangular de 60 graus do projeto original, proporcionando uma velocidade constante ao longo dos tubos, evitando dilatação térmica diferenciada no espelho. Os tubos são soldados ao espelho ao invés de mandrilhados, evitando passagem de gases entre o casco e o tubo.
  - Casco: projeto diferenciado das chicanas: anéis e discos c/ câmara central; proporcionando melhor eficiência de troca térmica, evitando zonas mortas e condensação de ácido sulfúrico;
  - Perda de carga: o projeto original proporciona o acúmulo de sulfato do lado do casco, sendo que hoje estamos operando com uma perda de carga de 1.000 & 1.100 mm de coluna d'água, respectivamente no cold heat and cold reheat exchanger, ou seja, 1.100 mm de coluna d'água acima do projeto original, representando uma elevação significativa do consumo de energia.

## Trocadores de calor gás / gás proprietários da AKC

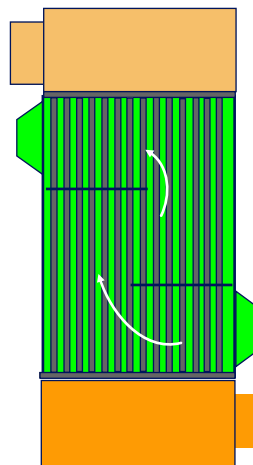
## Problemas encontrados em projetos de trocador de calor existentes

- Baixa eficiência térmica
- Tensões mecânicas extremas
- Corrosão severa

## Trocador de calor clássico

Feixe tubular com zonas mortas

Uso ineficiente de uma superfície de troca térmica muito cara



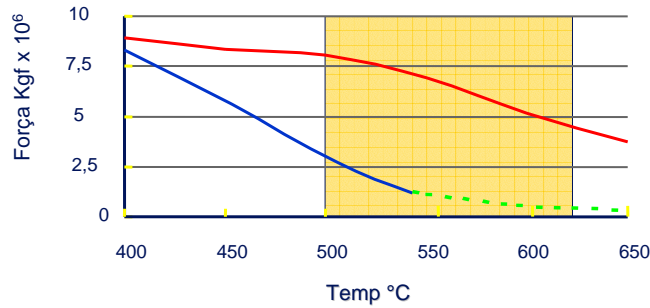
*Materiais de Construção*

- Grande gama de aplicações
- **Gases:**
  - Quentes, úmidos e com pó
  - Frios e úmidos
  - **Quentes e corrosivos**
- **Ácidos :**
  - Fracos e corrosivos
  - Fortes e quentes

*Materiais de Construção*

Permitido pelo código ASME  
Tensões de projeto

— **304 S.S.**  
— **516 Gr. 70**  
- - - **Projeção**



## Trocador de calor clássico

COBRAS V – Salvador, BA - 2007



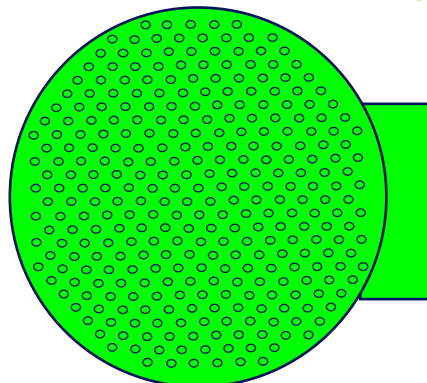
AKER KVAERNER  
Page 41

CARAÍBA METAIS S.A. Grupo ARANAPANEMA **AKER KVAERNER**

## Trocador de calor clássico

COBRAS V – Salvador, BA - 2007

### Arranjo dos tubos



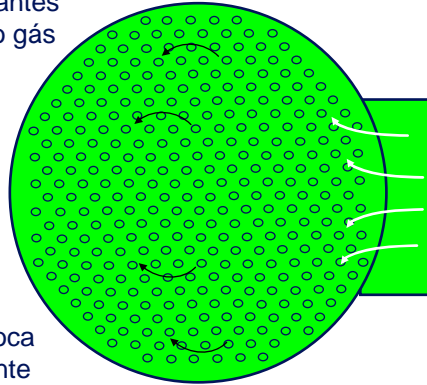
AKER KVAERNER  
Page 42

CARAÍBA METAIS S.A. Grupo ARANAPANEMA **AKER KVAERNER**

## Trocador de calor clássico

Mudanças constantes na velocidade do gás

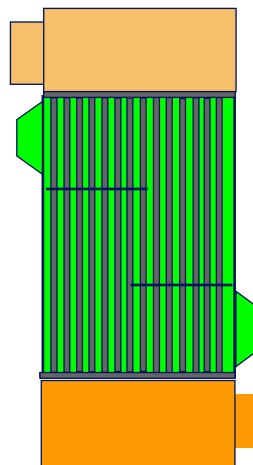
Arranjo dos tubos



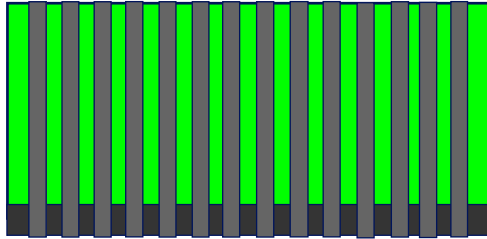
Resultam em troca térmica ineficiente

## Trocador de calor clássico

Tensões extremas entre tubos e entre tubos e espelho

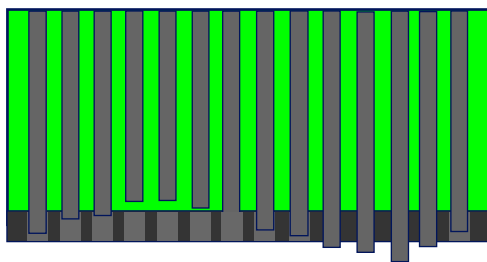


## Trocador de calor clássico



Os tubos se expandem e ou se contraem em razão das diferentes temperaturas aplicadas ao metal

## Trocador de calor clássico



Os tubos se expandem e ou se contraem em razão das diferentes temperaturas aplicadas ao metal

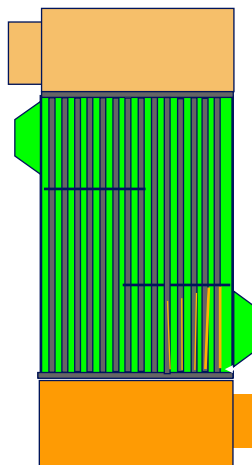
Alguns tubos se expandem e outros encolhem-se causando vazamentos

### Trocador de calor clássico



### Trocador de calor clássico

Ataque por particulado ácido contido no gás entrante

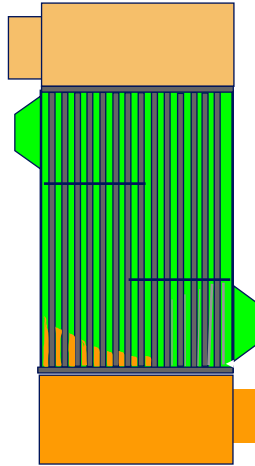


Corrosão severa na superfície do tubo

## Trocador de calor clássico

Ataque por particulado ácido contido no gás entrante

Resulta em sulfatação que restringe o fluxo



## Classical Heat Exchanger

Ataque por particulado ácido na entrada do gás no trocador de calor



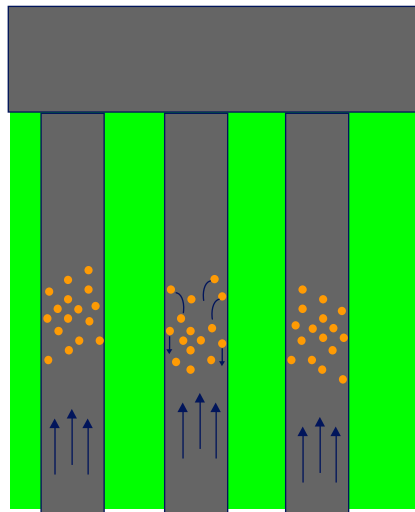
## Trocador de calor clássico



## Trocador de calor clássico

Falha resultante da condensação de  $\text{SO}_3$

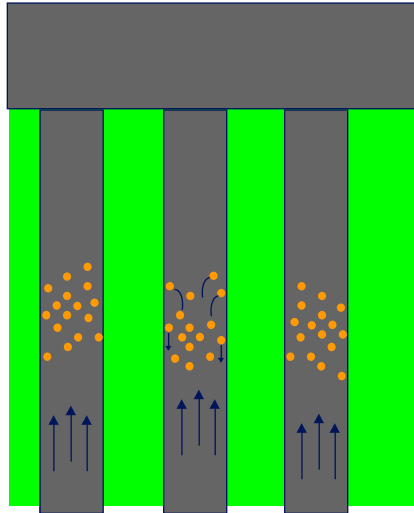
O  $\text{SO}_3$  fluindo de baixo para cima condensa na superfície de metal frio, e acaba sendo arrastado pelo gás



## Trocador de calor clássico

Falha resultante da  
condensação de  $\text{SO}_3$

Os tubos sofrem de  
erosão e corrosão e  
acabam por falhar



## Proposta de Melhorias

- Melhorar a troca térmica, com vistas a maximizar a eficiência de tubos muito caros.
- Eliminar ou minimizar tensões diferenciais dentro do trocador de calor.
- Endereçar ao assunto corrosão
- Selecionar materiais de construção adequados para a aplicação.
- Simplificar o arranjo dos dutos.

## Trocador de calor proprietário da CHEMETICS

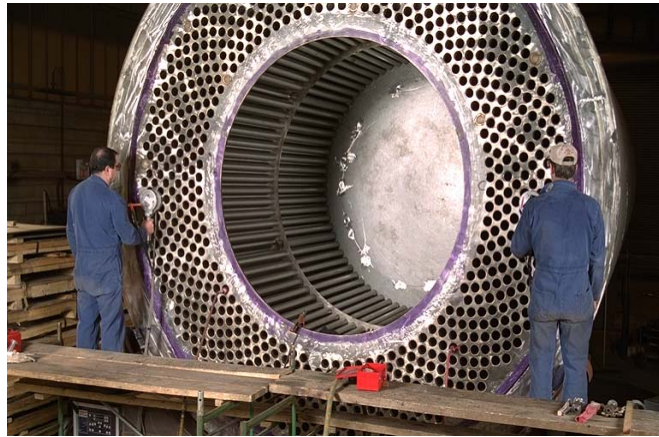
Passo radial patenteado pela Chemetics

Arranjo dos tubos em círculos concêntricos

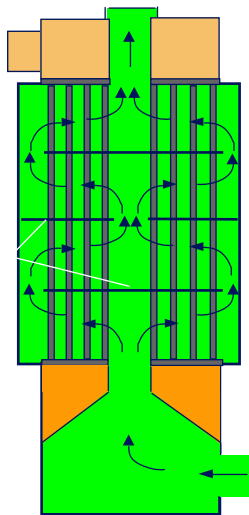
## Trocador de calor proprietário da CHEMETICS

Velocidade constante da massa de gás através do feixe tubular

Espejo de trocador de calor gás / gás com passo patenteado



### Trocador de calor gás / gás



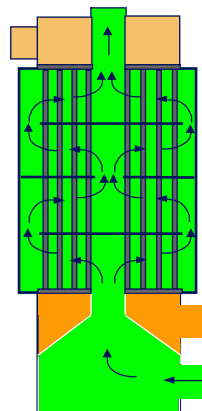


Trocador gás / gás em processo de fabricação na divisão Chemetics da Aker Kvaerner em Toronto.

### Trocador de calor gás / gás

Lay-out totalmente simétrico

Total liberdade para escolha da posição dos bocais

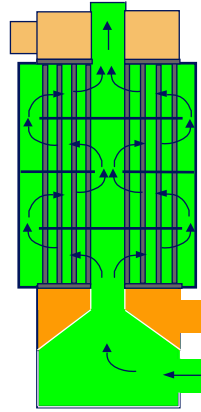


### Trocador de calor gás / gás

Materiais de construção selecionados em função da temperatura de operação

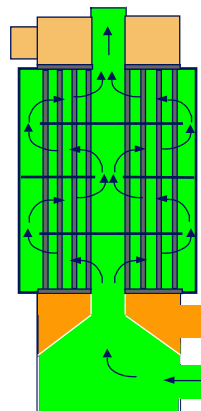
> 450 °C = Aço inoxidável

< 450 °C = Aço carbono



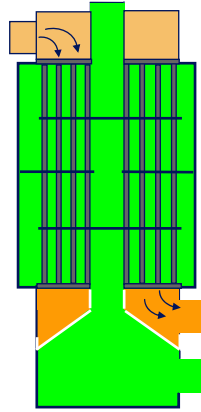
### Trocador de calor gás / gás

Vestíbulo de entrada em aço inoxidável promove a separação das gotículas de particulado ácido contidas no SO<sub>2</sub>



### Trocador de calor gás / gás

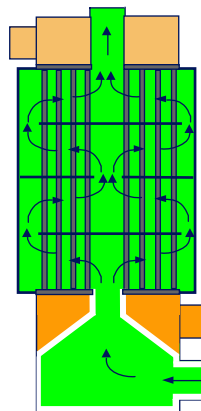
Fluxo de cima para baixo do SO<sub>3</sub> previne o acúmulo de gotículas de SO<sub>3</sub> dentro dos tubos



### Pré aquecedor

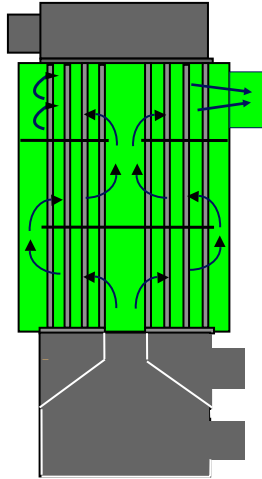
Gás de combustão atravessando o casco assegura aquecimento uniforme

O vestíbulo de entrada é revestido de massa de cerâmica



## Trocador de calor gás / gás

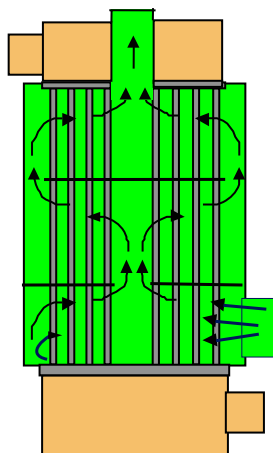
## Opções de arranjo



- O gás que passa pelo casco entra pelo fundo, e sai por um bocal lateral.
- Número ímpar de passagens pelo casco.
- Perda de eficiência térmica na última passagem.
- Eficiência térmica inferior ao projeto básico.

## Trocador de calor gás / gás

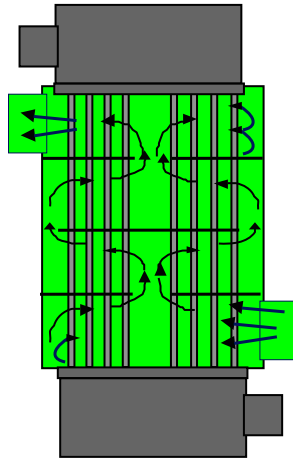
## Opções de arranjo



- Arranjo ao contrário
- O gás que passa pelo casco entra por um bocal lateral e sai pelo topo.
- A primeira passagem é menos eficiente .
- Eficiência térmica inferior ao projeto básico.

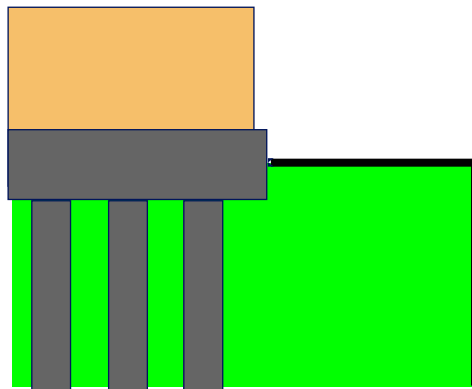
## Trocador de calor gás / gás

## Opções de arranjo

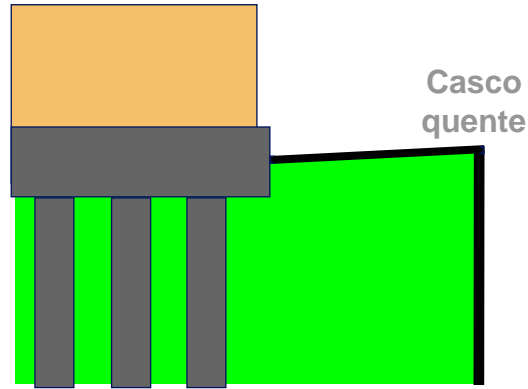


- Bocais laterais.
- Numero par de passes.
- A primeira e a ultima passagem são as menos eficientes.
- A mais baixa eficiencia térmica entre todas as opções.

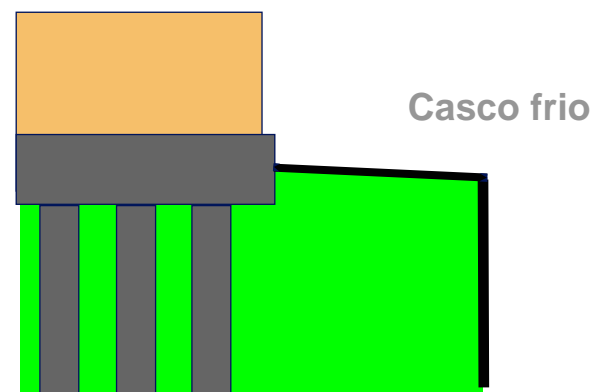
## Expansão térmica dentro do trocador



## Expansão térmica dentro do trocador



## Expansão térmica dentro do trocador





Solda do anel de  
expansão ao espelho



Solda automática dos tubos ao espelho.  
Solda de dois passes aplicada a todos os projetos.



Trocador de re-aquecimento intermediário para a Thai Copper  
Pronto para embarque na planta da AKC em Toronto.



Trocador gás / gás para Zhong Taio Shan, PRC  
sendo embarcado na fábrica da AKC Toronto Canada.



O primeiro de 8 trocadores sendo embarcado para - Agrico – Florida de 1984 a 1994



Reforma de um trocador gás / gás na IMC-Agrico Florida



Reforma na  
Falconbridge, Sudbury



Trocador gás / gás em aço inox  
instalado em 1982, como parte de  
uma reforma de fábrica para  
Dupla Absorção



Trocador gás / gás sendo instalado na Ineos, Runcorn UK.



Trocador gás / gás na Sasol Agri.,  
Julho de 2002 durante a fase 2 da  
reforma da planta de ácido



Conversor de ácido sulfúrico  
Noranda Minerals,  
Quebec, Canada

AKER KVAERNER  
Page 81

CARAÍBA METAIS S.A. **AKER KVAERNER**  
Grupo PARANAPANEMA



Conversor para planta de  
1100 ton/dia de ácido  
regenerado nos EUA - 1988

AKER KVAERNER  
Page 82

CARAÍBA METAIS S.A. **AKER KVAERNER**  
Grupo PARANAPANEMA



Trocador gás / gás P1101  
fornecido a Caraíba Metais

Execução: 100% em aço inox 304  
Fabricação Dedini – Parada de 10/2007

AKER KVAERNER  
Page 83

CARAÍBA METAIS S.A. **AKER KVAERNER**  
Grupo ARANAPANEMA



Trocador gás / gás P1101  
fornecido a Caraíba Metais

Execução: 100% em aço inox 304  
Fabricação Dedini – Parada de 10/2007

AKER KVAERNER  
Page 84

CARAÍBA METAIS S.A. **AKER KVAERNER**  
Grupo ARANAPANEMA



Trocador gás / gás P1104  
fornecido a Caraíba Metais

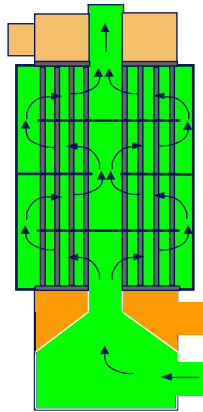
Execução: Casco e tubos: Aço Carbono  
Vestíbulos em inox 304  
Fabricação: Met. Bosch – Parada de 10/2007



Trocador gás / gás P1104  
fornecido a Caraíba Metais

Execução: Casco e tubos: Aço Carbono  
Vestíbulos em inox 304  
Fabricação: Met. Bosch – Parada de 10/2007

## Trocador de calor gás / gás



## Trocador de calor Características e Benefícios

- **Eficiência otimizada na troca térmica**
  - O projeto pode ser otimizado para equilíbrio entre a velocidade na troca de calor e a perda de
- **Integridade no projeto mecânico**
  - Um mínimo de tensões diferenciadas através do espelho e entre tubos e espelho.



## Trocador de calor Características e Benefícios

- Endereça a questão do refluxo de particulado ácido
- Flexibilidade ilimitada no arranjo dos dutos
- Todas as unidades são executáveis em fábrica
- Maior durabilidade
- Menos manutenção



Agradecemos a sua atenção....

Caraiba Metais  
&  
Aker Kvaerner Chemetics