

**Universidade Federal de Minas Gerais**  
**Escola de Engenharia**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**  
**Curso de Especialização em Automação Industrial**

DIMENSIONAMENTO E INSTALAÇÃO DE TUBO VENTURI PARA ANALISADORES DE  
GÁS

Públio Galane Braz e Souza

Monografia submetida à Banca Examinadora designada pela Comissão Coordenadora do Curso de Especialização em Automação Industrial, **como parte dos requisitos necessários à obtenção do Certificado de *Especialista em Automação Industrial*.**

Orientador: Prof. Carmela Maria Polito Braga

Belo Horizonte - MG  
Novembro de 2016

DIMENSIONAMENTO E INSTALAÇÃO DE TUBO VENTURI PARA ANALISADORES DE  
GÁS

Públio Galane Braz e Souza

Monografia submetida à Banca Examinadora designada pela Comissão Coordenadora do Curso de Especialização em Automação Industrial, **como parte dos requisitos necessários à obtenção do Certificado de *Especialista em Automação Industrial*.**

Aprovada em dia de mês de ano.

Por:

---

**Prof. Carmela Maria Polito Braga**  
(Orientador)

---

**Prof. Hugo César Coelho Michel**  
(Relator)

## Sumário

1	Introdução	4
1.1	Organização de texto	6
2	Revisão Bibliográfica	7
2.1.1	Processo Siderúrgico	8
2.1.2	Sistema de Arraste de Gás	16
2.2	Tubos Venturi	22
2.3	Revisão de Conceitos	24
2.3.1	Número de Reynolds	27
2.3.2	Lei da continuidade	28
2.4	Princípios e Tipos	29
2.4.1	Venturi do tipo Clássico	29
2.4.2	Venturi do tipo Clássico Longo	30
2.4.3	Venturi do tipo Clássico Curto	30
2.4.4	Venturi do tipo Retangular	30
2.5	Instalação	32
2.6	Equação Modificada	32
2.7	Comentários Finais	33
3	Desenvolvimento	34
3.1	Análise de Dados do Processo	34
3.1	Condições de instalação	38
3.2	Dimensionamento e Instalação do novo Venturi	39
3.3	Sugestões de Trabalhos Futuros	43
4	Conclusões	45
	Referência	47

## REGENERAÇÃO E ANÁLISE DE GÁS DIMENSIONAMENTO DE TUBO VENTURI PARA ANALISADORES DE GÁS

*Públio Galane Braz e Souza<sup>1</sup>,*

### Resumo

A necessidade de melhorias no sistema de análise dos gases surge diante do constante aumento de produção de aço líquido aliado a necessidade de redução do intervalo de tempo entre as corridas de produção e a economia de recursos no processo. Neste contexto, a implementação de um tubo do tipo Venturi no sistema de recuperação, bem como a análise dos gases advindos dos convertedores de uma aciaria é essencial à obtenção de melhores resultados, reduzindo o intervalo de tempo entre corridas, nota-se o aumento crescente do volume adequado do gás recuperado. Define-se pelo uso de um tubo de Venturi, para produzir uma pressão negativa, contribuindo para o arraste dos gases para dentro do sistema de análise e ao mesmo tempo, para atuar como elemento primário na medição da vazão dos gases. Foi efetuado a análise a partir da malha de instrumentação e controle do sistema de exaustão do convertedor da aciaria, no carregamento do gusa nos altos fornos, até o vazamento da matéria prima convertida em aço líquido. Os resultados obtidos afiançam a pretensão em diminuir a contaminação do oxigênio nos gasômetros, além de potencializar a velocidade nos comandos de recuperação, garantindo maior volume na regeneração de gases.

Palavras-chave: Gás, Recuperação, Volume, Malha de controle.

## Abstract

The need for improvements in the gas analysis system arises from the constant increase in liquid steel production coupled with the need to reduce the time interval between production runs and resource savings in the process. In this context, the implementation of a Venturi type tube in the recovery system, as well as the analysis of the gases coming from the converters of a steel plant is essential to obtain better results, since the reduction of the time interval between runs, That the volume of recovered gases is adequate. It was defined by the use of a Venturi tube to produce a negative pressure, which contributes to the entrainment of the gases into the analysis system and, at the same time, to act as a primary element for measuring the gas flow. It was analyzed from the instrumentation and control system of the exhaust system of the converter of the steelworks, the loading of the pig iron in the blast furnaces, to the leakage of the raw material converted into liquid steel. The results obtained strengthen the claim to reduce the oxygen contamination in the gas meters, besides potentiating the speed in the recovery commands, guaranteeing greater volume in the gas regeneration.

Keywords: Gas, Recovery, Volume, Control Loop.

# 1 Introdução

O sistema de análise de gases de um convertedor LD, é um módulo fundamental para a operação e o bom desempenho do convertedor de uma aciaria. Neste interim, a motivação deste trabalho é a busca de melhorias no sistema de análise de gases, dado o constante aumento de produção de aço líquido na indústria siderúrgica, aliado à necessidade de redução do intervalo de tempo entre as corridas de produção e a economia de recursos no processo.

Objetiva-se, para tanto, implementação de um tubo do tipo Venturi no sistema de recuperação para introduzir uma pressão negativa que contribua com o arraste dos gases para dentro do sistema de análise, atuando também como elemento primário de medição de vazão. Além disso, objetiva-se a análise dos gases advindos dos convertedores, visando redução no consumo energético, do convertedor, uma vez que a redução do intervalo de tempo entre as corridas faz com que o volume dos gases recuperados seja o adequado.

O sistema de análise do gás tem como objetivo quantificar qual o volume dos gases providos durante o processo de transformação de gusa em aço. Seu funcionamento se inicia desde o carregamento do gusa dentro dos convertedores, até o termino e configuração do aço, e é de suma importância que o tempo de análise dos gases seja o menor possível, uma vez que só após análise é que os gases são liberados para ingressar no sistema.

Os analisadores, em suma, alertam quanto aos níveis de concentração de gás monóxido de carbono, informando se estes estão altos, e ainda, se os níveis de gás de oxigênio estão próximos ou iguais a 0 (zero). Destarte, obter os dados de resposta em curto período de tempo é essencial não só a celeridade do processo, mas, principalmente no que tange à funcionalidade.

A economia em recursos dá-se na recuperação dos gases produzidos nos convertedores, coqueria, carboquímico e altos fornos, pois os gases oriundos destes locais são os responsáveis por alimentarem as turbinas

geradoras de energia elétrica das empresas metalúrgicas integradas, propiciando constante redução na demanda mensal de energia elétrica de fontes terceiras.

A fabricação de aço pelo processo de BOF (basic oxygen furnace), tem como característica principal a carga metálica que é composta em seu maior percentual de gusa líquido, cerca de 80%, e restante sucata e escória. A composição química do gusa pode variar entre diferentes organizações, mas possui uma média praticada.

Durante o processo de fabricação do aço, o silício é oxidado dando formação a sílica. Para evitar o desgaste prematuro do refratário de revestimento no interior do forno de forma acelerada são adicionadas grandes quantidade de cal, com o intuito de neutralizar a ação da sílica.

Devido a adição de cal, forma-se certo volume de escória dentro do forno, que também possui algumas importantes funções, sendo uma delas a diminuição das projeções de aço líquido durante o sopro de gás com a lança de oxigênio.

O oxigênio é introduzido com altos índices de pressão e velocidade, resultando na oxidação dos elementos contidos no gusa líquido, além de dobrar o volume do gás oxigênio presente no processo.

Dos gases existentes no processo, mais de 60% do volume é constituído de monóxido de carbono (CO), ao entrar em contato com o ar atmosférico, no bocal de entrada do convertedor, o monóxido de carbono se queima, aumentando o volume e a temperatura dos demais gases envolvidos.

Para que todo este volume de gás possa ser aproveitado no processo de geração interna de energia, o sistema de recuperação, por meio de um exaustor, exaure todo o volume de gás gerado no processo, conduzindo-o até os analisadores.

Após a análise e a confirmação de que o oxigênio está com um volume baixo e que o monóxido de carbono ultrapassa os níveis aceitáveis, a malha

de controle do conversor envia um comando para a válvula de 3 vias, que direciona o gás rico em até os tanques de armazenamento.

### **1.1 Organização de texto**

Este trabalho se divide 4 capítulos, conforme citado a seguir.

#### 1 – Introdução

No capítulo 1, trataremos do funcionamento do processo produtivo de uma área siderúrgica e a motivação na criação deste trabalho.

#### 2 – Tubo Venturi

Neste capítulo abordaremos conceitos básicos do tema proposto, geometria e a utilização dos tubos Venturi quando instalados em tubulações completamente preenchidas, de forma a determinar a vazão do fluido de escoamento.

O efeito Venturi ocorre em sistemas fechados quando um fluido com velocidade constante escoar dentro de um duto uniforme. Temos que em um determinado momento há a redução da pressão do fluido por um estreitamento da tubulação, este fator diminui sua pressão e aumenta a velocidade.

#### 3 – Desenvolvimento

Apresenta-se o desenvolvimento do dimensionamento do tubo Venturi para o sistema de análise de gases em estudo, bem como a análise dos dados do processo

#### 4 – Conclusão

Por fim, este trabalho finda com breve conclusão, abordando, entre outros, uma discussão dos resultados obtidos durante a etapa de desenvolvimento deste trabalho.

## 2 Revisão Bibliográfica

Uma revisão do processo de produção de gusa é apresentada de forma a contextualizar como se inicia a formação dos gases a serem analisados durante a transformação do gusa em aço.

Em uma empresa de processo integrado, o início da produção de aço se inicia por dois processos: Coqueria e a Sinterização. Estes dois processos possuem finalidade de tratar e preparar a matéria prima como carvão mineral e o minério de ferro, para que esses possam ser recebidos na área de Alto Forno.

**Coqueificação** – para o processo de coqueificação é utilizado o carvão mineral, por possuir em sua composição química grandes partes de carbono e hidrogênio. Este tipo de mineral é extraído de minas subterrâneas ou a céu aberto em processo de lavra mineral. [1]

Assim que o carvão mineral chega aos pátios de estocagem são enviados por meio de correias transportadoras à coqueria para que seja enornado.

O carvão é colocado dentro de fornos e aquecido por um determinado período de tempo suficiente para que na ausência do oxigênio as moléculas se agitem e saiam na forma de gás, denominado como gás de coqueria. Os compostos orgânicos de baixo peso molecular que sobra após a retirada dos gases, são chamados de coque. Este processo também é conhecido comumente como carbonização ou destilação destrutiva. [1]

Sinterização – este processo consiste na aglomeração a quente de uma mistura dos finos de minério de ferro, coque e fundentes (calcário). Esta mistura de minérios ao ser exposta por uma alta temperatura, faz com que os finos de coque entrem em combustão, liberando a energia necessária, para que o calcário (fundente) se funda, passando do estado solido para o estado líquido. Após o resfriamento o fundente se solidifica, aglomerando o minério de ferro de fina granulometria tornando um corpo de maior granulometria e com características físicas, químicas e metalúrgicas, a resultante deste processo denominamos de sínter. [1]

Com a obtenção das duas matérias secundárias (sínter e coque) e mais algumas matérias primas como: pelotas, fundentes, minério granulado. O alto forno é carregado de forma alternada com coque e materiais ferrosos, simultaneamente a este processo de carregamento, o ar aquecido e soprado pelas ventaneiras, na parte inferior do forno.

Na área inferior do forno, denominado de zona de combustão, o carvão é injetado junto ao coque e após, entram em contato com o ar aquecido gerando gases em um processo à altíssimas temperaturas.

Os gases que estão subindo, em contato com o material ferroso, reagem fundindo a carga e transformando em ferro gusa e escoria (não aproveitada). A escoria é separada do gusa por diferença de densidade, e guiada por um canal de vazamento diferente do ferro gusa. [2]

Após o processo e transformação da matéria prima, o ferro gusa é enviado a Aciaria, para dar início a transformação e refino para o aço.

## **2.1.1 Processo Siderúrgico**

### **2.1.1.1 Aciaria**

A Aciaria conforme mostrada na figura 1, é uma das unidades da usina siderúrgica onde existem máquinas e equipamentos voltados para o processo de transformação do ferro gusa em diferentes tipos de aço.

O equipamento principal de uma Aciaria é o convertedor LD, um tipo de forno revestido com tijolos refratário, responsável por receber o ferro gusa e transformar em aço.

Basicamente, o processo constitui-se de uma lança que introduz oxigênio em alta pressão para o interior do convertedor. O ferro gusa é submetido a conversão em aço, desta forma o teor de ferro é elevado pela eliminação das impurezas e parte do carbono [30]

A principal reação química no convertedor ocorre entre o oxigênio injetado e o carbono presente no ferro gusa, reação esta que gera gases que são destinados para as chaminés pelo sistema de exaustão do convertedor. Além disso, outro fator de relevância destacada é que estes gases se

combinam e reduzem a taxa de carbono do gusa, propiciando a formação do aço conforme especificação demanda.

O processamento na aciaria é bifásico, podendo ser distinguidos como sendo de refino primário e refino secundário. O refino primário acontece no convertedor, onde é adicionado sucata ao ferro-gusa e transformado em aço. Nesta fase, são removidos o silício, o manganês e principalmente o carbono. No refino secundário, são feitas as correções mais específicas e controladas. É também, nesta segunda fase que ocorre a composição de outros elementos químicos, corrigidos através da adição de ferro-ligas ao processo.

Figura 1 – Aciaria Votorantim



Figura de Própria Autoria

### 2.1.1.2 Convertedores

O processo de conversão de ferro gusa em aço líquido torna-se possível devido à oxidação e eliminação das impurezas enxofre e fósforo do material líquido.

Ademais, para que seja alcançado o produto almejado, deve-se adicionar cal com granulometria definida conforme demanda. Como resultante desta reação há o surgimento de escoria altamente oxidante, que atinge teor de carbono próximo ao pretendido no material. [7]

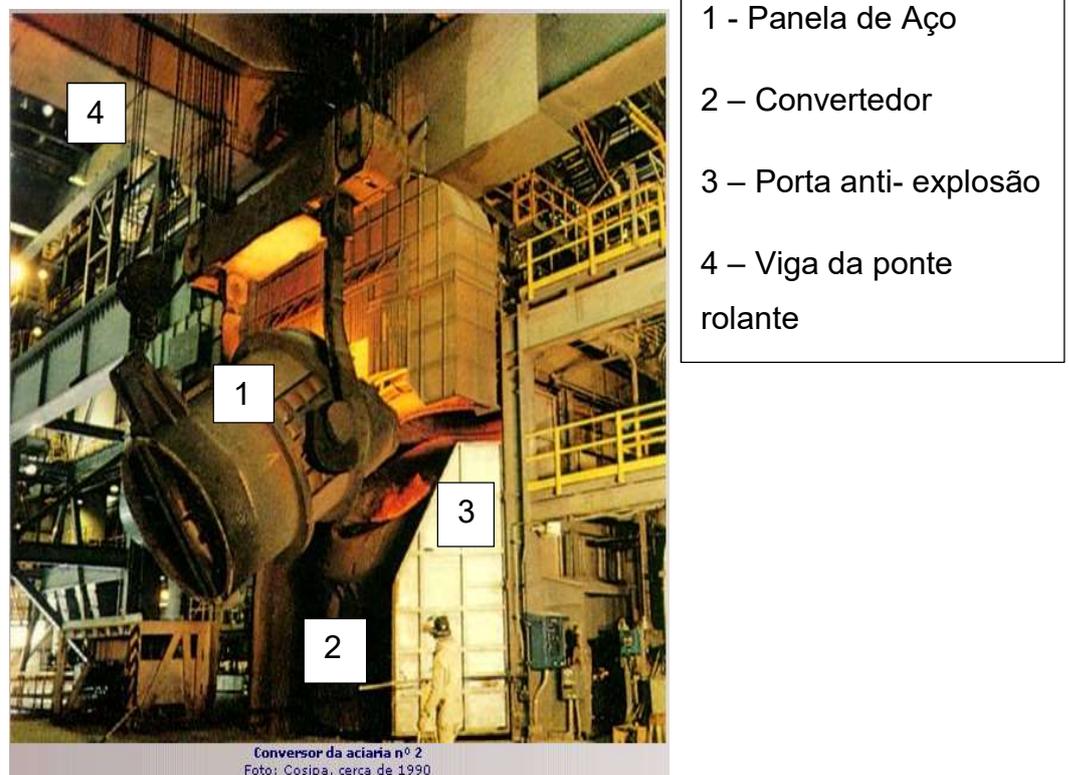
Em detalhes, temos que inicialmente haverá o vazamento do aço, que por ser elemento mais denso, fica na parte inferior do banho de gusa. Em

seguida há o vazamento da escoria, localizada na parte superior do banho. [7]

Todo esse processo de oxidação do aço gera como consequência valores elevados de monóxido de carbono (CO), estes recuperados através do sistema de exaustão. [7]

A figura 2 ilustra como o ferro gusa é introduzido dentro do convertedor, despertando o processo de transformação. [7]

Figura 2 – Convertedor da Aciaria – Foto da Cosipa 1990



Fonte: Disponível em – [www.usiminas.com.br](http://www.usiminas.com.br)

O processo do convertedor funciona pela afinação do ferro gusa aliado à injeção de oxigênio puro.

O convertedor mostrado na figura 3 possui uma abertura voltada para cima em um formato de pera. A lança possui a finalidade de injetar oxigênio puro em alta pressão sobre o banho de gusa, elevando rapidamente a temperatura do gusa. [7]

Figura 3 - Seção esquemática do convertedor



Fonte: Disponível em – [www.superstock.com](http://www.superstock.com)

Antes de iniciar o processo de oxidação do gusa são acrescentadas algumas ligas metálicas conhecidas como sucata, destinadas a refrigerar o interior do convertedor.

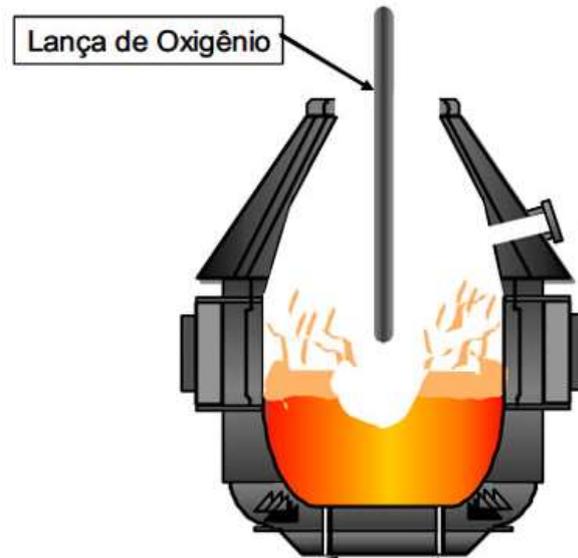
Logo após o gusa ser colocado no convertedor, e feita a inclinação na posição vertical, para iniciar o sopro de oxigênio. [7]

No início do processo uma lança de oxigênio, conforme mostrado na figura 4, é inserida dentro do convertedor, a uma altura pré-determinada, com cuidado para não perfurar a carcaça.

A lança inserida expõe oxigênio com pressão e vazão determinada pelo operador, podendo variar de acordo com o tipo de aço a ser feito.

Advindo da inserção de oxigênio sobre pressão e vazão elevados, tem-se a geração de quantidade de gás proporcional ao volume de oxigênio inserido, sendo que mais de 60% do volume gerado é composto de monóxido de carbono (CO). Entretanto, grande parte é queimada após contato com o oxigênio resultando no aumento da temperatura do gás gerado. [7]

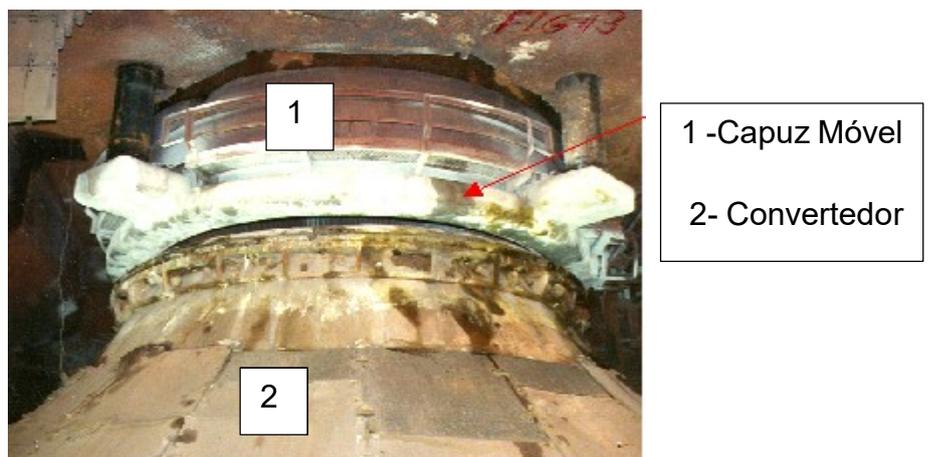
Figura 4 - Lança de oxigênio



Fonte: Disponível em - <http://ispatguru.com/basic-oxygen-furnace-gas-recovery-and-cleaning-system/>

Próximo à boca do convertedor existe um equipamento nominado por capuz móvel, conforme mostrado na figura 5, um dos principais equipamentos no auxílio do controle da pressão

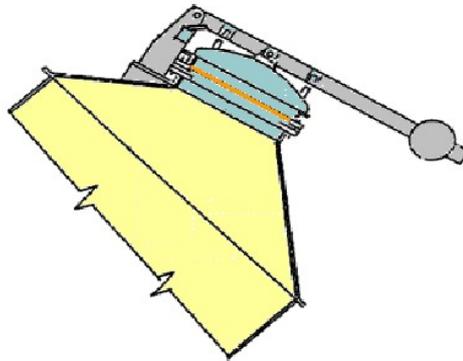
Figura 5 – Saia móvel interna do sistema



Fonte: Disponível em - [www.ietd.iipnetwork.org](http://www.ietd.iipnetwork.org).

O instrumento de pressão diferencial detecta a pressão negativa na entrada do sistema, está alterando o estado para positiva, o PLC processa as informações e comanda o sistema hidráulico de acionamento do capuz móvel de forma a manter a pressão sempre negativa.

Figura 6- Porta de explosão



Fonte: Disponível em - [aciarianews.blogspot.com](http://aciarianews.blogspot.com)

A porta de explosão (porta superior), mostrada na figura 6, fica localizada no topo do sistema de exaustão de gás. Seu funcionamento é 100% mecânico, sem o auxílio de sistemas elétricos ou algum tipo de comando remoto. [9]

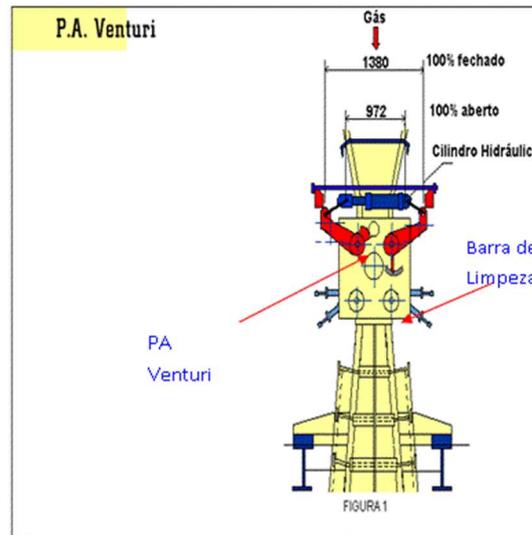
Caso a pressão interna do sistema ultrapasse o valor máximo permitido, a mesma se abre, aliviando a pressão e expulsando o gás em combustão para a atmosfera, com o objetivo de preservar o restante do sistema. Caso este falhe, há outra porta de explosão (piso inferior), com um sistema mais sensível.

Após a porta de explosão do piso superior vem o 1º e o 2º lavador de gás (*Primary and Secondary dust collector*) no qual ambos têm funções idênticas, mas com processos diferentes. No 1º lavador, o particulado com maior granulometria é retirado por um filme de água que se forma na caída do Venturi. Este filme de água se cruza, formando uma barreira para estas partículas maiores. No 2º lavador mostrado na figura 7, constituído de vários chuveiros internos, instalados em série, possui a função de pulverizar partículas de água em alta pressão e velocidade, desta forma os particulados se chocam contra as gotas de água, vencendo a tensão superficial da água e sendo acondicionada internamente. [9]

Após todo processo de lavagem, os gases gerados sofrem perdas de velocidades, qual surge a necessidade de aumentar a velocidade deles para

que não fiquem em suspensão dentro do sistema. O aceleração deste gás é através de um tubo Venturi, com medidor do tipo Herschel mostrado na figura 7 (medidor do volume do gás gerado). [10]

Figura 7 – Construção esquemática do P.A. Venturi e 2º lavador



Fonte: – Arquivo Técnico Gerdau

É introduzida uma restrição no duto de gás provocando uma diferença de pressão que será usada para medir a quantidade de gases em  $\text{Nm}^3/\text{h}$ .

Para que todo o sistema de exaustão de gás funcione corretamente é necessário um motor denominado IDF (*Induced Draft Fans*), mostrado na figura 8, hoje, pacificado, como o equipamento mais importante do sistema de exaustão. Devido a sua geometria, o sistema IDF com o apoio dos lavadores do tipo Venturi e do capuz móvel, são capazes de criar uma pressão negativa suficiente para succionar o gás CO gerado. [11]

Figura 8 – Motor WEG MODEL MAR630C Tensão de 4000v, Potência de 2600Kw



Fonte: – Arquivo Técnico Usiminas

Para que o gás não seja completamente queimado ou mesmo jogado na atmosfera, o sistema de exaustão possui uma válvula pneumática que guia o gás em três direções. Chamada de válvula 3 vias, ela compõe-se de um conjunto de válvulas do tipo borboleta que trabalham simultaneamente, de forma que quando uma válvula abre para a regeneração de gás (gasômetro), a outra aleta fecha para a chaminé (queima) e de forma contrária, abrindo para a chaminé e fechando para o gasômetro. [11]

A válvula em epígrafe é comandada pelos analisadores de gás, ou seja, quando o volume do oxigênio ( $O_2$ ) diminui drasticamente e o volume de gás Monóxido de carbono (Co) aumenta, a válvula se fecha em direção à chaminé e se abre em direção ao gasômetro. Quando estes valores se invertem, ou seja, o volume de Co cai e o volume de oxigênio sobe dentro do sistema de exaustão, a válvula fecha para o gasômetro e abre para a chaminé, queimando todo o excesso de gás que não pode ser reaproveitado. [11]

### 2.1.2 Sistema de Arraste de Gás

Para que seja possível análise do gás gerado durante o processo de conformação do aço, faz-se necessário a presença de componentes descritos na figura 16 e explicados a seguir.

#### Bomba de Água

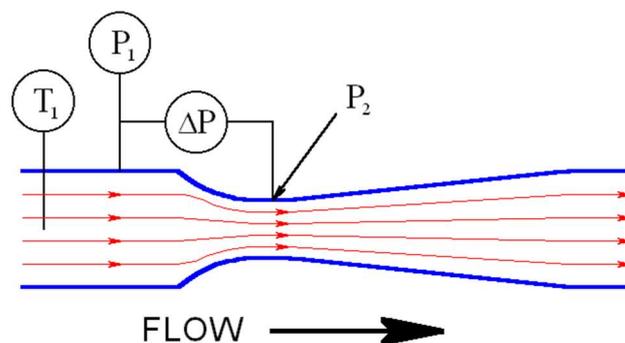
A bomba de água é responsável por gerar um diferencial de pressão entre dois pontos distintos. É composta por um motor 4 polos com alimentação 440v de 0,5 cv e uma bomba centrífuga.

#### Tubo de Venturi

O tubo de Venturi, mostrado na figura 9, tem a função de causar um diferencial de pressão ( $\Delta p$ ) dentro do sistema, a partir de um determinado ponto a montante e outro a jusante do estrangulamento [14]

O estrangulamento provoca o aumento de velocidade do fluido e, conseqüente redução da pressão, logo após sua passagem pelo estrangulamento, de acordo com o princípio de conservação de energia expresso na equação de Bernoulli e na equação de continuidade. [14]

Figura 9 –Tubo Venturi



Fonte: Disponível em – [www.ankersmid-process.com](http://www.ankersmid-process.com)

### **Tanque Separador**

Dentro do tanque separador, há várias telas perfuradas nominadas de chicana (placas colocadas dentro do tanque que viabilizam a troca de calor de forma forçada) e ajudam o gás a se desprender da água e seguir rumo ao interior do sistema de análise. [15]

### **Tanque de condensado**

O tanque de condensado, possui a função de armazenar a água do sistema além de servir como um depósito de resíduos (particulados) que são arrastados juntamente com o gás. [15]

### **Pressostato**

O pressostato indica a pressão total que o sistema em tempo real, geralmente apresenta os valores mensurados nas unidades de medida de bar, mbar, kg, mmh<sub>2</sub>O e mmca.

Como a pressão que está dentro do sistema de gás não precisa ser grande efetua-se a medição em mbar (milibar). [16]

### **Filtro Membrana**

O Filtro tipo membrana mostrado na figura 10, tem a função de não deixar as partículas maiores que 1 µm (1 micron) passarem, de forma preventiva dos componentes internos do analisador, dentro dele há um filtro de algodão e papel que executa a atividade de filtrar o gás.

Figura 10 – Filtro de Membrana



Fonte: Disponível em – [www.flowmaxx.com](http://www.flowmaxx.com)

### Rotâmetro

O rotâmetro mostrado na figura 11, tem a função de medir a vazão de qualquer tipo de fluido ou gás. Sua medição é efetuada como área variável fornecendo resposta direta por meio do flutuador, que se desloca dentro do tubo de policarbonato ou vidro, onde há uma escala graduada para indicação da vazão medida. A unidade utilizada para aferição mais usual é l/h ou  $m^3/h$ . [18]

Figura 11 – Rotâmetro



Fonte: Disponível em – [www.flowmaxx.com](http://www.flowmaxx.com)

### Refrigerador de Gás

Desde que a pressão interna do sistema seja mantida em 1,5 mbar, o refrigerador cumprirá a função de reduzir a temperatura do gás que está sendo arrastado dentro do sistema.

O gás, ao chegar à geladeira mostrada na figura 12, deve ter uma temperatura máxima de 70 °c. Destarte, o equipamento em voga adequa a temperatura do gás para 30 °c. [18].

Figura 12 – Refrigerador de gás



Fonte: Disponível em – [www.abb.com](http://www.abb.com)

## Sistema de Análise de Gás

Figura 13 – Sistema de análise de gás



Fonte: Disponível em – [www.siemens.com](http://www.siemens.com)

O Sistema de análise gás mostrado na figura 13, possui componentes que ajudam a manter a pressão interna e a controlar a vazão de gás afluyente aos analisadores, permitindo-se controlar o volume de gás total dentro do sistema.

Para que todo o sistema tenha sua pressão controlada são necessários inúmeros componentes, qual descreveremos o funcionamento nos parágrafos seguintes deste trabalho.

- **Analisador de Gás**

O analisador de gás mostrado na figura 14, funciona com uma câmara de análise enclausurada, onde ocorre a medição por infravermelho. Dentro da câmara há um irradiador, que trabalha à 600 °C, emitindo radiação infravermelha. Esta radiação possui uma variação de frequência produzida por um interruptor rotativo (motor *chopper*). Depois que o gás passa pela câmara de irradiação a intensidade da radiação infravermelha é medida em três camadas de detectores. Na passagem por cada camada, a absorção dos gases em análise leva a diferentes níveis de pressão. Este aumento de pressão é detectado por um micro sensor de fluxo. [13]

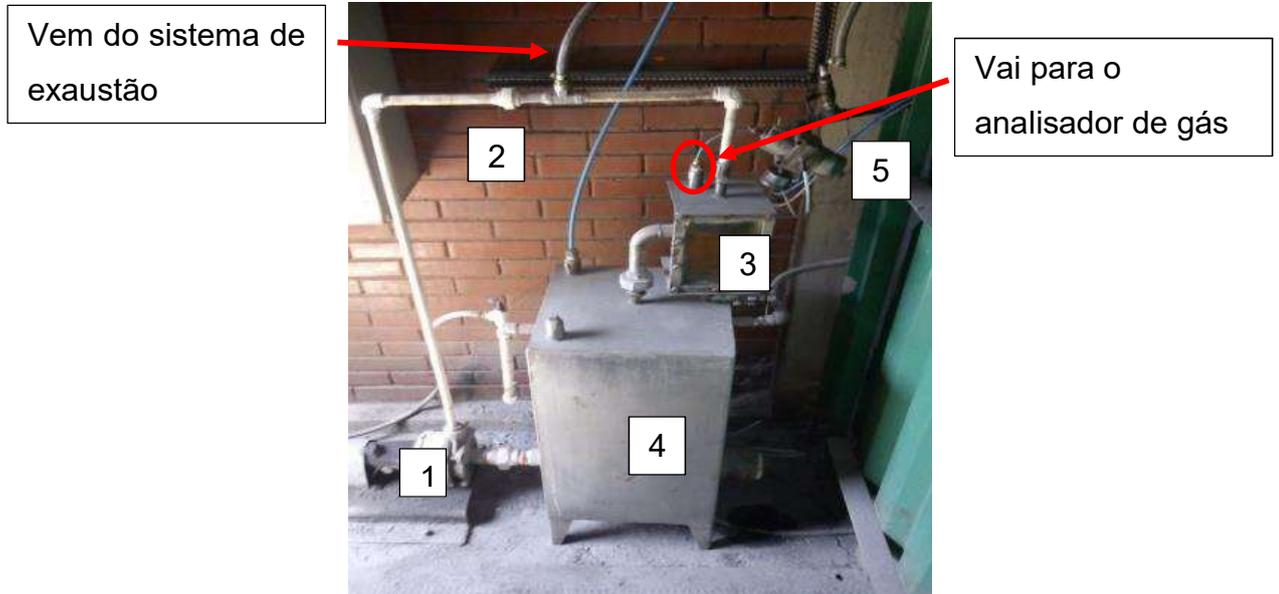
Figura 14 – Analisador de Gás - Ultramat 23 – Siemens



Fonte: Disponível em – [www.siemens.com](http://www.siemens.com)

- **Funcionamento do Sistema**

Figura 15 – Sistema de Arraste de Gás



Fonte: Disponível em – Própria Autoria

O arraste do gás forma uma pressão negativa (vácuo) dentro do sistema, sendo o tubo Venturi o principal equipamento a contribuir para esta redução de pressão.

Bombeando (1) diretamente a água pelo tubo Venturi (2), ocorre o aumento da velocidade do fluido (água e a introdução de uma queda de pressão  $\Delta p$  sobre Venturi, entre os pontos de tomada de pressão a montante e a jusante. Por esse diferencial gera-se uma pressão negativa na entrada superior do Venturi, que está em paralelo com a garganta, efetuando o arraste do gás e levando-o até o tanque separador.

Dentro do tanque separador (3) o gás se desprende da água em forma de bolhas, com a ajuda de uma chapa de metal perfurada denominada chicana, este processo se repete de forma contínua. Devido ao acúmulo de gás dentro do tanque separador, é gerada a pressão necessária para o gás prosseguir pelo tubo de vinil até o analisador de gás para a análise ser efetuada.

O primeiro local na qual o gás deve passar é a refrigerador (fig. 13), onde a temperatura será reduzida de 70°C para 30°C, tendo em mente que o gás é arrastado por uma tubulação advinda do sistema de exaustão, a uma temperatura média de 100°C. Assim que o gás passa pelo tanque separador, há uma perda de temperatura de 30°C.

O próximo equipamento é o filtro de membrana com sensor de umidade. Nele será retirado todo particulado (sujeira) e a umidade gerada pela redução brusca da temperatura do gás ocorrida na geladeira. Estes devem ser retirados para evitar aderência dos mesmos nas paredes da câmara de análise, aumentando o tempo de resposta do instrumento.

Antes da entrada de cada analisador de gás possui um rotâmetro, para definir a vazão de gás e também ajudar a controlar a pressão que está no sistema.

Assim que os analisadores de gás ( $O_2$  e Co) efetuam a análise, o PLC confirma se o gás este rico em volume de Co ou  $O_2$ . Confirmado estes valores, o PLC comanda a válvula 3 vias para abrir ou para fechar, iniciando a regeneração de gás do sistema.

Para que haja a regeneração de gás é levado em consideração o nível de concentração do monóxido de carbono e oxigênio que está sendo gerado dentro do convertedor, esta proporção é incluída na lógica de forma que quando estiver com menos de 2,7% de concentração de oxigênio e mais de 30% de concentração de monóxido de carbono é considerado altamente inflamável, ou seja, bom para ser utilizado nos geradores elétricos, estes valores são considerados como *setpoint's* no sistema de logica do PLC.

## 2.2 Tubos Venturi

Explana-se um pouco sobre os conceitos básicos, a geometria e a utilização dos tubos Venturi, quando instalados em tubulações completamente preenchidas, de forma a determinar a vazão do fluido de escoamento.

O efeito Venturi ocorre em sistemas fechados, quando um fluido com velocidade constante escoar dentro de um duto uniforme, em um determinado momento é causada uma resistência à passagem do fluido, ocasionando uma queda na variável de esforço do sistema a pressão e aumentando a velocidade.

De forma a explicar o efeito Venturi, a equação de Bernoulli que descreve que o comportamento de um fluido em movimento em um sistema fechado permanece constante ao longo do percurso deslocado. Se a velocidade do fluido é constante mas há a redução da seção na qual ele percorre, necessariamente há um aumento da velocidade ao atravessar esta seção. Pelo teorema da conservação de energia, que diz que a quantidade de energia em um sistema fechado permanece constante, se há um aumento da energia cinética, então a energia determinada pela pressão irá diminuir.

Inicialmente o tubo Venturi teve seu formato esculpido para efetuar a medição de velocidade de um fluido, entretanto já é mais comum sua utilização para acelerar a velocidade de um fluido. Este conceito é utilizado em numerosos dispositivos que há a necessidade de aumento da velocidade do fluido. Na instalação do tubo Venturi deve-se levar em conta o efeito da cavitação, que é o fenômeno de vaporização de um fluido no momento da redução da pressão. O risco de cavitação neste tipo de tubo, encontra-se no estrangulamento, onde a redução da área há valores mínimos e o aumento da velocidade, e o ponto onde a pressão é a menor ao longo do circuito. Quando o efeito da cavitação ocorre, geram-se borbulhas no fluido ao longo do seu percurso, se estas chegam em regiões de grandes pressões podem entrar em colapso, podendo haver picos de pressão não controladas e consequentemente danificar as paredes da tubulação.

Neste capítulo foi explicado, sobre os conceitos básicos, a geometria e a utilização dos tubos Venturi.

### 2.3 Revisão de Conceitos

Em 1797 Giovanni Batista Venturi foi o primeiro cientista a demonstrar em testes o princípio de funcionamento do tubo de Venturi, mas foi somente em 1887 que Clemmens Herschel conseguiu efetuar medições com o tubo Venturi, utilizando-o em aplicações industriais. [19]

O tubo de Venturi mostrado na figura 17, pertencente a categoria primária geradores de pressão diferencial, possuindo a função de criar uma resistência a passagem do fluido, a partir do estrangulamento de um determinado ponto. Considerado em um excelente medidor de vazão, sua construção não requer a instalação de anteparos que possam ocasionar a retenção das partículas que circulam no fluido ou gás medido. Sua estrutura possui uma configuração simples, que consiste em um estrangulamento, no centro de seções cônicas de maior diâmetro, em que a primeira seção converge e a segunda diverge o material que irá fluir pelo tubo.

O estrangulamento provoca um diferencial de pressão  $\Delta p$ , ou seja, a diferença de pressão entre dois pontos distintos relacionados a uma vazão, 1.1, sendo um ponto a montante e outro a jusante do estrangulamento. [21][22][23]

$$Q = K\sqrt{\Delta p} \quad (1.1)$$

Q – Vazão

K – Característica do fluido e das instalações

$\Delta p$  – Diferença de pressão entre pontos

Logo após a passagem pelo estrangulamento, há o aumento de velocidade do fluido ou composto gasoso e, como já dito anteriormente, pelo princípio de conservação de energia, se a velocidade aumenta a pressão diminui obrigatoriamente. [21][22][23]

Originalmente o tubo Venturi foi construído de forma a medir a velocidade do fluido, mas já é bastante comum sua utilização para aceleração do fluido em alguns tipos de sistemas, como por exemplo, o

sistema de regeneração de gás, onde sua utilização é amplamente explorada. [14]

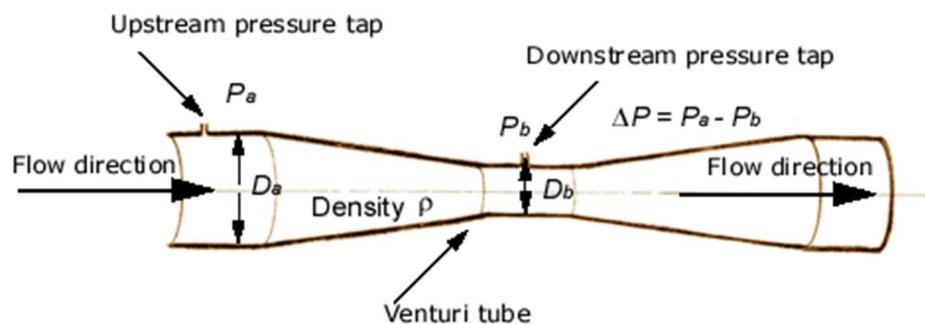
Outro exemplo da utilização do tubo de Venturi, seria na aplicação de sistemas ejetores (figura 16), ou injetores. Os sistemas ejetores, realiza a sucção do fluido através da utilização de uma energia cinética de um segundo fluido. Os fluidos secundários geralmente compressíveis, como gás ou vapor, serão succionados pelo fluido primário ou motriz.

Figura 16 - Ejetores em diversos tamanhos



Fonte: Disponível em: <http://www.crystalcs.com/vacuum-systems.php>

Figura 17 - Aspecto construtivo do Tubo Venturi



Fonte: Disponível em

[http://www.efunda.com/formulae/fluids/venturi\\_flowmeter.cfm](http://www.efunda.com/formulae/fluids/venturi_flowmeter.cfm)

A equação geral de Bernoulli, 1.2, relaciona a pressão e a velocidade de um fluido ideal, incompressível, escoando em regime laminar, sob efeito da gravidade, ao longo de uma tubulação.

$$z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} = z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} \quad (1.2)$$

$h$  = Altura do fluido (a partir de um ponto de referência)

$\rho$  = densidade da massa de fluido ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )

$\gamma$  = Densidade de peso de fluido ( $\gamma = \rho g$ ) ( $\text{N}/\text{m}^3$ )

$g$  = aceleração da gravidade ( $\text{m}/\text{s}^2$ )

$V$  = velocidade do fluido ( $\text{m}^3 / \text{s}$ )

$P$  = pressão de fluido ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$Z$  = constante

Sendo que cada um dos principais termos da equação acima possuem uma expressão para cada tipo diferente de energia. [21][22][23]

$z\rho g$  = Elevação inicial

$\frac{v^2\rho}{2}$  = velocidade inicial

$P$  = Pressão inicial

Para o caso do tubo de Venturi ser instalado na posição horizontal, onde  $h_1 = h_2$ , a equação deve ser simplificada 1.3:

$$p_1 + \frac{dv_1^2}{2} = p_2 + \frac{dv_2^2}{2} \quad (1.3)$$

### 2.3.1 Número de Reynolds

Comumente utilizado para determinar o escoamento possui sua forma processamento, laminar ou turbulento, o número de Reynolds, 1.4, e muito utilizado como parâmetro modificador do coeficiente de descarga. [21][22][23]

$$Re = \frac{Dv\rho}{\mu} \quad (1.4)$$

Onde:

Re = Numero de Reynolds

D = Diâmetro do tubo (m)

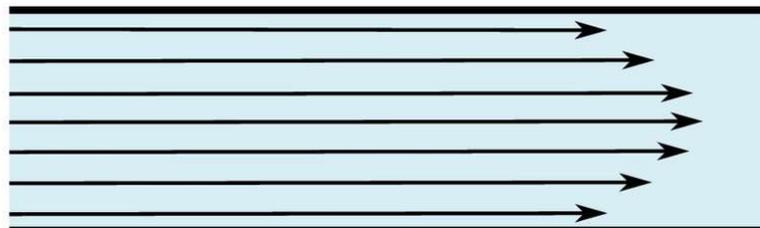
v = velocidade média do fluido (m<sup>2</sup>s)

ρ = densidade de massa de fluido (kg/m<sup>3</sup>)

μ = viscosidade absoluta de fluido (Pa.s)

Com a determinação do número de Reynolds, e possível descobrir-se qual a forma de processamento. Se o material que flui por dentro da tubulação apresentar um comportamento laminar mostrado na figura 18, significa que suas moléculas se movem em linhas retas, desta forma a resultante da determinação do número de Reynolds apresentara valores baixos.

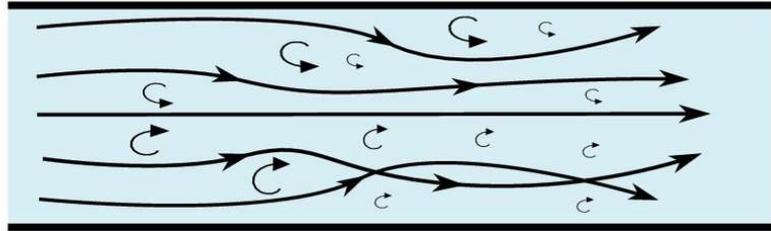
Figura 18 - Fluxo Laminar (Valor de Re alto)



Fonte: Disponível em - <http://www.engquimicasantosp.com.br/2013/10/numero-de-reynolds.html>

Se na resultante do número de Reynolds os valores forem mais altos, podemos concluir que o escoamento do material é de forma turbulenta mostrado na figura 19, isto significa que o movimento das moléculas é de forma desordenada.

Figura 19 - Fluxo Turbulento (Valor de Re Alto)

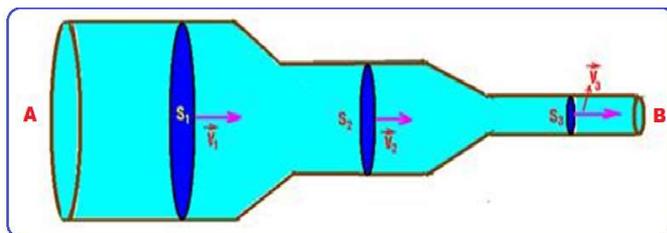


Fonte: Disponível em - <http://www.engquimicasantosp.com.br/2013/10/numero-de-reynolds.html>

### 2.3.2 Lei da continuidade

A lei da continuidade exemplificada na figura 20, se aplica para todo e qualquer material que se mova através de um tubo, ela institui que a velocidade média e a densidade do fluido devem permanecer constante. [21][22][23]

Figura 20 - Lei da continuidade  $\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 = \dots = \rho_n A_n v_n$



Fonte: Disponível em - <http://fisicaevestibular.com.br/>

Considerando que o fluido que escoar por dentro da tubulação seja incompressível e sua densidade não se altera, podemos considerar que  $\rho$  é uma constante, assim a equação de continuidade simplificada, 1.5, fica da seguinte forma.

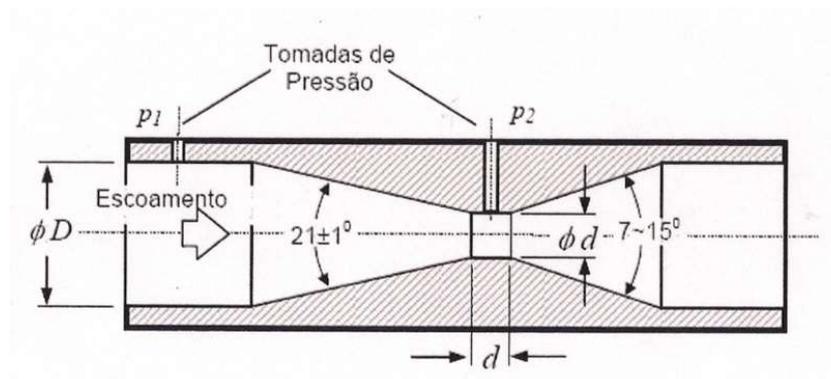
$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (1.5)$$

## 2.4 Princípios e Tipos

### 2.4.1 Venturi do tipo Clássico

O tubo Venturi teve seu *design* desenvolvido por Clemmens Herschel em 1887 conforme mostrado na figura 21. [24]

Figura 21 - Medidor Venturi



Fonte: Disponível em – [www.ebah.com.br](http://www.ebah.com.br)

- Sua construção basicamente segue os formatos de secção igual ao diâmetro de um tubo comum.
- Possui uma seção cônica que faz com que a velocidade do fluido reduza no início, aumentando a pressão, e a velocidade na saída do tubo.
- No tubo onde a seção cilíndrica da garganta é reduzida, a pressão pode ser medida.

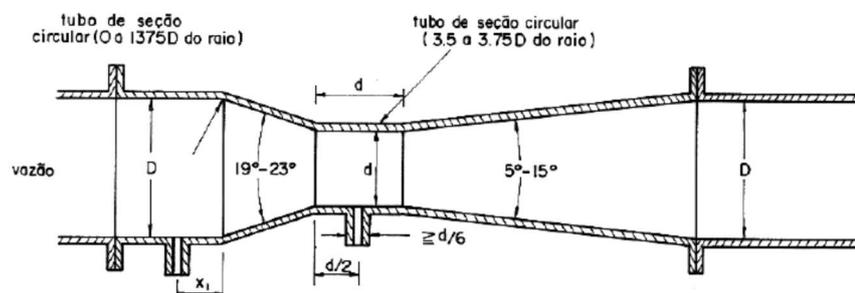
Para aplicações do Venturi como elemento primário de medição de vazão, em que é necessário efetuar medições da pressão a montante e a jusante do estrangulamento, é necessário criar no tubo tomadas de medição. Nestas tomadas são conectados transmissores capazes efetuar a medição da pressão diferencial interna do tubo, gerando como sua resultante o valor quantificado da pressão e da vazão do fluido que passa internamente. Para criação das tomadas é necessário levar em conta os diferentes tipos e materiais, primeiramente para que na interligação dentre o Venturi e o duto sejam consideradas buchas vedantes nos flanges, e em segundo, na conexão

da tomada de medição, na qual também devem ser consideradas buchas que sejam capazes de vedar a conexão. [24][25]

### 2.4.2 Venturi do tipo Clássico Longo

A saída do tubo mostrado na figura 22, conhecido também como difusor, se prolonga gradativamente até chegar ao alinhamento cônico do tubo. [24][25]

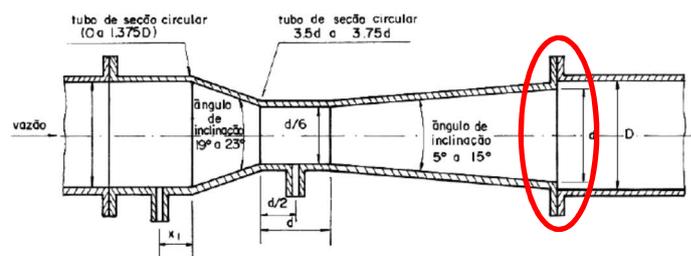
Figura 22 - Venturi clássico tipo longo



Fonte: Disponível em – [www.ebah.com.br](http://www.ebah.com.br)

### 2.4.3 Venturi do tipo Clássico Curto

Figura 23 - Venturi Clássico tipo curto



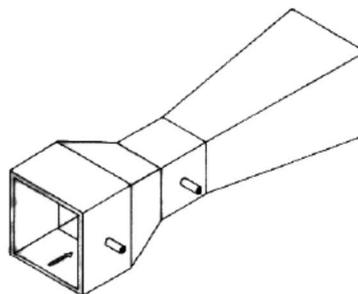
Fonte: Disponível em – <https://docente.ifrn.edu.br>

A saída do Venturi possui um corte final que delimita o ângulo de abertura no final mostrado na figura 23. [24][25]. Apesar de ser muito parecido como tipo clássico, é notório de acordo com a figura a diferença entre o diâmetro interno e externo entre os tubos.

### 2.4.4 Venturi do tipo Retangular

Comumente utilizados quando os dutos são de seção retangular.

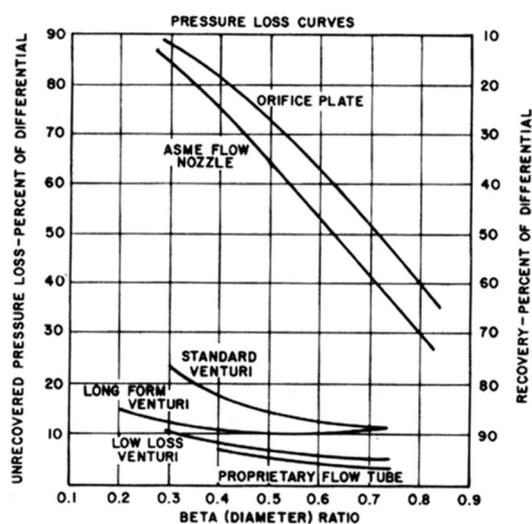
Figura 24 - Venturi do tipo Retangular



Fonte: Disponível em – [www.asperjato.com.br](http://www.asperjato.com.br)

O tubo de forma retangular mostrado na figura 24 normalmente possui seus cantos arredondados e com o mesmo ângulo de forma a convergi e divergi a um único ponto. As regras para instalação das tomadas de medição, não se alteram, mantendo as mesmas que as normas de tubos de Venturi circular. As perdas de pressão no momento da medição, permanecem entre 10% a 25%, sendo a menor porcentagem de perdas de cargas nos tipos de medidores primários. Sua saída alongada em forma de cone, recupera até 89% da pressão perdida no sistema, estes valores podem ser acompanhados na figura 25. [24][25]

Figura 25 - Gráfico de recuperação da pressão X Diâmetro da tubulação



Fonte: Disponível em - <http://www.venturiclassicgarage.com.br/>

## 2.5 Instalação

A instalação do Venturi pode ser realizada em qualquer posição desde que atenda aos requisitos operacionais e as necessidades de medição a serem realizadas. A única regra que deve ser seguida para que o instrumento tenha o comportamento correto na medição, é que para líquidos, o interior deve estar completamente preenchido. [24][25]

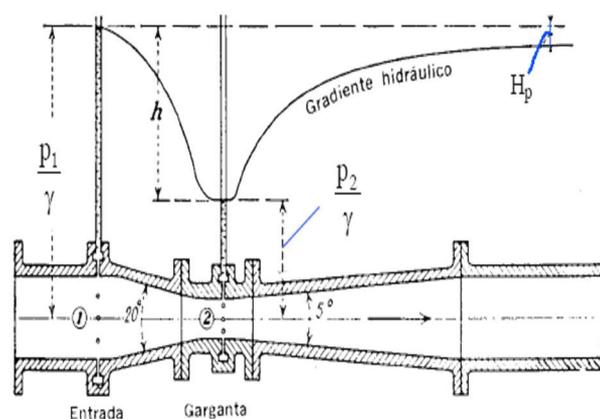
É necessário que no momento da instalação seja verificado o sentido de fluxo, sendo a entrada a tomada de menor comprimento (a montante) e a saída a tomada de maior comprimento (a jusante). É importante também a necessidade de alinhamento da tubulação e das tomadas de pressão.

É recomendado na instalação utilizar o espaçamento a montante da tubulação no mínimo duas vezes o diâmetro do tubo Venturi e duas vezes a jusante, desta forma o material a ser medido poderá ter fluidez na passagem pelo tubo e uma correta medição. [26]

## 2.6 Equação Modificada

Apresenta-se a demonstração da equação modificada para se chegar ao dimensionamento adequado do tubo Venturi, a figura 26, exemplifica os parâmetros utilizados na equação.

Figura 26 - Venturi Clássico



Fonte: Disponível em – [www.usbr.gov](http://www.usbr.gov)

Para o cálculo do Venturi primeiramente é necessário conhecer a vazão 1.6, que se passa na tubulação. Sendo assim considerando a vazão existente atualmente no sistema de  $Q = 3 \text{ L/s}$ , o diâmetro da tubulação de  $\frac{3}{4} = 0,039 \text{ cm}$ , tem-se que:

$$Q = A_1 A_1 = A_2 A_2 \quad (1.6)$$

Após o cálculo da vazão nos dois pontos do Venturi, faz-se necessário conhecer-se a diferença de pressão entre os pontos a montante e a jusante. Considera-se a equação de Bernoulli ,1.7, para este desenvolvimento.

$$p_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} + \rho g y_1 = p_2 + \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho g y_2 \quad (1.7)$$

Considerando que os pontos correspondentes a  $y_1$  e  $y_2$  são aplicados ao mesmo fluido, pode-se dizer que sua resultante é igual a zero (0). Assim, reorganizando a equação 1.7 obtemos a seguinte equação 1.8.

$$p_1 - p_2 = \frac{\rho v_2^2}{2} - \frac{\rho v_1^2}{2} \quad (1.8)$$

## 2.7 Comentários Finais

Foram apresentados neste capítulo as principais características dos tubos de Venturi, bem como do seu dimensionamento e da instalação do mesmo a uma tubulação, variação de tamanhos e formas construtivas disponíveis.

Trataremos, a seguir, dos procedimentos realizados no levantamento de campo, as dificuldades que surgiram no longo do processo e as tratativas dadas a cada uma delas.

### 3 Desenvolvimento

Apresenta-se o desenvolvimento do dimensionamento do tubo Venturi para o sistema de análise de gases em estudo, bem como a análise dos dados do processo.

#### 3.1 Análise de Dados do Processo

Durante o processo de recuperação avaliamos uma ineficiência no transporte do gás até as câmaras dos analisadores, pois, a velocidade com que o gás era transportado até a análise, não condizia com a velocidade com a qual o sistema dos convertedores exauria o gás de processo até o final dos dutos de recuperação, antes da instalação do novo Venturi. É possível averiguar que em determinadas corridas do convertedor houve turbulência entre as pressões, estes valores podem ser verificados na tabela 1.

Analisando estas oscilações e confrontando-as com o histórico de falta de manutenção do equipamento, foi possível aplicarmos o método de causa e efeito, determinando assim quais seriam os próximos passos para a melhor performance do sistema.

Tabela 1 - Pressões (mbar) no sistema antes do check

Dia	05/mai	06/mai	07/mai	08/mai	09/mai	10/mai	11/mai	12/mai
Corridas	32	35	34	35	34	31	37	30
	32	34	28	26	32	39	32	27
	35	33	34	35	38	31	30	30
	36	32	32	31	32	32	30	35
	31	36	34	35	34	31	37	30
	30	32	28	26	32	39	32	27
	35	32	34	35	38	31	30	30
	32	32	31	36	35	33	35	38
	31	36	34	35	34	31	37	30
	Media Pressoes em mbar	32,66667	33,55556	32,11111	32,66667	34,33333	33,11111	33,33333

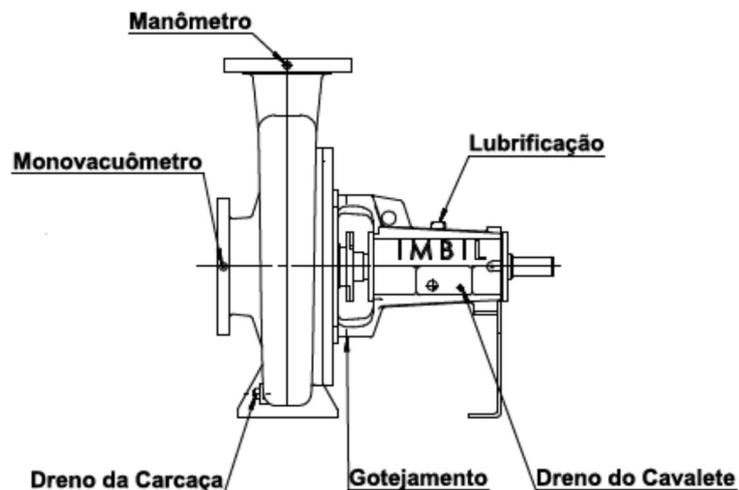
Fonte de Própria autoria

Antes de se efetuar a troca do Venturi, foi realizada verificação total do sistema, qual utilizando o método de causa e efeito, foi possível traçar uma estratégia mais eficaz, com intuito de minimizar as falhas da análise do sistema.

Inicialmente, verificamos a bomba centrífuga, após ser desacoplada, para verificação da integridade das palhetas responsáveis por succionar e empurrar o líquido conduzido. Verificado, ainda, o desgaste interno da voluta. A voluta é o canal interno da bomba responsável por conduzir o líquido. O desgaste na voluta é causado pelo atrito de pequenas partículas em alta velocidade contra as paredes do corpo da bomba. Apesar de o esforço exigido ser pequeno, havia o histórico de não haver manutenção no sistema de arraste. O líquido penetrante tem a função de mostrar com maior clareza pequenas trincas na superfície do eixo e também ranhuras provenientes de desbalanceamento do eixo da bomba.

O segundo passo foi a limpeza do sistema e a troca das tubulações. Durante a abertura do sistema foi identificado que o fundo do tanque separador estava com 20% a menos da capacidade em volume de água, devido ao encrostamento de impurezas nas paredes internas. Com isso a tubulação de 3/8 na entrada do monovacuômetro (figura 27), estava com abertura de passagem de 6mm de raio.

Figura 27 -Bomba Centrífuga



Fonte: Disponível em – [www.imbil.com.br](http://www.imbil.com.br)

O terceiro passo, consistiu na verificação do tanque de separação, no qual foi avaliada a existência de perfurações irregulares na placa defletora (chicana) e vazamento no vidro frontal. No lugar do vidro frontal foi

colocado uma placa acrílica, com o intuito de garantir a melhor vedação junto aos parafusos. A placa defletora (chicana) que tem a função de contribuir na troca de calor entre o fluido e separação das moléculas de gás da água.

No processo de reavaliação do sistema, foi feito um levantamento manual das pressões internas do mesmo, conforme pode ser visto na tabela 2, estas pressões foram verificadas com a ajuda do pressostato instalado na entrada do sistema de análise de gás.

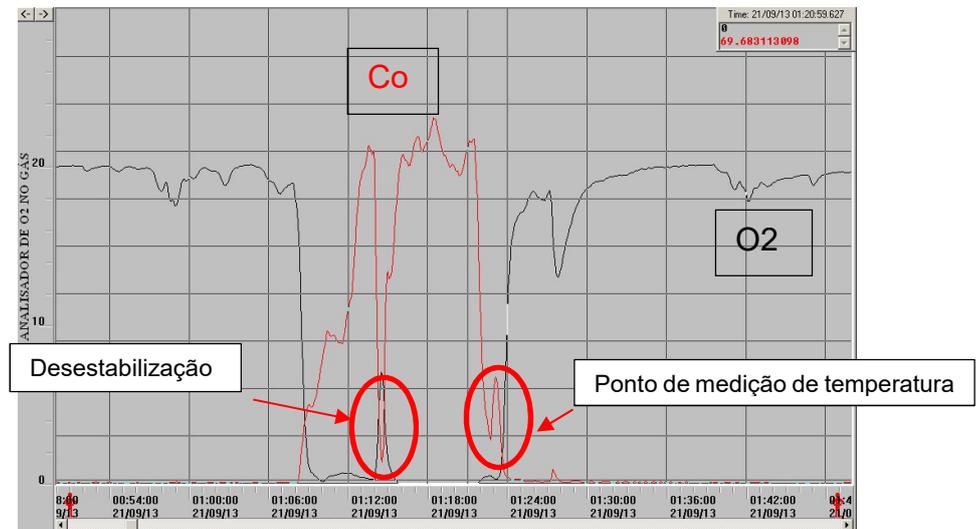
A tabela 2, mostra as pressões internas do sistema após ter sido efetuado somente a manutenção do circuito. Nesta tabela pode ser visto que, para cada corrida efetuada no conversor, houve uma melhora nas pressões internas do sistema, comparando com tabela 1. Verificando a relação tempo x nível de gás CO e O<sub>2</sub> da figura 29, podemos concluir que as pressões ainda não são o suficiente para que o volume de gás chegue rapidamente ao set point desejado e mantenha a estabilidade necessária.

Tabela 2 – Pressões (mbar) internas no sistema de gás após o check

Dia	12/jun	13/jun	14/jun	15/jun	18/jun	19/jun	20/jun	21/jun	22/jun
Corridas	45	42	48	46	41	47	45	45	46
	42	44	50	44	44	47	41	47	47
	46	43	47	45	45	44	43	45	43
	47	45	47	47	43	43	47	45	43
	46	47	48	48	47	43	47	43	46
	47	47	44	43	43	43	45	43	43
	45	47	43	45	47	45	46	46	42
	44	45	42	43	43	47	43	47	46
43	58	43	42	47	45	44	43	47	
Media Dia	45	46,44444	45,77778	44,77778	44,44444	44,88889	44,55556	44,88889	44,77778

Fonte de Própria autoria

Figura 28 – Gráfico dos analisadores nível de oxigênio x nível monóxido de carbono



Fonte de Própria autoria

Na figura 28, mostra o nível de oxigênio (O<sub>2</sub>) em preto, com maior porcentagem de volume (60%), enquanto que os níveis de monóxido (CO) de carbono estão em baixas porcentagens volumétricas dentro do sistema de exaustão de gás do convertedor (1%). No início de uma corrida de convertedor, os níveis de CO, sobem dando condições para o analisador de gás habilitar o início de recuperação. É possível notar que o sistema possui um atraso no início da recuperação, e logo em seguida há uma queda do sinal, fazendo com que a recuperação sofra um novo atraso, uma vez que a válvula 3 vias responsável pelo desvio de fluxo do gás, tem um tempo de resposta de 30 segs. para se movimentar completamente.

Devido a ineficiência das pressões internas dentro do sistema de análise de gás, faz o sistema ficar inerte por um período de tempo de 00:02:10 minutos + 0,30 segundos. Onde 2,10 min corresponde ao tempo que o sistema de arraste de gás leva para succionar o CO do duto e transportar até o analisador, e 30 segs. e o tempo de resposta da válvula três vias até sua abertura total para a recuperação do gás.

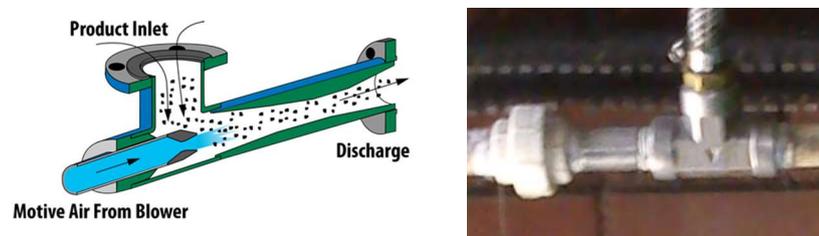
### 3.1 Condições de instalação

O tubo Venturi anteriormente instalado e mostrado na figura 29, era composto de um tubo T de ½” mais um tubo de ½” acoplado a sua jusante.

A instalação do Venturi, realizada sem seguir os padrões, fez com que os espaçamentos a jusante e a montante fossem ignorados, o que proporcionava, perda de pressão ao final da área de descarga do tubo. É recomendado na instalação utilizar o espaçamento a montante da tubulação no mínimo duas vezes o diâmetro do tubo Venturi e duas vezes a jusante, desta forma o material a ser medido poderá ter fluidez na passagem e uma correta medição.

Foi encontrado na relação de espaçamento a jusante do Venturi caseiro um total de 1,3 vezes o tamanho do Venturi, a sua montante o total de 1,4 vezes, dificultando a fluidez do material, além de possuir distúrbios na medição causado pelas curvas a 90° no início de final da tubulação.

Figura 29 -Funcionamento do Venturi Anterior (Imagem Demonstrativa)



**Fonte:** Disponível em: [www.directindustry.com](http://www.directindustry.com) + Fonte de própria autoria

Após o crescente número de corridas nos convertedores, surgiu a necessidade de tornar o sistema mais eficiente, de forma a iniciar a recuperação de gás com maior velocidade a partir do início de sopro de uma corrida, o Venturi anteriormente utilizado passou a não possuir mais funcionalidades, devido ao seu baixo desempenho. A tabela 3, mostra os dados levantados do tubo Venturi que foi confeccionado artesanalmente.

Tabela 3 - Dados do Venturi Antigo

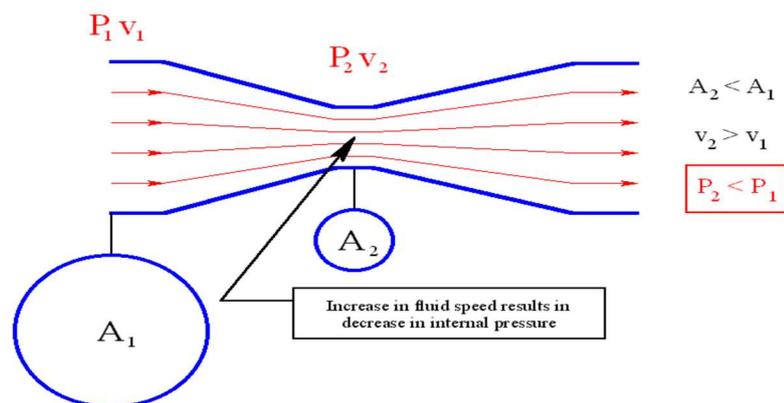
Cota	Venturi (½”), (12,7 milímetros)
A (Distancia total do Venturi)	1940,3 milímetros
B (Distância entre o estrangulamento e o ponto a jusante)	47,1 milímetros
C (Diâmetro da jusante do Venturi)	½” rosca BSP (12,7 milímetros)
D (Diâmetro da entrada do estrangulamento)	½” rosca BSP (12,7 milímetros)
E (Diâmetro da entrada do estrangulamento pela redução)	13 milímetros
F (Altura a partir do centro do Venturi, até o ponto F)	38,6 milímetros
G (Distancia do Venturi sem o estrangulamento)	1780 milímetros
H (diâmetro interno da jusante e montante do Venturi)	½” (12,7 milímetros)
I (Diâmetro interno do estrangulamento do Venturi)	4 milímetros

Tabela de própria autoria

### 3.2 Dimensionamento e Instalação do novo Venturi

Apresenta-se a demonstração da equação modificada para se chegar ao dimensionamento adequado do tubo Venturi.

Figura 30 - Venturi Clássico



Fonte: Disponível em: <http://www.flowmaxx.com/venturi.htm>

Para o cálculo do Venturi mostrado na figura 30, primeiramente é necessário conhecer a vazão (1.9) que se passa na tubulação. Sendo assim

considerando a vazão existente atualmente no sistema de  $Q= 3 \text{ L/s}$ , o diâmetro da tubulação de  $\frac{3}{4} = 0,039 \text{ cm}$ , tem-se que:

$$Q = A_1 A_1 = A_2 A_2 \quad (1.9)$$

Para o cálculo de  $V_1$ , (2.0 e 2.1), tem-se:

$$V_1 = \frac{Q}{A_1} = \frac{3 \times 10^{-3}}{39 \times 10^{-4}} \quad (2.0)$$

$$V_1 = 0,76 \frac{m}{s} \quad (2.1)$$

Para o cálculo de  $V_2$  (2.2 e 2.3), tem-se:

$$V_2 = \frac{Q}{A_2} = \frac{3 \times 10^{-3}}{10 \times 10^{-4}} \quad (2.2)$$

$$V_2 = 3 \frac{m}{s} \quad (2.3)$$

Portanto o cálculo da pressão ,2.4.

$$p_1 - p_2 = \frac{1}{2} (1000)(3^2 - 0,76^2) \quad (2.4)$$

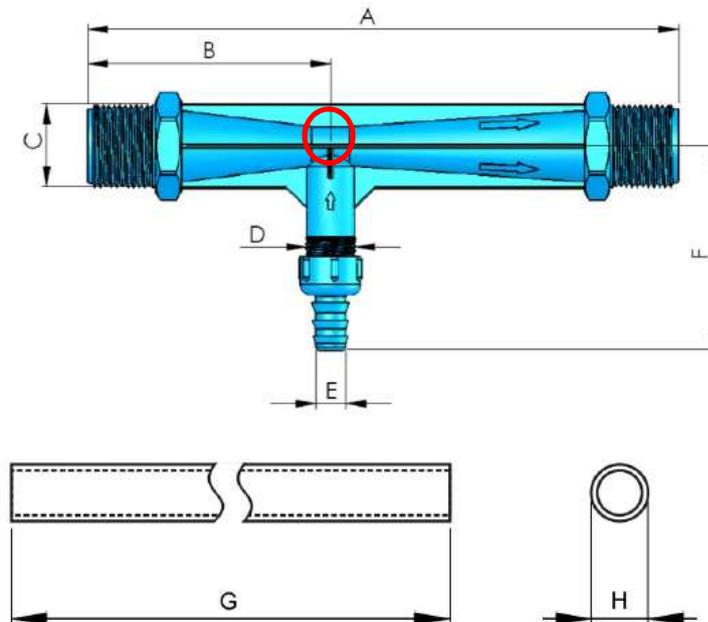
A diferença de pressão entre os pontos  $p_1 - p_2$ , 2.5.

$$p_1 - p_2 = 4.211 \text{ Pa} \quad (2.5)$$

Para instalação do novo Venturi mostrado na figura 31, alguns dos dados do anteriores em relação a estrutura física do local da instalação foram considerados, afim de não haver muitas modificações na estrutura física do

local, porem na região de estrangulamento foi solicitado à fabricante que fizesse uma pequena alteração no diâmetro do estrangulamento, passando de 4mm para 6 mm, desta forma será possível atingir a pressão calculada na equação 2.5.

Fig. 31 - Dimensões do tubo Venturi solicitado



Fonte: Projeto criado pela Viqua

Tabela 4 - Dados do novo Venturi

Cota	Venturi (½”), (12,7 milímetros)
A (Distancia total do Venturi)	2000 milímetros
B (Distância entre o estrangulamento e o ponto a jusante)	48,45 milímetros
C (Diâmetro da jusante do Venturi)	½” rosca BSP, (12,7 milímetros)
D (Diâmetro da entrada do estrangulamento)	½” rosca BSP, (12,7 milímetros)
E (Diâmetro da entrada do estrangulamento pela redução)	13 milímetros
F (Altura a partir do centro do Venturi, até o ponto F)	82,3 milímetros
G (Distancia do Venturi sem o estrangulamento)	1800 milímetros
H (diâmetro interno da jusante e montante do Venturi)	½”, (12,7 milímetros)
I (Diâmetro interno do estrangulamento do Venturi)	6 milímetros

Fonte de própria autoria

Fazendo comparação entre o Tubo de Venturi caseiro (Tabela 3), que funcionava anteriormente e o novo tubo Venturi (tabela 4), e possível notar que foi realizado mudanças físicas. Com estas alterações no novo tubo Venturi e sua instalação, foi realizado acompanhamento do comportamento geral do sistema. Tendo em vista que com o aumento da velocidade de análise de gás, também haveria uma maior velocidade no tempo de resposta e comandos do sistema de automação da planta de convertedores.

Com o acompanhamento sendo realizado via supervisor, efetuamos uma nova medição das pressões internas no sistema de arraste de gás para cada corrida efetuada dentro do convertedor, estas pressões podem ser vistas na tabela 5, na qual apresenta valores muito melhores que as medições anteriores e maior estabilização das pressões encontradas demonstradas na tabela 2.

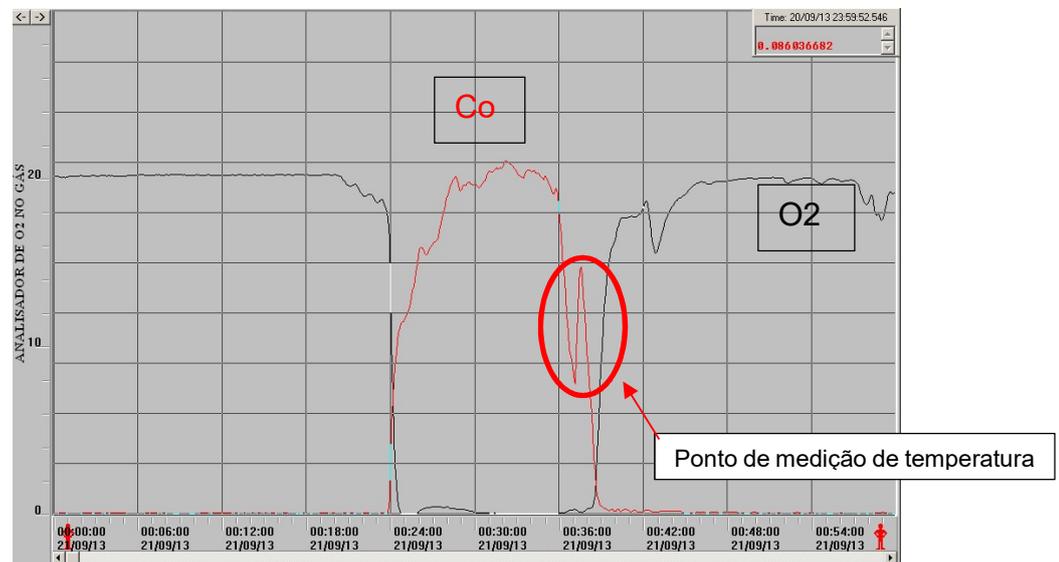
Tabela 5-Pressões (mbar) internas no sistema de gás após troca do Venturi

Dia	12/ago	13/ago	14/ago	15/ago	18/ago	19/ago	20/ago	21/ago	22/ago
Corridas	80	77	80	82,8	73,8	79	81	81	82,8
	77,6	79,2	80	79,2	79,2	80	73,8	75	84,6
	80	78	79	81	81	79,2	77,4	81	79,5
	80	80	79	84,6	77,9	77,4	78	81	77,4
	79,8	80	78,7	86,4	8	78,6	80	77,4	82,8
	79	80	80	77,4	77,4	77,4	81	80	77,4
	80	84	79	81	80	81	81,3	80	75,6
	79,8	79	80	78,9	77,6	79	77,4	79	82,8
	78	78,8	79,8	75,6	80	81	79,2	77,4	84,6
Media Dia	79,35556	79,55556	79,5	80,76667	70,54444	79,17778	78,78889	79,08889	80,83333

Fonte de Própria autoria

Verificando a relação tempo do volume de gás analisado, em relação as medições anteriores, e notória que o comportamento dos analisadores obteve um menor tempo de resposta, e uma estabilização melhor realizando comparação entre as figuras 28 e 32.

Fig. 32 – Gráfico dos analisadores após a troca do Venturi gerado pelo supervisor



Fonte de Própria autoria

Na figura 32, mostra o nível de oxigênio (O2) em preto, com maior porcentagem de volume (60%), enquanto que os níveis de monóxido (CO) de carbono estão em baixas porcentagens volumétricas dentro do sistema de exaustão de gás do convertedor (1%). No início da corrida do convertedor, os níveis de CO, sobem dando condições para o analisador de gás habilitar o início de recuperação. É possível notar que o sistema responde rapidamente, dando condições para que a válvula 3 vias abra o fluxo para a regeneração de gás. Em comparação a figura 28, podemos dizer que houve uma melhora na estabilização do sistema

### 3.3 Sugestões de Trabalhos Futuros

Correlacionando os resultados obtidos com considerando as modificações realizadas no equipamento, faço as seguintes sugestões para os trabalhos futuros.

- 1) Cria novo ponto para tomada de arraste de pressão, antes do Tubo de Venturi dos convertedores.

2) Modificar a lógica de comando da válvula três vias, para que a válvula inicie sua abertura quando o nível de O<sub>2</sub> estiver abaixo de 1% e os níveis de CO acima de 40%.

3) Acréscimo de uma válvula reguladora de pressão na saída do taque separador, para que seja regulado a pressão mais indicada no sistema.

4) Troca dos dutos de condução do gás, até o sistema de arraste, viabilizando um maior volume na análise.

5) Acréscimo de um filtro cerâmico, no duto de gás, para a retirada de impurezas advindas do processo.

## 4 Conclusões

Com base nos resultados obtidos e considerando todas as modificações realizadas no equipamento, inclusive a substituição do tubo Venturi, que atendeu as expectativas ao proporcionar maior pressão e estabilidade no sistema de análise gás, propiciando continuidade do sistema com desempenho satisfatório. Para tanto, é necessário que a manutenção fosse conduzida de forma assertiva e sua periodicidade verificada para continuidade ideal do sistema, livre de impurezas.

Com o dimensionamento do novo tubo Venturi é possível verificar claramente que o sistema de arraste atingiu a meta esperada, tendo uma melhora de 40% na pressão gerada dentro do sistema, passando da média 48 mbar (velocidade do fluido 2 m/s) para 80 mbar (velocidade do fluido 4,81m/s), e além de maior estabilidade do sistema.

Graficamente de acordo com a figura 28 e 32 é possível nota uma significativa melhora do sistema, pois o gás  $O_2$  (oxigênio) em preto, teve um declive rápido habilitando a condição de recuperação em 00:01:50 minutos (gráfico 30) e o gás  $C_o$  (monóxido de carbono) em vermelho passou a porcentagem de 35% em 00:02:40 minutos

Ademais, ressaltamos que o monóxido de carbono levou menos de 01:30 minutos para alcançar a concentração necessária para início da recuperação, somando a movimentação da válvula Três Vias, que foi de 30 segundos até sua abertura total.

Com a estabilidade da análise do gás foi possível minimizar a contaminação no tanque de armazenamento (gasômetro), de tal forma que os níveis de oxigênio ficaram abaixo dos níveis críticos controlados na rotina diária, sendo, assim, necessário a criação de um novo gráfico de tendência do seu acompanhamento.

Com maior confiabilidade e velocidade no tempo de resposta sistema, foi contabilizado a redução do *cash cost* (redução de custo de produção) na produção de aço. Esta significativa redução, justifica investimentos na

melhorias e modernização do sistema de arraste e do sistema de análise do gás.

## Referência

- 1 - <http://cursos.unisanta.br/mecanica/polari/sinterizacao.html> – visitado em 21 de agosto de 2015
- 2 - CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica Vol. III – Materiais de Construção Mecânica**. 2ed. Makron Books. São Paulo: 1986
- 3 – Kempenich, Geraldo, Curso de Instrumentação para Engenheiros e técnicos, 1º,2º,3º partes, São Paulo: Siemens S.A, 1975.
- 4 - Uso e Aplicação de Termosensores – IOPE (Manual e Catálogos) <http://www.iope.com.br/> visitado em 30 de agosto de 2015
- 5 - Termometria e Pirometria – ECIL (Manual e Catálogos) - <http://www.ecil.com.br/> visitado em 30 de 2015
- 6 – F. MILLER, J. T. - the Revised Course in Industrial Instrument Pratisse February, 1964
- 7 - MACHADO, Marcelo. L. P. *Elaboração refino e lingotamento do Aço*. CEFET-ES, Vitória-ES: 2002.
- 8 - <http://coral.ufsm.br/gef> visitado em 08 de agosto de 2015
- 9 - *A.L.S. Mesquita; F.A. Guimarães; N. Nefussi. Engenharia de ventilação Industrial. 2ª ed. Brasil: Cetesb, 1988.*
- 10- [www.cefetsp.br/edu/jcaruso/instrumentacao/medicao\\_vazao.pdf](http://www.cefetsp.br/edu/jcaruso/instrumentacao/medicao_vazao.pdf) visitado em 11 de setembro 2015
- 11 – , [Giuseppe c/o Nalco Italiana S.p.A. , Parri,Francesco Nalco Italiana S.p.A. Ricciardi](http://www.google.com.br/patents/EP0978574A1?cl=en), Compositions of cationic surfactants and their use as antifouling agents for induced draft fans (IDF), EP 0978574 A1, 9 fev. 2000, acessado em 14 de setembro de 2015. <http://www.google.com.br/patents/EP0978574A1?cl=en>, [Giuseppe c/o Nalco Italiana S.p.A. , Parri,Francesco Nalco Italiana S.p.A. Ricciardi](http://www.google.com.br/patents/EP0978574A1?cl=en), Compositions of cationic surfactants and their use as antifouling agents for induced draft fans (IDF), EP 0978574 A1, 9 fev. 2000, acessado em 14 de setembro de 2015. <http://www.google.com.br/patents/EP0978574A1?cl=en>
- 12 – Medição de Temperatura – SENAI (Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial) – Cenatec – [www.senai-mg.org.br\cetel](http://www.senai-mg.org.br/cetel), visitado em 15 de setembro de 2015

- 13 – Ultramat 23 – Análise de gás para gases absorvedores de infravermelho e oxigênio - [http://cache.automation.siemens.com/dnl/DE/DE2Njg3AAAA\\_7600621\\_HB/IN\\_ULTRAMAT23\\_BA\\_pt-BR\\_C79000-G5279-C216-03-20100208.pdf](http://cache.automation.siemens.com/dnl/DE/DE2Njg3AAAA_7600621_HB/IN_ULTRAMAT23_BA_pt-BR_C79000-G5279-C216-03-20100208.pdf) visitado em 15 de setembro de 2016
- 14 - <http://www.smar.com/brasil/artigostecnicos/artigo.asp?id=80> visitado em 20 de setembro de 2016
- 15 – Mecânica: automação / Maria Leonor Reis Vianna (autora); Edvaldo Ângelo, Gabriel Ângelo (coautores); Evaldo Silva, Mauro Gomes da Silva (revisores); Meire Satiko Fukusawa Yokota (coordenadora). – São Paulo: Fundação Padre Anchieta, 2011 (Coleção Técnica Interativa. Série Mecânica, v. 4
- 16 – Manuais e Catalogo - [www.ifm.com/](http://www.ifm.com/) visitado em 20 de setembro de 2016
- 17 - Manuais e Catalogo - <http://www.applitech.com.br/> visitado em 26 de setembro de 2016
- 18 – Manuais e Catalogo – <http://www.abb.com> visitado em 01 de outubro de 2016
- 19 - Marcelo F. Moreira, Siderurgia, <http://buscatextual.cnpq.br/buscatextual/visualizacv.do?metodo=apresentar&id=K4700620U6>
- 20 - <http://www.dec.ufcg.edu.br/biografias/ClensHer.html> visitado em 08 de outubro de 2016
- 21 - DOEBELIN, Ernest. O.; MANIK, Dhanesh N. *Measurement Systems: Application and Design*. 5th Edition. New York: McGraw Hill, 2007
- 22 - VIANA, Ulisses Barcelos. *Instrumentação Básica II: Vazão, Temperatura e Analítica – Instrumentação*. Vitória: SENAI, 1999
- 23 -HALLIDAY, David, RESNIK Robert, KRANE, Denneth S. Física 2, volume 1, 5 Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.
- 24 – Apostilas e Manuais - <http://www.abraman.org.br/> visitado em 08 de outubro de 2016
- 25 - Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full - Reference number ISO 5167-1:2003(E) – Visitado em 10 de Agosto de 2016

26 – Medição de vazão de fluidos por meio de instrumentos de pressão – Parte 1: Placas de Orifício, Bocais e tubos de Venturi instalados em seção transversal circular de condutos forçados – NBR ISO 5167-1 – Visitado em 05 de agosto de 2016

27 - <http://www.acobrasil.org.br/site2015/oaco.html>

28 - Iso 5167 -1 Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full - Visitado em 07/09/2016

29 – NBR ISO 5167-1 Medição de vazão de fluidos por meio de instrumentos de pressão

30 - <https://www.voestalpine.com/group/en/group/commitment/60-years-of-the-linz-donawitz-process/> visitado em 12 de agosto de 2016

30 – The story of the Linz-Donawitz process – [www.voestalpine.com](http://www.voestalpine.com) – Visitado de 14/09/2016

31 – Venturi Tubes and Flow Nozzles Brochure - [www.emersonprocess.com](http://www.emersonprocess.com) – Visitado em 24/09/2016