

Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável
Fundação Estadual do Meio Ambiente
Diretoria de Pesquisa e Desenvolvimento
Gerência de Desenvolvimento e Apoio Técnico às Atividades Industriais



Utilização do Gás de Alto-forno para Produção de Energia em Indústria Siderúrgica no Estado de Minas Gerais

Sumário Executivo



Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável
Fundação Estadual do Meio Ambiente
Diretoria de Pesquisa e Desenvolvimento
Gerência de Desenvolvimento e Apoio Técnico às Atividades Industriais

Utilização do Gás de Alto-forno para Produção de Energia em Indústria Siderúrgica no Estado de Minas Gerais

Sumário Executivo

Belo Horizonte
Agosto 2010



© 2010 Fundação Estadual do Meio Ambiente

Governo do Estado de Minas Gerais

Antônio Augusto Junho Anastasia

Governador

Sistema Estadual do Meio Ambiente – Sisema

**Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável -
Semad**

José Carlos Carvalho

Secretário

Fundação Estadual do Meio Ambiente - Feam

José Cláudio Junqueira

Presidente

Diretoria de Pesquisa e Desenvolvimento

Paulo Eduardo Fernandes de Almeida

Diretor

Gerência de Desenvolvimento e Apoio Técnico às Atividades Industriais

Liliana Adriana Nappi Mateus

Gerente

Elaboração:

Arnaldo Abranches Mota Batista

Analista Ambiental

Ficha catalográfica elaborada pelo Núcleo de Documentação Ambiental

Fundação Estadual do Meio Ambiente.

F981u Utilização de gás de alto-forno para produção de energia em indústria siderúrgica em Minas Gerais: sumário executivo / Gerência de Desenvolvimento e Apoio Técnico às Atividades Industriais. --- Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2010. 70p.

1. Produção de energia. 2. Indústria siderúrgica – gás de alto forno. 3. Aproveitamento energético. I. Título

CDU: 669:620.97(815.1)

**Rodovia Prefeito Américo Gianetti s/nº - Serra Verde - Belo Horizonte/MG
CEP: - 31630-900 (31) 3915-1465
www.meioambiente.mg.gov.br**

SUMÁRIO EXECUTIVO

Este sumário contém os principais resultados que compõem a dissertação de mestrado “Utilização do gás de alto-forno para produção de energia na indústria siderúrgica de Minas Gerais”, do servidor Msc. Arnaldo Abranches Mota Batista da Fundação Estadual do Meio Ambiente. A referida dissertação foi requisito parcial do curso de Mestrado Profissionalizante em Sustentabilidade Sócio-econômica e Ambiental, realizado em conjunto com outros servidores da Fundação Estadual do Meio Ambiente, Instituto Mineiro de Gestão das Águas e Instituto Estadual de Florestas, no âmbito do convênio firmado entre a FEAM e a Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

Este trabalho mostra a situação atual do aproveitamento de gás de alto-forno para geração de energia elétrica no Estado de Minas Gerais, por meio de levantamento realizado nos anos de 2008 e 2009, onde é discutida a melhor tecnologia de limpeza de gás de alto-forno, utilizando as experiências do próprio setor de produção de ferro-gusa em altos-fornos a carvão vegetal.

O trabalho também contemplou uma pesquisa mais detalhada dos sistemas de limpeza de gás utilizados pelos empreendimentos do setor de ferro-gusa que já possuem termoelétricas. Para comparar os dados pesquisados em campo e nas informações existentes no Sistema Integrado de Informação Ambiental (SIAM) de Minas Gerais sobre lavadores foi utilizado um modelo matemático para calcular a eficiência teórica de lavadores.

Além disso, foi ainda adaptado um modelo de cálculo de custo/benefício para termoelétricas a gás de alto forno onde se verificaram as vantagens econômicas de instalação de termoelétricas em alto-fornos a carvão vegetal mesmo levando-se em conta os investimentos adicionais em equipamentos de limpeza de gás discutidos neste estudo. Por fim, foram levantados prováveis ganhos com créditos de carbono aplicando a metodologia do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo para cálculo de emissões evitadas de dióxido de carbono (CO₂).

1. INTRODUÇÃO

A conservação e preservação de energia devem ser prioridades em todos os empreendimentos por razões econômicas e ambientais, principalmente devido à necessidade de um balanço positivo quanto às emissões de gases que provocam o efeito estufa, visando contribuir na minimização do aquecimento global do planeta.

A siderúrgica mineira é um segmento industrial relevante, inclusive no cenário nacional. Identifica-se nesse setor o gás de alto-forno da produção de ferro-gusa, com elevada temperatura e teores de monóxido de carbono (CO), como principal perda energética, pelo fato de não ser totalmente utilizado como redutor no processo produtivo. O gás de alto-forno é parcialmente utilizado hoje para pré-aquecimento do ar de processo no alto-forno, mas numa quantidade que varia de 40% a 60%, sendo o restante descartado para a atmosfera após a queima nas tochas.

Em processos de geração de eletricidade por meio da cogeração, o uso do gás de alto-forno é adequado, uma vez que o calor rejeitado ainda pode ser parcialmente convertido em energia útil. Assim, o aproveitamento do gás de alto-forno tem se tornado fundamental no processo de produção de ferro-gusa.

Algumas usinas siderúrgicas já possuem centrais termelétricas, utilizando os gases oriundos dos processos de fabricação do ferro-gusa que são queimados em caldeiras, para a geração de energia elétrica. Parte significativa dessa cogeração destaca-se por não advir da queima do gás e sim do aproveitamento de características físicas do gás de alto-forno para a geração de energia.

Dessa forma, é importante conhecer a situação atual da recuperação energética de gás de alto-forno para a geração de energia elétrica no Estado de Minas Gerais e as possibilidades para aumento desta geração.

Em se tratando de altos-fornos a carvão vegetal, tendo em vista o atual “estado da arte” da limpeza do gás de alto-forno, faz-se necessário também conhecer a melhor tecnologia disponível possibilitando aumentar a eficiência de limpeza do gás para sua recuperação energética.

Os principais objetivos do presente trabalho são:

- Levantar a situação atual do uso do gás de alto-forno para geração de energia elétrica no Estado de Minas Gerais.
- Realizar um estudo da melhor tecnologia de limpeza de gás de alto-forno a carvão vegetal para geração de energia elétrica.

Os objetivos secundários são:

- Levantar o cenário atual de produção de ferro-gusa em altos-fornos a carvão vegetal no Estado de Minas Gerais.
 - Verificar a eficiência de lavadores tipo Venturi, por meio da aplicação de modelo matemático, e comparar os resultados com dados fornecidos pelas empresas em questionários e arquivos – Sistema Integrado de Informação Ambiental (SIAM) de Minas Gerais, além de informações da literatura.
 - Calcular o custo benefício de uma termoelétrica a gás de alto-forno, por meio de modelo matemático.
 - Calcular, por meio de metodologia específica, as emissões de dióxido de carbono CO₂ evitadas com a utilização de uma termoelétrica a gás de alto-forno conforme os princípios do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL.
-

2. DISCUSSÃO E RESULTADOS

Como conseqüência da compilação dos dados de questionários aplicados nos altos-fornos no Estado de Minas Gerais, o setor se apresenta resumidamente conforme a Figura 2.1 com a distribuição dos altos-fornos a coque e a carvão vegetal.

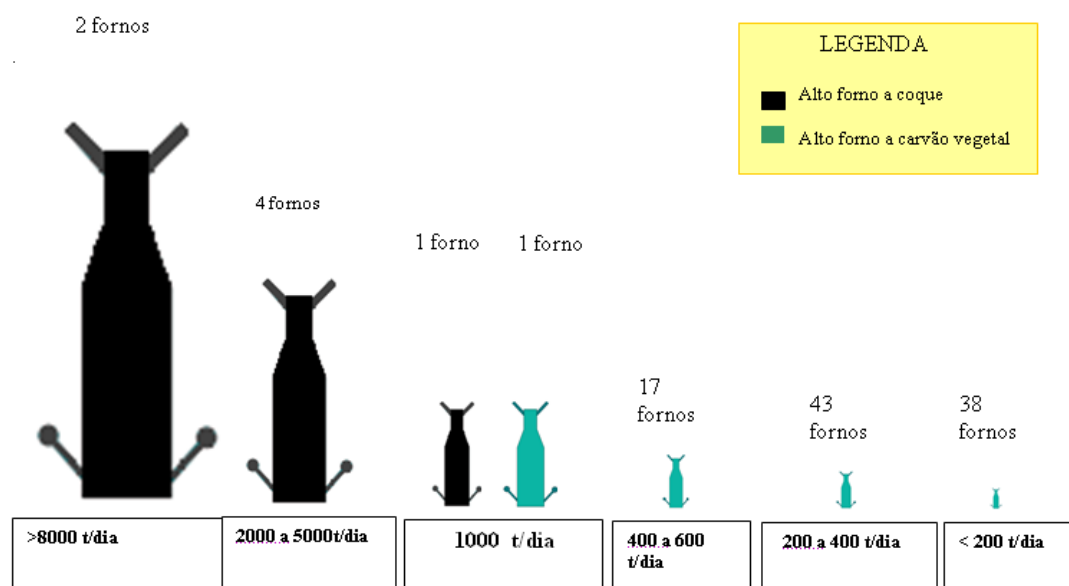


Figura 2.1 – Distribuição dos altos-fornos a coque e a carvão vegetal em Minas Gerais.

Verifica-se que os altos-fornos a coque possuem maior capacidade produtiva e são em número muito menor, enquanto que os altos-fornos a carvão vegetal possuem menor capacidade produtiva e são em maior número.

Atualmente, em Minas Gerais existe um determinado nível de produção, aproximadamente, 1.000 t/dia, em que se pode utilizar tanto o coque quanto o carvão vegetal. Os altos-fornos a carvão vegetal podem ser modificados para utilizarem coque.

2.1 Cenários do Aproveitamento Energético do Gás de Alto-Forno Para Geração de Energia Elétrica

Obviamente a diferença entre altos-fornos a coque e altos-fornos a carvão vegetal não se esgota na diferença de produção e tamanho dos fornos. Quando se pretende

analisar o cenário da utilização de gás de alto-forno para geração de energia elétrica é importante verificar a disparidade que existe nas pressões de topo, vazões e concentração de material particulado nos gases da chaminé do *Glendon ou Cowper*¹ como mostrado na Figura 2.2.

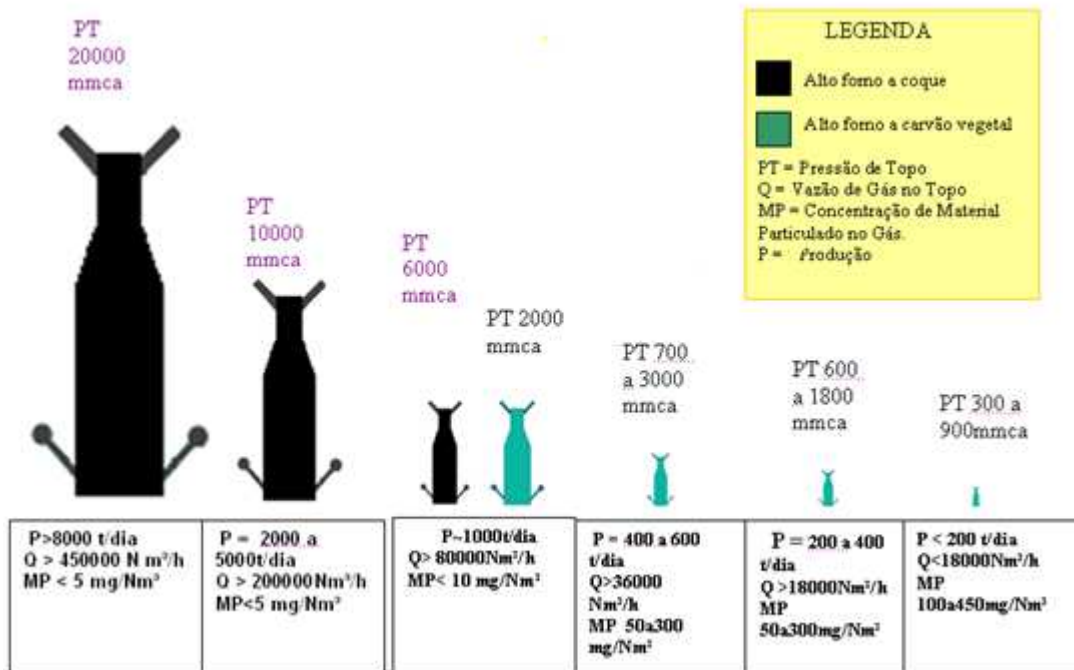


Figura 2.2 – Altos-fornos a coque e a carvão vegetal no Estado de Minas Gerais.

No entanto, quando examinamos somente os altos-fornos a carvão vegetal, não verificamos uma relação muito clara entre pressão de topo, vazão de gás e concentração de particulado no gás. O motivo disto será discutido neste trabalho.

Os valores de variação de material particulado e pressão de topo apresentados na Figura 2.2 são apenas um indicativo da realidade, não podendo ser interpretado como valores exatos, mas como uma ferramenta didática para exemplificarmos a diferença de valores obtidos pelo uso de coque e de carvão vegetal em Minas Gerais.

Como visto na Figura 2.2, os altos-fornos a coque possuem uma pressão de topo muito elevada, assim como elevadas vazões de gás, e concentração de material particulado no gás mais reduzidas. Isto faz com que o gás de alto-forno seja

¹ *Glendon ou cowper* é um trocador de calor, destinado a pré-aquecer o ar que será soprado pelas ventaneiras do alto-forno a carvão vegetal.

aproveitado para geração de energia elétrica por meio da utilização das chamadas turbinas de recuperação de topo.

As turbinas de recuperação de topo são utilizadas em fornos a coque devido a energia cinética do gás (grande vazão e grande energia de topo) e somente é possível esta utilização porque o gás possui baixa concentração de material particulado (inferior a 5 mg/Nm^3).

É importante salientar que neste trabalho estamos tratando do gás de alto-forno puro, sem ser misturado com outros gases. Quando o gás de alto-forno passa pela turbina de recuperação de topo para gerar energia elétrica o seu poder calorífico ainda é aproveitado na usina. Porém, após passar por um balão de gás onde o mesmo é misturado com outros gases, por exemplo, de coqueria e aciaria.

Na Figura 2.3 é apresentado um exemplo de aproveitamento do gás de alto-forno a coque em uma turbina de recuperação de topo.



Figura 2.3 – Aproveitamento de gás de alto-forno a coque em turbina de recuperação de topo.

A Figura 2.4 mostra o *layout* de uma turbina de recuperação de topo instalada em Minas Gerais.

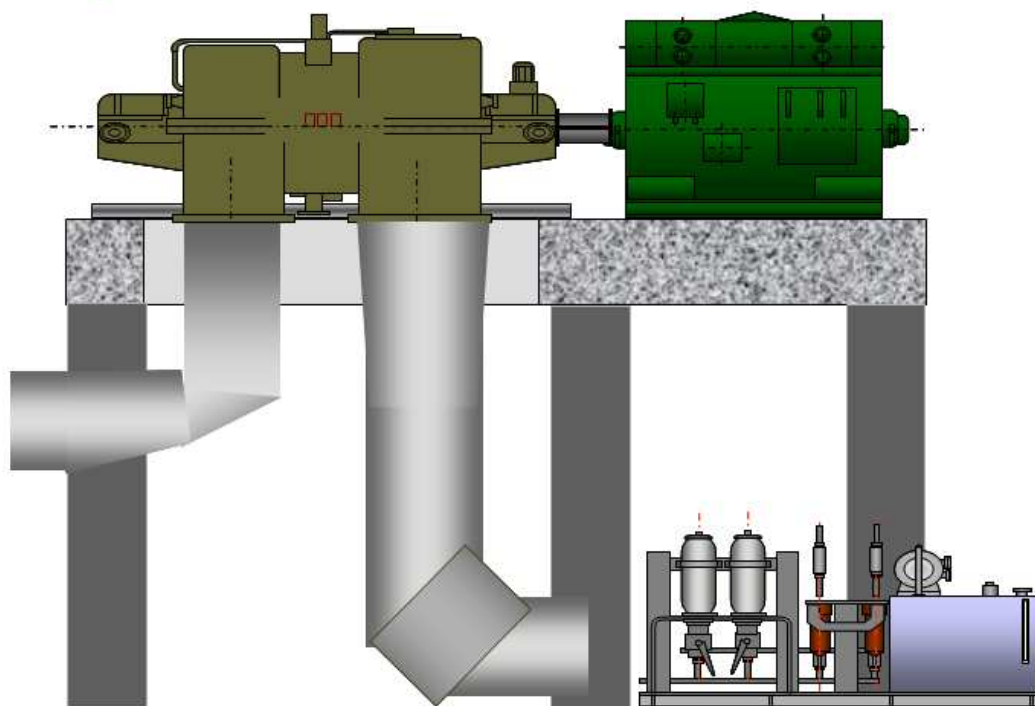


Figura 2.4 – Turbina de Topo empresa
Fonte: Shaangu Group, 2008.

Conforme verificado na Figura 2.4, o princípio de funcionamento da turbina de recuperação de topo é muito simples, uma vez que o gás passa pela turbina e aciona um gerador, apenas aproveitando a energia cinética do gás.

A Tabela 2.1 mostra o cenário da utilização das turbinas de recuperação de topo por empreendimentos do setor siderúrgico no Estado de Minas Gerais.

Tabela 2.1 – Cenário da utilização das turbinas de recuperação de topo no Estado de Minas Gerais

Empresa	Capacidade do Forno (t/d)	Potência da Turbina (MW)	Pressão de Topo do Forno (mmca)	Sistema de Limpeza do Gás	Vazão de Gás (Nm ³ /h)	Perda de Carga Lavador Venturi (mmca)	Concentração de Particulado no Gás (mg/Nm ³)
1	8.500	Capacidade: 18 Geração: 9 a 12	2.000	1 balão 2 Venturi	480.000	4.000	< 5
2	7.800	10,45	2.000	1 balão 2 Venturi	450.000	4.000	< 5
2	4.155	6,8	2.000	1 balão 2 Venturi	300.000	4.000	< 5

Portanto, conforme a Tabela 2.1, existem 3 turbinas de recuperação de topo instaladas em empreendimentos do setor de ferro-gusa no Estado de Minas Gerais, gerando aproximadamente 29,25 MW de energia elétrica.

Os altos-fornos a carvão vegetal, possuem uma pressão de topo muito inferior, no máximo de 2000 mmca (9,8N/m²), quando comparada à pressão de topo dos altos-fornos a coque, e, normalmente, uma alta concentração de material particulado, geralmente superior a 50 mg/Nm³, impossibilitando a utilização de turbinas de recuperação de topo.

Conforme demonstra a Figura 2.5, a alternativa para os altos-fornos a carvão vegetal passa a ser a termoelétrica.

Neste caso, o poder calorífico do gás é aproveitado para sua queima em uma caldeira para gerar vapor que, por sua vez irá movimentar as palhetas de uma turbina que estará acoplada a um eixo de um gerador de energia elétrica.

As caldeiras implantadas podem ser flamotubulares ou aquatubulares, conforme as Figuras 2.6 e 2.7.

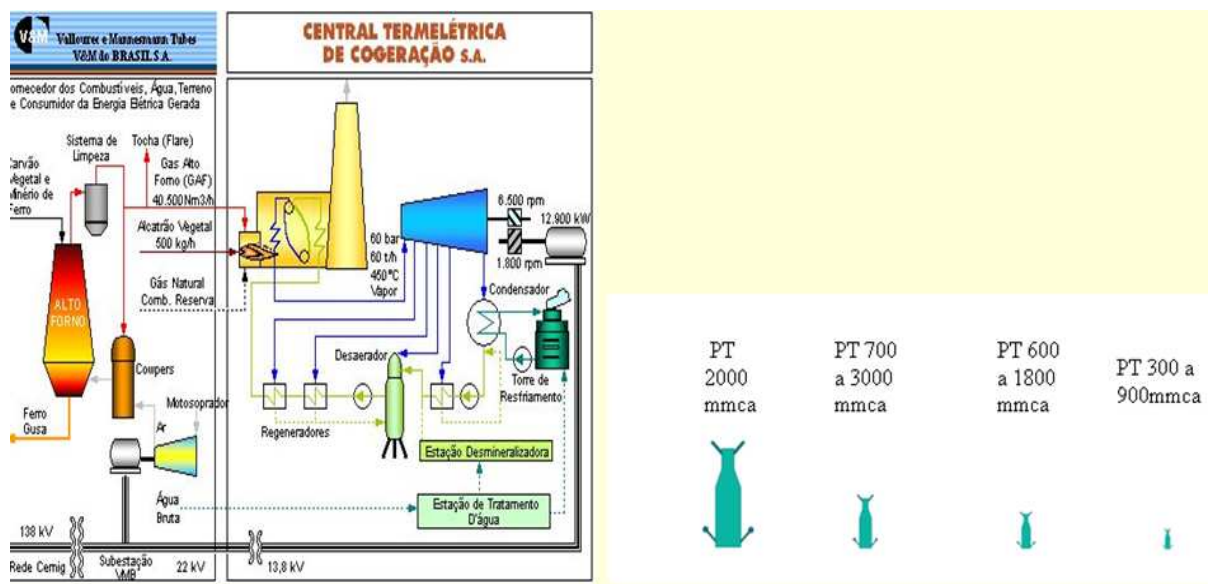


Figura 2.5 – Esquema de utilização de gás de alto-forno em Minas Gerais- Termoelétrica.



Figura 2.6 – Caldeira Flamotubular.
Fonte: Catálogo da *Biochamm*, 2008.



Figura 2.7– Caldeira Aquatubular.
Fonte: Catálogo da *Biochamm*, 2008.

Nas Tabelas 2.2 e 2.3 foram consolidadas as principais características das termoelétricas em operação e em fase de implantação no Estado de Minas Gerais, respectivamente.

Conforme a Tabela 2.2, a produção atual de energia elétrica no Estado de Minas Gerais é de, aproximadamente, 36,2 MWh utilizando o gás de alto-forno a carvão vegetal em termoelétricas. As caldeiras mistas existentes no Estado também foram classificadas com flamotubulares na tabela 2.2.

Com relação à emissão demonstrada na tabela 2.2, não foram utilizados somente os dados fornecidos pelas empresas durante as visitas, mas também dados que foram adquiridos pesquisando os projetos de sistemas de limpeza nos arquivos da FEAM-Fundação Estadual do Meio Ambiente através do sistema informatizado. Esses dados referem-se à concentração de material particulado do gás na chaminé do *glendon*.

Quanto às informações referentes à frequência das paradas, estas foram fornecidas pelas empresas durante as visitas. Verifica-se que ocorrem paradas mensais, bimensais, quadrimensais, dependendo do teor de material particulado no gás.

Para reduzir estas paradas para limpeza das caldeiras, propõe-se que o teor de particulado na chaminé do *glendon* (ou da chaminé da termoelétrica) seja de no máximo 50 mg.Nm^{-3} visando também atender a legislação nacional para emissão de material particulado em siderúrgicas integradas e para termoelétricas.

Tabela 2.2 – Características das termoeletricas a gás de alto-forno em operação em Minas Gerais

Empresa	Forno	Produção (t/d)	Vazão (Nm ³ /h)	Pressão Topo (mmca)	Tipo Caldeira	Produção de Vapor (t/h)	Potência (kW)	Pressão de Vapor (kgf/cm ²)	Parada para Limpeza	Emissão de Material Particulado (mg/Nm ³)
1	1	80	8.500	600	flamotubular	12	1.200	21	mensal	>150
	2	145		600						
2	1	80	11.200	700	flamotubular	25	2.500	25	mensal	>100
	2	120		1.200						
	3	160		1.700						
3 ⁽¹⁾	1	158	11.460	1.000	flamotubular	13	1.200	21	quadrimestral	100
3	1	110	11.460	900	flamotubular	13	1.200	21	quadrimestral	100
4	2	500		800	flamotubular	20	2.000	21	parada	80
5	1	200	10.200	870	flamotubular	12	1.000	21	quadrimestral	70
6	1	282	36.667	800	aquatubular	30	5.000	35	acidente	70
	2	420								
7	1	170	33.000	850	aquatubular	30	6.000	44	no início operação	90
	2	330								
8	1	440	18.000	380	flamotubular	18	2.000	24	mensal	>100
9	2	210		700	flamotubular	20	1.200	21	bimensal	80
10	1	1.200	40.500	2.900	aquatubular	60	12.900	60	na manutenção do(s) fornos	<10
	2	600		2.800						

Observações

(1) – Uma empresa possui 2 termoeletricas.

(2) – Somente o gás do forno 2 vai para a termoeletrica

Conforme observado na tabela 2.3 haverá ainda a geração de mais 11 MWh de energia elétrica no Estado de Minas Gerais de duas termoelétricas que se encontravam em construção no momento da pesquisa.

Tabela 2.3 – Características das termoelétricas a gás de alto-forno em fase de implantação em Minas Gerais

Empresa	Forno	Produção (t/d)	Vazão Termoelétrica (Nm ³ /h)	Pressão Topo (mmca)	Tipo Caldeira	Produção de Vapor (t/h)	Potência (kW)	Pressão de Vapor (kgf/cm ²)	Equipamento de Limpeza do Gás
	1	420		1.100					Balão, ciclone e Venturi
	2(2)	500	15.800	1.300	aquatubular	17	2.200	45	Ventilador adicional (3)
2	6AF(1)	170	43.312	500	aquatubular	42	8.800	42	Balão e lavador Ventilador adicional Lavador adicional

Observações.

(1) Esta empresa possui 7 fornos iguais, sendo que funcionará apenas com 6 fornos de 170 t/dia

(2) Somente em um alto-forno

(3) Adicional refere-se a equipamentos adicionais na linha da termoelétrica.

As Figuras 2.8 e 2.9 mostram as vazões e potências teóricas comparadas com as vazões e potências das termoeletricas instaladas informadas.

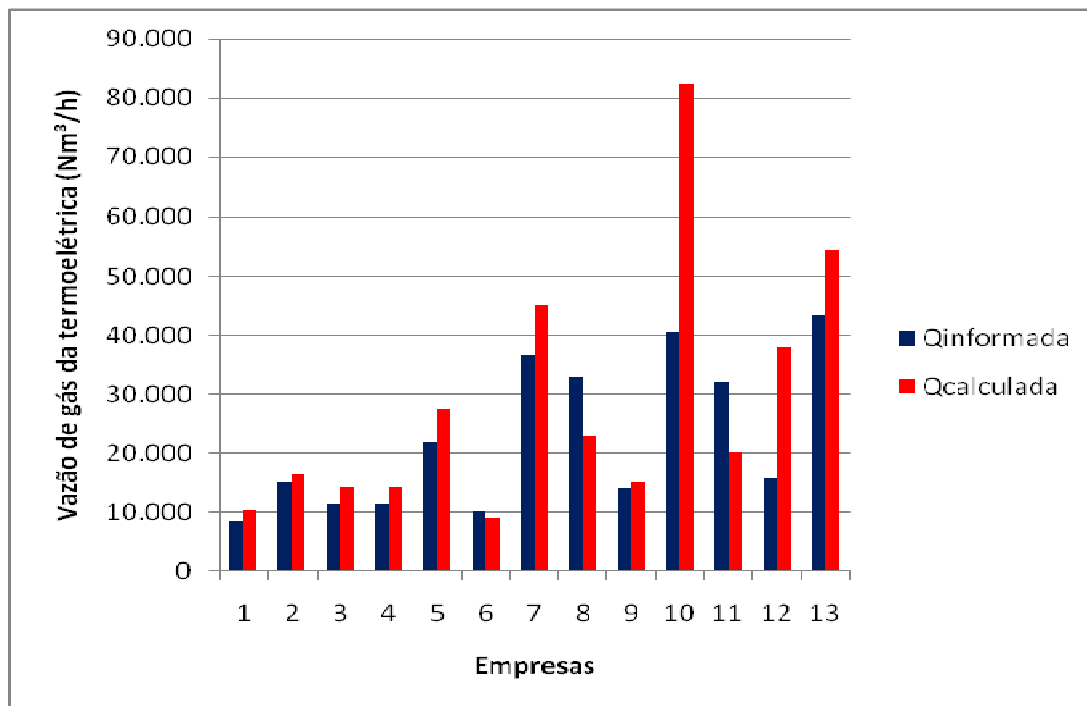


Figura 2.8 – Dados de vazão de gás na entrada da termoeletrica informado e calculado.

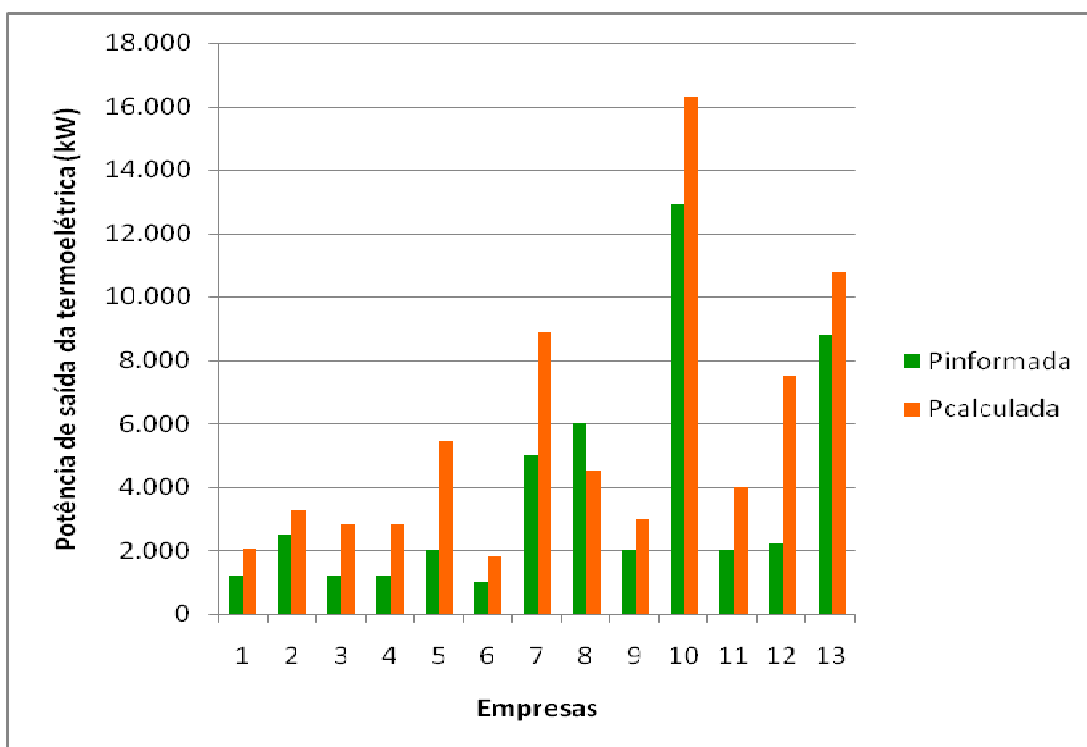


Figura 2.9 – Dados de potência de saída da termoeletrica informada e calculada.

A potencia foi calculada utilizando-se a seguinte fórmula:

$$PI = \frac{(Q/2) \times PCI \times \eta}{860} \quad (2.1)$$

sendo:

Q = vazão de gás no topo do alto-forno (Nm³/h)

PCI = poder calorífico do gás de alto-forno (kcal/Nm³)

η = rendimento da termoelétrica

PI = potencia em kWh

Analisando as Figuras 2.8 e 2.9, observa-se que os dados calculados, tanto de vazão de gás, quanto de potência, apresentaram-se maiores em relação aos dados informados pelas empresas, com poucas exceções. Esse fato pode ser justificado pelo fato de que, na realidade, a maior parte do gás é dirigido ao *glendon* e não à termoelétrica e também, as empresas foram conservadoras ao dimensionar as termoelétricas visando garantir mais gás para os *glendons*, enquanto que os dados calculados são estimados de acordo com a produção total de cada forno, em plena operação.

A Figura 2.10 apresentada a distribuição de termoelétricas em operação e em fase de implantação por município no Estado de Minas Gerais.

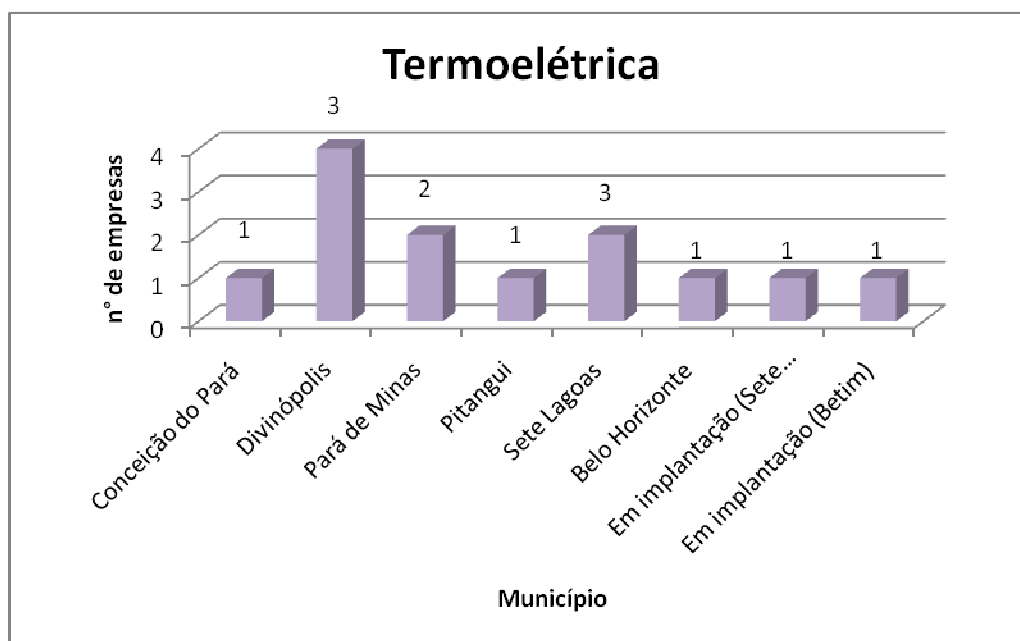


Figura 2.10 – Distribuição das termoelétricas por município em Minas Gerais.

2.2 – Configurações de Sistemas de Limpeza de Gás de Alto-Forno a Carvão Vegetal em Termoelétricas no Estado de Minas Gerais.

As Figuras 2.11 a 2.18 a seguir representam esquematicamente as principais configurações de sistemas de limpeza de gás de alto-forno que é queimado em termoelétricas instaladas no Estado.

Onde, nestas figuras:

P topo = Pressão de Topo do alto-forno em mmca ($9,8 \text{ N/m}^2$)

50% = Porcentagem do gás que é dirigido para termoelétrica ou para o *glendon*

P entrada = Pressão do gás na entrada da caldeira da termoelétrica.

Teor de Particulado = Teor de material particulado no gás medido na chaminé do *glendon*.

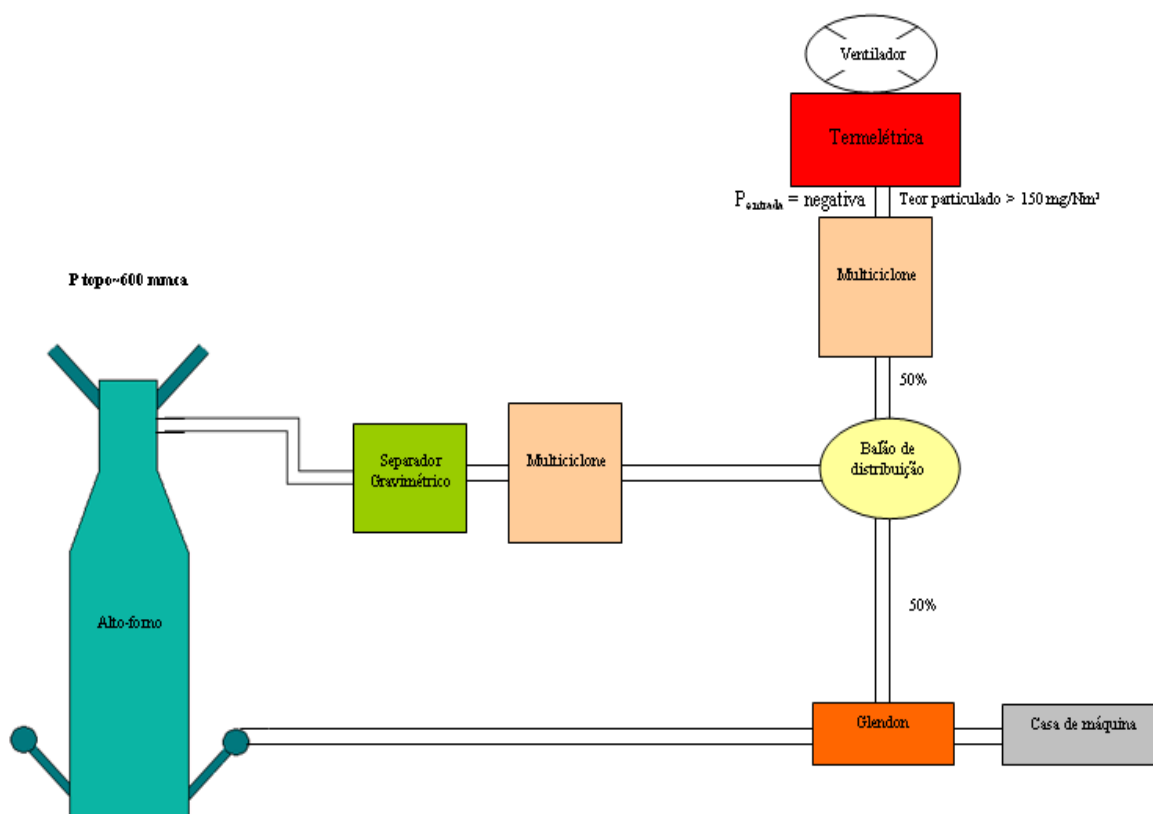


Figura 2.11 – Configuração 1 do sistema de gás de alto-forno.

Nesta Configuração 1, a pressão de topo do alto-forno é reduzida, da ordem de 600 mmca ($9,8 \text{ N/m}^2$), fazendo com que o empreendimento adote um sistema de

controle de limpeza de gás de baixa eficiência, que consiste de balão (separador gravimétrico) e multiciclone.

A empresa tentou compensar a baixa eficiência de limpeza com outro multiciclone na linha da termoelétrica, o que adiantou pouco, fazendo com que a concentração de particulado seja considerada alta, maior que 150 mg/Nm^3 .

Nesta configuração a empresa optou por utilizar como ventilador adicional (para compensar a baixa pressão na linha) o próprio ventilador da termoelétrica, o que não é recomendado pelos fabricantes de caldeira por elevar o nível de riscos de explosão.

A empresa neste caso se preocupou em apenas melhorar a limpeza de gás que é dirigido para a termoelétrica, não se preocupando com a limpeza do gás que é dirigido para o *glendon*, fazendo que o mesmo continue com elevados teores de particulado. Para manter a temperatura de sopro, necessita-se de mais gás no *glendon*, faltando gás para a termoelétrica.

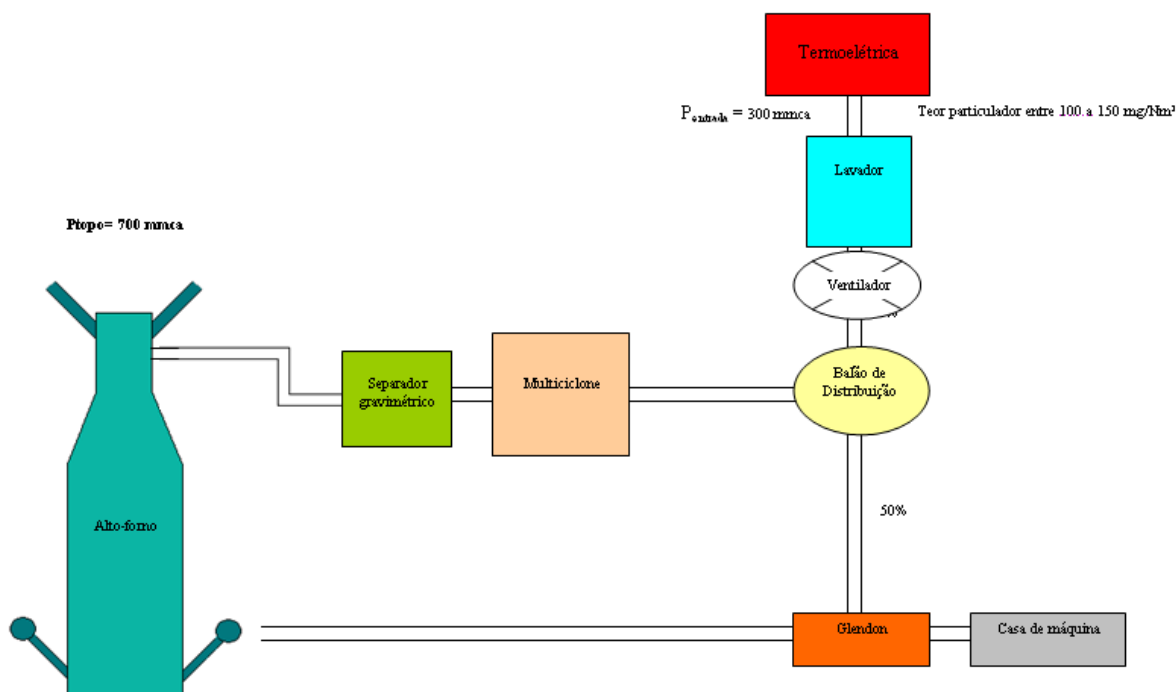


Figura 2.12 – Configuração 2 do sistema de gás de alto-forno.

Nesta Configuração 2, a empresa também opera com pressão de topo do alto-forno pequena, na ordem de 700 mmca (9,8N/m²), fazendo com que seja adotado um sistema de controle de baixa eficiência consistindo de balão (separador gravimétrico) e multiciclone.

Neste caso a empresa tentou compensar a baixa eficiência de limpeza com a implantação de um lavador de baixa energia na linha da termoelétrica, o que também adiantou pouco, fazendo com que a concentração de particulado seja considerada alta, na faixa de 100 a 150 mg/Nm³.

Nesta configuração a empresa optou por implantar um ventilador adicional (para compensar a baixa pressão na linha). Este ventilador, no entanto, constantemente, precisa ser limpo porque o gás com particulado não permite o seu funcionamento correto (sujando as palhetas). Além disso, existe também o risco de explosão devido à presença de pressão negativa na linha de gás de alto-forno. A empresa também neste caso preocupou se apenas em melhorar a limpeza de gás que é dirigido para a termoelétrica, não se preocupando com a limpeza do gás que é dirigido para o *glendon*, fazendo que o mesmo continue com altos teores de particulado prejudicando a sua eficiência de operação.

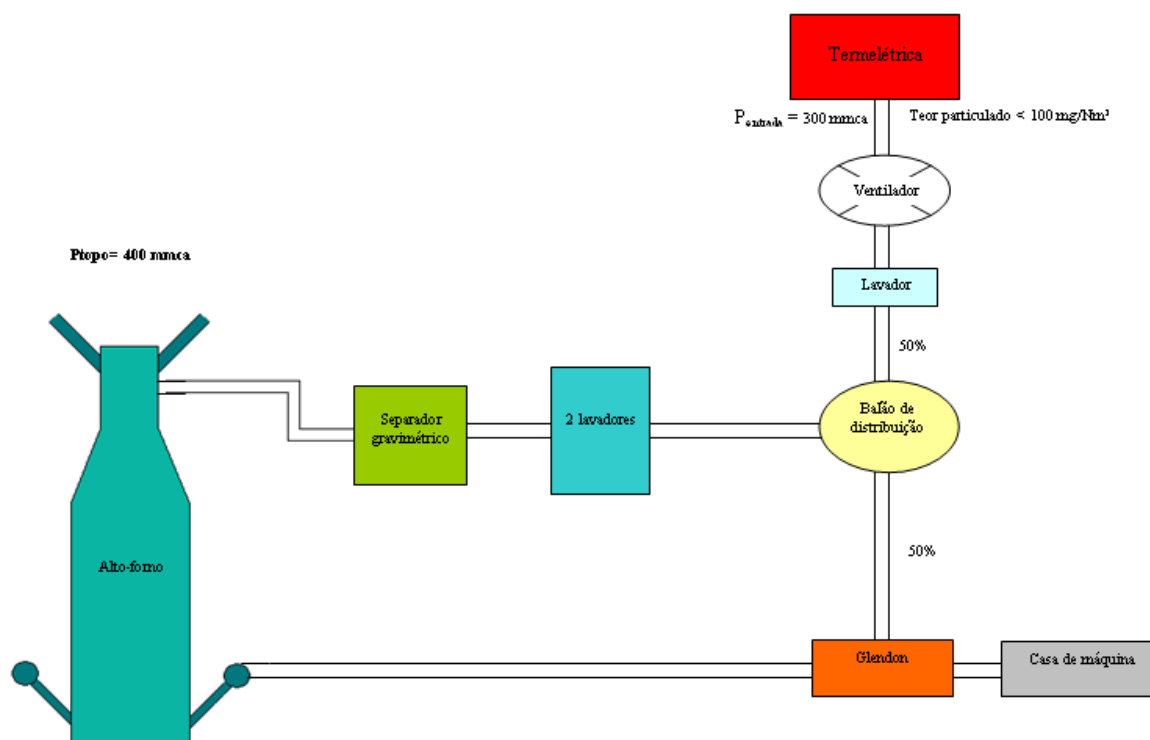


Figura 2.13 - Configuração 3 do sistema de gás de alto-forno.

Nesta Configuração 3, a empresa opera com pressão de topo do alto-forno muito pequena, na ordem de 400 mmca (9,8 N/m²), e a empresa adota um sistema de controle de baixa eficiência consistindo de balão (separador gravimétrico) e dois lavadores de baixa energia.

A empresa compensou a baixa eficiência de limpeza com a implantação de mais um lavador de baixa energia na linha da termoelétrica, e um ventilador depois do lavador para compensar a perda de carga necessária. O conteúdo de particulado para a termoelétrica é considerada alta, na faixa de 100 mg/Nm³. Este ventilador, por estar depois do lavador, requer menos limpeza porque o gás está com menor concentração de particulado, porém neste caso, também ocorre risco de explosão devido à presença de pressão negativa na linha de gás de alto-forno.

A empresa também neste caso preocupou-se apenas em melhorar a limpeza de gás que é dirigido para a termoelétrica, não se preocupando com a limpeza do gás que é dirigido para o *glendon*, fazendo que o mesmo continue com altos teores de particulado prejudicando a sua eficiência de operação.

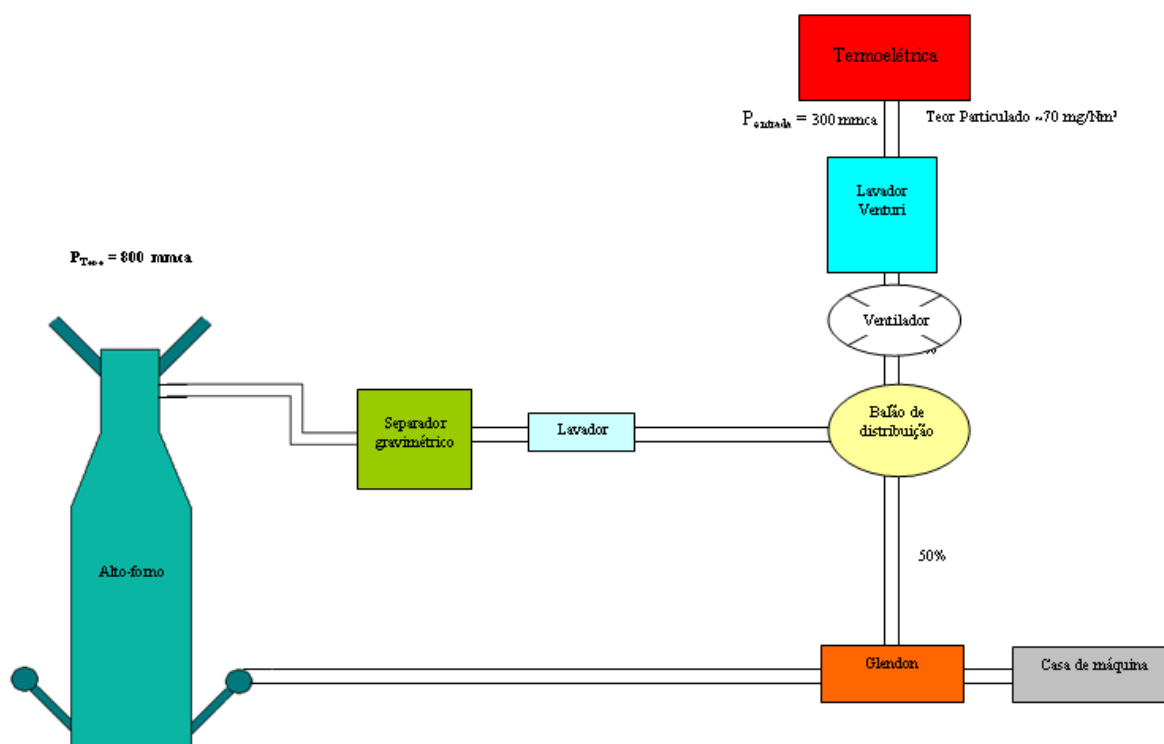


Figura 2.14 – Configuração 4 do sistema de gás de alto-forno.

Nesta Configuração 4, a empresa opera com pressão de topo do alto-forno baixa, na ordem de 800 mmca (9,8 N/m²), e adota um sistema de controle de baixa eficiência consistindo de balão (separador gravimétrico) e lavador de baixa energia.

A empresa compensou a baixa eficiência de limpeza com a implantação de um lavador Venturi na linha da termoelétrica, e um ventilador antes do lavador para compensar a perda de carga necessária para dirigir o gás até a termoelétrica. O conteúdo de particulado medido é na faixa de 70 mg/Nm³ devido à boa eficiência do lavador Venturi.

Este ventilador, por estar antes do Venturi, requer muitas paradas para limpeza de suas pás, para não desbalancear, sendo que também neste caso, existe o risco de explosão devido à presença de pressão negativa na linha de gás de alto-forno.

Similar às configurações anteriores, essa empresa também se preocupou apenas em melhorar a limpeza de gás que é dirigido para a termoelétrica, não se preocupando com a limpeza do gás que é dirigido para o *glendon*, fazendo com que continue com altos teores de particulado prejudicando a sua eficiência de operação.

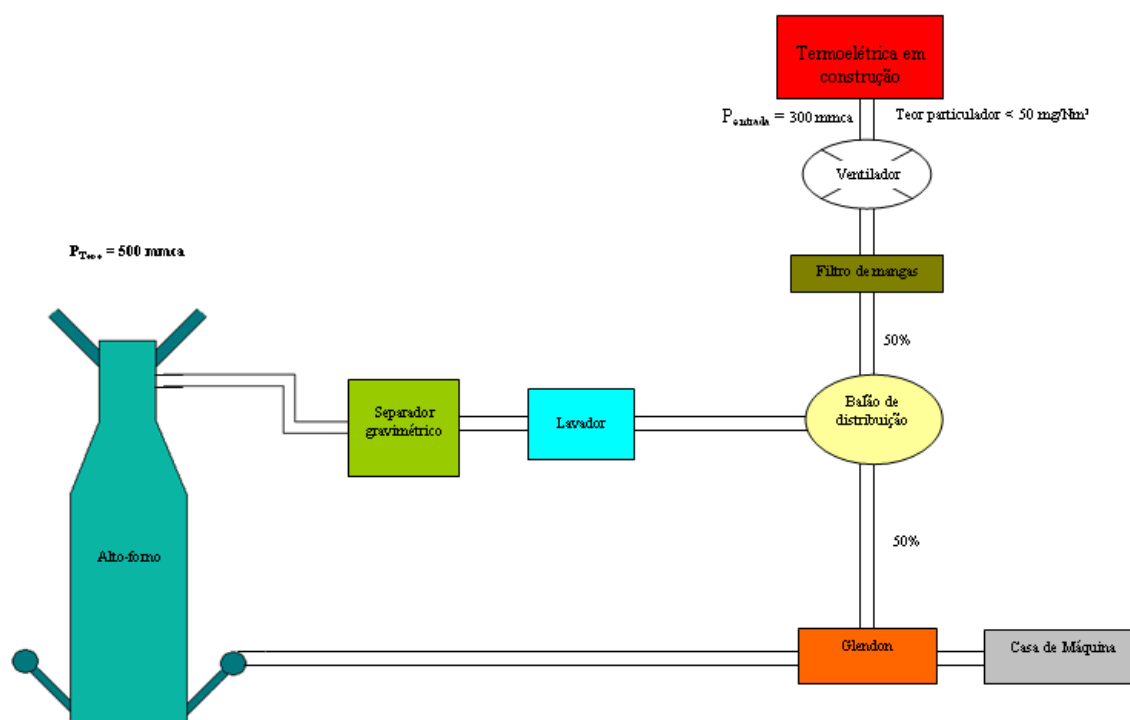


Figura 2.15 – Configuração 5 do sistema de gás de alto-forno.

A Configuração 5, na realidade, foi um teste realizado em uma das empresas com termoelétrica em implantação, sendo pequena a pressão de topo do alto-forno, na ordem de 500 mmca (9,8 N/m²), fazendo com que seja adotado um sistema de controle de baixa eficiência consistindo de balão (separador gravimétrico) e lavador de baixa energia.

Para compensar a baixa eficiência de limpeza a empresa instalou de um filtro de mangas na linha da termoelétrica, o que não funcionou, uma vez que a umidade e o conteúdo de alcatrão no gás não permitiram o funcionamento a contento do filtro de mangas, ocasionando o entupimento das mangas. A tentativa era de alcançar uma emissão de 50 mg/Nm³ na chaminé da termoelétrica. Nesta configuração a empresa optou por utilizar um ventilador adicional, para compensar a perda de carga necessária.

A empresa se preocupou também somente em melhorar a limpeza de gás que é dirigido para a termoelétrica, não se preocupando com a limpeza do gás que é dirigido para o *glendon*, fazendo que o mesmo continue com altos teores de particulado. Para manter a temperatura de sopro, necessitar-se-ia de mais gás no *glendon*, o que diminuiria o gás para a termoelétrica.

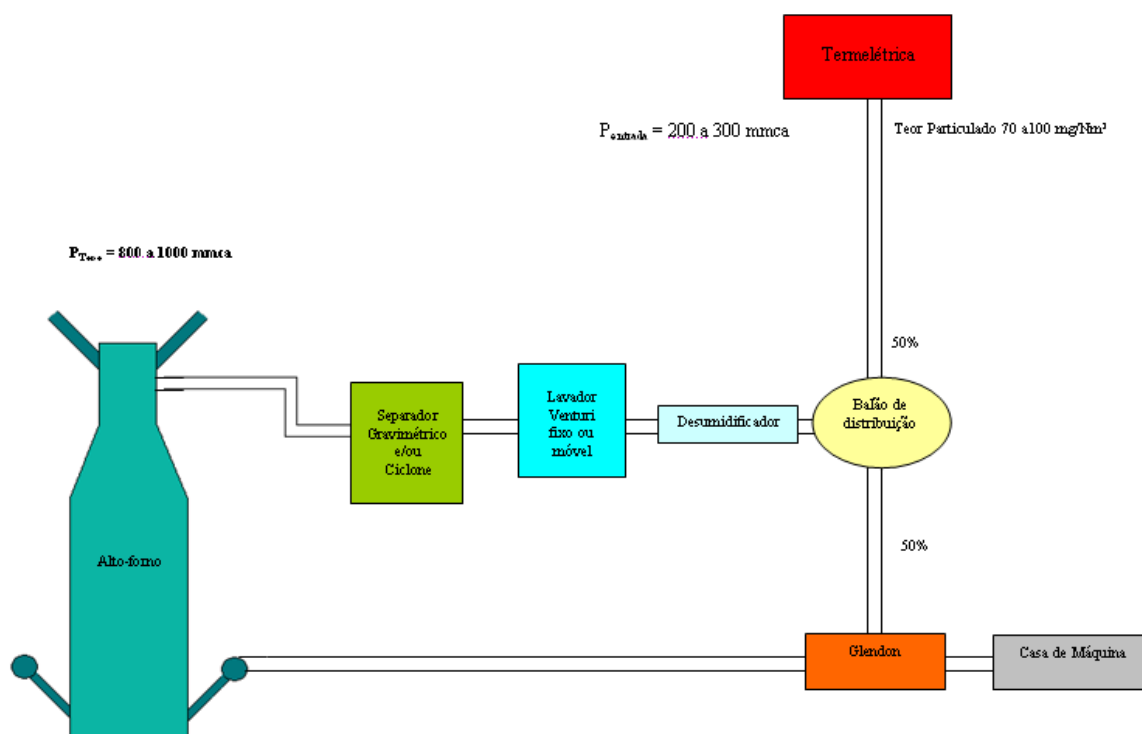


Figura 2.16 - Configuração 6 do sistema de gás de alto-forno.

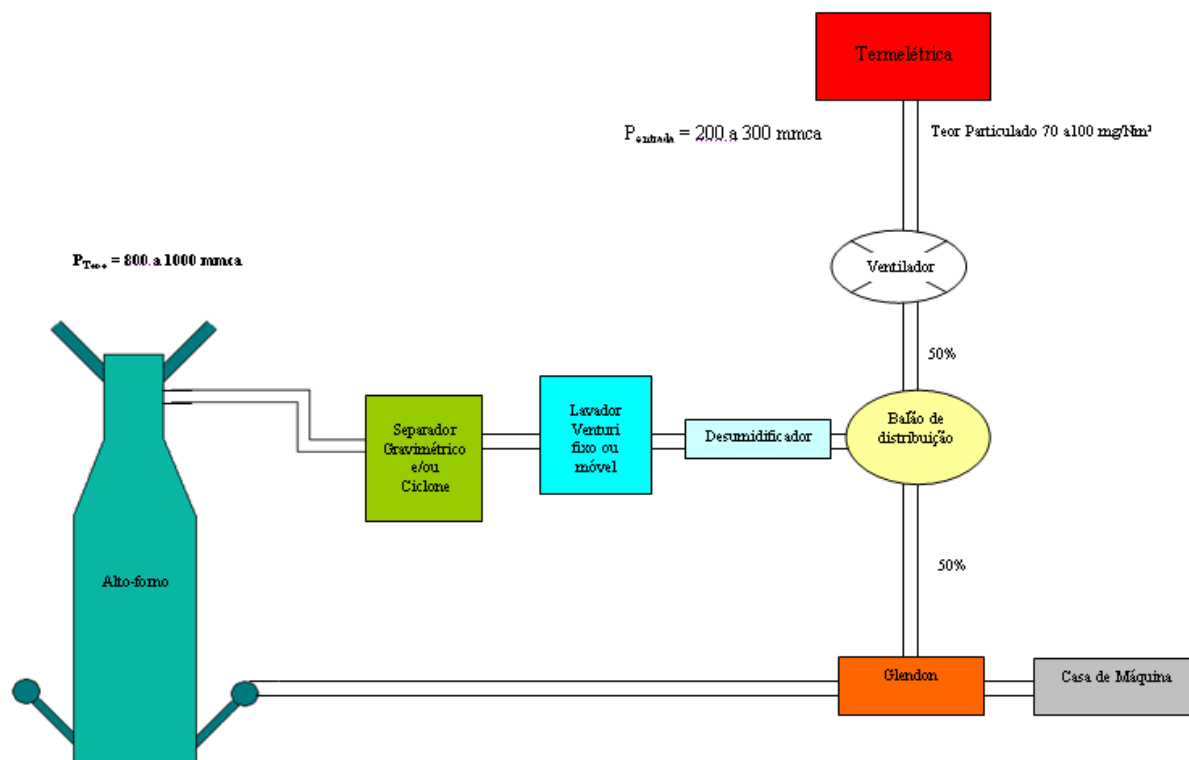


Figura 2.17 -Configuração 7 do sistema de gás de alto-forno.

Nas Configurações 6 e 7, que correspondem as Figuras 2.16 e 2.17, respectivamente, três empreendimentos optaram por instalar um equipamento de limpeza de gás, de maior eficiência, constituído pelo o lavador Venturi. No entanto optaram por lavadores Venturi de baixa energia.

Estas configurações possuem a vantagem de se obter um gás mais limpo para ser dirigido à termoelétrica e ainda permitem limpar o gás que é dirigido ao *glendon*. No entanto não alcançaram a eficiência necessária para se obter uma concentração de 50 mg/Nm^3 medida na chaminé do *glendon*, sugerida por este trabalho.

Na configuração 7, algumas empresas optaram por adicionar um ventilador na linha da termoelétrica para ajudar a vencer a perda de carga necessária para dirigir o gás, porque as pressões de topo dos fornos não são altas o suficiente. Esta opção como discutido anteriormente é preocupante porque pode estar criando pressão negativa na linha de gás de alto-forno, fazendo com que provável injeção de ar na linha cause risco de explosão. Foram relatados pelo menos dois casos que tal fato ocorrera.

Pelo menos uma empresa modificou a casa de máquina para aumentar a pressão de topo evitando a utilização do ventilador adicional.

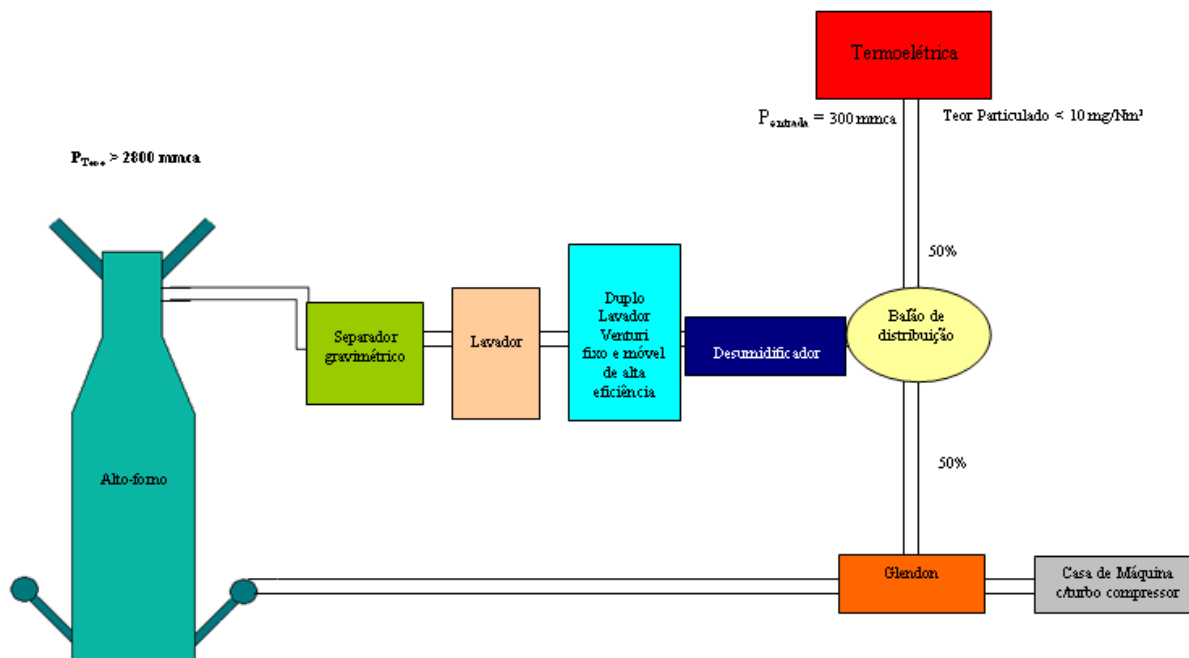


Figura 2.18 - Configuração 8 do sistema de gás de alto-forno.

Nesta Configuração 8, o alto-forno possui alta pressão de topo proporcionando a utilização de lavadores Venturi de alta energia e alta eficiência, sendo que a concentração de material particulado no gás antes da termoelétrica é menor que 10 mg/Nm^3 .

Nesta configuração o *glendon* também fica limpo e a casa de máquina utiliza o turbo compressor. Ocorre parada para limpeza da caldeira somente com as paradas programadas dos altos- fornos.

É importante destacar que a concentração de material particulado em todas estas configurações são medidas nos *glendons*. Portanto, deve-se levar em consideração o ar de combustão utilizado no *glendon* que eleva a quantidade do gás de combustão em aproximadamente 2,5 vezes o gás de alto-forno. Além disso, não foi considerado o carbono presente no particulado do gás (aproximadamente 40 %) que pode ser queimado nos *glendons* e nas tochas.

2.3 Cenário do Setor de Produção de Ferro-Gusa a Carvão Vegetal no Estado de Minas Gerais

Conforme a metodologia proposta no projeto procurou-se, utilizando a própria experiência do setor de ferro-gusa a carvão vegetal, detectar as melhores tecnologias de processo e limpeza de gás de alto-forno que poderiam ser aproveitadas pelas demais empresas.

Para tanto foi realizado o diagnóstico do setor referente aos anos de 2008 e 2009, por meio de consulta ao Sistema Integrado de Informação Ambiental (SIAM) de Minas Gerais e de visitas técnicas aos empreendimentos, que respondiam um questionário desenvolvido especificamente para a coleta de dados técnicos do setor.

O setor produtor de ferro-gusa possui um total de 74 empresas a carvão vegetal no Estado de Minas Gerais, sendo que, dentre elas, uma estava em construção e oito empresas estavam com as atividades paradas há anos por intervenção judicial ou por se tratar de massa falida. Essa parcela corresponde a 12% das empresas do setor.

Das 65 empresas à carvão vegetal restantes, seis não responderam ao questionário, o que corresponde a 9% das empresas visitadas. Dentre as 59 empresas, que preencheram o questionário, apenas 29 empresas estavam operando pelo menos um forno, o que corresponde a 49% deste total em atividade, as demais não se encontravam em operação.

A Figura 2.19 mostra a relação de empresas por município, considerando as 65 empresas analisadas.

O setor siderúrgico possui atualmente 102 fornos, estando 98 em condições de funcionamento e quatro paralisados há vários anos, sendo desconsiderados nesse levantamento.

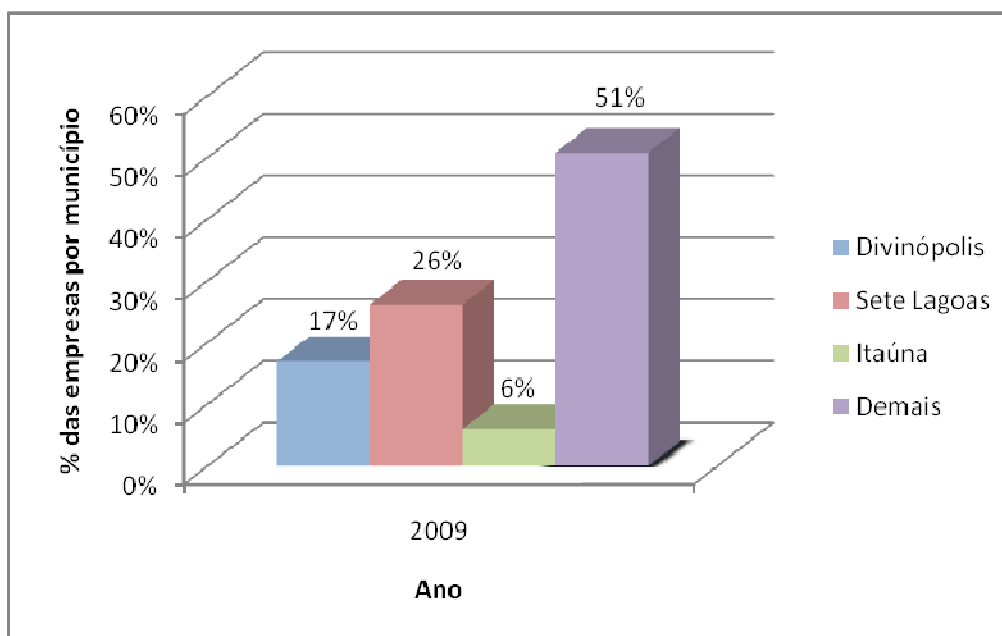


Figura 2.19 – Distribuição dos empreendimentos do setor de ferro-gusa, por município, no Estado de Minas Gerais.

A Figura 2.20 mostra a capacidade instalada unitária considerando o total de altos-fornos em condições de funcionamento. A capacidade de produção total destes fornos por dia é de 27.515 toneladas de gusa. De acordo com os dados obtidos, o total de carvão vegetal consumido pelas empresas foi de 73.703 m³/d, com exceção de duas empresas que não informaram o consumo de carvão. O consumo específico médio de energia elétrica é de 84 kw/h por tonelada produzida.

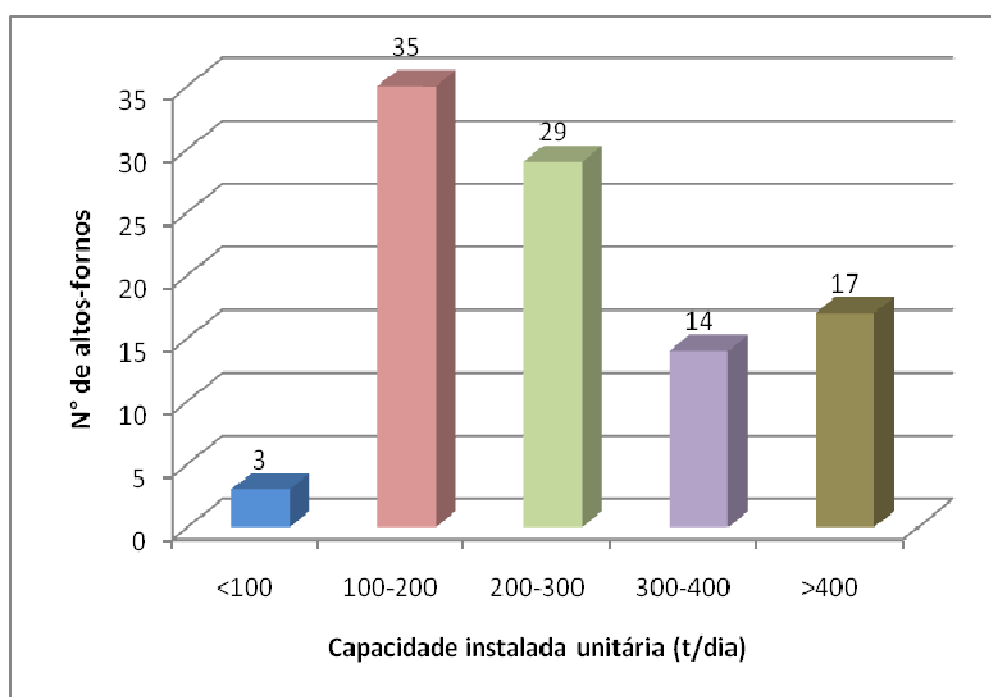


Figura 2.20 - Capacidade instalada unitária (t/d) por número de alto-fornos em condições de funcionamento.

O levantamento verificou junto às empresas o tipo de vazamento de gusa, podendo esse ser contínuo ou intermitente demonstrado na Figura 2.21.

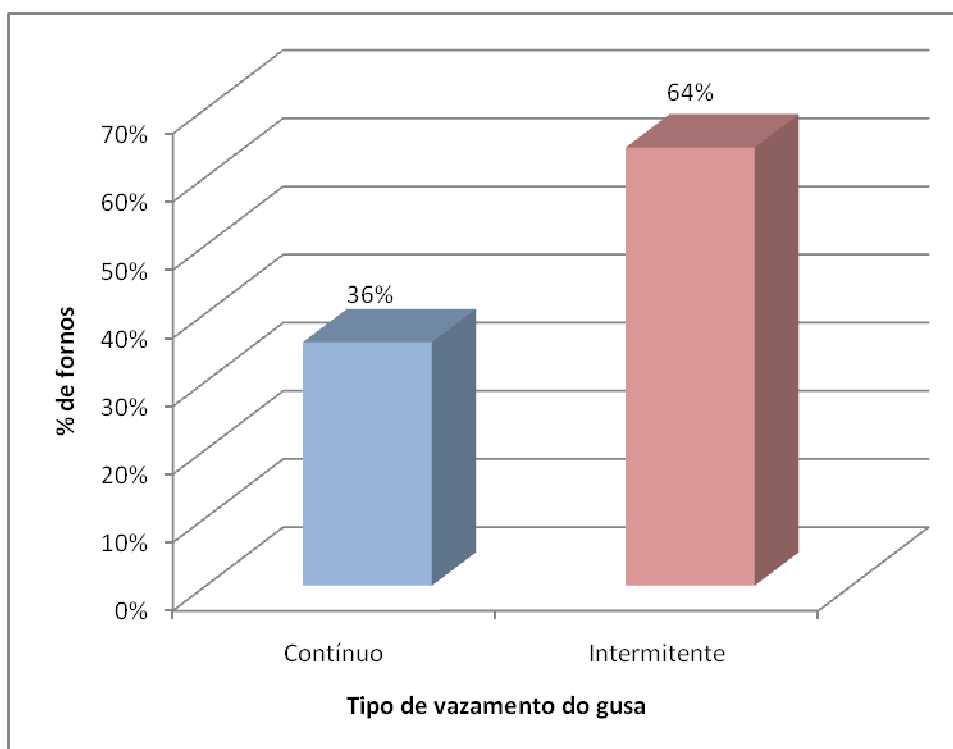


Figura 2.21 – Percentagem de alto-fornos com vazamento contínuo ou intermitente de gusa.

Outro dado analisado no levantamento se refere à presença de sistema de injeção de finos, conforme a distribuição percentual apresentada na Figura 2.22, onde se observou que, dos 98 fornos analisados, ainda a maior parte não possui sistema de injeção de finos.

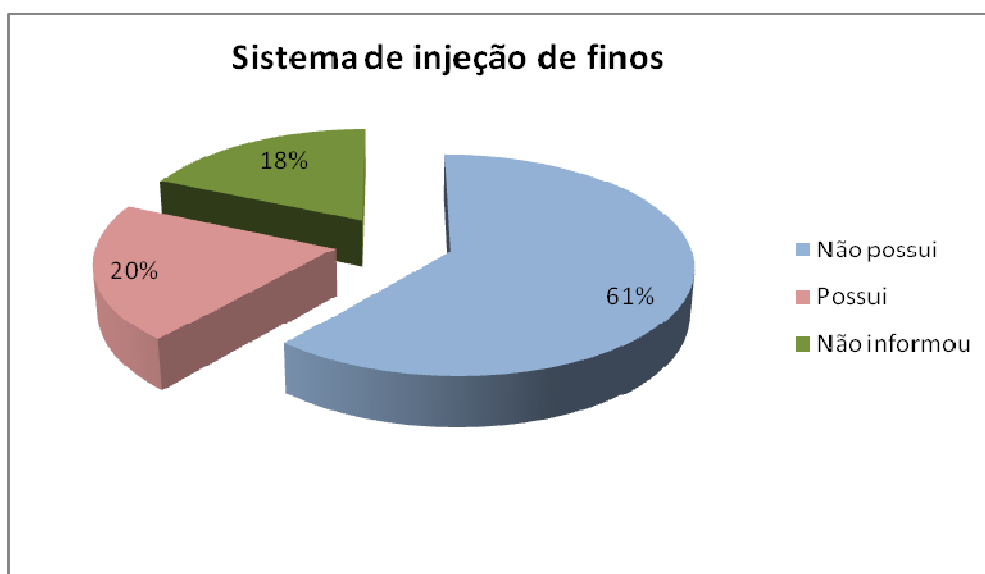


Figura 2.22 – Percentagem de alto-fornos que possuem sistema de injeção de finos de carvão vegetal.

Além do sistema de injeção de finos, também foram obtidas informações nesse levantamento quanto às características dos *glendons*, como a percentagem de *glendons* em relação ao total de alto-fornos analisados, apresentado na Figura 2.23, a percentagem de queimadores por *glendon*, conforme a Figura 2.24, e a percentagem de empresas com sopradores de ar combustão nos *glendons*, Figura 2.25.

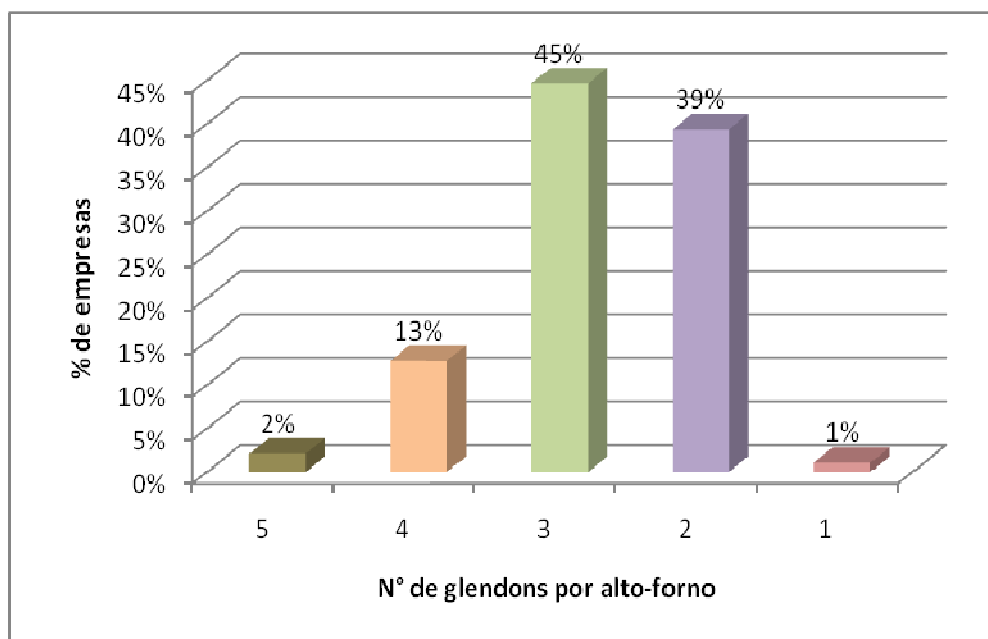


Figura 2.23 – Percentagem de *glendons* em relação ao número total de alto-forno.

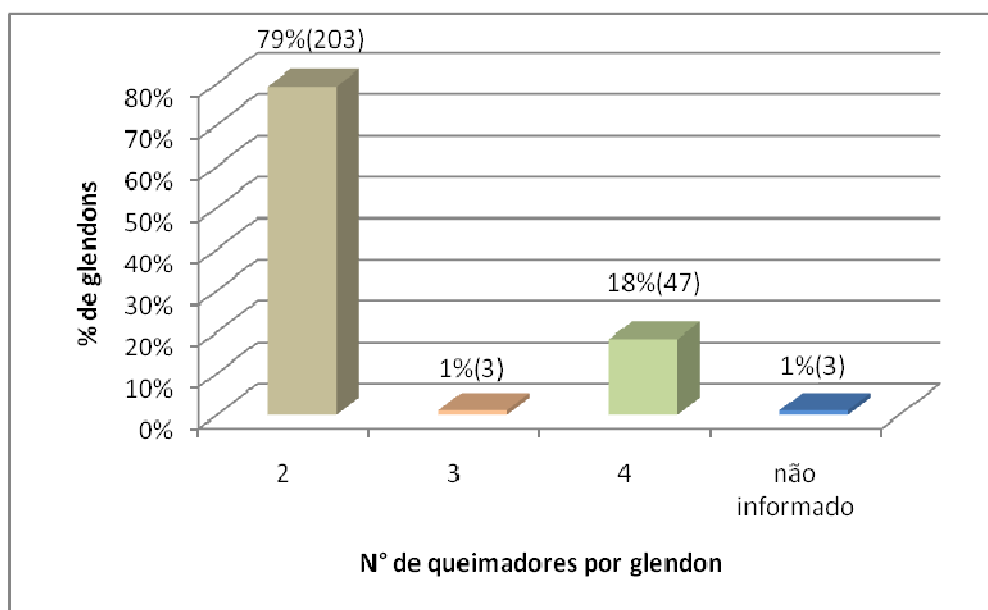


Figura 2.24 - Percentagem de queimadores por *glendon*.

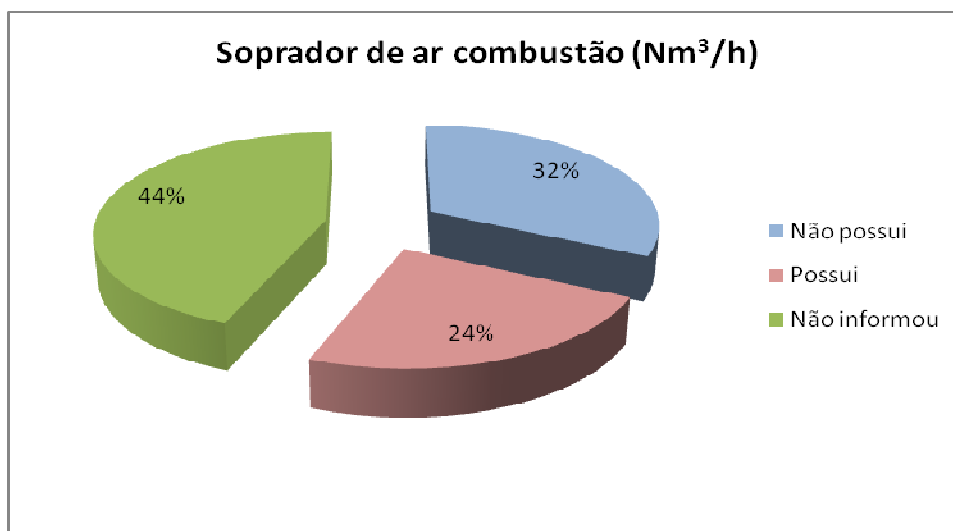


Figura 2.25 – Percentagem de empresas dotadas de sopradores de ar combustão nos *glendons*.

Outra característica analisada se refere à posição da chaminé nos *glendons*, cuja distribuição por é apresentada na Figura 2.26.

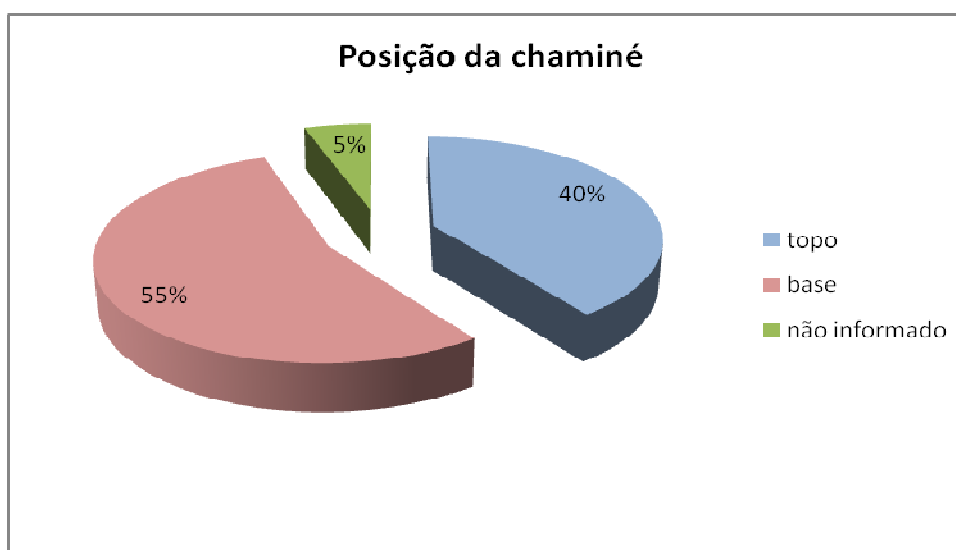


Figura 2.26 – Distribuição percentual da posição de chaminés nos *glendons*.

Ainda referente ao processo produtivo, as informações referentes à tocha são mostradas na Figura 2.27.

Das 98 tochas existentes, cerca de 64 possuem ignição manual, o que equivale a 86% dos alto-fornos analisados.

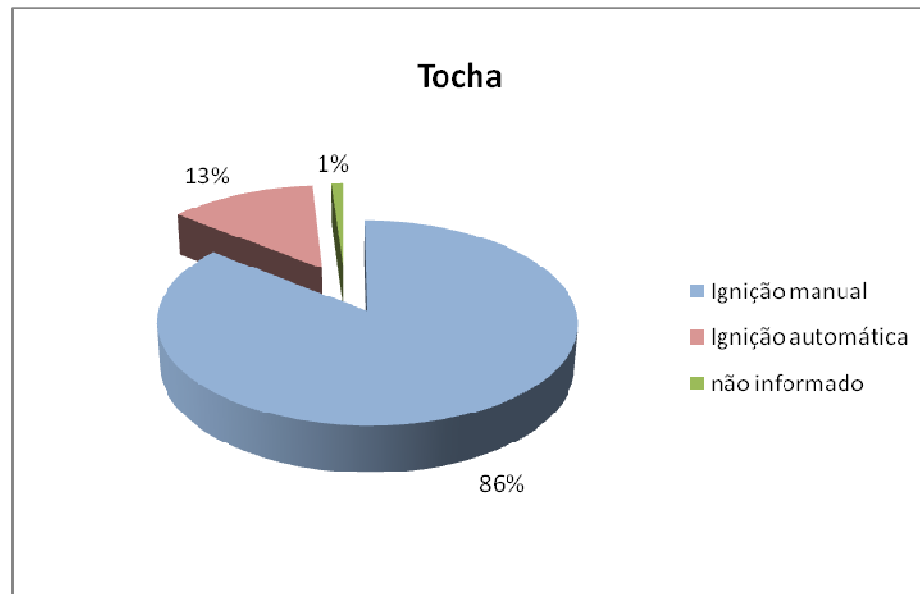


Figura 2.27 - Porcentagem de tochas com ignição manual ou automática.

A Figura 2.28 mostra as faixas do índice de produtividade de cada alto-forno, sendo esse índice determinado pela divisão da produção do forno pelo seu volume útil conforme a abaixo:

$$E = P / V \quad (2.2)$$

Onde:

V = volume útil do alto-forno (m³)

P = produção diária de ferro-gusa (t/d)

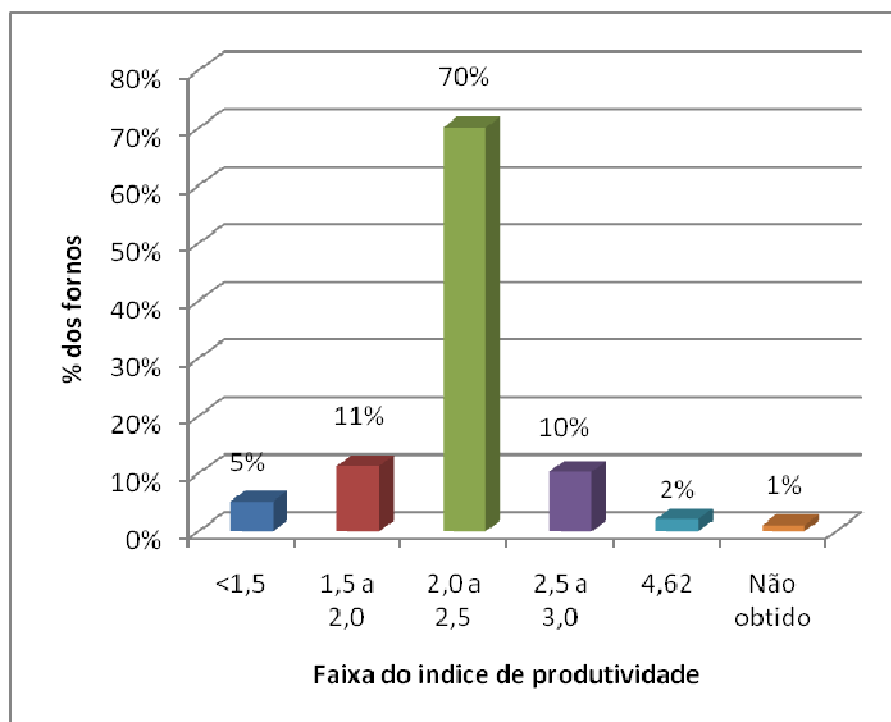


Figura 2.28 - Porcentagem de altos-fornos com variados índices de produtividade.

Conforme observado na Figura 2.28, a maior parte das empresas possuem índice de produtividade variando na faixa de 2,0 a 2,5.

Os dados de pressão de topo foram correlacionados à potência total dos ventiladores, à produção e à pressão de sopro, e estão apresentados nas Figuras 2.29, 2.30 e 2.31.

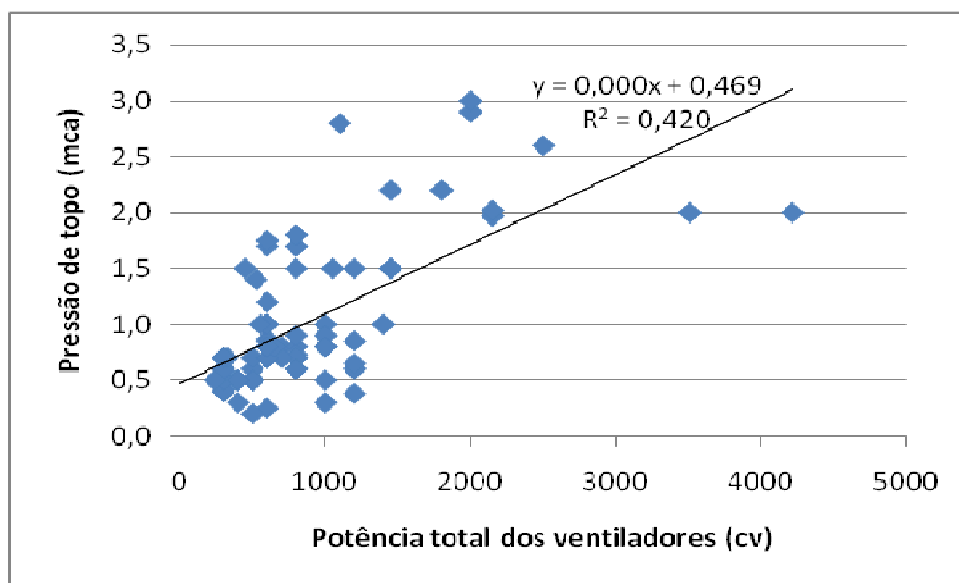


Figura 2.29 – Relação entre pressão de topo e potência total dos ventiladores.

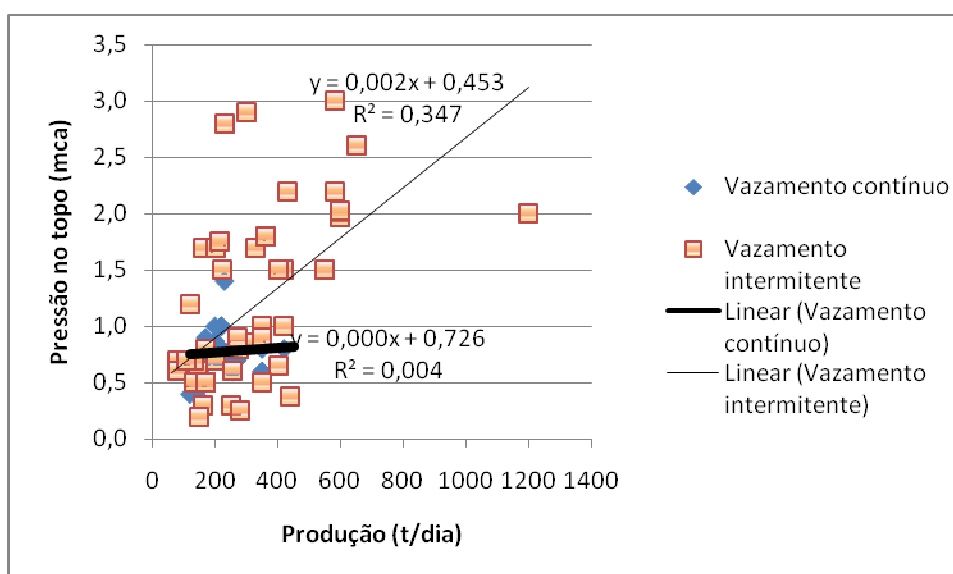


Figura 2.30 – Relação entre pressão de topo e produção.

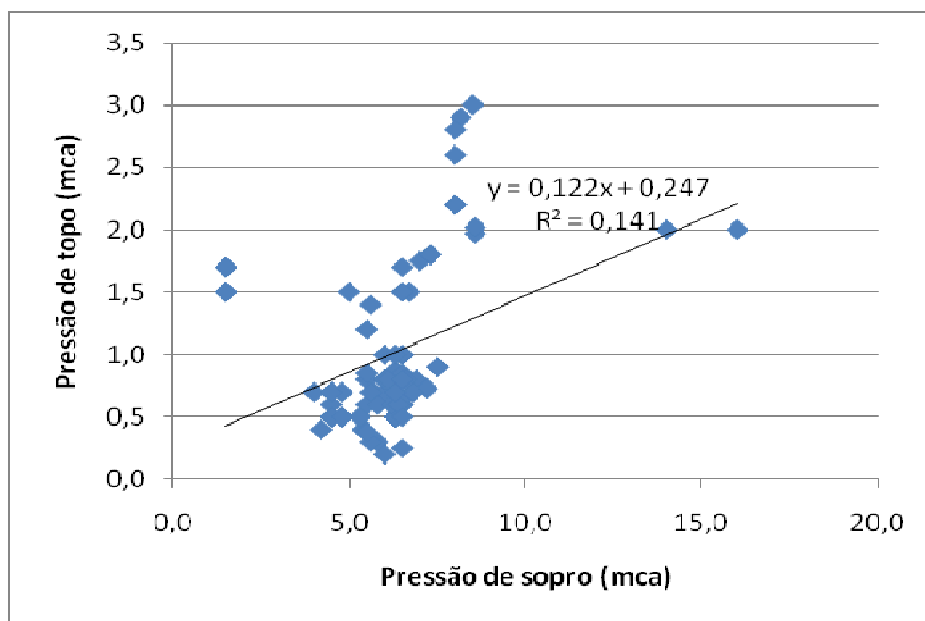


Figura 2.31 – Relação entre pressão de topo e pressão de sopro.

Observa-se na Figura 2.29 a falta de correlação matemática entre pressão de topo e potencia total de ventiladores, (R^2 pequeno), a despeito de teoricamente ser esperada essa correlação, uma vez que, quanto maior potencia maior deveria ser a pressão de topo. Este fato nos mostra que existem problemas de perda de pressão nos fornos muito frequentemente, devido a vazamentos no sistema de carregamento, problemas de projeto e desgaste.

O mesmo vale para a Figura 2.31, onde também deveria haver uma correlação matemática entre pressão de topo e pressão de sopro.

A Figura 2.30 demonstra que os fornos com vazamento intermitente trabalham com uma pressão de sopro maior que os fornos com vazamento contínuo, o que confirma uma preocupação constante pelas empresas, detectada na aplicação dos questionários, de que esses fornos com vazamento contínuo precisam trabalhar com pressão de topo menor para que a escória não vaze pelo canal de gusa, devido a diminuição da chamada zona de amolecimento no forno.

Não foi possível avaliar se trabalhar com pressão de topo menor em forno com vazamento contínuo é função desta “crença” de vazamento de escória ou se é tecnicamente necessária. Também não foi possível observar uma correlação matemática (R^2 pequeno).

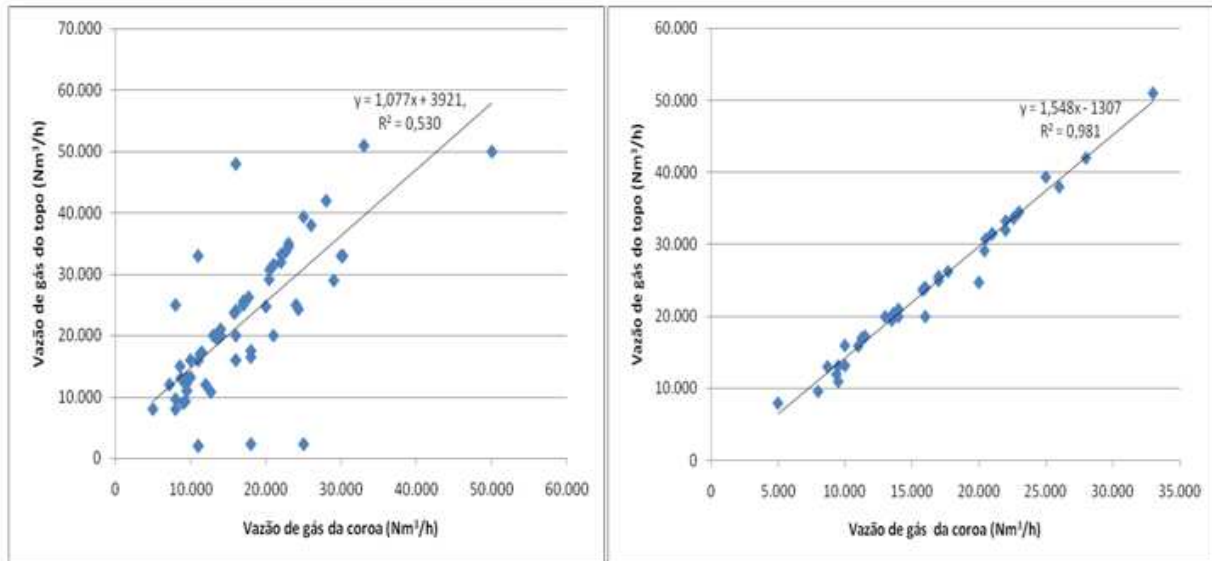


Figura 2.32 – a) Relação entre vazão de gás da coroa e vazão de gás de topo do alto-forno; b) mesma relação em a), considerando apenas os dados aproximados.

Em teoria, deveria haver uma correlação entre a vazão de gás na coroa e vazão de gás no topo, e esta relação entre pressão topo e pressão da coroa (que seria o coeficiente angular) deveria ser aproximadamente entre 1,4 e 1,5 devido ao balanço de Nitrogenio o que não foi detectado na Figura 2.32a. Infelizmente isto demonstra que grande parte das empresas não tem conhecimento da vazão de gás no topo do alto-forno sendo que muitas responderam no questionário que a vazão de topo é a mesma na coroa.

Desta forma os dados considerados equivocados foram desconsiderados e a Figura 2.32b mostra uma correlação entre vazão de topo e vazão na coroa.

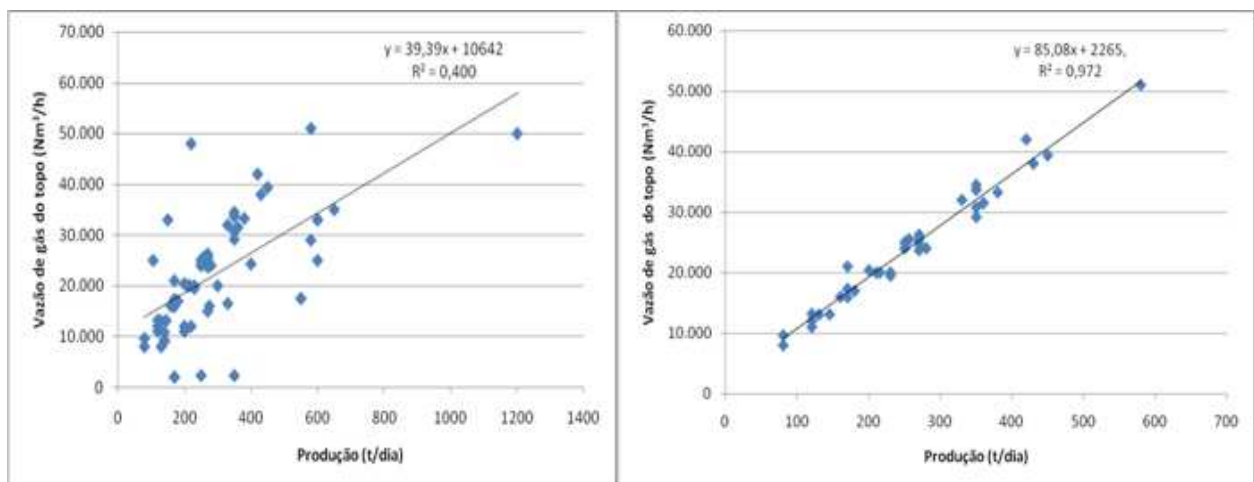


Figura 2.33 – a) Relação entre produção e vazão de gás do topo do alto-forno; b) mesma relação de a), considerando apenas os dados aproximados.

Assim como na Figura 2.32, na Figura 2.33 a relação entre produção e vazão do gás de topo teoricamente deveria existir e seria na ordem de 2.100 a 2.300 Nm³ de gás por tonelada produzida. Pelos mesmos motivos da Figura 2.32 (desconhecimento técnico dos entrevistados), esta correlação somente é observada na Figura 2.33b.

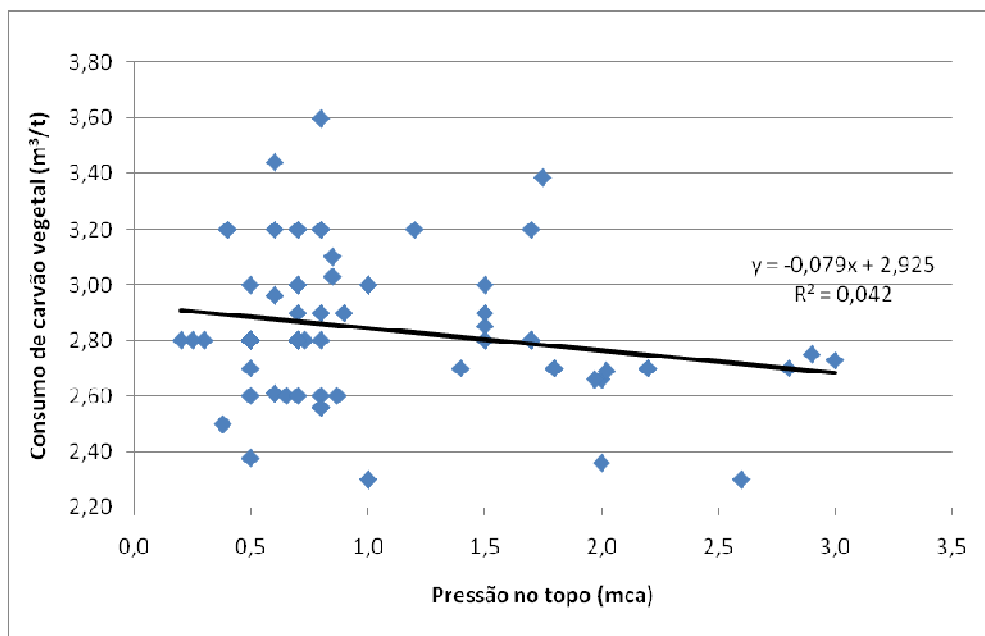


Figura 2.34 - Relação entre consumo de carvão vegetal e pressão de topo

A Figura 2.34 mostra a relação entre o consumo de carvão vegetal e a pressão de topo, onde observa-se através do baixo valor de R² que não há uma relação direta entre as variáveis, percebendo-se no entanto uma importante tendência de menor consumo de carvão com o aumento da pressão de topo.

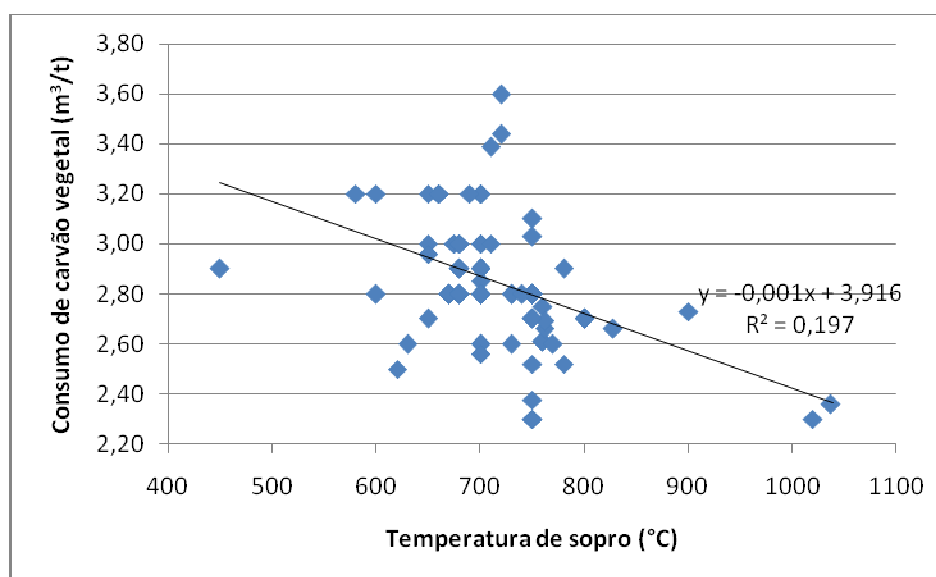


Figura 2.35 - Relação entre temperatura de sopro e consumo de carvão vegetal.

Na análise da Figura 2.35, a relação entre temperatura de sopro e consumo de carvão vegetal pode ser entendida no sentido de que, com o aumento da temperatura de sopro, ocorre uma diminuição do consumo de carvão vegetal, uma vez que diminui a necessidade energética do carvão.

As interpretações das Figuras 2.34 e 2.35 podem ser complementares uma vez que aumentando a pressão de topo, existe maior disponibilidade de energia para limpeza do gás, e, portanto, um gás mais limpo é dirigido ao *glendon*, aumentando a eficiência do mesmo e consequentemente aumentando a temperatura de sopro diminuindo a necessidade de consumo de carvão. Esta análise não leva em conta aspectos metalúrgicos como a melhoria da permeabilidade da carga, favorecendo as reações químicas envolvidas e diminuindo a necessidade de carvão com o aumento da pressão.

Na Figura 2.36 observa-se que um menor consumo de carvão é alcançado com empresas que utilizam sistemas de injeção de fino.

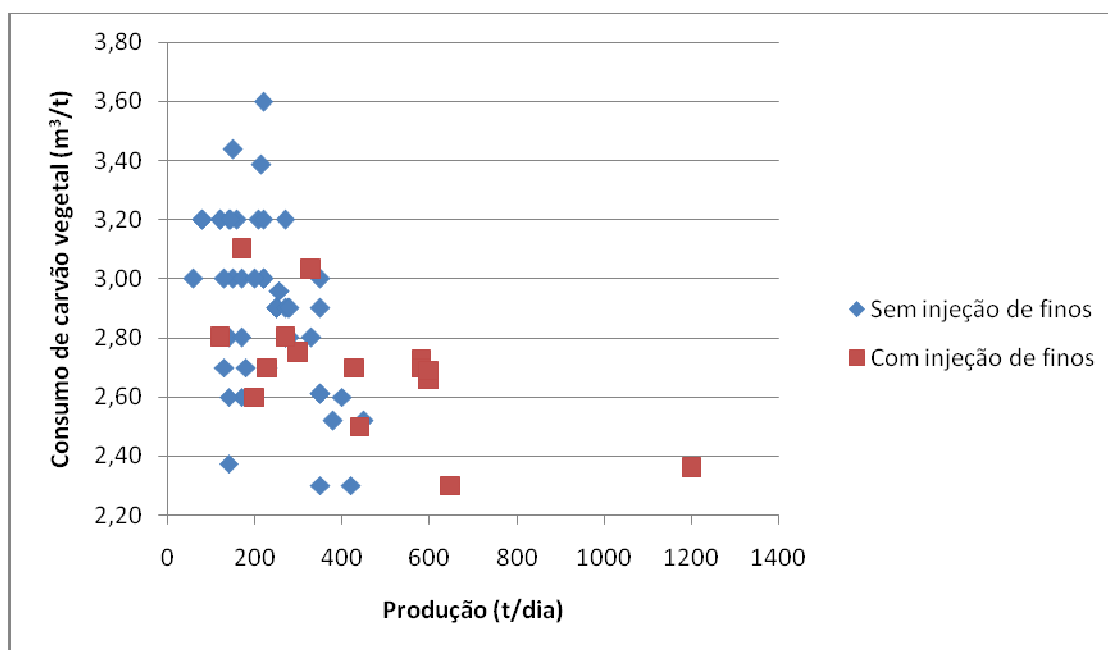


Figura 2.36 - Relação entre produção e consumo de carvão vegetal.

As Figuras 2.37 e 2.38 relacionam o volume útil do forno a potência total dos ventiladores, e a produção.

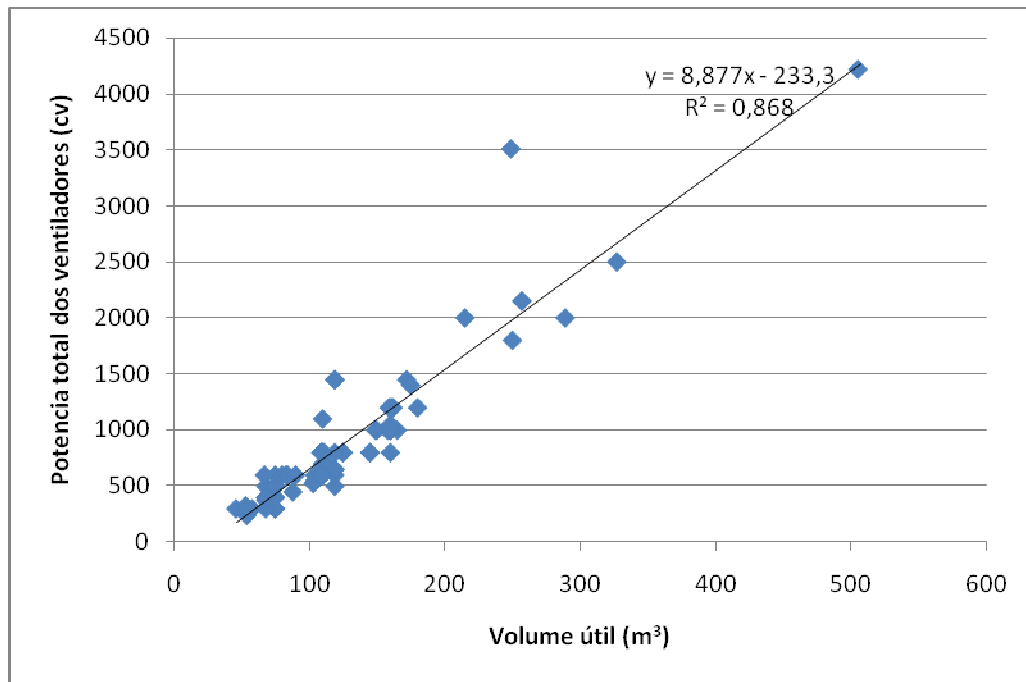


Figura 2.37 – Relação entre o volume útil do alto-forno e potência total dos ventiladores.

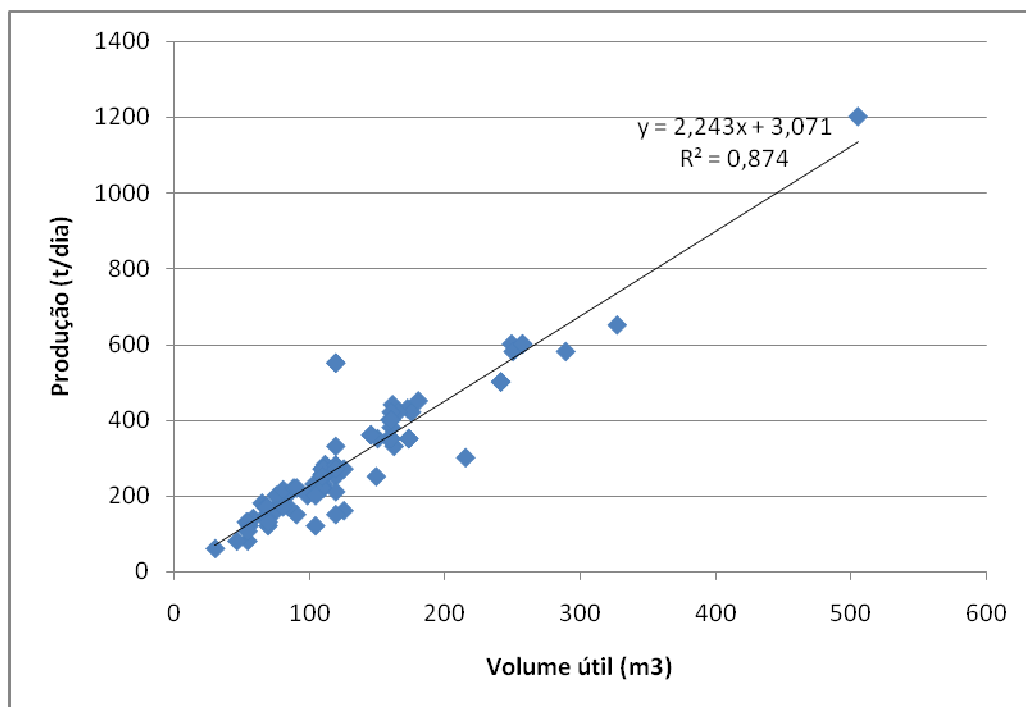


Figura 2.38 – Relação volume útil do alto-forno e produção de ferro-gusa.

Uma relação direta foi observada nas Figuras 2.37 e 2.38, demonstrando uma necessidade de maior potência dos ventiladores para uma maior vazão de sopro na coroa, à medida que se tem um forno com volume útil maior e também uma possibilidade de produção de gusa maior. Entretanto, nota-se que não é a única

condição, visto que há fornos com o mesmo volume útil de outros fornos que alcançam uma produção maior o que já foi apresentado na Figura 2.28 onde demonstrou diferentes índices de produtividade dos fornos.

Quanto ao de sistema de limpeza dos gases dos altos-fornos adotado pelo setor no estado de Minas Gerias, sua distribuição é apresentada na Figura 2.39. A análise dos sistemas de tratamento de gases de alto-forno foi realizada considerando os tipos de sistemas mais utilizados, equivalentes ao sistema a seco e úmido, sendo esse último constituído por lavador comum ou Venturi. Os fornos definidos por sistema a seco apresentam somente esse tipo de limpeza dos gases, enquanto os fornos com lavadores também possuem sistema a seco.

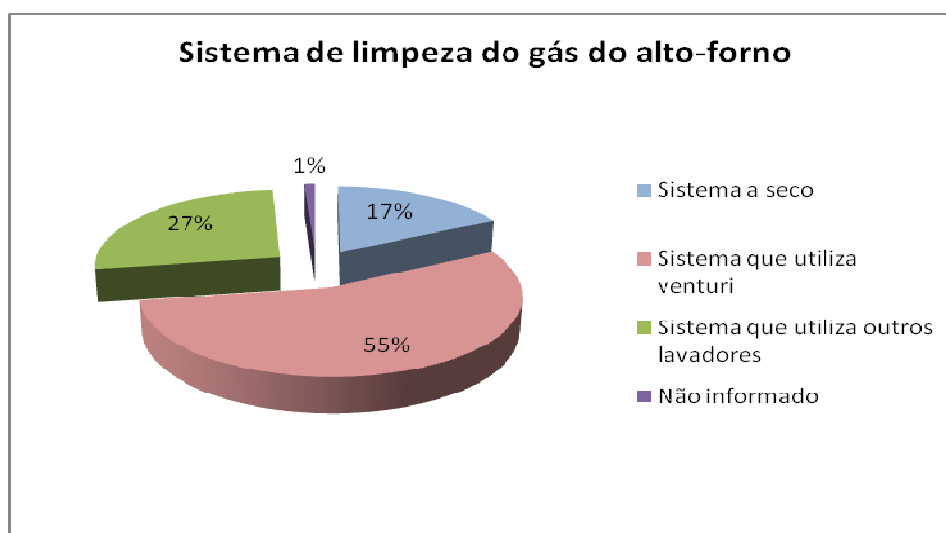


Figura 2.39 – Distribuição percentual do tipo de sistemas de limpeza de gases, a seco ou úmido, adotados pelo setor de ferro-gusa no Estado de Minas Gerais.

Além dos sistemas tratamento de efluentes atmosféricos, foram analisados também os sistemas de tratamento da água de lavagem dos gases, Figura 2.40, e sistema de desidratação do lodo, Figura 2.41.

Observa-se que a metade das empresas do setor que utilizam lavadores ainda utiliza o sistema de decantadores retangulares, cuja dificuldade de retirada do lodo é bem maior e apresentam uma eficiência, no caso de altos-fornos, bem menor que os decantadores circulares. Também é preocupante que 63 % das empresas não utilizam nenhum sistema de desidratação do lodo.

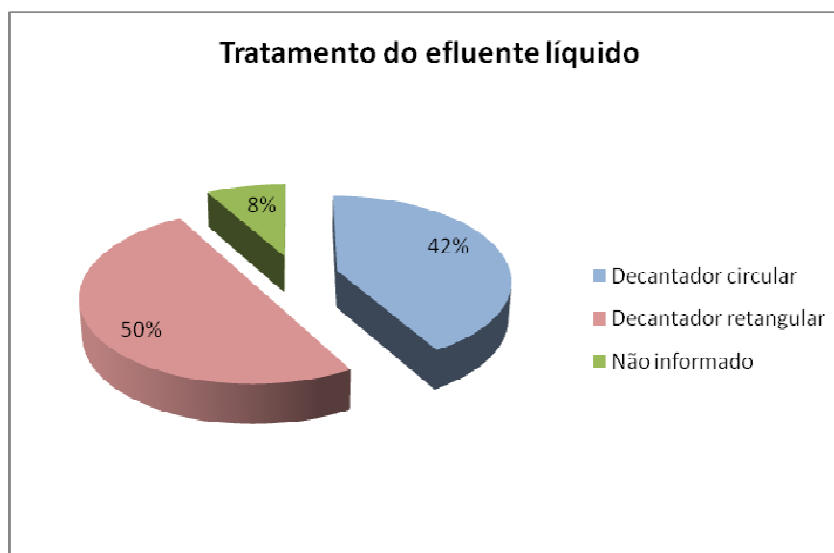


Figura 2.40 – Distribuição percentual dos sistemas de tratamentos das águas de lavagem de gás, por tipo, adotado pelo setor de ferro-gusa em Minas Gerais.

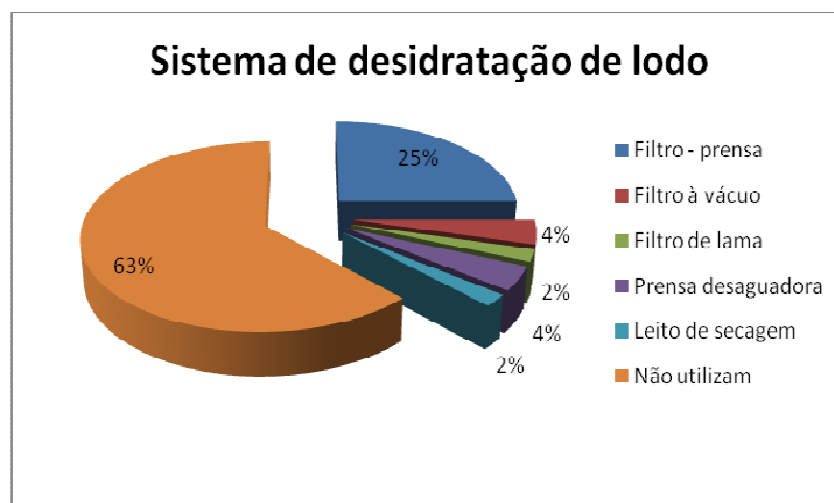


Figura 2.41 – Distribuição percentual dos sistemas de desidratação de lodo , por tipo, adotado pelo setor de ferro-gusa em Minas Gerais.

É muito importante que as empresas utilizem um sistema eficiente de sedimentação e tratamento do lodo para recircular a água para o lavador, visando não só a melhoria da limpeza do gás do alto-forno, mas também a água de limpeza do gás é muito tóxica, chegando a ter níveis de fenóis na ordem de 600 mg/L, não podendo ser descartada em corpo receptor.

Como discutido anteriormente, a maior parte do setor utiliza sistema a úmido na limpeza dos gases, sabidamente mais eficiente que o sistema a seco. Entretanto, esse fato não ficou claramente demonstrado nas Figuras 2.42 e 2.43, visto que alguns dados de sistema a seco alcançaram concentrações de material particulado

bem menores que a faixa da maioria dos lavadores, levando ao questionamento da qualidade das medições na chaminé dos *glendons*, condições de operação e projeto dos lavadores e excesso de ar de combustão utilizado nos *glendons* podendo estar ocorrendo diluição do efluente.

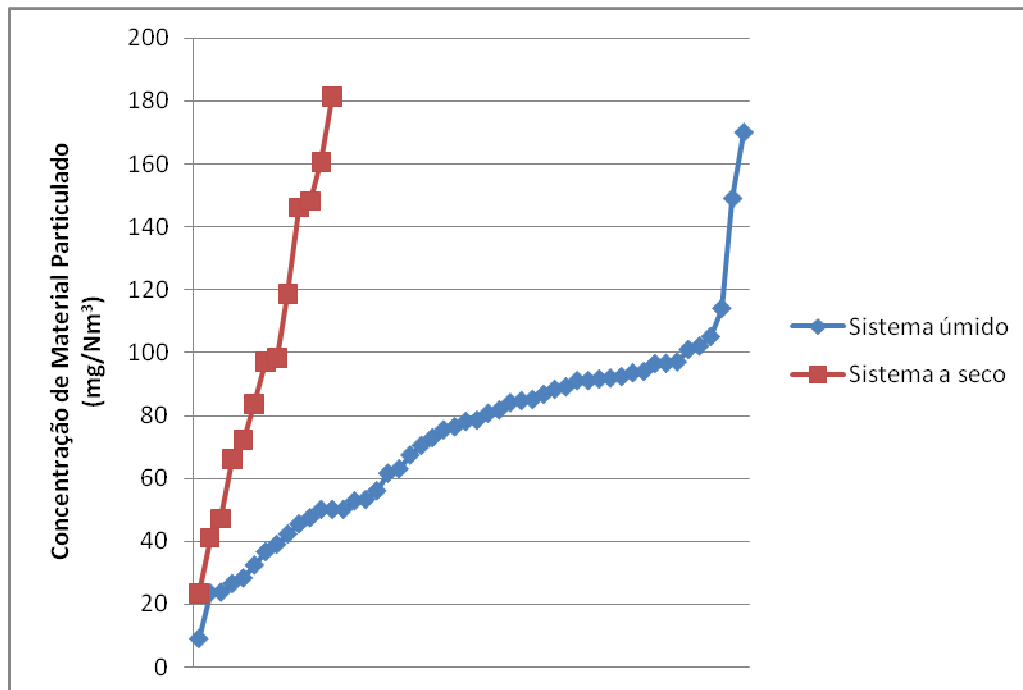


Figura 2.42 - Níveis de concentração de material particulado nas saídas de sistemas de tratamento a seco e a úmido

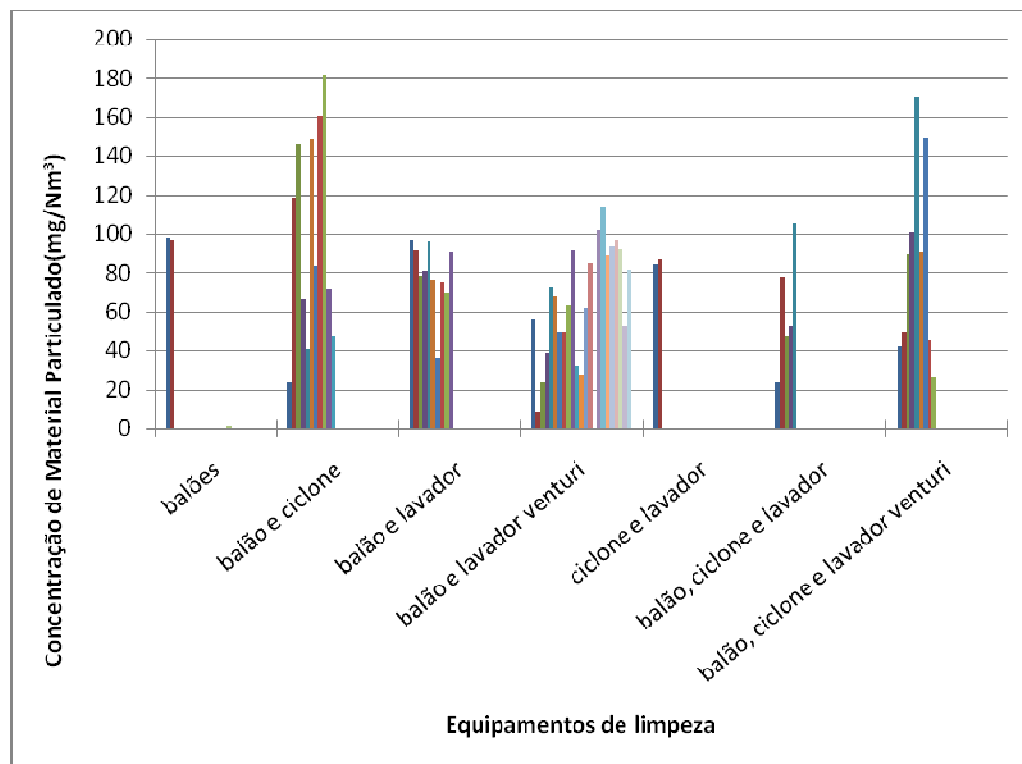


Figura 2.43 - Níveis de concentração de material particulado nas saídas de diferentes sistemas de limpeza.

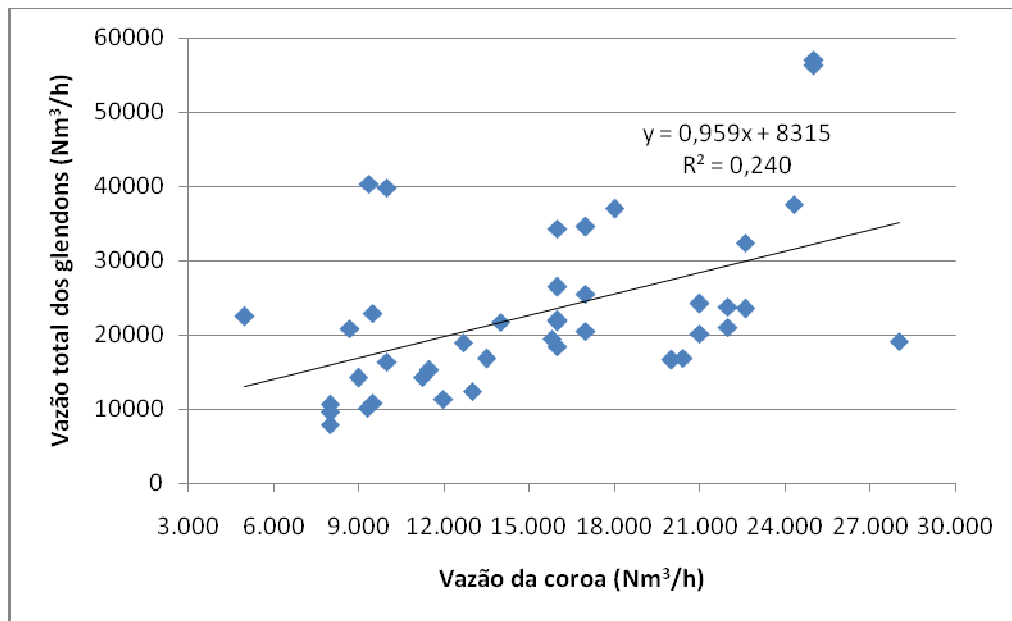


Figura 2.44 – Relação entre vazão da coroa e vazão total das chaminés dos *glendons*

A Figura 2.44 mostra a relação entre a vazão da coroa e a vazão total dos *glendons* medida. Observa-se que para a mesma vazão da coroa tem-se diferentes vazões totais das chaminés dos *glendons*, não conseguindo se efetuar uma relação, que teoricamente deveria existir, devido as grandes inconstâncias de funcionamento dos *glendons*, com diferentes vazões de ar de combustão, e problemas nas medições de chaminé, não se conseguiu estabelecer uma correlação.

Assunção (2006) obteve as vazões volumétricas de ar de combustão e de gás de alto-forno no *glendon*. O valor médio nas condições normais de temperatura e pressão (CNTP) encontradas para o ar de combustão foi a relação de 1,67 Nm³/h para 1 Nm³/h de gás de alto-forno. Considerando o princípio de conservação das massas e o fato de que a densidade do gás de combustão (na chaminé do *glendon*) ser semelhante á densidade do gás de alto-forno e do ar, a quantidade de gás nas chaminés dos *glendons* deveria ser 2,67 vezes a quantidade de gás de alto-forno.

2.4 Proposta do Sistema de Limpeza de Gás mais Adequado

Conforme a metodologia utilizada, foi considerada a concentração máxima de material particulado no gás a ser queimado nas caldeiras da termoelétrica de 50 mg/Nm³ medido na chaminé da termoelétrica e o estudo se concentrou no lavador venturi uma vez que filtros de manga e precipitadores eletrostáticos são ainda muito

caros e não são comumente utilizados na limpeza de gás de alto-forno, sendo que o filtro de manga ainda se mostrou até o momento, tecnicamente inadequado, e os equipamentos a seco como ciclones e balões gravitacionais possuem baixa eficiência de remoção.

2.4.1 Análise estatística sobre eficiência de lavador Venturi

Por meio do questionário aplicado nas empresas e análise de desenhos de lavadores Venturi empregados, tentou-se realizar uma correlação entre eficiência desse tipo de lavador utilizando-se o resultado de medição na chaminé dos *glendons* e perda de carga nos lavadores Venturi.

A Figura 2.45 foi construída em função das perdas de carga informadas no questionário dos lavadores Venturi do sistema de limpeza do gás de alto-forno utilizado no setor, sendo estas informações complementadas pelos Relatórios de Controle Ambiental (RCA) e Planos de Controle Ambiental (PCA) dos empreendimentos em consulta ao Sistema Integrado de Informação Ambiental.

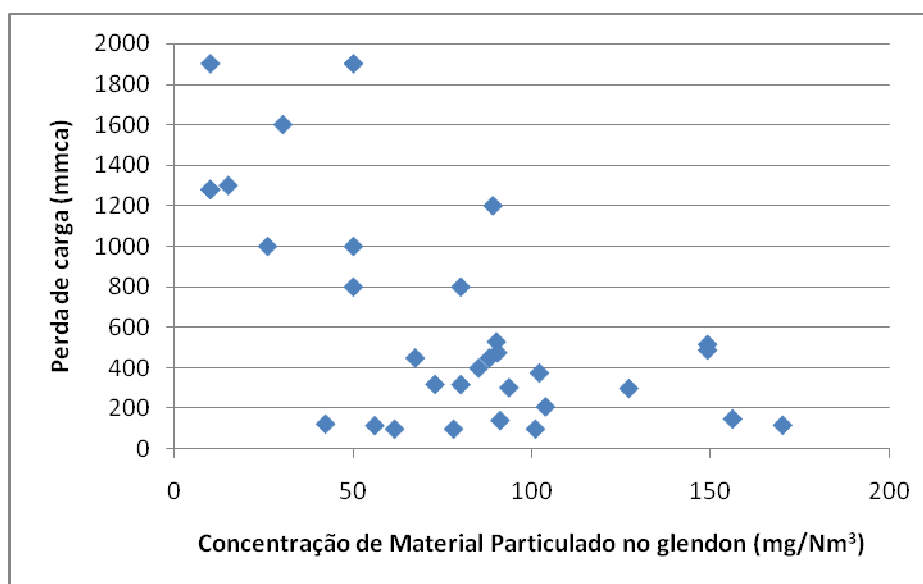


Figura 2.45 – Relação da concentração de material particulado na saída da chaminé dos *glendons* com a perda de carga dos lavadores.

A fim de se obter uma melhor correlação dos dados, Figura 2.46, excluiu-se os pontos considerados equivocados devido aos mencionados erros de medição nos

glendons e eventual diluição com ar do efluente também no *glendon*, onde lavadores com perda de carga inferior a 200 mmca (9,8 N/m²) obtiveram uma concentração de material particulado na chaminé do *glendon* inferior a 100 mg/Nm³,

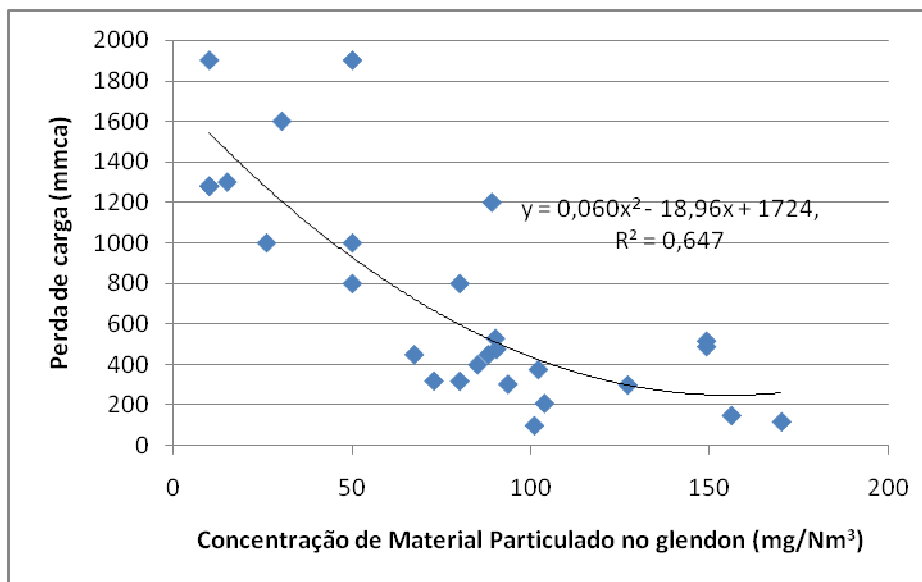


Figura 2.46 – Relação modificada da concentração de material particulado da chaminé dos *glendons* com a perda de carga dos lavadores venturi.

Observa-se na Figura 2.46 que uma concentração de material particulado inferior a 50 mg/Nm³ só foi obtida com lavadores Venturi com perdas de carga superiores a 800 e 1.000 mmca (9,8 N/m²).

Nota-se uma relação inversa entre a perda de carga e a concentração de material particulado, porém não foi possível obter uma correlação matemática (R^2 pequeno).

Apesar da metodologia utilizada adotar o valor de 50 mg/Nm³ na chaminé da termoelétrica ou do *glendon*, foi calculado também a concentração de particulado no gás na tubulação antes do *glendon* levando-se em conta uma relação de 2,5 Nm³ de gás de combustão para 1 Nm³ de gás de alto-forno conforme a Figura 2.47.

Observa-se que a concentração de particulado no gás que é dirigida para a termoelétrica na verdade é bem maior que o encontrado na chaminé do *glendon*.

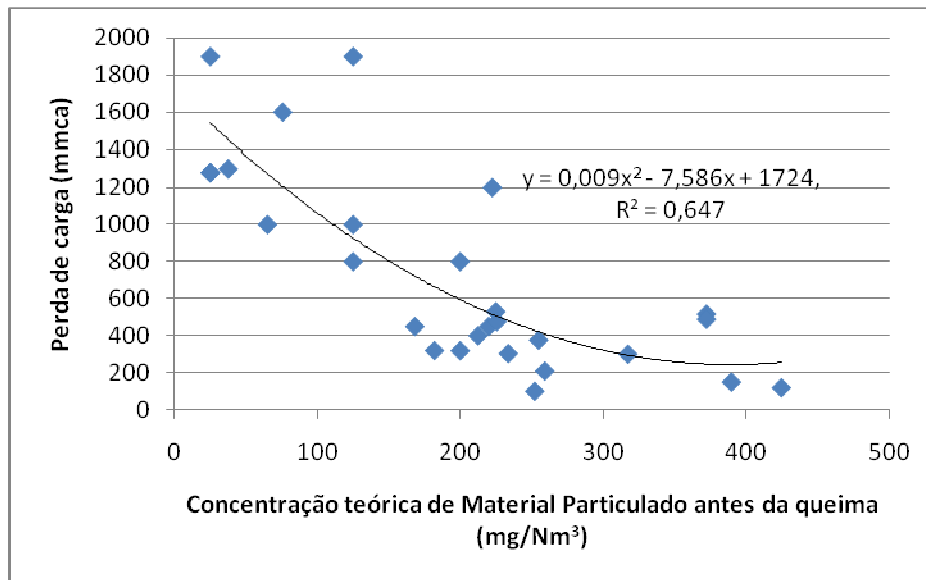


Figura 2.47 – Relação modificada da concentração de material particulado na tubulação antes da chaminé dos *glendons* com a perda de carga dos lavadores Venturi.

2.4.2 Modelamento Matemático

Visando verificar as observações da análise estatística, foram utilizadas as equações descritas abaixo.

$$P_T = P_G + P_L \quad (\text{hp}/1000 \text{ acfm}) \quad (2.3)$$

Onde:

P_T = energia total de contato (hp/1000 acfm)

P_G = energia para fluxo de gás (hp/1000 acfm)

P_L = energia para injeção de líquido (hp/1000 acfm)

A energia gasta para movimentar o gás através do sistema, P_G , é expressa em termos da perda de carga do lavador:

$$P_G = 0,1575 \cdot \Delta p \quad (\text{hp}/1000 \text{ acfm}) \quad (2.4)$$

Onde:

Δp = perda de pressão [pol. H₂O (249 N/m²)]

$\text{acfm} = 0,03 \text{ (m}^3/\text{min)}$

A energia gasta no fluxo líquido (P_L) é expressa como:

$$P_L = 0,583 \cdot P_l \cdot \left(\frac{Q_L}{Q_G} \right) \quad (\text{hp}/1000 \text{ acfm}) \quad (2.5)$$

Onde:

P_I = pressão de entrada do líquido (lb/pol²) (0,0703 kgf/cm²)

Q_L = vazão de líquido (gal/min) (3,78 L/min)

Q_G = vazão de gás (pé³/min) (0,03 m³/min)

As constantes dadas nas expressões para P_G e P_L incorporam os fatores de conversão. A energia total pode ser expressa como:

$$P_T = 0,1575 \cdot \Delta p + 0,583 \cdot P_I \cdot \left(\frac{Q_L}{Q_G} \right) \quad (\text{hp}/1000 \text{ acfm}) \quad (2.6)$$

Semrau correlaciona a eficiência do lavador através da formula:

$$\eta = 1 - \exp\left(-\alpha \cdot P_T^\beta\right) \quad (2.7)$$

Onde:

α e β = constantes empíricas que são determinadas experimentalmente e dependem da característica do material particulado.

Uma das formas de calcular a perda de carga em um lavador Venturi é citada por Suhara (1992) sendo:

$$P = 0,85 \times 10^{-3} V_g^2 \frac{QL}{QG} \quad (2.8)$$

Onde:

P = perda de carga (cmH₂O)

V_g = velocidade do gás na garganta (cm/s)

$\frac{QL}{QG}$ = relação líquido/gás (adimensional)

Calculou-se a eficiência de lavadores Venturi com perda de carga de 700, 800, 900, 1.000, 1.100 e 1.200 mmca (9,8 N/m²), com variação da pressão de entrada do líquido de 5, 7 e 10 kgf/cm² e relação líquido (m³/h) / gás (Nm³/h) = 1,0, obtendo-se a concentração de material particulado no gás após sua limpeza no sistema preliminar a seco e/ou úmido de baixa energia (considerado uma eficiência de 80%) e no lavador Venturi. A quantidade de particulado no gás antes do sistema de limpeza nesta simulação é de 10 g/Nm³ (dado de literatura)

A partir dos dados obtidos foram geradas as Figuras 2.48, e 2.49

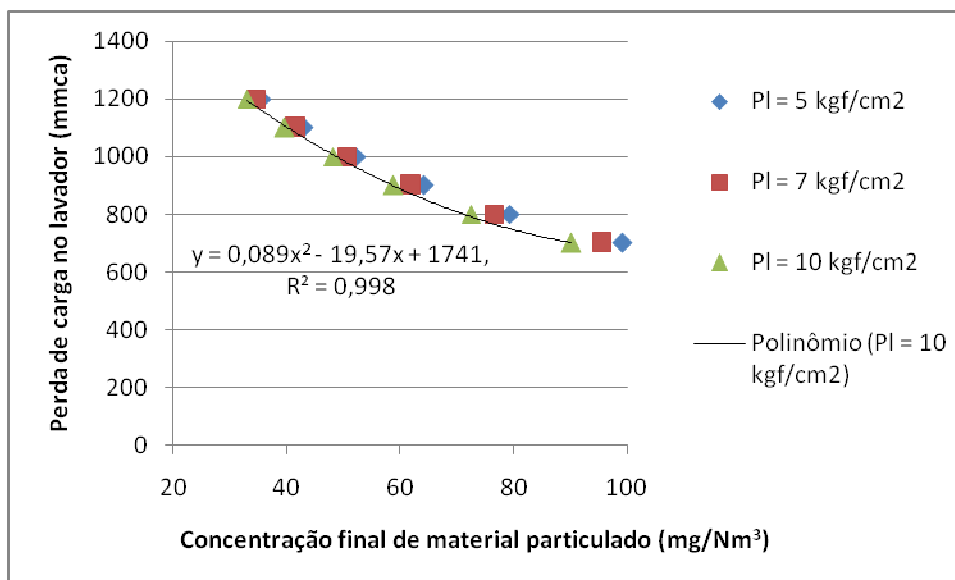


Figura 2.48 – Concentração final de material particulado após a limpeza do gás em sistema a seco, com eficiência de 80%, e lavador Venturi, variando com a perda de carga no Venturi.

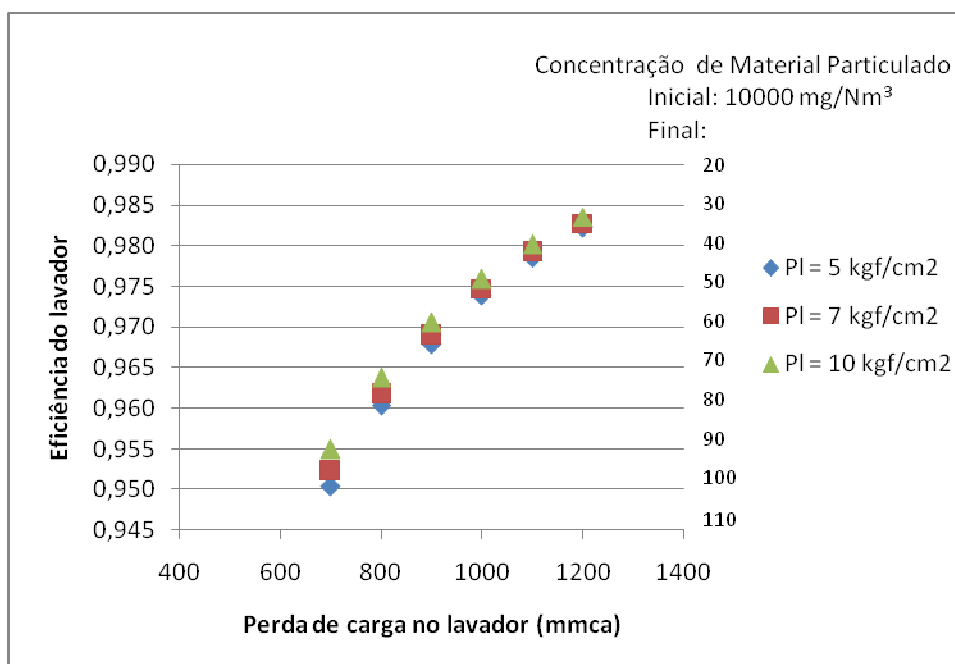


Figura 2.49 – Relação entre a perda de carga e a eficiência do lavador, com diferentes pressões de entrada do líquido.

Para as perdas de carga entre 700 a 1.200 mmca ($9,8 \text{ N/m}^2$), a velocidade na garganta variou de 98,7 a 129,3 m/s. Conforme dados de literatura, esta variação de velocidade pode ser de 60 a 180 m/s.

Uma concentração de material particulado igual a 50 mg/Nm^3 é alcançada com um lavador venturi de 1.000 mmca ($9,8 \text{ N/m}^2$) trabalhando com pressão de entrada de 7 kgf/cm^2 .

Na Figura 2.50, destaca-se a eficiência para lavadores de 1.000 mmca ($9,8 \text{ N/m}^2$) com pressão de entrada do líquido de 10, 7 e 5 kgf/cm^2 , sendo maior a eficiência para pressão maior de entrada do líquido. O efeito da diferença de pressão de entrada do líquido tende a diminuir com o aumento da perda de carga no lavador.

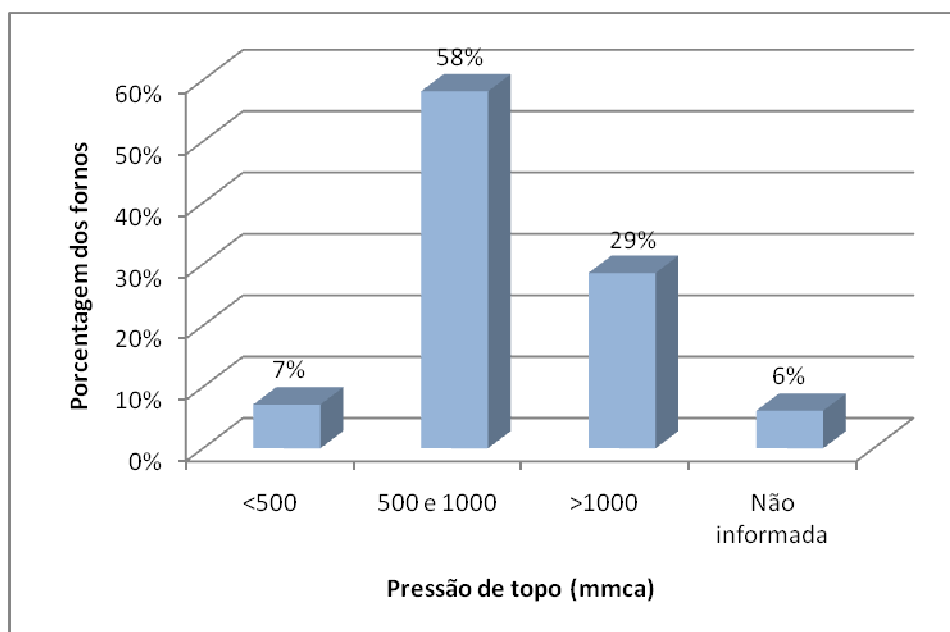


Figura 2.50 – Porcentagem de fornos por pressão de topo.

Nota-se que considerando uma concentração inicial de particulado do gás do alto-forno de 10 g/Nm^3 , alcança-se uma concentração inferior a 50 mg/Nm^3 já na entrada da caldeira com um lavador com eficiência maior que 97,5% e um sistema de limpeza preliminar com 80% de eficiência.

De acordo com a simulação efetuada, concentrações próximas ou inferiores a 50 mg/Nm^3 somente foram obtidas em lavadores com perda de carga igual ou superior a 1.000mmca ($9,8 \text{ N/m}^2$). Entretanto apenas 29% dos fornos do setor, Figura 2.50, possuem pressão de topo superior a 1000 mmca ($9,8 \text{ N/m}^2$). O que poderia ser alterado, em alguns casos, com melhorias nas casas de máquinas e concomitantemente em outros casos, principalmente por problemas de *layout* da

usina ou distancia da termoelétrica, seria preciso a instalação de ventiladores na linha da termoelétrica, sempre funcionando com pressão positiva.

Foi realizada uma avaliação teórica da eficiência de lavadores variando a perda de carga, pressão de entrada do líquido e relação líquido/gás, gerando as Figuras 2.51 e 2.52.

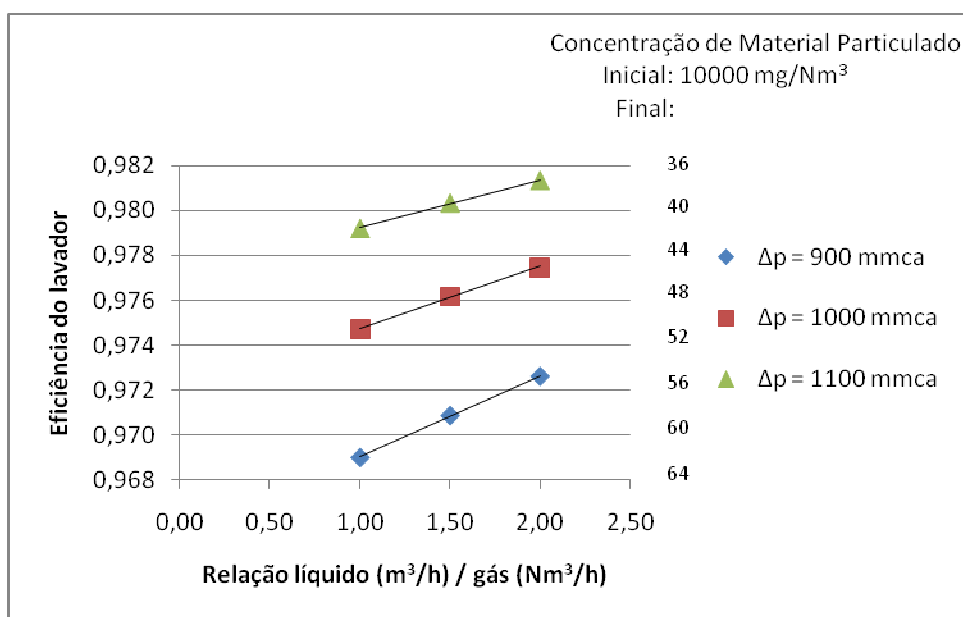


Figura 2.51 – Eficiência dos lavadores em função da perda de carga e relação líquido/gás, considerando pressão de entrada do líquido de 7 kgf/cm².

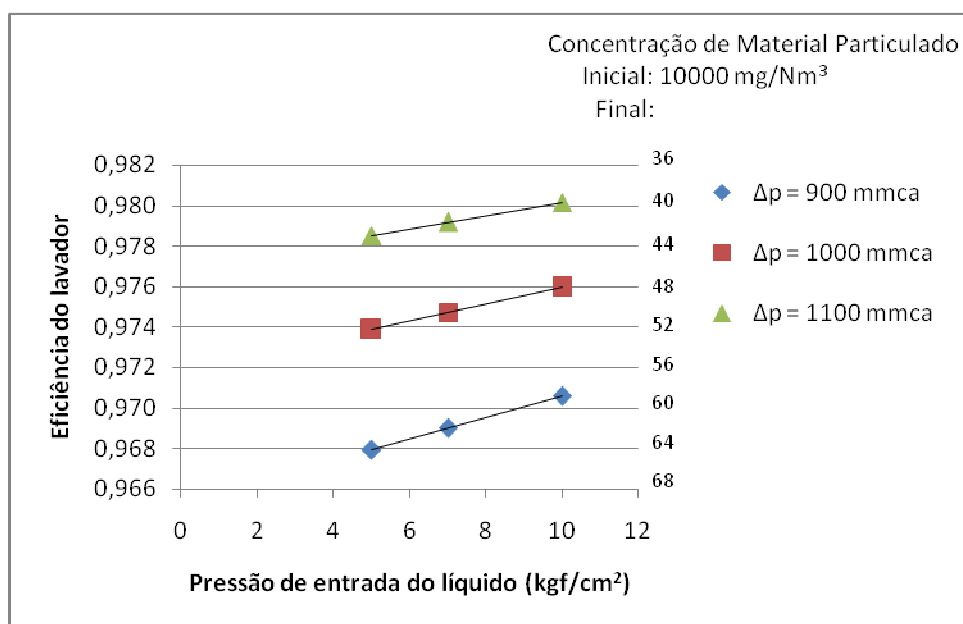


Figura 2.52 – Eficiência dos lavadores em função da perda de carga e pressão de entrada do líquido, considerando relação líquido/gás = 1.

O aumento da pressão de entrada do líquido leva a um aumento da eficiência, entretanto a utilização de pressões elevadas pode danificar os bicos *spray* do lavador venturi, em função do material em suspensão presente na água de lavagem e levar a um consumo de energia desnecessário. Os fabricantes de bicos consultados garantem a sua operação com uma pressão de até 25 kgf/cm².

Nestas simulações, a concentração de 50 mg/Nm³ está sendo atingida na entrada da termoelétrica, para uma concentração inicial de 10 g/Nm³. O valor na chaminé da termoelétrica levando-se em conta o ar de combustão seria de aproximadamente 20 mg/Nm³.

No entanto, na consulta ao SIAM, contatou-se que em pelo menos duas medições realizadas do gás de alto-forno em empresas diferentes, antes do sistema de tratamento a concentração do particulado era 17 mg/Nm³.

Desta forma, foi realizada outra simulação para aproximar mais o estudo teórico da realidade, utilizando a concentração inicial de 17 mg/Nm³ e levando-se em consideração a relação de ar de combustão como 1,5 vezes o gás de alto-forno e foi construída a Tabela 2.4.

Observa-se que para atingir a mesma concentração final de particulado, no caso de 17.000 mg/Nm³ incluindo ar combustão, um lavador de 800 mmca (9,8 N/m²) e pressão de entrada do líquido de 7 kgf/cm², seria suficiente.

As Figuras 2.53 e 2.54 permitem uma melhor visualização.

Tabela 2.4 - Perdas de carga de lavadores com suas respectivas eficiência e concentração final de material particulado

Perda de carga Δp (mmca)	Velocidade (m/s)	Relação QL/Qgás (L/Nm ³)	Pressão de entrada do líquido (kgf/cm ²)	Eficiência do lavador	Eficiência do sistema preliminar	Eficiência total	Concentração MP inicial (mg/Nm ³)	Concentração de MP final incluindo ar combustão (mg/Nm ³)
600	91,5	1,0	5	0,93732	0,8	0,98746	17.000	85,2
700	98,7	1,0	5	0,95037	0,8	0,99007	17.000	67,6
800	105,5	1,0	5	0,96031	0,8	0,99206	17.000	54
900	111,9	1,0	5	0,96791	0,8	0,99358	17.000	43,6
1.000	118	1,0	5	0,97385	0,8	0,99477	17.000	35,6
1.100	123,8	1,0	5	0,97851	0,8	0,99570	17.000	29,2
1.200	129,3	1,0	5	0,98219	0,8	0,99644	17.000	24,4
600	91,5	1,0	7	0,93984	0,8	0,98797	17.000	82
700	98,7	1,0	7	0,95225	0,8	0,99045	17.000	64,8
800	105,5	1,0	7	0,96174	0,8	0,99235	17.000	52
900	111,9	1,0	7	0,96901	0,8	0,99380	17.000	42
1.000	118	1,0	7	0,97471	0,8	0,99494	17.000	34,4
1.100	123,8	1,0	7	0,97920	0,8	0,99584	17.000	28,4
1.200	129,3	1,0	7	0,98274	0,8	0,99655	17.000	23,6
600	91,5	1,0	10	0,94340	0,8	0,98868	17.000	76,8
700	98,7	1,0	10	0,95492	0,8	0,99098	17.000	61,2
800	105,5	1,0	10	0,96376	0,8	0,99275	17.000	49,2
900	111,9	1,0	10	0,97058	0,8	0,99412	17.000	40
1.000	118	1,0	10	0,97594	0,8	0,99519	17.000	32,8
1.100	123,8	1,0	10	0,98017	0,8	0,99603	17.000	26,8
1.200	129,3	1,0	10	0,98352	0,8	0,99670	17.000	22,4

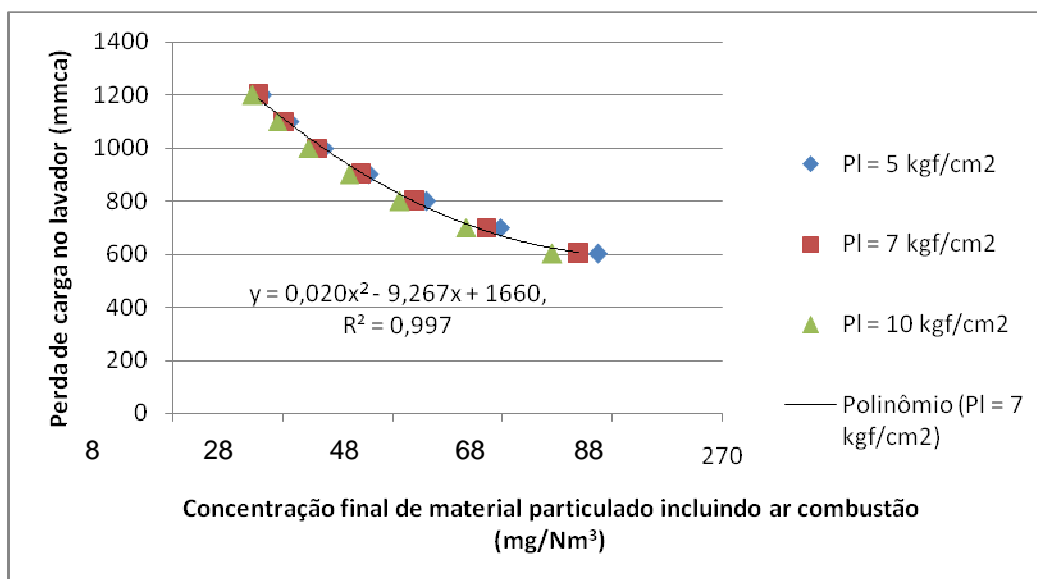


Figura 2.53 – Concentração final de material particulado, partindo de 17.000 mg/Nm³, após a limpeza do gás em sistema preliminar com eficiência de 80% e lavador Venturi, conforme a perda de carga no lavador, considerando ar combustão

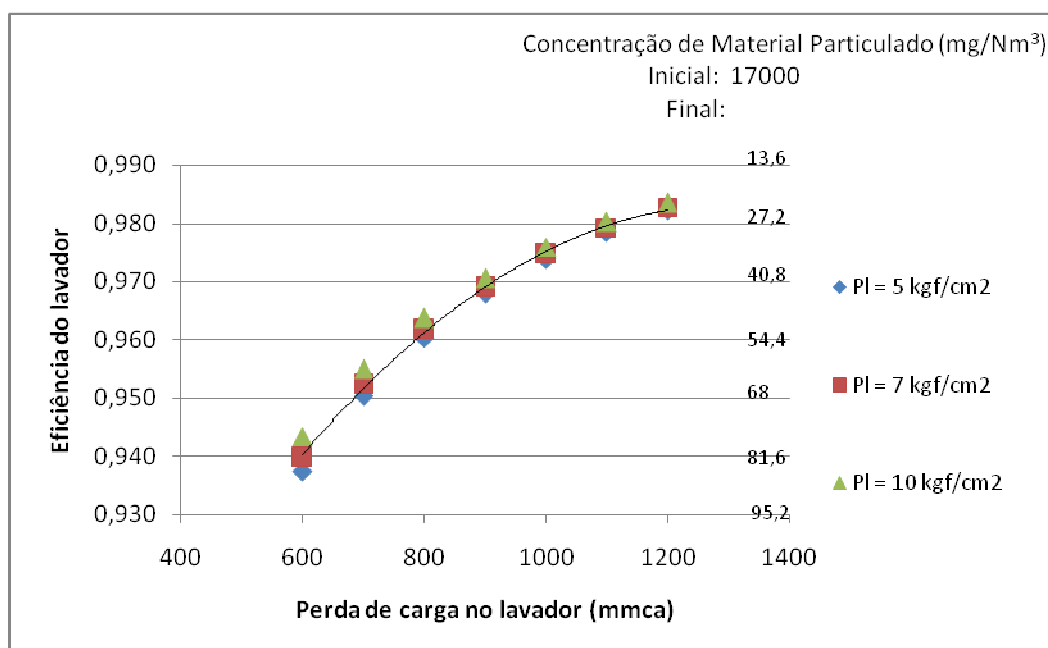


Figura 2.54 – Relação perda de carga no lavador para diferentes pressões de entrada do líquido e eficiência de limpeza, considerando ar combustão na inicial de 17.000 mg/Nm³.

Foi ainda realizada uma avaliação teórica da eficiência de lavadores Venturi variando a perda de carga, pressão de entrada do líquido e relação líquido/gás, conforme a Tabela 2.5, gerando as Figuras 2.55 e 2.56.

Tabela 2. 5 - Avaliação teórica de lavadores venturi considerando ar de combustão

Perda de carga Δp (mmca)	Velocidade (m/s)	Pressão de entrada do líquido (kgf/cm ²)	Relação QL/Qgás (L/Nm ³)	Eficiência do Lavador	Eficiência do sistema preliminar	Eficiência total	Concentração de MP inicial (mg/Nm ³)	Concentração de MP final incluindo ar combustão (mg/Nm ³)
600	91,5	7	1,00	0,93984	0,8	0,98797	17000	82
600	74,7	7	1,50	0,94394	0,8	0,98879	17000	76,4
600	64,6	7	2,00	0,94750	0,8	0,98950	17000	71,2
700	98,7	7	1,00	0,95225	0,8	0,99045	17000	64,8
700	80,6	7	1,50	0,95536	0,8	0,99107	17000	60,8
700	69,8	7	2,00	0,95820	0,8	0,99164	17000	56,8
800	105,6	7	1,00	0,96186	0,8	0,99237	17000	52
800	86,2	7	1,50	0,96417	0,8	0,99283	17000	48,8
800	74,6	7	2,00	0,96627	0,8	0,99325	17000	46
900	112	7	1,00	0,96912	0,8	0,99382	17000	42
900	91,4	7	1,50	0,97088	0,8	0,99418	17000	39,6
900	79,2	7	2,00	0,97262	0,8	0,99452	17000	37,2

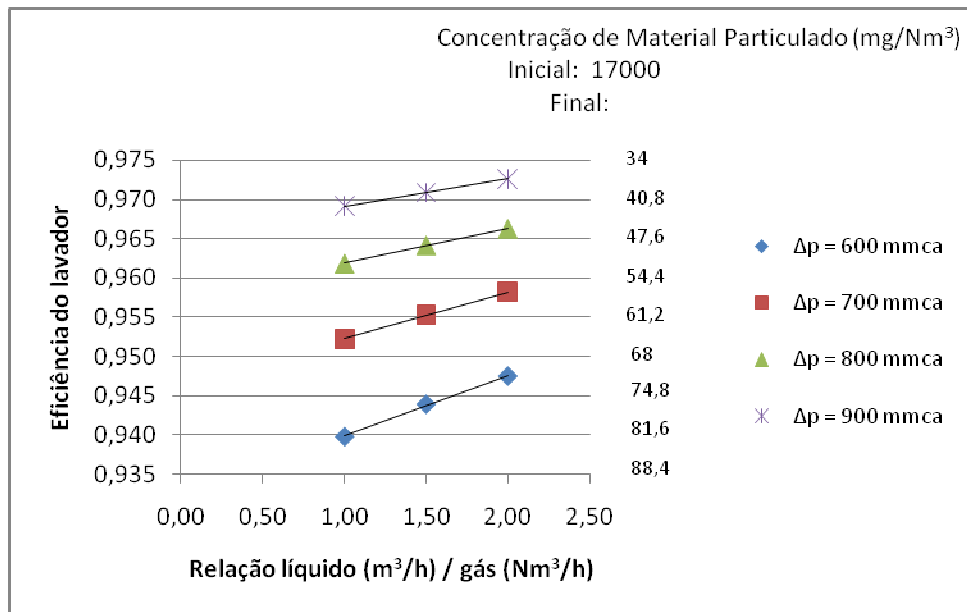


Figura 2.55 – Eficiência dos lavadores Venturi em função da perda de carga e da relação líquido/gás, considerando pressão de entrada do líquido de 7 kgf/cm² e ar combustão.

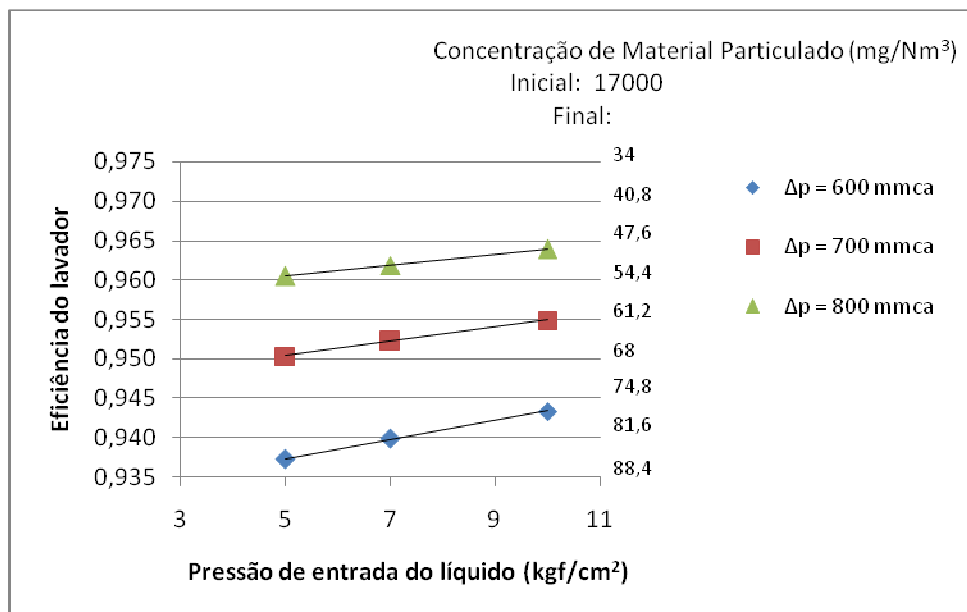


Figura 2.56 – Eficiência dos lavadores Venturi em função da perda de carga e da pressão de entrada do líquido, considerando a relação líquido/gás = 1 e ar combustão.

Portanto um lavador Venturi com perda de carga de 800 mmca (9,8 N/m²) atende aos objetivos do trabalho, ou seja, uma emissão de 50 mg/Nm³, medida na chaminé da termoeletrica.

2.4.3 Configuração de sistema de limpeza proposto

O diagrama da Figura 2.57, foi elaborado baseado nas discussões dos capítulos 2.4.1 e 2.4.2., sendo este a proposta de sistema de limpeza de gás de alto-forno deste estudo.

Apesar da simulação matemática indicar que um lavador de 800 mmca (9,8 N/m²) seria suficiente para atender o objetivo do trabalho, optou-se por um sistema de lavador Venturi com perda de carga de 1.000 mmca (9,8 N/m²) por segurança (a concentração de particulado no gás antes do sistema de limpeza pode passar de 17 g/Nm³ devido às peculiaridades do processo produtivo)

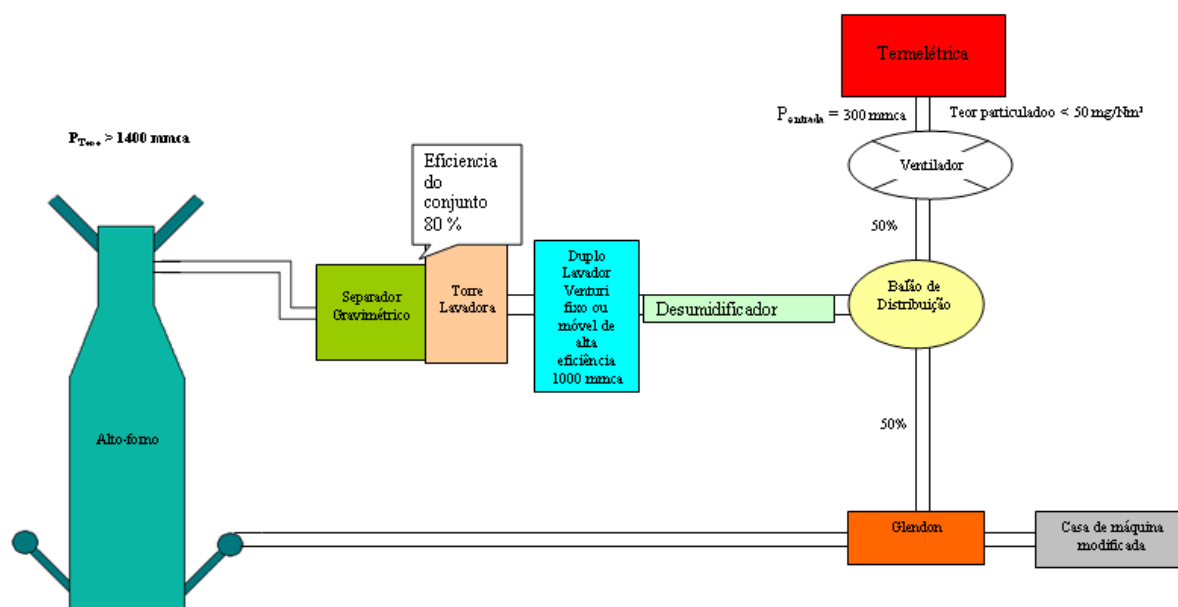


Figura 2.57 – Proposta de configuração do sistema de limpeza de gás do alto-forno

A razão da escolha de um duplo Venturi é baseado no fato de que dois equipamentos em série com a mesma energia 800mmca (9,8 N/m²), ou 400 mmca (9,8 N/m²), cada Venturi, alcança uma melhor eficiência devido à equação abaixo:

$$E_{\text{total}} = 1 - [(1-E1) \cdot (1-E2) \cdot (1-E3) \cdot (1-En)] \quad (2.9)$$

Onde:

E_{total} = Eficiência Total

E_n = Eficiência do equipamento n

Assim aplicando a equação de eficiência total, a emissão de um duplo Venturi com a mesma energia de um único Venturi chegaria a 14 mg/m^3 . No entanto, foi adotado o princípio da segurança, uma vez que o segundo Venturi não teria a mesma eficiência do primeiro porque as partículas diminuem de tamanho à medida que são limpas pelos equipamentos (diminuindo a eficiência do segundo Venturi em série) e neste trabalho foi considerado que a emissão final continuaria a ser de 50 mg/Nm^3 .

Trata-se apenas de uma sugestão, sendo que a escolha de um único Venturi de 1.000 mmca ($9,8 \text{ N/m}^2$) de perda de carga conforme o modelo empregado chegaria ao resultado proposto de forma mais barata.

A escolha de maior velocidade na garganta e maior ou menor consumo de água, é opção de cada empresa dependendo de vários fatores como disponibilidade de água e disposição de desgastar mais ou menos o material do Venturi.

A adoção de lavador Venturi móvel, podendo-se variar a largura da garganta, é mais aconselhável porque permite um maior controle da pressão de topo do alto-forno.

É importante lembrar novamente que os equipamentos preliminares como balão com ou sem lavador ou ciclone deve ter uma eficiência mínima de 80 %, ou seja, o gás dirigido ao Venturi deverá conter no máximo 3.400 mg/Nm^3 . Na prática esta é uma condição muito conservadora, porque medições de material particulado na chaminé do *glendon* em empresas que apresentam somente como equipamento de limpeza de gás esta configuração nunca atingiram mais que 1.000 mg/Nm^3 ou 2.500 mg/Nm^3 considerando o ar de combustão.

Desta forma, fica evidente a necessidade da maioria das empresas pesquisadas modificarem a casa de máquinas para atingir a pressão de topo sugerida, de no mínimo 1.400 mmca ($9,8 \text{ N/m}^2$) e não só modificar a casa de máquinas, solucionar problemas relativos a projetos do forno e vazamentos na área de carregamento de matérias primas, visando alcançar este objetivo.

Sugere-se a utilização de casas de máquinas com os chamados turbo - compressores, já implantados em muitas empresas maiores e em uma empresa menor (produção menor que 500 t/d), que possibilitam um melhor controle de

parâmetros de processo como pressão e vazão, possuem maior eficiência energética, porém, são mais caros.

É preferível não colocar ventiladores na linha da termoelétrica para evitar riscos de explosão, e assim os fornos deveriam funcionar com perdas de pressões de topo maiores, de 1.600 a 1.800 mmca (9,8 N/m²). No entanto, sabemos que em muitos casos, por motivo de *layout* da planta industrial e distancia da termoelétrica, a utilização do ventilador torna-se imperiosa. Neste caso é importante destacar que este ventilador na verdade deveria ser uma chamada torre elevatória, sendo que seria rigorosamente projetado para funcionar apenas com pressão positiva, evitando a entrada de ar na tubulação, este ventilador deveria ter um inversor de frequência e possuir controle de pressão e vazão na sua entrada.

2.5 Sistemas de Limpeza da Água de Lavagem

É muito importante que a água do Venturi esteja em condições de ser utilizada na lavagem do gás, ou seja, deve conter no máximo 100 mg/L de sólidos. A água deve ser recirculada e para tanto se utiliza como equipamento mais eficiente o espessador circular, com retirada continua da lama e um filtro prensa ou a vácuo. As Tabelas 2.6 e 2.7 mostram a situação do setor com relação à utilização de espessadores e produtos químicos que auxiliam na sedimentação de partículas.

Conforme verificado, muito poucas informações estão disponíveis sobre sistema de tratamento da água do lavador. No entanto podemos inferir que um espessador com pelo menos quatro horas de tempo de detenção e velocidade de sedimentação de no máximo 1 m/h é capaz de atingir uma concentração de sólidos suspensos de 100 mg/L, se utilizar de forma adequada os produtos químicos necessários para a decantação das partículas que variam de empresas para empresa.

É importante ressaltar novamente que este é um efluente muito tóxico, com teores de fenóis que podem atingir 600 mg/L, e sendo assim é prudente recomendar que este efluente deva ser inteiramente recirculado, e para assegurar, deveria existir um tanque adicional para estoque do efluente quando acontecer paradas para manutenção e vazamentos.

Tabela 2.6 – Dados do espessador circular

Área útil (m ²)	Altura útil (m)	Volume útil (m ³)	Vazão (m ³ /h)	Tempo de detenção (h)	Velocidade de sedimentação (m/h)	Concentração de sólidos (mg/L)
201,0	7,5	1.518,0	180,0	2,2	0,9	150
113,0	10,6	1.200,0	580,0	2,1	5,1	200
113,0	10,6	1.200,0	600,0	2,0	5,3	200
133,0	3,8	500,0	504,0	1,0	3,8	Não ⁽²⁾
50,2	3,0	150,7	20,0	7,5	0,4	Não
20,4	1,7	35,2	32,0	1,1	1,6	Não
43,7	4,2	184,4	40,0	4,6	0,9	150
211,1	6,2	1.300,0	600,0	2,2	2,8	200
49,0	4,0	196,0	40,0	4,9	0,8	Não
201,0	4,6	925,0	200,0	4,6	1,0	25
60,0	3,0	180,0	73,0	2,5	1,2	200
28,3	3,2	89,3	50,0	1,8	1,8	Não
ni ⁽¹⁾	ni	10,0	26,7	0,4	ni	Não
15,8	5,2	81,3	90,0	0,9	5,7	Não
31,5	3,8	118,3	150,0	0,8	4,8	Não
47,0	4,5	211,0	70,0	3,0	1,5	60
ni	ni	300,0	80,0	3,8	ni	100
1500,0	4,0	6.000,0	800,0	7,5	0,5	100

Observação: (1) ni = não informado; (2) Não = Não realiza

Tabela 2.7 – Produtos químicos utilizados

Polímero catiônico/aniônico	Produtos Químicos (g/m ³)			Sistema de verificação SS (mg/l)
	Anti-espumante	Coagulante	Dispersante	
0,7	11,6	10,4	2,3	150
1,0	5,2	1,0	2,1	150
2,1	10,4	2,1	4,2	200
0,4	6,3	7,1	1,7	50
Não	20,5	24,7	Não	200
Não	5,2	Não	Não	Não
Não	9,3	Não	Não	Não
Não	2,9	3,8	2,0	60
20,8	13,9	Não	Não	100
0,3	3,5	Não	Não	100

Observação: Não = Não utiliza.

2.6 Estudos Econômicos (Custo Benefício)

Tendo como base as informações apresentadas pelas empresas do setor siderúrgico foi possível calcular o custo/benefício da instalação de termoelétricas em todas as empresas consumidoras de carvão vegetal utilizando a metodologia descrita abaixo

Avaliação Econômica de Projetos de Termoelétricas

Numa distribuição típica dos custos de um empreendimento energético, os custos distribuídos são modelados por meio de Fluxos de Caixa uniformes. Tal modelo se aplica, sem grande perda de generalidade, uma vez que se pode sempre calcular, com pequeno esforço adicional, o fluxo uniforme equivalente a outro fluxo mais complexo quaisquer (Barja, 2006).

No Fluxo de Caixa, projeta-se o investimento inicial para uma data futura ao fim de um tempo de construção e de instalação, Figura 2.58. Assim, estima-se o valor do investimento inicial como sendo o valor futuro relativo ao consumo do equipamento, somado ao valor futuro equivalente a série uniforme dos custos de instalação. Dessa forma, propõe-se que a análise comparativa seja feita em um tempo infinito, com reposições sucessivas ao final da vida útil para todas as alternativas consideradas (Barja, 2006).



Figura 2.58 - Fluxo de caixa de um empreendimento energético.
Fonte: Barja, 2006.

Assim, o Fluxo de Caixa pode ser decomposto em dois outros, sendo o primeiro uma série uniforme de valor $CC + CM - VS$, e o segundo um investimento inicial aplicado no tempo zero, somado a uma série uniforme de valores $I - R$. A série uniforme equivalente à soma destas duas composições de Fluxo de Caixa corresponde ao Custo Distribuído Total (Barja, 2006).

$$CD_{\text{total}} = CC + CM - VS + I \cdot i + \frac{(I - R) \cdot i}{(1+i)^v - 1} \quad (2.10)$$

De posse do CD_{total} , calcula-se a energia produzida (E_n) em kWh, que no período de um ano será igual à potência instalada (PI) em kW, multiplicado ao número de horas de um ano, corrigido pelo fator de capacidade (FC). O fator de capacidade pode ser definido como sendo a razão entre a energia efetivamente gerada ao longo de um ano e aquela que seria produzida se a instalação operasse a plena carga no mesmo período (Barja, 2006).

$$E_n = PI \cdot FC \cdot 8760 \quad (2.11)$$

Neste modelo, conforme Carvalho *apud* Barja (2006), a razão entre as expressões, isto é, o custo distribuído anual total e a energia anual produzida, é o principal indicador oferecido, ao passo que permite a comparação de alternativas de geração ou de economia de energia com sucessivas reposições ao fim da vida útil de cada uma. Este indicador avalia o custo da energia produzida ao ano e tem a vantagem adicional de permitir uma comparação direta com os preços da energia praticados pelas concessionárias de energia elétrica.

A relação custo/benefício (C/B) de um empreendimento energético é expressa de forma mais ampla com poucas restrições.

$$C/B = \left(CC + CM - VS + I \cdot i + \frac{(I - R) \cdot i}{(1+i)^v - 1} \right) \cdot \frac{1}{PI \cdot FC \cdot 8760} \quad (2.11)$$

Onde:

C/B - relação custo / benefício em \$/kWh

CC - custo anual do insumo energético em \$/ano

CM - custo de manutenção específico em \$/ano

VS - valor do subproduto específico em \$/ano

R - valor residual em \$

I - investimento inicial em \$

FC - fator de capacidade

V - vida em anos

PI - potência instalada em kW

i - taxa de juros ao ano

Análise Econômica de Custo Benefício

Tendo em vista que grande parte dessas empresas não possui termoelétrica, o cálculo considerou os dados de produção e vazão de gás de alto-forno gerado, propondo analisar a viabilidade econômica dessa instalação.

Para se obter resultados mais correlatos, neste estudo optou-se por utilizar uma vazão de gás de 2.200 Nm³/t de gusa produzida e uma eficiência de produção de 90 % utilizando a equação 2.1 para o cálculo da potência.

Considerando que o processo de geração de energia se faz através da cogeração, sendo o insumo utilizado o gás de alto-forno, resíduo da produção do gusa que seria enviado para a atmosfera, foram considerados como nulos os custos do insumo energético e valor do subproduto.

O cálculo do investimento inicial pode ser realizado considerando-se que:

$$I = \frac{(Q/2) \times PCI \times \eta}{0,60} \times 3500 = PI \times 3500 \quad (2.12)$$

Assim, o investimento inicial equivale à potência instalada multiplicado a R\$3.500,00, sendo esse o valor estimado pelo custo do kWh.

Foi considerado que todos os dados de produção e vazão apresentados equivalem ao somatório da produção e vazão de todos os fornos da empresa que utilizam como matéria-prima o carvão vegetal. Os fornos que utilizam coque como matéria-prima não foram considerados nesses cálculos.

Para os cálculos de custo/benefício, foram considerados dois tipos de investimentos adicionais: de R\$2.500.000,00, chamado investimento adicional IA1 e de R\$1.500.000,00, chamado investimento adicional IA2.

Esses investimentos foram inseridos ao investimento inicial para cada forno, estando relacionados com os custos adicionais para a instalação de equipamentos mais modernos e eficientes nas termoeletricas.

O investimento de IA1 seria para termoeletricas que optassem por modificar a casa de máquinas com turbo compressor e lavador de 1.000 mmca (9,8 N/m²), e o investimento IA2, seria para instalar o mesmo lavador Venturi e modificar a casa de máquinas de forma convencional (acrescentando exaustores de ar na casa de máquinas).

A partir dos cálculos de custo/benefício sem investimento adicional e com investimentos adicionais IA1 e IA2 foram calculados os tempos de retorno desses investimentos, utilizando a fórmula:

$$TR = \frac{I+IA}{(P/24) \times c \times 8760 \times (PE - C/B)} \quad (2.13)$$

Onde:

TR – tempo de retorno (ano)

I – investimento inicial (\$)

IA – investimento adicional (\$)

P – produção (t/dia)

c – consumo de energia (kW.t⁻¹)

PE – preço da energia (\$)

C/B – custo/benefício (\$)

Para a análise dos dados obtidos foram gerados gráficos, relacionando Produção *versus* Tempo de Retorno e Empresa *versus* Custo/Benefício demonstrados nas figuras 2.59 e 2.60.

Para o valor da taxa de juros foi considerada uma variação anual de inflação de 4,5%, a vida útil da instalação de 20 anos e o consumo de energia é de 84 kW por tonelada produzida.

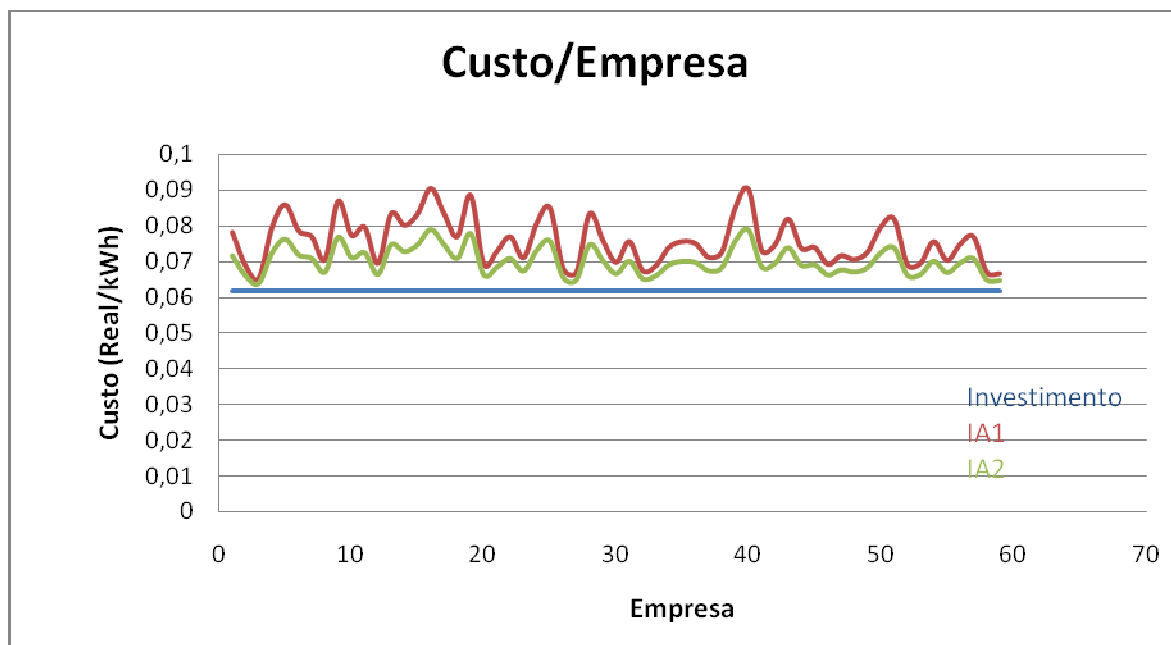


Figura 2.59 – Custo da energia com termoelétrica e investimentos adicionais

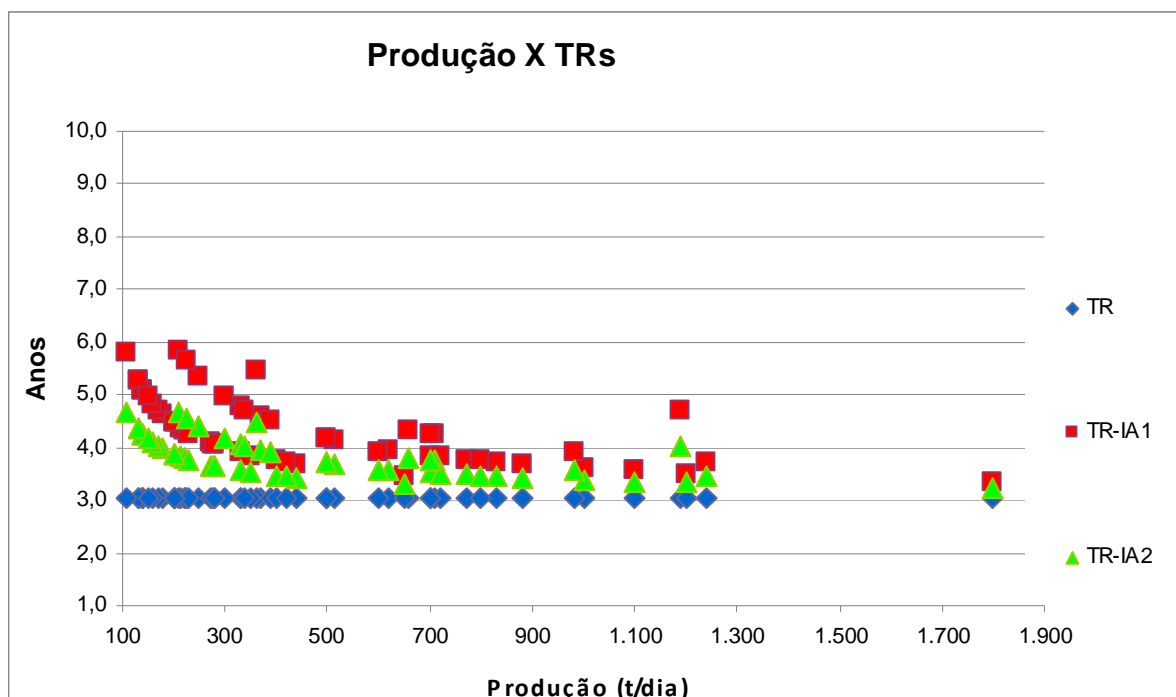


Figura 2.60 – Correlação entre produção e tempo de retorno.

Conforme a Figura 2.60, verifica-se que quanto maior a produção, menor o tempo de retorno do investimento. Os tempos de retorno denominados TRIA1 e TRIA2, que

correspondem aos tempos de retorno contando os investimentos adicionais IA1 de R\$ 2.500.000,00 e IA2 de R\$1.500.000,00 não modificam de forma substancial o retorno do investimento inicial para as empresas com maior produção, o mesmo não valendo para as empresas menores, que em alguns casos o tempo é duplicado.

O custo da energia elétrica em kWh com termoelétrica varia de R\$0,06 a R\$0,09 dependendo do investimento inicial, sendo que a energia da concessionária custa para as empresas R\$0,40/kWh.

As diferenças de custo da energia entre os investimentos adicionais 1 e 2 variou devido a presença do número de fornos diferentes em cada empresa, o que onera o custo de instalação de investimentos adicionais para uma mesma produção.

Nestes cálculos não estão computados os ganhos adicionais de queda de consumo de carvão (com o aumento da pressão de topo do forno) e diminuição de parada das termoelétricas por funcionar com gas mais limpo.

2.7 Mecanismos de Desenvolvimento Limpo – Redução de Emissão de CO₂

Para calcular as reduções nas emissões de dióxido de carbono (CO₂) é utilizada a fórmula descrita abaixo:

$$ER = (E_p * G_p) - (E_c * G_c) - (E_t * C_t) - L \quad (2.14)$$

Onde:

E_p - Energia requerida do sistema nacional durante o cenário de linha de base (energia produzida)

G_p - Intensidade de carbono da energia fornecida pelo sistema nacional durante o cenário de linha de base

E_c - Energia requerida do sistema nacional durante o cenário de projeto (energia consumida)

G_c - Intensidade de carbono da energia fornecida pelo sistema nacional durante o cenário de projeto

E_t - Energia produzida no cenário de projeto

C_t - Intensidade de carbono da energia no cenário de projeto

L - Emissões de carbono por vazamento

Uma vez que o cenário de referência (linha de base) tenha sido definido, é simples se determinar as reduções de gases de efeito estufa obtidas por meio do uso de combustível renovável na produção de energia elétrica. Economias líquidas na emissão (ER) são calculadas pela quantidade de energia da rede pública substituída, descontando-se todas as emissões relacionadas à operação da usina termoeletrica e qualquer vazamento.

A quantidade de energia da rede pública substituída é calculada como a diferença entre a energia requerida no cenário de referência menos a energia requerida do projeto em estudo, considerando-se que esta diferença foi causada pela energia adicional provida pelas atividades de projeto em estudo.

Considerando as informações sobre o cálculo de redução de emissões e custo da tonelada de CO₂ equivalente, as emissões evitadas foram estimadas para as empresas do setor siderúrgico de Minas Gerais.

Dessa forma, obtiveram os resultados apresentados nas Figuras 2.61 e 2.62.

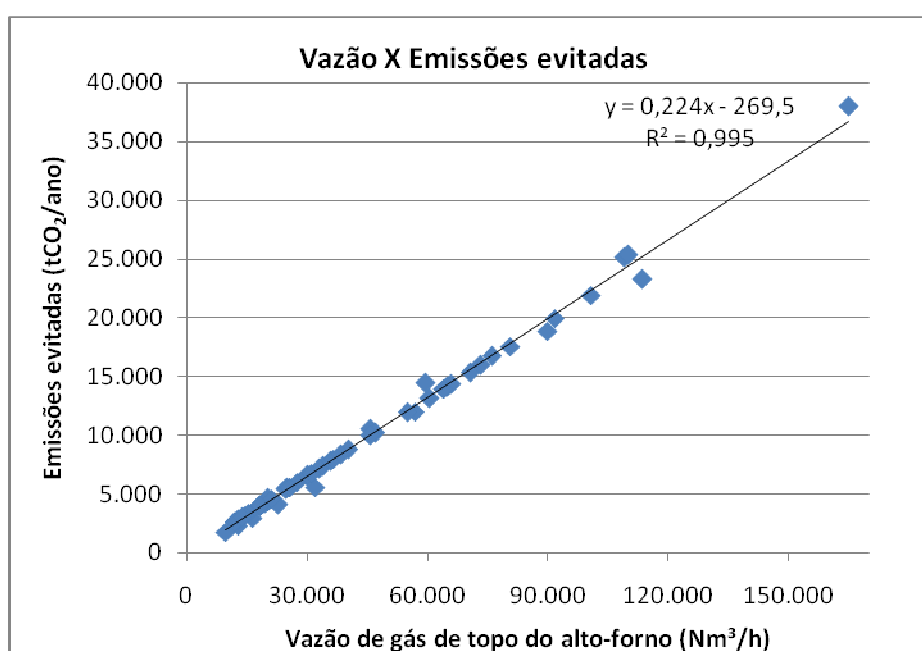


Figura 2.61 - Relação entre vazão de gás de alto-forno e emissões de CO₂ evitadas.

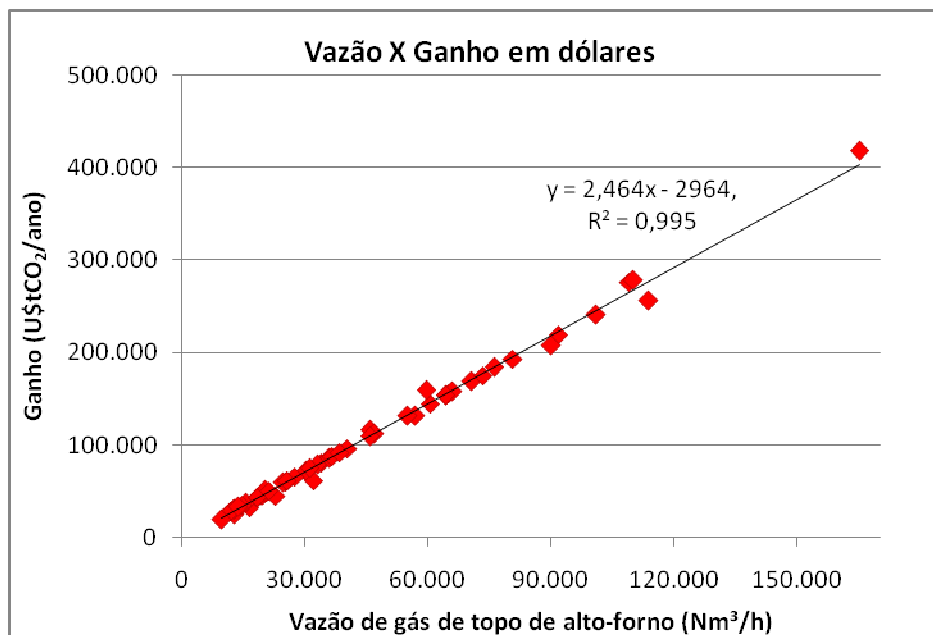


Figura 2.62 – Relação entre vazão de gás de alto-forno e ganho em dólares pela redução de emissões de CO₂.

A relação entre a vazão de gás de alto-forno e as emissões evitadas de CO₂ pela instalação da termoeletrica é crescente e, similar à relação entre a vazão de gás de alto-forno e o ganho em dólares.

Um estudo de projeto MDL, no ano de 2008, para se chegar à certificação não custa menos de R\$300000,00 tendo em vista a necessidade de se contratar auditorias internacionais. Sendo assim a empresa deverá ficar atenta em sua vazão de gás para o cálculo do ganho compensar o custo do estudo.

Pelo menos uma empresa já possui estudo aprovado para certificação de créditos de carbono conforme a metodologia descrita neste trabalho, sendo que os certificados valem por 7 anos podendo ser renovados por este período até 20 anos.

3. CONCLUSÃO

O Estado de Minas Gerais possui atualmente 74 empresas utilizando carvão vegetal, com 102 fornos, estando 98 em condições de funcionamento e 4 paralisados há anos. A capacidade de produção total destes fornos por dia é de 27.515 toneladas de gusa. O levantamento demonstrou que quanto maior a pressão de topo do alto-forno, maior é a temperatura de sopro e menor é o consumo de carvão vegetal. Foi demonstrado também o desconhecimento de boa parte das empresas (pelo menos dos seus representantes entrevistados) de parâmetros importantes de processo como vazão de topo, pressão de topo, temperatura na coroa dentre outros.

A capacidade atual de geração de energia elétrica no Estado de Minas Gerais utilizando turbina de recuperação de topo é de aproximadamente 29 MW, em três altos-fornos. No entanto este tipo de aproveitamento energético somente é utilizado em fornos de grande porte (maior que 4000 t/d) utilizando coque.

Os altos-fornos a carvão vegetal utilizam a termoelétrica para geração da energia elétrica aproveitando o gás excedente, sendo que possui uma capacidade de produção de aproximadamente 32 MW contando com onze termoelétricas. Encontra-se em construção mais duas termoelétricas que irão gerar mais 11 MW. A capacidade teórica de produção de energia elétrica no Estado de Minas Gerais em termoelétricas a gás de altos-fornos a carvão vegetal é de 224 MW. Na prática as empresas estão implantando suas termoelétricas com capacidade inferior que a calculada teoricamente uma vez que aparentemente estão sendo conservadoras no dimensionamento das mesmas visando garantir mais gás para os *glendons*.

O lavador tipo Venturi ainda é o equipamento de limpeza de gás de alto-forno mais eficiente, sendo que os dados fornecidos pelas empresas no campo por meio de questionários e pesquisando os arquivos e informações constantes nos processos dos empreendimentos constantes do Sistema Integrado de Informação Ambiental (SIAM), demonstraram que um lavador venturi com perda de carga de 800 mmca (9,8 N/m²) já atinge a emissão de material particulado medida em chaminé do *glendon* ou da termoelétrica de 50 mg/Nm³. No entanto o mesmo levantamento demonstrou que sistemas com esta perda de carga ainda permitiam emissões acima

do valor citado, sendo que lavadores venturi com perda de carga acima de 1.000 mmca ($9,8 \text{ N/m}^2$) seriam os mais indicados.

A emissão de 50 mg/Nm^3 foi adotada como referência por se tratar do limite previsto pela legislação ambiental brasileira uma vez que não há uma exigência dos fabricantes de caldeira para teor de particulado no gás na entrada da fornalha.

O modelo matemático aplicado para calcular a eficiência do lavador Venturi se ajustou muito bem aos dados fornecidos pela empresas e de literatura. O modelo demonstrou que lavadores Venturi com perda de carga de 800 mmca ($9,8 \text{ N/m}^2$) são capazes de atingir a concentração em chaminé de 50 mg/Nm^3 .

Com a aplicação do modelo se verificou também a possibilidade de que uma concentração de pó no gás na saída do alto-forno de 17 g/Nm^3 (valor medido por algumas empresas segundo levantamento nos arquivos do SIAM) é mais realista que a concentração de 10 g/Nm^3 encontrado na literatura.

O trabalho propõe o sistema de limpeza descrito na Figura 2.57 (proposta sistema de limpeza de gás), onde o lavador Venturi a ser implantado tenha uma perda de carga de 1.000 mmca ($9,8 \text{ N/m}^2$) e tenha garganta móvel.

Verificou-se também a necessidade da maioria das empresas pesquisadas modificarem a casa de máquinas para atingir a pressão de topo sugerida, de no mínimo 1.400 mmca ($9,8 \text{ N/m}^2$), e não só modificar a casa de máquinas, solucionar problemas relativos a projetos do forno e vazamentos na área de carregamento de matérias primas, visando alcançar este objetivo.

Sugere-se a utilização de casas de máquinas com os chamados turbo-compressores, já implantados em várias empresas de maior porte maiores e em uma empresa de menor porte, que possibilitam um melhor controle de parâmetros de processo como pressão e vazão, possuem maior eficiência energética, porém, são mais caros.

Para evitar risco de explosão, é preferível não posicionar os ventiladores na linha da termoelétrica, e assim os fornos deveriam funcionar com pressões de topo maiores,

de 1.600 a 1.800 mmca (9,8 N/m²). No entanto sabe-se que em muitos casos, por motivo de *layout* da planta industrial e distancia da termoelétrica, a utilização do ventilador torna-se imperiosa. Devem sempre funcionar com pressão positiva na linha.

Em relação aos efluentes líquidos, apesar dos poucos dados de espessadores utilizados pelas empresas, verificou-se que um espessador com pelo menos quatro horas de tempo de detenção e velocidade de sedimentação de no máximo 1 m/h é capaz de atingir uma concentração de sólidos suspensos de 100 mg/L, caso sejam utilizados de forma adequada os produtos químicos necessários para a decantação das partículas, cujos teores variam de empresa para empresa. Desta forma, deveria ser adotado um tanque adicional para estoque do efluente no caso de paradas para manutenção e vazamentos, tendo em vista a toxidade dos despejos que podem conter teores de fenóis na ordem de 600 mg/L.

O modelo de custo benefício adaptado para termoelétrica a gás de alto-forno indicou que o custo da energia elétrica passa de R\$0,40 para a faixa de R\$0,06 a R\$0,09 o kWh dependendo do investimento com a utilização da termoelétrica. Quanto maior a produção com o menor número de fornos, menor será o tempo de retorno do investimento contando os custos adicionais propostos por este trabalho. Outra forma de se adquirir retorno do investimento com a termoelétrica é a aquisição de créditos de carbono através da emissão de certificados seguindo a metodologia do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, sendo que a relação entre a vazão de gás de alto-forno e as emissões evitadas pela instalação da termoelétrica é crescente.
