

Enrico Lara Chaves

**GESTÃO AMBIENTAL DO GÁS DO ALTO FORNO E
AVALIAÇÃO DOS SISTEMAS DE CONTROLE
ATMOSFÉRICOS DE SIDERÚRGICA, VIABILIZANDO UM
SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.**

Dissertação submetida ao Programa de Pós Graduação da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestrado Profissionalizante Stricto Sensu em Engenharia Ambiental com Ênfase em Gestão Ambiental.
Orientador: Prof. Dr. Henrique de Melo Lisboa.

Florianópolis - SC

2013

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Chaves, Enrico Lara

Gestão ambiental do gás do alto forno e avaliação dos sistemas de controle atmosféricos de siderúrgica, viabilizando um sistema de geração de energia / Enrico Lara Chaves; orientador, Henrique de Melo Lisboa - Florianópolis, SC, 2013.
156 p.

Dissertação (mestrado profissional) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental.

Inclui referências

1. Engenharia Ambiental. 2. Gestão do gás de alto forno. 3. Sistema de controle atmosférico. 4. Cogeração. I. Lisboa, Henrique de Melo. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. III. Título.

Enrico Lara Chaves

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação para o Grau de Mestrado Profissionalizante em Engenharia Ambiental com Ênfase em Gestão Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC.

Prof. Mauricio Luis Sens, Dr.
Coordenador do Curso de Mestrado Profissionalizante em Engenharia
Ambiental

Prof. Henrique de Melo Lisboa, Dr. (Orientador)

BANCA EXAMINADORA:

Profa. Cátia Regina Silva de Carvalho Pinto, Dra. – PPGEA/UFSC

Prof. Paulo Belli Filho, Dr. – PPGEA/UFSC

Prof. Vicente de Paulo Nicolau, Dr. – EMC/UFSC

Dedico esse trabalho a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, trabalham com controle de poluição atmosférica nas siderúrgicas e contribuem de alguma maneira para a preservação da qualidade do ar.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, primeiramente, aos meus pais Euler Costa Chaves e Eliane Lara Chaves, por me transmitir segurança e incentivo nos momentos de maior necessidade, além do apoio e sabedoria dedicados desde o meu nascimento.

A minha esposa Flavia Soares Correa, que esteve sempre ao meu lado.

Ao Professor Dr. Henrique de Melo Lisboa, pela paciência, acompanhamento e orientação.

Aos representantes da banca examinadora Prof^a. Cátia Regina Silva de Carvalho Pinto, Prof. Paulo Belli Filho, Prof. Vicente de Paulo Nicolau, pelas dicas de aperfeiçoamento.

Aos meus amigos, pelo apoio nas horas difíceis e pelos grandes momentos vividos juntos. Aos professores, pelos conhecimentos transmitidos ao longo da execução deste trabalho. A todos aqueles que durante esta caminhada deixaram lembranças, incentivo e alegrias.

“Ambiente limpo não é o que mais se limpa e
sim o que menos se suja.”

(Francisco de Paula Cândido Xavier - Chico
Xavier,)

RESUMO

A presente dissertação aborda o aproveitamento dos gases emitidos no processo de fabricação do ferro gusa em alto forno de siderúrgicas localizadas em Minas Gerais que utilizam carvão vegetal como matéria prima e a viabilidade de geração de energia a partir desses gases. Os objetivos dessa dissertação são: descrever o processo de produção das siderúrgicas a carvão vegetal; levantar a natureza dos gases gerados no topo do alto forno; identificar as principais técnicas de reutilização dos GAF (gases de alto forno), bem como seus respectivos métodos de tratamento e mostrar a viabilidade de instalação de um sistema de geração de energia elétrica através do reaproveitamento dos GAF, sendo o objetivo principal a gestão do GAF. Para atingir tais metas foram utilizadas pesquisas bibliográficas, informações laboratoriais e pesquisa de campo (estudo de caso). A intenção foi apontar as melhorias a serem feitas nos sistemas de aproveitamento e tratamento dos GAF de uma empresa siderúrgica em Minas Gerais e a vantagem de reutilizar o GAF na produção de energia. Com isso pretende-se demonstrar a viabilidade do aproveitamento do GAF nas etapas do processo de produção do ferro gusa e na geração de energia elétrica, o qual está diretamente relacionado à busca da sustentabilidade da siderúrgica. O resultado mostra que ajustes nos sistemas de tratamento do GAF, proporcionam uma produção mais limpa e econômica para a empresa.

Palavras-Chave: Alto forno; reutilização dos gases; tratamento dos GAF; geração de energia, produção mais limpa.

ABSTRACT

This dissertation addresses the utilization of waste gas in the manufacturing process of pig iron in blast furnace steelmakers located in Minas Gerais using vegetal coal as raw material and viability power generation from this gases. The objectives of this dissertation are: describe the production process of steelmakers to vegetal coal; lifting the nature of the gases generated in furnace top; identify the main techniques for reuse the BFG (blast furnace gas), as well their respective methods of treatments and show the feasibility of installing a system of generating electricity through the reuse of the BGF. To achieve this goals we use literature searches, laboratory information and field research (case study). The intent is to point out the improvements to be made in the systems of exploitation and processing of BGF for a steel company in Minas Gerais and advantage of reuse BGF in the production of energy. With that is intended to demonstrate the feasibility of the use of BGF stages of pig iron production and electric power generation, which is directly related to the pursuit of sustainability of steelmaker. The result shows that adjustments in treatment systems BGF, provide cleaner production and financial savings for the steel company.

Keywords: Blast furnace; reuse of gases; treatment of BGF; power generation, cleaner production.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Fluxograma do processo de produção do ferro gusa em uma usina não integrada.
- Figura 2 – Forno tipo forja Catalã usada em 1587 e o seu perfil.
- Figura 3 – Forja Catalã acionada por foles manuais – Idade Média.
- Figura 4 – Alto forno de 1640, com acionamento hidráulico. Os fornos eram construídos juntos de barrancos para permitir o carregamento pelo topo por carrinhos de mão.
- Figura 5 – Foto de um alto forno americano do século XVII, com foles acionados por roda d'água.
- Figura 6 – Seção transversal típica de um alto forno moderno.
- Figura 7 – Sequência do carregamento no topo do alto forno.
- Figura 8 – Esquema do sistema de injeção de ar pelas ventaneiras do Alto Forno.
- Figura 9 – Esquema de entrada e saída de ar no filtro de mangas.
- Figura 10 – Filtros de Mangas instalados nas siderúrgicas mineiras.
- Figura 11 – Recuperadores de calor tipo Glendon e Garrafas dos glendons.
- Figura 12 – Lateral do Glendon e Glendon em construção.
- Figura 13 – Desenho esquemático do funcionamento dos glendons.
- Figura 14 – Desenho esquemático do funcionamento dos cowpers.
- Figura 15 – Cowpers.
- Figura 16 – Queimador tipo tocha (combustível - GAF).
- Figura 17 – Tubulação do secador de minério.
- Figura 18 – Esquema básico dos GAF até o secador de minério.
- Figura 19 – Câmara Gravitacional ou câmara de sedimentação.
- Figura 20 – Balões gravimétricos instalados nas siderúrgicas na integradas de Minas Gerais.
- Figura 21 – Esquema de funcionamento do balão gravimétrico.
- Figura 22 – Esquema de funcionamento do Ciclone e Multiciclone.
- Figura 23 – Ciclone e Multiciclone instalado nas siderúrgicas mineiras não integradas.
- Figura 24 – Lavadores de gases instalados nas siderúrgicas mineiras não integradas.
- Figura 25 – Modelo esquemático do Lavador de gás tipo Venturi.
- Figura 26 – Desumidificador instalado nas siderúrgicas mineiras não integradas.
- Figura 27 – Esquema do ciclo de cogeração tipo Topping.
- Figura 28 – Esquema do ciclo de cogeração tipo Bottoming.
- Figura 29 – Diagrama de uma central termelétrica.

- Figura 30 – Central Termelétrica implantada em uma siderúrgica mineira.
- Figura 31 – Tubulação conduzindo o GAF.
- Figura 32 – Sistema de controle atmosférico.
- Figura 33 – Caçamba para recolhimento do material particulado.
- Figura 34 – Glendons (três) instalados na Citygusa.
- Figura 35 – Secador de minério instalado na Citygusa.
- Figura 36 – Eficiência do ciclone para partículas de diferentes tamanhos.
- Figura 37 – Eficiência do lavador de gás tipo venturi para partículas de diferentes tamanhos.
- Figura 38 – Eficiência do desumidificador tipo ciclone.
- Figura 39 – Eficiência energética de um sistema convencional e de um sistema de cogeração.
- Figura 40 – Detalhe do glendon.
- Figura 41 – Lay out do sistema de desempoeiramento.
- Figura 42 – Esquema para dimensionamento do ciclone de alta eficiência.
- Figura 43 – Sistema básico de funcionamento do Lavador de gás Venturi.
- Figura 44 – Dimensionamento do Lavador de gás Venturi.

LISTA DE QUADROS

- Quadro 1 – Principais tipos de minério de ferro e o seu percentual de ferro.
- Quadro 2 – Consumo de energia elétrica por tonelada de ferro gusa produzido – Siderúrgica A.
- Quadro 3 – Consumo de energia elétrica por tonelada de ferro gusa produzido – Siderúrgica B.
- Quadro 4 – Consumo de energia elétrica por tonelada de ferro gusa produzido – Siderúrgica C.
- Quadro 5 – Consumo de energia elétrica por tonelada de ferro gusa produzido – Siderúrgica D.
- Quadro 6 – Composição do Gás do Alto Forno.
- Quadro 7 – Poder calorífico do GAF.
- Quadro 8 – Eficiência fracionada de coletores de material particulado em função da distribuição de tamanho das partículas (em porcentagens).
- Quadro 9 – Produção de ferro gusa da Siderúrgica Citygusa.
- Quadro 10 – Composição média do GAF da Citygusa.
- Quadro 11 – Faixa granulométrica do GAF da Citygusa.
- Quadro 12 – Concentração de material particulado – Siderúrgica Citygusa.
- Quadro 13 – Porcentagem de material particulado no GAF da Citygusa.
- Quadro 14 – Eficiência estimada de remoção do Ciclone em relação à concentração de material particulado, por Nm³ de GAF.
- Quadro 15 – Particulados presentes no gás de entrada do lavador Venturi e sua eficiência estimada de remoção.
- Quadro 16 – Particulados presentes no gás de entrada do segundo lavador Venturi e sua eficiência estimada de remoção.
- Quadro 17 – Particulados presentes no gás de saída do lavador Venturi e eficiência estimada de remoção do desumidificador.
- Quadro 18 – Consumo de energia elétrica por tonelada de ferro gusa produzido – Siderúrgica Citygusa.
- Quadro 19 A – Cálculo de investimento da Siderúrgica Citygusa.
- Quadro 19 B – Cálculo de investimento da Siderúrgica Citygusa.
- Quadro 19 C – Cálculo de investimento da Siderúrgica Citygusa.
- Quadro 19 D – Cálculo de investimento da Siderúrgica Citygusa.

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Sistema de limpeza dos GAF por número de altos fornos em siderúrgicas não integradas de Minas Gerais.

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

GAF	Gás de Alto Forno
BGF	Blast Furnace Gas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ΔP	Perda de Carga
in. H ₂ O	Polegadas de coluna d'água
mm H ₂ O	Milímetros de coluna d'água
MW	Megawatts

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1 A história da metalurgia do ferro no Alto Forno	21
2.2 Siderúrgicas não integradas em Minas Gerais	22
2.3 Alto forno e a produção de ferro gusa.....	24
2.3.1 <i>Funcionamento do Alto Forno</i>	26
2.3.2 <i>Reações químicas no Alto Forno</i>	29
2.3.3 <i>Processo simplificado no Alto Forno</i>	34
2.3.4 <i>Matérias-primas da produção de ferro gusa</i>	34
2.3.5 <i>Material particulado gerado no beneficiamento das matérias-primas</i>	38
2.3.6 <i>O consumo de energia elétrica nas siderúrgicas não- integradas a carvão vegetal do Estado de Minas Gerais</i>	40
2.4 Emissões atmosféricas geradas no topo do alto forno da produção de ferro gusa	42
2.4.1 <i>Volume gerado de GAF</i>	44
2.4.2 <i>Composição do GAF</i>	44
2.4.3 <i>Poder Calorífico do GAF</i>	44
2.5 Utilização do gás gerado na produção do ferro gusa	46
2.5.1 <i>Recuperadores de calor</i>	46
2.5.2 <i>Processo de queima do GAF</i>	53
2.5.3 <i>Tocha</i>	53
2.5.4 <i>Secador de minério</i>	54
2.6 Tratamento e controle das emissões atmosféricas dos altos fornos das siderúrgicas não-integradas a carvão vegetal.....	55
2.6.1 <i>Equipamentos para tratamento dos GAF</i>	56
2.6.2 <i>Eficiência de remoção de material particulado</i>	65
2.6.3 <i>Sistemas de controle de GAF implantados nas siderúrgicas mineiras não integradas</i>	65
2.7 Geração de energia elétrica na siderurgia.....	66
2.7.1 <i>Cogeração</i>	67
2.7.2 <i>Diferença entre termelétrica e cogeração</i>	70
2.7.3 <i>Termelétrica nas siderúrgicas mineiras não-integradas a carvão vegetal através da utilização do gás de alto forno</i>	70
2.7.4 <i>Legislação para produção de energia</i>	72
2.8 Redução de impactos ambientais	73

3 MATERIAIS E MÉTODO.....	75
3.1 Características do GAF da Citygusa Siderurgia Ltda.....	75
<i>3.1.1 Produção do gás de alto forno</i>	<i>75</i>
<i>3.1.2 Composição do gás do alto forno.....</i>	<i>76</i>
<i>3.1.3 Material particulado do gás do alto forno.....</i>	<i>77</i>
<i>3.1.4 Utilização do GAF.....</i>	<i>77</i>
3.2 Composição dos sistemas de tratamento de emissões atmosférico da Citygusa Siderurgia Ltda.....	79
3.3 Caracterização dos recuperadores de calor instalados na Citygusa e cálculo da eficiência de controle do material particulado.....	81
3.4 Proposta de aproveitamento do calor residual dos recuperadores de calor instalados na Citygusa	82
3.5 Proposição de melhorias nos equipamentos de controle do GAF.....	83
<i>3.5.1 Limpeza do gás de alto forno da Citygusa.....</i>	<i>84</i>
<i>3.5.2 Coletor tipo Ciclone.....</i>	<i>85</i>
<i>3.5.3 Lavador de gás tipo Venturi.....</i>	<i>86</i>
<i>3.5.4 Desumidificador</i>	<i>88</i>
<i>3.5.5 Potência requerida para funcionamento do sistema.....</i>	<i>90</i>
3.6 Proposição de melhorias nos recuperadores de calor da Citygusa	91
3.7 Redução do consumo de energia na Citygusa.....	91
3.8 Implantação do sistema de geração de energia elétrica a partir do GAF.....	92
3.9 Viabilidade de reutilização da energia térmica do sistema de geração de energia elétrica	94
3.10 Venda de energia elétrica	95
3.11 Implantação de uma termelétrica ou uma usina de cogeração	95
4 RESULTADOS	97
4.1 Eficiência do sistema de tratamento atual e concentração de material particulado na entrada dos glendons	97
4.2 Redimensionamento do sistema de tratamento do GAF	100
4.3 Verificação da potência disponível no sistema da Citygusa ..	114
4.4 Custos referentes às modificações propostas.....	116
4.5 Modificações nos recuperadores de calor - Glendon	116
4.6 Consumo de energia na Citygusa	117
4.7 Levantamento de custos referentes à implantação de uma usina termelétrica.....	118

4.8 Cálculo financeiro do investimento.....	119
5 CONCLUSÃO	125
6 RECOMENDAÇÕES	127
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	129
ANEXOS	137
Anexo I – Tabela de poder calorífico.....	137
Anexo II – Análise do GAF na chaminé do glendon.	138
Anexo III – Orçamento do sistema de tratamento proposto.	139
Anexo IV – Conta de energia elétrica da usina siderúrgica Citygusa.....	142
Anexo V – Orçamento da termelétrica.....	143

1 INTRODUÇÃO

A intenção deste estudo é propor uma melhor gestão da utilização dos gases gerados na produção de ferro gusa em alto forno a carvão vegetal.

Uma das mais importantes e atuais buscas das indústrias brasileiras é a sustentabilidade. No setor siderúrgico das usinas não integradas¹ que usam o carvão vegetal como matéria prima, à sustentabilidade vem sendo estudada de maneira intensa. A busca de um caminho para sobreviver nesse mercado disputado é fundamental para tais usinas.

O desenvolvimento do setor siderúrgico no Brasil é de muita importância para o crescimento do País e se torna mais que necessário em virtude das suas grandes reservas de minério de ferro, principalmente em Minas Gerais.

Nas últimas décadas, a questão ambiental vem sendo amplamente discutida em todo o mundo e o interesse pelo aproveitamento do gás do alto forno (GAF) tem crescido cada vez mais, impulsionado pela consciência ambiental da sociedade e pela legislação, cada vez mais exigente.

O primeiro passo deste trabalho será, assim, descrever o processo de funcionamento de um alto forno, bem como as matérias primas utilizadas e os produtos nele gerados, sendo o GAF o foco do estudo.

Nesse sentido, buscam-se analisar o gás de alto forno (GAF) gerado ao longo do processo de fabricação do ferro gusa, os equipamentos de controle atmosférico usados nas siderúrgicas não integradas a carvão vegetal e os sistemas de aproveitamento desse gás na usina.

A investigação a respeito do GAF mostrará as possibilidades de uma gestão eficiente, com o objetivo de maximizar os indicadores econômicos com a preservação do meio ambiente.

É nesse cenário que será examinado os sistemas de tratamento desses GAF e a geração de energia elétrica com a utilização do mesmo, com intuito da auto-suficiência em eletricidade.

¹ Siderúrgicas não integradas são aquelas que apenas produzem o ferro gusa, operam apenas a fase da redução do minério de ferro e não as fases do refino e laminação como as siderúrgicas integradas.

Passa-se, assim, a parte final desta dissertação, que será dedicada a um sistema de geração de energia elétrica a ser implantado.

Em suma, com esse trabalho, pretendo propor uma gestão eficaz na utilização do GAF, viabilizando a implantação de um sistema de geração de energia elétrica na usina siderúrgica não integrada, a fim de não impactar o meio ambiente e tornando o seu processo sustentável economicamente e ambientalmente.

Objetivos

Os objetivos foram divididos de maneira a facilitar a compreensão de todos os assuntos relacionados.

Objetivos gerais

O objetivo principal consiste em propor uma gestão ideal para o GAF, fomentando a aplicação de técnicas de aproveitamento dos gases de alto forno do setor de siderurgia não-integrada a carvão vegetal do estado de Minas Gerais.

Para estudo piloto, propor uma gestão adequada ambientalmente e economicamente à usina Citygusa Siderurgia Ltda., localizada em Matozinhos, região metropolitana de Belo Horizonte.

Objetivos específicos

Para atingir o propósito definido no objetivo geral foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar a geração do gás de alto forno da Citygusa;
- Levantar o atual sistema de tratamento e a utilização do GAF da Citygusa Siderurgia Ltda.;
- Propor melhorias nos sistemas de tratamento (desempoeiramento) e utilização dos gases do alto forno da Citygusa Siderurgia Ltda., viabilizando a implantação de um projeto de geração de energia elétrica;
- Verificar a viabilidade econômica e ambiental de implantação de um sistema de geração de energia elétrica na siderúrgica

Citygusa e analisar a possibilidade de redução de consumo e comercialização de energia na usina.

- Apresentar às empresas do setor informações e avaliações acerca das melhores tecnologias disponíveis para controle e tratamento de efluentes atmosféricos, visando incentivar os empreendedores a buscar a sustentabilidade da planta da usina através de uma consciência ambiental correta.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A história da metalurgia do ferro no Alto Forno

Os altos fornos mais antigos conhecidos foram construídos na China da dinastia Han, no Século I a.C., embora os artefatos férreos encontrados neste país datem do Século V a.C. Isto torna possível acreditar que a história dos altos fornos na China seja mais antiga do que atualmente se supõe (CHIAVERINI, 1986).

Quanto à metalurgia na região da Europa, o processo de obtenção do ferro e o surgimento dos primeiros altos fornos, aparecem em diversos países, sendo disseminados em regiões diferentes.

Na Índia e na África, também como nos outros continentes, a metalurgia do ferro surgiu de forma independente. Na Oceania e nas Américas, a metalurgia do ferro só chegou com o conquistador europeu (MOURÃO et al., 2007).

O primeiro forno de ferro da América foi instado em São Paulo, no fim do século XVI. O mineral havia sido descoberto no Brasil, no início do século XVI, pelos jesuítas, que logo passaram a fabricar, com o metal obtido na forma primária da redução do minério, anzóis, facas e outros tipos de ferramenta (TABELA PERIÓDICA ONLINE, 2011).

Diversas literaturas² contextualizam datas distintas em relação ao surgimento da metalurgia do ferro no mundo. No Brasil, o desenvolvimento na produção de ferro ocorreu lentamente, e somente no século XIX que houve um crescimento significativo.

Em 1936 fabricavam-se no Brasil cerca de oitenta mil toneladas. Com a instalação, em 1941, da Companhia Siderúrgica Nacional, em Volta Redonda - RJ, a produção de ferro iniciou uma nova época de desenvolvimento com incentivo estatal (TABELA PERIÓDICA ONLINE, 2011).

Segundo Machado (2006) a siderurgia é tão importante para o desenvolvimento das nações que passou a servir de padrão medidor, sendo consideradas fortes as nações dotadas de elevadas capacidades de produzir e/ou comercializar produtos siderúrgicos e seus insumos.

No fim do século XX, o Brasil figurava entre os três países possuidores das maiores reservas conhecidas de minério de ferro em

² Alguns autores: (CHIAVERINI, 1986), (MOURÃO et al., 2007), (MARAFIGO; ROSA, 2010), (WORLDLINGO, 2011), (LANDGRAF et al., 1994), (PRADO, 2012).

todo o mundo. Passou de terceiro a segundo lugar após a descoberta de riquíssimas reservas no norte de Minas Gerais e na serra de Carajás, no Pará (TABELA PERIÓDICA ONLINE, 2011).

Minas Gerais, por ser uma região rica em dois insumos básicos, o carvão vegetal e o minério de ferro, para a fabricação de ferro gusa, atraiu, inicialmente, algumas indústrias. A partir da década de 1970, em decorrência do crescimento da siderurgia mundial, a construção de altos fornos em Minas Gerais se intensificou (JACOMINO et al., 2002). O Estado de Minas Gerais possui hoje o maior número de siderúrgicas a carvão vegetal do país, destacando as cidades de Sete lagoas, Divinópolis, Itaúna, Bom Despacho, Pitangui, Ipatinga, Pará de Minas, Pedro Leopoldo e Matozinhos.

2.2 Siderúrgicas não integradas em Minas Gerais

No começo dos anos 60, existiam aproximadamente 80 altos-fornos a carvão vegetal nas siderúrgicas não-integradas de Minas Gerais, com capacidade instalada anual de um milhão de toneladas de ferro gusa (CEMIG, 1988).

Em 2009 o estado de Minas Gerais era o maior produtor de ferro gusa em siderúrgicas não integradas do Brasil, possuindo 68 usinas, que juntas contavam com 109 altos fornos com capacidade de produção de 9.390.355 toneladas de ferro gusa por ano.

As usinas siderúrgicas podem ser integradas, semi-integradas e não-integradas.

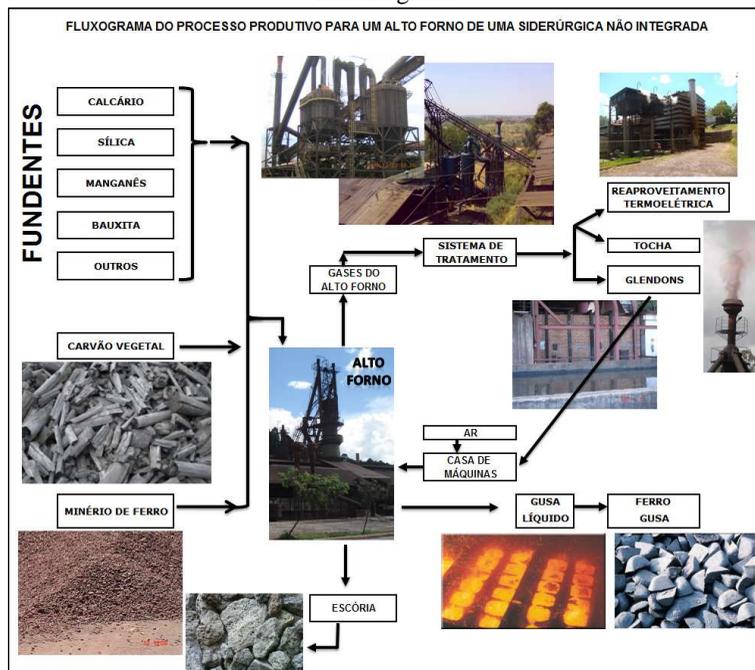
As siderúrgicas integradas adquirem as matérias primas no estado bruto, executam todas as fases do processo industrial e vendem os produtos acabados, ou seja, operam as três fases básicas de produção de aço: redução, refino e laminação. Na redução o ferro se liquefaz e é chamado de ferro gusa ou ferro de primeira fusão. A etapa seguinte do processo é o refino que normalmente ocorre em fornos a oxigênio ou elétricos, onde o ferro gusa é levado para a aciaria, para ser transformado em aço, mediante queima de impurezas e adições de outras ligas. Finalmente, a terceira fase clássica do processo de fabricação do aço é a laminação. O aço, em processo de solidificação, é deformado mecanicamente e transformado em produtos utilizados pela indústria de transformação, como chapas grossas e finas, bobinas, vergalhões, arames, perfilados, barras etc.

Nas semi-integradas, por sua vez, existem duas fases – refino e laminação. As siderúrgicas compram ferro gusa de outras siderúrgicas para transformá-lo em aço.

As siderúrgicas não integradas são aquelas que apenas produzem o ferro gusa. Elas executam apenas o processo de redução do minério de ferro em alto forno, que é vendido para fundições e aciarias. Segue um fluxograma do processo de produção do ferro gusa em uma usina não integrada.

Em princípio, quanto maior for o grau de integração de uma usina, mais competitiva se torna no mercado. Geralmente, são usinas de grande porte, que exigem investimentos muito elevados antes de entrarem em operação. Quando não há capital suficiente, uma usina pode iniciar sua produção como usina não integrada e, à medida que vai aumentando seu capital, pode passar a semi-integrada e, finalmente, totalmente integrada.

Figura 1 – Fluxograma do processo de produção do ferro gusa em uma usina não integrada.



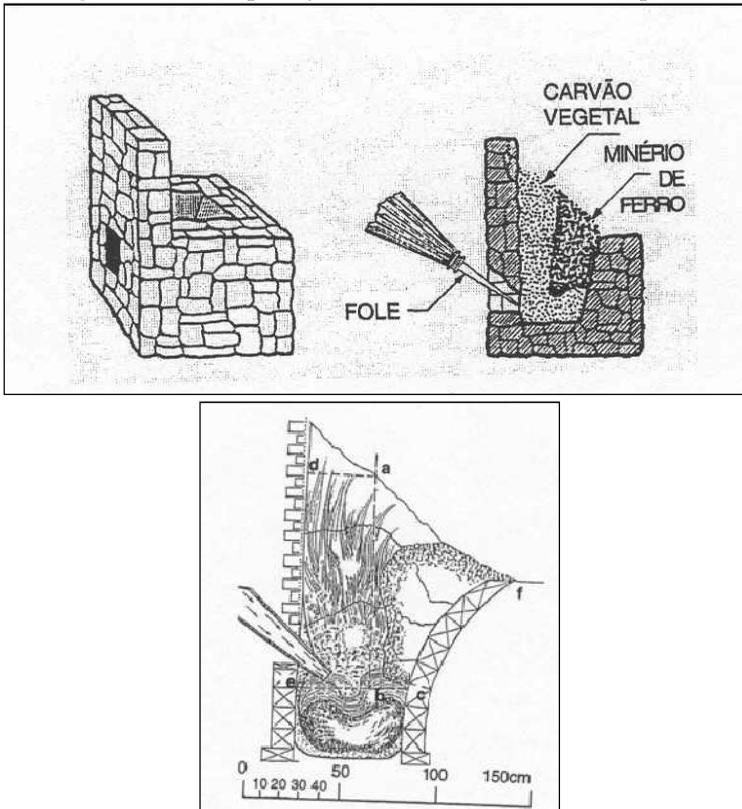
Fonte: Autor.

2.3 Alto forno e a produção de ferro gusa

O alto-forno constitui o principal equipamento utilizado na metalúrgica do ferro. A partir dos primeiros fornos, dos tipos mais rudimentares, em que os gases eram perdidos na atmosfera, constantes aperfeiçoamentos técnicos vêm sendo introduzidos (CHIAVERINI, 1986).

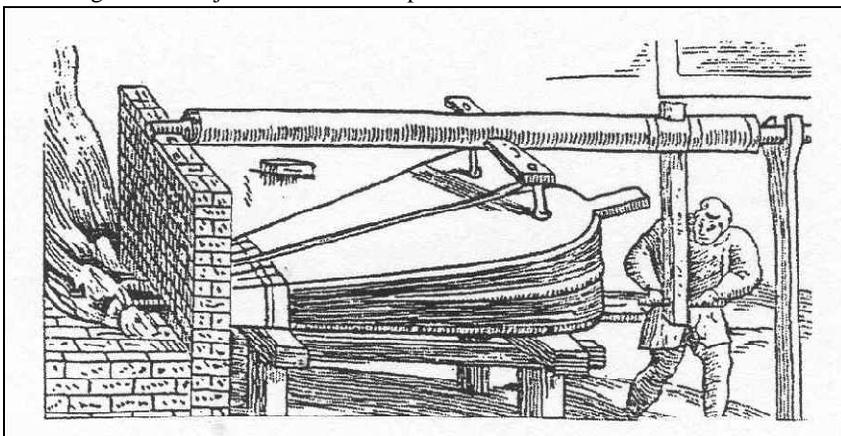
Os primeiros fornos utilizados na antiguidade já utilizavam sistemas de injeção de ar para ajudar na combustão do carvão. Uma evolução nas técnicas utilizadas para os sistemas de injeção de ar ocorreu durante os séculos, as imagens a seguir mostram equipamentos acionados manualmente até equipamentos com acionamento hidráulico e por roda d'água.

Figura 2 – Forno tipo forja Catalã usada em 1587 e o seu perfil.



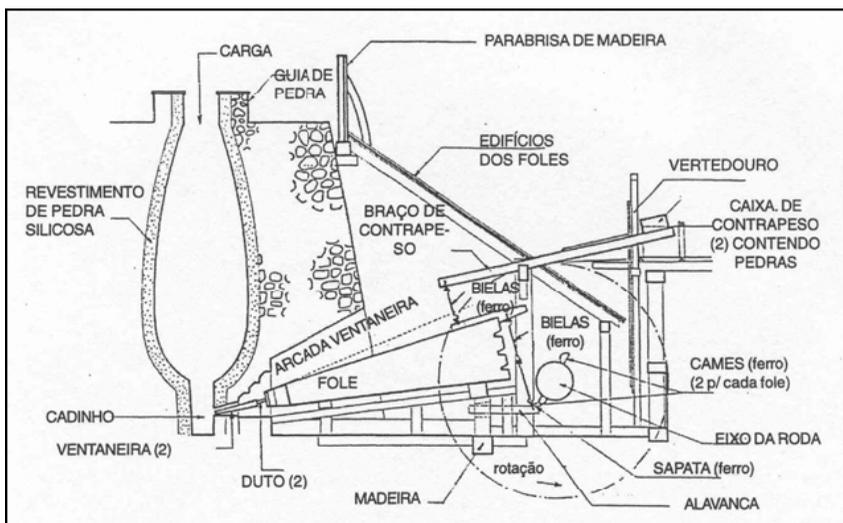
Fonte: MACHADO; SOBRINHO; ARRIVABENE, 2003.

Figura 3 – Forja Catalã acionada por foles manuais – Idade Média.



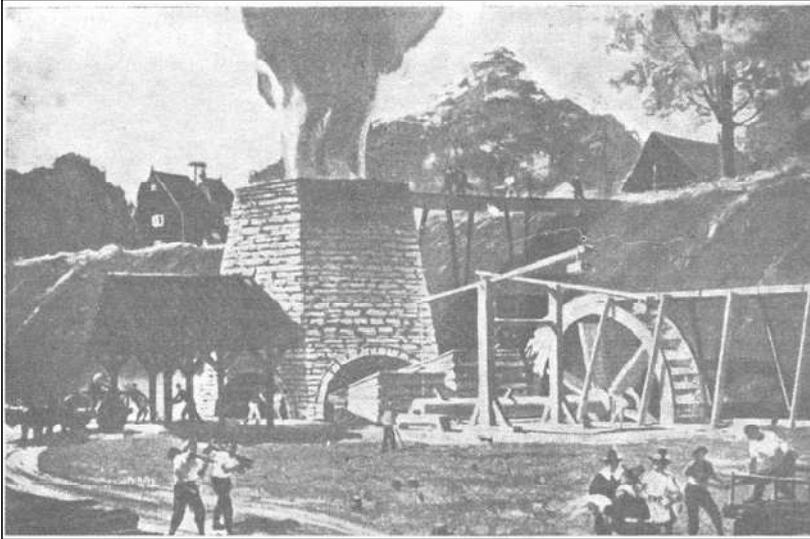
Fonte: MACHADO; SOBRINHO; ARRIVABENE, 2003.

Figura 4 – Alto forno de 1640, com acionamento hidráulico. Os fornos eram construídos juntos de barrancos para permitir o carregamento pelo topo por carrinhos de mão.



Fonte: MACHADO; SOBRINHO; ARRIVABENE, 2003.

Figura 5 – Foto de um alto forno americano do século XVII, com foles acionados por roda d'água.



Fonte: MACHADO; SOBRINHO; ARRIVABENE, 2003.

2.3.1 Funcionamento do Alto Forno

A metalurgia do ferro nas siderúrgicas não integradas consiste essencialmente na redução dos óxidos dos minérios de ferro. Para isto é empregado um redutor, tipo carvão vegetal, que é um material à base de carbono, sendo o principal produto do alto forno o ferro gusa (CHIAVERINI, 1986).

Os produtos gerados no alto forno, além do ferro gusa, compreendem a escória, o gás de alto forno e o material particulado contido no gás.

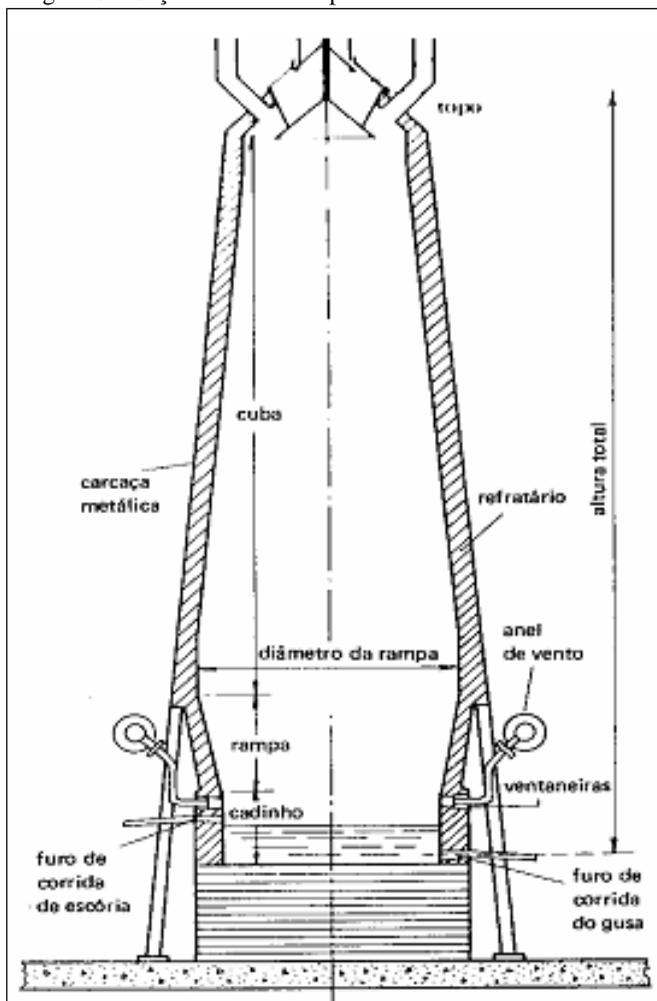
As transformações de natureza física e as reações químicas básicas do processo de produção do ferro gusa ocorrem no interior do alto forno nos diversos níveis da descida da carga e a temperaturas específicas.

Na área inicial da cuba onde, como pode-se ver na Figura 6, com a elevação da temperatura, de 200°C para 800°C a 1000°C, a carga perde a sua umidade e tem-se o início a calcinação dos carbonatos e a redução dos óxidos de ferro.

No final da cuba e início da rampa é completada a redução dos óxidos de ferro. O material torna-se plástico e, em seguida, fluido, e o ferro gusa e a escória começam a gotejar através do carvão.

Na zona turbilhonaria das ventaneiras é onde ocorre a combustão do carvão vegetal. Na figura 6, uma foto típica da seção transversal de um alto forno.

Figura 6 – Seção transversal típica de um alto forno moderno.



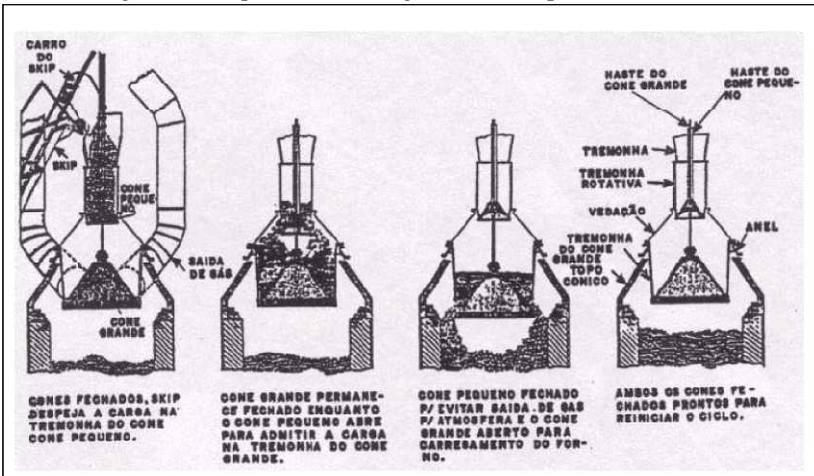
Fonte: CHIAVERINI, 1986.

A matéria-prima, minério de ferro, os fundentes³ e o carvão vegetal são descarregados, já pesados na dosagem certa da carga, no topo do alto forno.

As pesagens e os descarregamentos são controlados por operadores de modo a atenderem à sequência correta de composição da carga, definida em projeto e na programação da produção.

A carga, ao chegar ao topo do alto forno, é descarregada na caçamba/tremonha giratória ali existente que, em seguida, abre-se e deixa o material cair no funil inferior de onde a carga entra no forno. Na figura 7, um desenho do carregamento no topo do alto forno.

Figura 7 – Sequência do carregamento no topo do alto forno.



Fonte: MACHADO; SOBRINHO; ARRIVABENE, 2003.

Após a descarga no topo do alto forno, a carga de minérios e carvão vegetal, em sentido descendente, entra em contato com uma corrente ascendente de gases quentes, oriunda da combustão do carvão, a qual é propiciada pela injeção de ar, que é feita através das ventaneiras⁴. Ocorre então, quando desse contato, o processo físico de

³ Fundentes são substâncias adicionadas ao conteúdo da carga de um alto-forno com o propósito de retirar as impurezas existentes no metal e de tornar a escória mais fluida. No caso do ferro gusa os fundentes mais comuns são o calcário, manganês, sílica, bauxita (WIKIPÉDIA - B,2012).

⁴ Ventaneiras são bocais ou tubos através do qual o ar quente é soprado no alto forno.

secagem da umidade dos materiais. Essa umidade é removida com o gás, enquanto a água combinada será eliminada em zonas inferiores, a temperaturas específicas.

Uma sonda que penetra o alto forno indica o espaço vazio dentro dele, o que possibilita definir a frequência de enformamento das cargas ao longo do tempo.

O tempo para a carga chegar às ventaneiras normalmente é de quatro horas após seu enformamento. Em seguida, a carga segue para o cadinho, onde sua fusão é completada e o ferro gusa fundido é vazado duas horas depois na lingotadeira ou rodeio, através do canal de gusa ou mesmo direcionado para a panela.

2.3.2 Reações químicas no Alto Forno

Dentro do forno ocorrem reações químicas que vão alterando a composição da carga original e o seu estado físico até a produção do ferro gusa líquido.

Reações químicas – Formação de gases no alto forno:

O carvão reage com o oxigênio produzindo gás carbônico (dióxido de carbono) – Equação (1):



O dióxido de carbono reduz-se formando o monóxido de carbono – Equação (2):



Num processo contrário, o monóxido de carbono pode sofrer oxidação com o oxigênio, reproduzindo o gás carbônico – Equação (3):



O processo de oxidação do carvão com oxigênio libera energia. Na parte inferior do alto forno a temperatura interna pode alcançar 1900°C.

Reações químicas – Redução dos minerais:

Os óxidos de ferro são inicialmente reduzidos na parte superior do alto forno, parcial ou totalmente, com o monóxido de carbono, já produzindo ferro metálico.

No caso da magnetita (óxido duplo), Fe_3O_4 , por exemplo, a reação de redução do ferro (do estado oxidado, no minério, para o de ferro metálico, no ferro gusa) é representada pelas equações citadas a seguir.

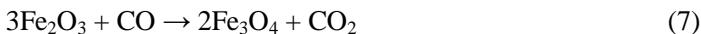
Óxido Duplo – Equação (4):



O ferro do minério deve ser reduzido a ferro metálico. O monóxido de carbono serve para reduzir o ferro – Equações (5 e 6).



O minério de ferro (Hematita) também pode reagir como monóxido de carbono gerando a magnetita – Equação (7).



Posteriormente, na parte inferior do alto forno, onde a temperatura é mais elevada, ocorre à maior parte da redução dos óxidos com o carvão (carbono) – Equação (8):



Reações químicas – Vapor de água:

O vapor de água reage com o carbono gerando monóxido de carbono e hidrogênio, como demonstrado a seguir – Equação (9).



Ocorre também a reação – Equação (10).



Reações químicas – Redução dos fundentes:

O fundente carbonato de cálcio, por sua vez, se decompõe de acordo com a Equação (11):



O dióxido de carbono assim formado é reduzido com o carbono a monóxido de carbono, de acordo com reação idêntica à apresentada na Equação (2):



O manganês reage com o carbono a baixas temperaturas – Equação (12).



E a altas temperaturas o manganês reage assim – Equação (13):



Os óxidos de silício e de fósforo ainda não reduzidos são reduzidos ao reagirem com o carbono a uma temperatura superior a 1.100° C, na altura da rampa do alto forno – Equações (14 e 15).

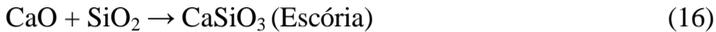


Praticamente todo o fósforo é incorporado ao ferro gusa.

Reações químicas – Formação da escória:

No final das reações descritas, a mistura no alto forno, a uma temperatura da ordem de 900°C, consiste de ganga⁵, cal, carvão, ferro esponja e quantidades variáveis de minério não reduzido.

A cal reage com parte da ganga e pequena parte dos óxidos de ferro não reduzidos, dando início à formação da escória – Equação (16).



Com o aumento da temperatura para 1.260°C, os óxidos de cálcio, de alumínio e de silício unem-se à escória formada pelos demais óxidos já reduzidos.

Inicialmente viscosa, a escória, dentro de uma faixa de temperatura que depende de sua composição química (relação sílica, alumina, cal, etc.), passa totalmente ao estado líquido ao alcançar as zonas mais quentes do alto forno (região das ventaneiras).

Formação do ferro gusa:

O ferro reduzido (Fe) absorve carbono, o que reduz o seu ponto de fusão, e começa a gotejar pelos interstícios do carvão incandescente, caindo no cadinho do alto forno.

O ferro puro funde-se á temperatura de 1.500°C. Ao absorver carvão essa temperatura cai para 1.150°C.

Ferro Gusa é um produto de primeira fusão obtido a partir da redução do minério em alto-forno.

Composição Química:

⁵ Ganga são as impurezas contidas nos minérios. É a parte não aproveitada da fragmentação de minérios. Os principais tipos de ganga encontrados em minérios são micro-inclusões de Silício, Enxofre, Fósforo e Óxidos Globulares. A ganga é responsável pela perda da qualidade do produto da exploração de minérios, sendo que ela afeta nas propriedades mecânicas e químicas do minério, além de alterar a sua ductibilidade e resistência (WIKIPÉDIA - C,2012).

Contêm em torno 4 % de carbono sob forma de cementita (Fe_3C). Possui como principais impurezas o silício (0,3 a 2%), o enxofre (0,01 a 1%), o fósforo (0,05 a 2%) e o manganês (0,5 a 2%).

Características: O ferro gusa, também chamado de ferro bruto, é duro e quebradiço, com baixa resistência mecânica, devido ao excesso de carbono.

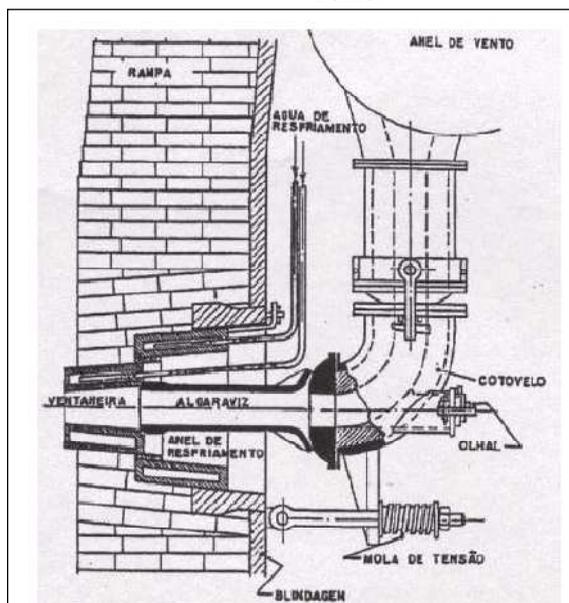
A reação da dessulfuração do ferro gusa (retirada do enxofre) – Equação (17):



Ventaneiras:

As altas temperaturas reinantes nas ventaneiras, em sua região denominada zona turbilhonaria, são geradas pela queima ou combustão do carvão vegetal em contato com a forte corrente de ar quente proveniente dos recuperadores de calor (glendons/cowpers). A figura 8 mostra o esquema de injeção de ar pelas ventaneiras.

Figura 8 – Esquema do sistema de injeção de ar pelas ventaneiras do Alto Forno.



Fonte: MACHADO; SOBRINHO; ARRIVABENE, 2003.

O ar quente alimenta o alto forno através de suas ventaneiras, sendo injetado através de seu tubo de ligação a uma pressão de até três atmosferas e velocidade média de 150 m/s. A profundidade do turbilhonamento, que depende da velocidade do ar quente, da granulometria do carvão vegetal e das condições da própria ventaneira, define uma zona anular ativa, dentro da qual ocorrem as correntes de formação de gusa, escória e gás de alto forno. A temperatura nessa zona oscila entre 1.800°C a 2.000°C.

Assim, é na ventaneira que o carvão vegetal é consumido como fonte energética. Com as altas temperaturas geradas na sua combustão, ocorre a separação da escória que, sendo mais leve, flutua sobre o ferro gusa no cadinho.

2.3.3 Processo simplificado no Alto Forno

No alto forno podem ser feitas as observações explicitadas a seguir, que esclarecem com simplicidade, a complexidade do que se passa realmente dentro desse equipamento. Em resumo, várias reações ocorrem dentro do Alto Forno até a produção do ferro gusa, tais como:

- redução de óxidos de ferro;
- carbonetação do ferro;
- fusão da ganga;
- fusão do ferro gusa;
- redução parcial de certos elementos da ganga;
- dessulfuração parcial do ferro gusa.

Portanto, pode-se considerar o alto forno como um conjunto de três aparelhos bem distintos:

- um intercambiador químico e térmico;
- um forno de fusão;
- um gasogênio, fornecendo calor e o gás redutor necessário.

2.3.4 Matérias-primas da produção de ferro gusa

As matérias-primas básicas para a produção de ferro gusa consistem em:

Minério de ferro:

Esta é a matéria prima principal na produção de ferro gusa, pois é dele que se extrai o ferro. O consumo previsto desta matéria-prima no alto forno é da ordem de 1.700 kg/tonelada de ferro gusa. Este material é fornecido por diversas mineradoras, em função da oferta no mercado e da logística. O transporte é realizado em caminhões tipo caçamba ou vagões de trem de ferro e armazenado em pilhas (sem cobertura), diretamente no pátio para depois ser transferido para os silos de estocagem. Durante sua estada no pátio, o material particulado presente no minério de ferro pode ser carregado pelo vento, porém, o volume é ínfimo e desprezado pelas empresas, sendo que a umidade presente no minério de ferro forma uma camada coloidal como o material particulado, dificultando a dispersão. Os pátios onde são armazenados os minérios de ferro, normalmente possuem uma cortina arbórea minimizando ainda mais a dispersão do material particulado carregado pelo vento.

O minério normalmente chega às usinas siderúrgicas com uma umidade em torno de 10%. Durante sua estada no pátio a umidade cai em torno de 4%. Este excesso de umidade prejudica o processo de peneiramento do minério, fazendo com que o particulado de menor dimensão fique aderido no grão de minério de ferro. Este particulado enfiado juntamente com o minério será completamente seco dentro do alto forno e provocará uma redução de permeabilidade da carga, impedindo a distribuição do ar aquecido por toda a carga, direcionando este ar principalmente para as áreas laterais do forno (paredes de refratários), consumindo mais refratário e reduzindo a vida útil do alto forno. Para que este problema não ocorra o minério é seco, antes do processo de peneiramento, utilizando o gás do alto forno queimado nos glendons⁶ que seria descartado para a atmosfera. Como este processo gera muito material particulado, todo o sistema de secagem e peneiramento do minério é enclausurado e instalado um sistema de desempoeiramento com equipamento tipo filtro de mangas para recolher o material particulado gerado que posteriormente será reutilizado ou comercializado. Tal equipamento é descrito a seguir.

⁶ Glendons é um tipo de recuperador de calor, destinado a pré-aquecer o ar que será soprado pelas ventaneiras no alto forno. Esse tipo de câmara de combustão é mais utilizado nas siderúrgicas não integradas a carvão vegetal.

As maiores jazidas de ferro do mundo localizam-se na Austrália, Brasil, Estados Unidos, Rússia, França e Inglaterra. No Brasil as maiores jazidas encontram-se em Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Pará, Amapá e Bahia (ROMEIRO,1977).

O principal minério encontrado no Brasil, a hematita, com 50 a 70 % de Ferro (8% das reservas mundiais), é de boa qualidade devido aos baixos índices de fósforo e enxofre (ROMEIRO,1977).

Os principais tipos de minério de ferro e o seu percentual de ferro são apresentados no Quadro 1, a seguir.

Quadro 1 – Principais tipos de minério de ferro e o seu percentual de ferro.

Mineral	Fórmula química	Conteúdo teórico em ferro	Conteúdo teórico em ferro após calcinação
hematita	Fe_2O_3	69,96	69,96
magnetita	Fe_3O_4	72,4	72,4
magnesioferrita	$\text{MgO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	56-65	56-65
goetita	$\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$	62,9	70
hidrogoetita	$3\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot 4\text{H}_2\text{O}$	60,9	70
limonita	$2\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot 3\text{H}_2\text{O}$	60	70
siderita	FeCO_3	48,3	70
pirita	FeS_2	46,6	70
pirrotita	Fe_{1-x}S	61,5	70
ilmenita	FeTiO_3	36,8	36,8

Fonte: WIKIPÉDIA - D, 2012.

Fundentes:

O minério de ferro contém, além do ferro, o material inerte denominado ganga, como já observado, são as impurezas contidas nos minérios.

Os fundentes têm a função de reduzir o ponto de fusão de impurezas contidas na ganga e garantir a presença de substâncias que se combinem preferencialmente com tais impurezas. Deste modo, produziria uma escória fluida e um ferro gusa isento de determinados elementos não aceitáveis em sua composição e contendo outros em limites toleráveis.

Os tipos de fundentes no alto forno variam com a composição do minério de ferro e do tipo de ferro gusa a ser produzido, podendo ser utilizado calcário, manganês, sílica, bauxita, etc.. O consumo também varia, estando na ordem de 50 a 100 kg/tonelada de ferro gusa produzido. O calcário e o quartzito (sílica) são os mais utilizados e são fornecidos por diversas mineradoras e transportados de forma idêntica ao minério de ferro. O estoque destes materiais é efetuado no pátio e em silos, passando pelo mesmo processo do minério de ferro, onde, o material particulado gerado é mínimo conforme descrito nas informações sobre o minério de ferro.

Carvão Vegetal:

O carvão vegetal é obtido a partir da queima ou carbonização de madeira, após esse processo resulta em uma substância negra.

Internacionalmente, o uso do carvão derivado da madeira foi utilizado somente no início das primeiras fabricações do ferro, sendo logo substituído pelo carvão mineral, um combustível de origem fóssil. A substituição do carvão de lenha para o carvão mineral é atribuída extensamente a Abraham Darby, em 1709. Isso ocorreu porque o combustível, carvão vegetal, era pouco encontrado nas regiões onde se desenvolveu a metalurgia do ferro e o consumo do carvão mineral para produção do ferro era menor que a do carvão vegetal. No Brasil, o carvão vegetal é atualmente o combustível mais utilizado nas siderúrgicas de ferro gusa não integradas (WORLDLINGO, 2011).

O consumo previsto de carvão vegetal no alto forno é de aproximadamente 680 kg/tonelada de ferro gusa produzido. Esta matéria-prima pode vir em sacaria ou a granel. Na chegada à usina os caminhões são medidos e é recolhida amostra do material. O galpão onde é realizada a descarga do carvão vegetal precisa ser enclausurado e

possuir um sistema de desempoeiramento. O transporte deste material dos silos até a área de peneiramento e de carregamento será efetuado através de correia transportadora.

Os sistemas de desempoeiramento do beneficiamento do carvão vegetal, minério de ferro e fundentes são feitos através do filtro de mangas, conforme descrito abaixo.

2.3.5 Material particulado gerado no beneficiamento das matérias-primas

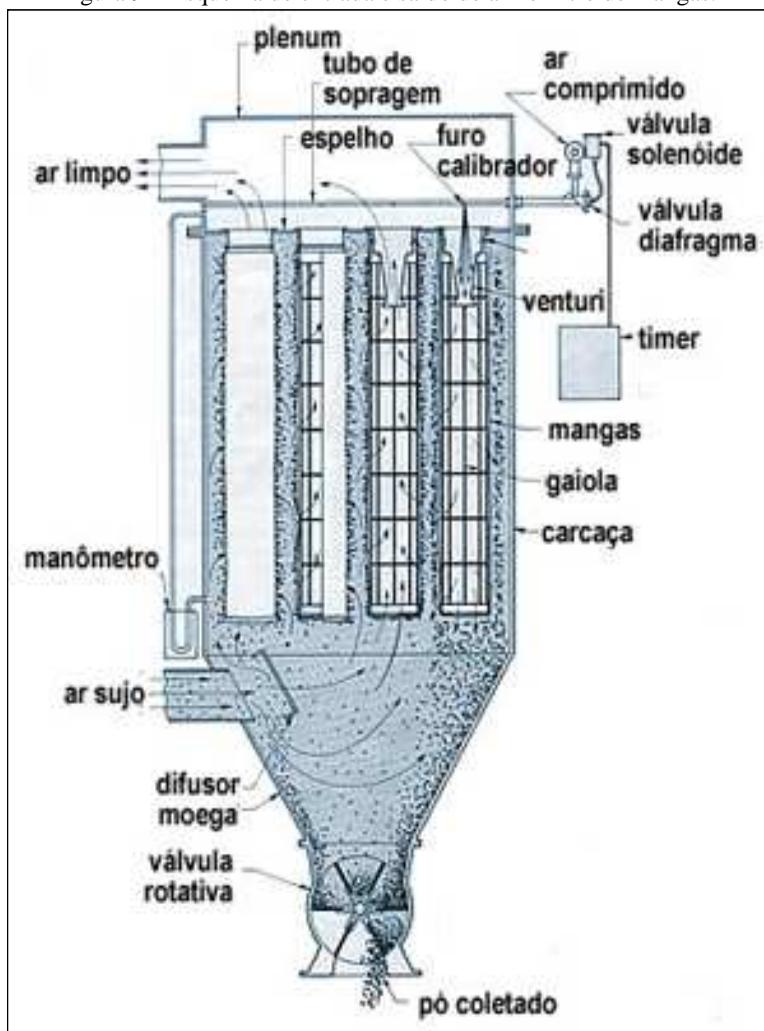
São utilizadas peneiras vibratórias no beneficiamento das matérias-primas (minério de ferro, fundentes e carvão vegetal). Esse peneiramento gera muito material particulado, fazendo-se necessário o enclausuramento das peneiras e correias transportadoras para reduzir o material particulado disperso.

Um sistema de desempoeiramento é instalado para garantir a limpeza do ar presente no beneficiamento das matérias-primas. Após o beneficiamento, esse ar, contendo material particulado, é direcionado, normalmente, para um sistema composto de um filtro de mangas, pois uma porcentagem das partículas presentes no ar está em uma faixa granulométrica abaixo da capacidade de coleta de equipamentos do tipo ciclones, que seriam mais baratos.

O Filtro de Mangas é basicamente composto por Plenum Superior, Corpo Central e Moega de Recolhimento, sendo dotado de Sistema Automático de Limpeza das mangas filtrantes.

O princípio de funcionamento consiste na introdução do ar contaminado no corpo central do filtro, através de antecâmara lateral devidamente dimensionada no sentido de evitar o choque direto do particulado com as mangas, assim como, reduzir a velocidade do fluxo e precipitar, por efeito de gravidade, o particulado coletado. O ar, ainda contaminado, é então conduzido para o interior do corpo central e forçado a passar através das mangas de filtragem, local de retenção do particulado ainda em suspensão. Na sequência, o ar, já isento de impurezas, passa para o plenum superior, saindo do filtro por meio de bocal (ais) localizado(s) em uma de suas laterais, como demonstrado no esquema a seguir.

Figura 9 – Esquema de entrada e saída de ar no filtro de mangas.



Fonte: DELTA DUCON, 2012.

Seguem algumas fotos de filtros de manga instalados em siderúrgicas não integradas, em Minas Gerais.

Figura 10 – Filtros de Mangas instalados nas siderúrgicas mineiras.



Fonte: CHAVES, 2001 a 2012.

2.3.6 O consumo de energia elétrica nas siderúrgicas não-integradas a carvão vegetal do Estado de Minas Gerais

Numa siderúrgica não integrada, o consumo de energia elétrica é elevado. Cada siderúrgica possui sua particularidade de equipamentos instalados e tecnologias diferentes de produção, tornando o consumo de energia elétrica por tonelada de ferro gusa, um valor específico de cada usina.

Um levantamento em quatro usinas siderúrgicas não integradas foi realizado com intuito de quantificar o consumo médio de energia elétrica na produção de ferro gusa nas siderúrgicas não integradas do estado de Minas Gerais. Os quadros a seguirem demonstram uma média da produção de ferro gusa em relação ao consumo de energia.

Quadro 2 – Consumo de energia elétrica por tonelada de ferro gusa produzido – Siderúrgica A.

	JANEIRO	FEVEREIRO	MARÇO	ABRIL
CONSUMO ENERGIA MÊS (kWh)	191.100	303.800	331.800	387.800
PRODUÇÃO (TONELADAS/MÊS)	2.659,28	3.341,90	4.580,71	4.782,56
CONSUMO (kWh POR TONELADA DE GUSA)	71,86	90,90	72,43	81,08

Fonte: CEMIG, 2012 e CHAVES, 2012.

Quadro 3 – Consumo de energia elétrica por tonelada de ferro gusa produzido – Siderúrgica B.

	MARÇO	ABRIL	MAIO	JUNHO
CONSUMO ENERGIA MÊS (kWh)	395.920	433.440	435.120	443.520
PRODUÇÃO (TONELADAS/MÊS)	4.406,57	4.631,91	4.878,31	4.438,23
CONSUMO (kWh POR TONELADA DE GUSA)	89,84	93,57	89,19	99,93

Fonte: CEMIG, 2012 e CHAVES, 2012.

Quadro 4 – Consumo de energia elétrica por tonelada de ferro gusa produzido – Siderúrgica C.

	JANEIRO	FEVEREIRO	MARÇO	ABRIL
CONSUMO ENERGIA MÊS (kWh)	1.338.651	1.207.073	1.192.059	1.057.617
PRODUÇÃO (TONELADAS/MÊS)	16.351,86	14.614,25	13.471,71	12.270,11
CONSUMO (kWh POR TONELADA DE GUSA)	81,86	82,59	88,48	86,19

Fonte: CEMIG, 2012 e CHAVES, 2012.

Quadro 5 – Consumo de energia elétrica por tonelada de ferro gusa produzido – Siderúrgica D.

	JUNHO	JULHO	AGOSTO	SETEMBRO
CONSUMO ENERGIA MÊS (KW/h)	449.400	313.600	530.600	575.400
PRODUÇÃO (TONELADAS/MÊS)	5.525,75	3.588,76	7.327,81	6.920,11
CONSUMO (kWh POR TONELADA DE GUSA)	81,32	87,38	72,40	83,14

Fonte: CEMIG, 2012 e CHAVES, 2012.

O consumo médio de energia elétrica varia de 70 a 100 kWh por tonelada de ferro gusa produzido.

2.4 Emissões atmosféricas geradas no topo do alto forno da produção de ferro gusa

Além do ferro gusa e da escória, outro produto gerado no alto forno são as emissões atmosféricas que saem no topo do alto forno durante o processo de produção de ferro gusa. Emissões atmosféricas de altos fornos poderão conter gases, partículas e vapores. O tratamento e a utilização destas emissões são fundamentais para a preservação do meio ambiente, proporcionando uma melhor qualidade de vida para o ser humano.

Dentre as emissões atmosféricas, o gás de alto forno é produzido durante a reação do carbono presente no carvão vegetal com o ferro do minério de ferro. O gás de alto forno é um subproduto da produção do ferro gusa. Por ser um gás com propriedades energéticas, cuja queima é utilizada para produzir calor, o seu aproveitamento é realizado em todas as usinas siderúrgicas.

O gás gerado no alto forno siderúrgico pode ser chamado de gás residual. Porém, não apresenta uma classificação específica, como é o caso dos resíduos sólidos. Este gás é queimado para pré-aquecer o ar que é insuflado no alto forno, significando que apresenta capacidade de fornecer calor, isto é, possui poder calorífico considerável. Por isso, em algumas instalações siderúrgicas, este gás residual passou a ser utilizado como combustível em usinas termelétricas geradoras de energia.

O gás residual pode ser utilizado na produção de eletricidade, suprimindo assim, parte do consumo de eletricidade da planta siderúrgica e ajudando na redução do custo operacional do processo. Porém, é

importante que seja utilizado da melhor maneira possível, isto é, proporcionando o maior nível de eficiência possível.

Ao longo da história, o homem sempre utilizou os recursos naturais do planeta e gerou resíduos sem preocupação, os recursos eram abundantes e a natureza absorvia os despejos realizados. Com o passar dos tempos, um novo posicionamento em relação às questões ambientais foi gradualmente se estabelecendo, passando a sociedade a pensar e atuar de forma a, cada vez mais, buscar uma melhor compatibilidade entre o desenvolvimento, utilização dos recursos e meio ambiente (MOURÃO et al., 2007).

Uma boa gestão ambiental nas siderúrgicas consiste em avaliar os encargos ambientais associados à geração de efluentes. O GAF gerado na produção de ferro gusa no topo alto forno é um efluente que merece destaque por possuir um grande valor energético. É preciso identificar e quantificar a composição e o volume lançado ao meio ambiente, além de comparar com padrões e analisar uma oportunidade de melhoria ambiental.

Conforme Salierno (2007) as composições dos gases que saem no topo do alto forno refletem como está sendo a redução do minério de ferro. Os principais gases são o monóxido de carbono (CO), o dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), o hidrogênio (H₂) e o gás nitrogênio (N₂).

O controle da poluição do ar nas siderúrgicas é muito importante, sendo necessário o tratamento das emissões que saem no topo do alto forno para a obtenção de valores compatíveis com padrões estabelecidos nas legislações.

Os padrões usados em Minas Gerais foram estabelecidos conforme o COPAM, Deliberação Normativa nº 49, de 28 de setembro de 2001. Para fornos existentes e instalados em zona urbana anteriormente a data de publicação desta Deliberação Normativa, o padrão de emissão para partículas totais é de 100 mg/Nm³ para todas as fontes sujeitas a monitoramento. Para fornos existentes e instalados em zona rural ou mista anteriormente a data de publicação desta Deliberação Normativa, o padrão de emissão para partículas totais é de 200 mg/Nm³ para todas as fontes sujeitas a monitoramento. Para altos-fornos a serem instalados a partir da data de publicação desta Deliberação Normativa em zona urbana, o padrão de emissão para partículas totais será de 50 mg/Nm³; em zona mista ou rural o padrão será de 100 mg/Nm³ (MINAS GERAIS, 2001).

Os padrões de emissões são utilizados, principalmente, para orientar a formulação de planos de gestões de controle. Eles podem

implicar no estabelecimento de providências a serem tomadas em cada fonte de poluição para reduzir suas emissões (MOURÃO et al., 2007).

2.4.1 Volume gerado de GAF

O volume do gás de alto forno a ser gerado na produção depende das matérias primas que foram enforçadas e suas reações químicas para a produção de ferro gusa, além do volume de ar insuflado para pré-aquecer a carga.

A geração média de gás de alto forno está na faixa de 2.000 Nm³ por tonelada de ferro gusa produzido (JACOMINO et al., 2002).

2.4.2 Composição do GAF

A composição química do gás de alto-forno nas usinas siderúrgicas mineiras não integradas é obtida na maioria delas através do uso do aparelho de ORSAT. A análise de ORSAT determina a composição dos gases secos (não inclui vapor d'água). Os aparelhos de ORSAT possuem reagentes químicos que absorvem o gás a ser determinado. É possível analisar CO₂, O₂ e CO por absorção química e H₂, N₂, CH₄ e outros hidrocarbonetos por diferença (MECATRONICAATUAL, 2009).

A análise da composição é importante na avaliação de aspectos operacionais de aproveitamento dos gases residuais gerados durante o processo de produção do ferro gusa. Os componentes do gás de alto-forno são apresentados no Quadro 2, a seguir.

Quadro 6 – Composição do Gás do Alto Forno.

Composição do Gás do Alto Forno (%)					
CO	H ₂	H ₂ O	CH ₄	N ₂	CO ₂
22,15	5,46	9,88	1,02	46,73	14,76

Fonte: DE SOUSA, 2010.

2.4.3 Poder Calorífico do GAF

Calor é a energia que passa de um corpo a certa temperatura para outro corpo a uma temperatura mais baixa. Energia que passa dos gases quentes para água em uma caldeira.

O poder calorífico de um combustível é definido como a quantidade de energia liberada durante sua combustão completa, por unidade de massa ou de volume desse combustível. O poder calorífico

superior (PCS) inclui o calor latente⁷ do vapor de água gerado pela reação de combustão durante a queima do combustível com o ar seco, enquanto que o poder calorífico inferior (PCI) desconta este valor. Como em instalações industriais, geralmente a temperatura dos gases de saída é superior à temperatura de condensação da água e seu calor latente não pode ser recuperado, o poder calorífico inferior é mais amplamente empregado (MACIEL, 2004).

A determinação experimental do poder calorífico de um combustível pode ser feita utilizando calorímetros ou por métodos analíticos, a partir de sua composição química.

Como método experimental, o calorímetro de Junkes é usado na determinação experimental do poder calorífico dos combustíveis líquidos e gasosos (JOSÉ, 2004).

O poder calorífico de um combustível é dado pelo número de calorias desprendidas na queima do mesmo. Uma caloria é uma unidade de calor necessário para elevar um grama de água pura de 14,5 até 15,5 C°, sobre pressão atmosférica normal (LINERO, 2008). O poder calorífico do GAF é apresentado no Quadro 7, a seguir.

Quadro 7 – Poder calorífico do GAF.

Gás do Alto Forno (GAF)	
	Energia Específica (kJ/Nm ³)
PCI	3.768
PCS	3.919

Fonte: MACIEL, 2004.

No Brasil, costuma-se exprimir o poder calorífico de um gás em kcal/Nm³, kcal/m³ ou kcal/kg, muito embora a unidade do sistema internacional seja (kJ/Nm³). No entanto, 1 kcal = 4,186 kJ.

No Anexo I é apresentado uma tabela com alguns gases, líquidos e sólidos e seus respectivos valores de poder calorífico. Como pode ser verificado nesta tabela, os componentes do GAF proporcionam um poder calorífico inferior (PCI) não muito elevado.

⁷ Calor latente é a grandeza física relacionada à quantidade de calor que uma unidade de massa de determinada substância deve receber ou ceder para mudar de fase, ou seja, passe do sólido para o líquido, do líquido para o gasoso e vice versa (WIKIPÉDIA - A,2012).

2.5 Utilização do gás gerado na produção do ferro gusa

As emissões atmosféricas do alto forno possuem grande capacidade poluidora, sendo de extrema relevância um adequado controle destas emissões, preferencialmente seguido de processos de utilização dos mesmos.

O principal sistema de aproveitamento dos GAF é a utilização dos gases como combustível em um recuperador de calor. Após serem queimados, estes gases ainda podem ser reutilizados em um secador de minério. Outra utilidade para o GAF é a geração de energia elétrica.

2.5.1 Recuperadores de calor

A eficiência do processo de produção do ferro foi realçada pela prática de pré-aquecimento a explosão (pré-aquecimento do ar que é soprado no alto forno), patenteada por James Beaumont Neilson, em 1828, em Ironworks de Wilsontown, na Escócia. A intenção era ter um pré-aquecedor do ar de entrada no alto forno a partir da queima do gás emitido na produção do ferro gusa. Ou seja, o gás gerado na produção de ferro gusa é queimado em uma câmara de combustão dentro de um recuperador. O calor gerado pela queima do GAF é utilizado para pré-aquecer o ar em contra-corrente, que será insuflado no alto forno (pelas ventaneiras). Isso reduziu a quantidade de carvão requerida para fazer o ferro e aumentou a eficiência da produção (WORLDLINGO, 2011).

Caso o ar necessário à combustão fosse introduzido pelas ventaneiras do alto-forno à temperatura ambiente, uma maior quantidade de combustível, neste caso carvão vegetal, seria gasta para gerar o calor necessário para que estes gases atingissem a temperatura da região de queima. Utilizando-se uma parte dos gases de topo do alto-forno para ser queimado e aquecer o ar em contra-corrente, antes de soprá-lo pelas ventaneiras, obtém-se uma considerável economia de combustível sólido, o carvão vegetal (JÚNIOR, 2007).

O ar que será insuflado nas ventaneiras é pré-aquecido nos recuperadores a temperaturas da ordem de 500 C° a 1.200 C° (DE CASTRO et al., 2004).

Na obra de Kern (1987) intitulada “Processos de Transmissão de Calor”, uma riqueza de exemplos de recuperadores de calor, bem como suas características, tipos e aplicações e, sobretudo, o memorial de cálculos são apresentados de forma a mostrar a complexidade existente para o projeto dos mesmos. Vários fatores são considerados em um

recuperador de calor, entre eles o fator de incrustação, que contribui para diminuir a eficácia do equipamento.

O método de utilização dos GAF para o aquecimento do ar de sopro é feito em pré-aquecedores metálicos ou de alvenaria, com projeto exclusivo. As siderúrgicas utilizam dois tipos de equipamentos, os chamados glendons e os cowpers.

Glendons:

O glendon, equipamento mais utilizado nas siderúrgicas mineiras não integradas a carvão vegetal, é um recuperador de calor, destinado a pré-aquecer o ar que será soprado pelas ventaneiras no alto forno. Cada alto forno possui de dois a quatro módulos (glendons) operando em paralelo. O pré-aquecedor (glendon) consiste de um conjunto de tubos centrifugados de ligas especiais, chamados garrafas, soldados segundo método específico, sendo projetados para atingir temperaturas de sopro de até 900 °C – ver figuras 11 e 12. O combustível utilizado para o aquecimento do ar de sopro é o próprio gás gerado no alto forno (GAF). Os queimadores dos glendons são projetados para operar com o GAF e também com outro combustível auxiliar (lenha), necessário durante o início de funcionamento do alto forno. Quando o alto forno está começando a funcionar, o volume de GAF gerado ainda não é o suficiente para ser queimado nos glendons e assim aquecer o ar que será insuflado pelas ventaneiras.

Os recuperadores tipo glendon utilizam parte do gás que sai do topo do forno, após passarem pelo sistema de limpeza dos gases, para realizar o pré-aquecimento do ar de entrada no alto forno. Esse gás é queimado nos glendons ($\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$), enquanto que a tubulação com o ar a ser injetado no forno passa dentro do glendon, ocorrendo a troca de calor (PEREIRA, 2008).

Figura 11 – Recuperadores de calor tipo Glendon e Garrafas dos glendons.



Fonte: CHAVES, 2001 a 2012.

Figura 12 – Lateral do Glendon e Glendon em construção.



Fonte: CHAVES, 2001 a 2012.

A parte interna dos glendons possui, basicamente, uma câmara de combustão e uma área onde se localiza as fileiras de garrafas interligadas. Na parte externa das garrafas, o gás queimado, aquece as garrafas e o ar frio que passa dentro das garrafas se aquece. A Figura 13 mostra um esquema básico de funcionamento do glendon.

Figura 13 – Desenho esquemático do funcionamento dos glendons.



Fonte: (DE CASTRO et al., 2004).

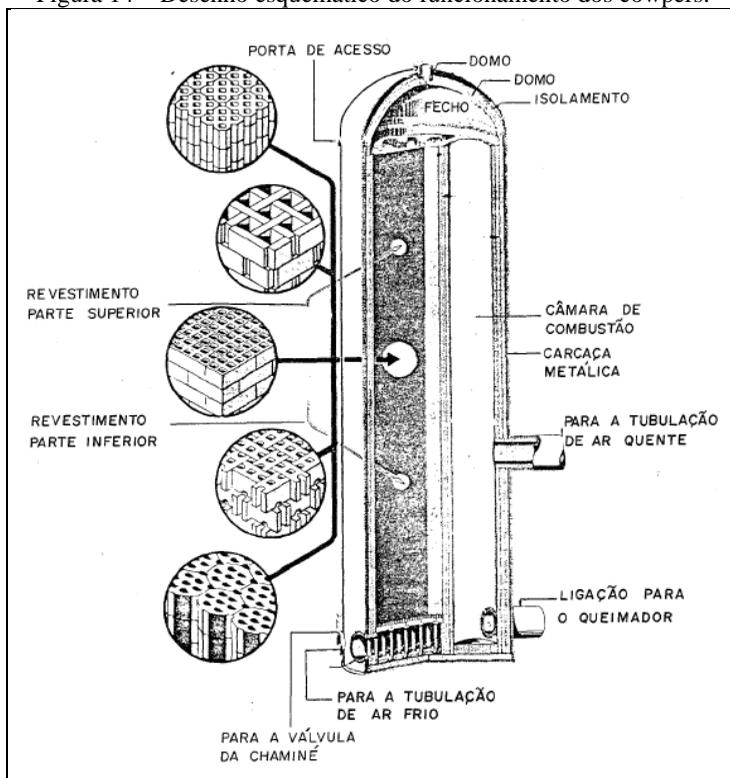
A queima do GAF possui duas finalidades: aquecer o ar a ser injetado e transformar monóxido de carbono em dióxido de carbono, amenizando a poluição liberada para o meio ambiente. Após ser queimado, o gás é liberado para atmosfera através da chaminé do glendon.

Cowpers:

A alternativa aos glendons são os recuperadores de calor tipo cowpers, capazes de atingir temperaturas de até 1.200 °C. Cumpre notar que a cada 100 °C a mais no sopro corresponde uma economia de 15 a 20 kg de carvão vegetal, por tonelada de gusa (MINITEC, 2009).

Os cowpers possuem uma carcaça cilíndrica de chapa metálica, revestida internamente de tijolos refratários. Em um dos lados existe a câmara de combustão, formando um ducto de seção redonda, onde é queimado o GAF em mistura com ar. O outro lado é formado por tijolos refratários empilhados de forma especial, proporcionando canais com o máximo de superfície de aquecimento, como demonstrado na Figura 14, a seguir (DE CASTRO et al., 2004).

Figura 14 – Desenho esquemático do funcionamento dos cowpers.

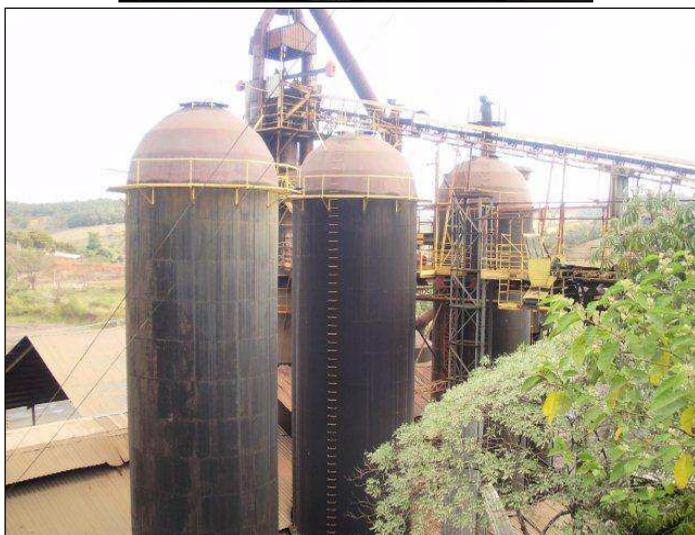


Fonte: (DE CASTRO et al., 2004).

Nas siderúrgicas mineiras não integradas os cowpers não são muito utilizados. Apesar de sua eficiência ser maior, o investimento na construção dos glendons é bem menor (DE CASTRO et al., 2004).

A Figura 15 mostra algumas fotos de cowpers implantados nas siderúrgicas mineiras não integradas.

Figura 15 – Cowpers.



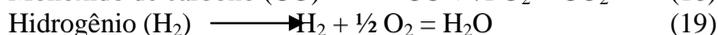
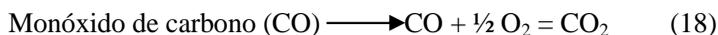
Fonte: CHAVES, 2001 a 2012.

2.5.2 Processo de queima do GAF

A queima ou combustão é uma reação química na qual os constituintes do combustível se combinam com o oxigênio do ar. Os combustíveis derivados do carvão e do petróleo são as principais fontes de energia.

A reação que ocorre na combustão é exotérmica (com liberação de calor).

No caso do gás gerado na produção de ferro gusa com carvão vegetal, as reações de combustão, dentro do recuperador de calor, são demonstradas conforme as equações 18, 19 e 20 a seguir:



2.5.3 Tocha

Após o sistema de tratamento das emissões atmosféricas no alto forno, parte do GAF é encaminhado para os glendons, para aquecimento do ar de sopro pelas ventaneiras e parte é descartado para a atmosfera, sendo encaminhado antes do descarte a um queimador do tipo tocha.

O excesso de gás será queimado numa tocha de alta eficiência. A operação de combustão ocorrerá sempre com excesso de ar, o que garantirá a queima do combustível presente no GAF, conforme descrito no item anterior. Após a queima, serão emitidos para atmosfera CO_2 , N_2 , O_2 , vapor de água e um mínimo de resíduos. Seguem abaixo, tochas instaladas nas siderúrgicas mineiras não integradas.

Figura 16 – Queimador tipo tocha (combustível - GAF).



Fonte: CHAVES, 2001 a 2012.

2.5.4 Secador de minério

O secador de minério é um equipamento utilizado para evitar o enforamento de carga úmida ou molhada, ou seja, economia de energia.

Os gases de combustão resultantes da queima dos GAF nos glendons para pré-aquecer o ar insuflado no alto forno, normalmente são eliminados pela chaminé a uma temperatura aproximada de 450°C. O secador de minério consiste em captar esse gás (gás queimado), através de um sistema de exaustão acoplado à chaminé dos glendons e encaminhá-lo ao silo de minério. Com isso, os gases de combustão percorrem a pilha de minério, de baixo para cima, a uma temperatura aproximada de 200°C, retirando umidade. Para ilustrar este ponto, segue abaixo, imagens de uma tubulação introduzindo o gás advindo da chaminé dos glendons nos silos de minério.

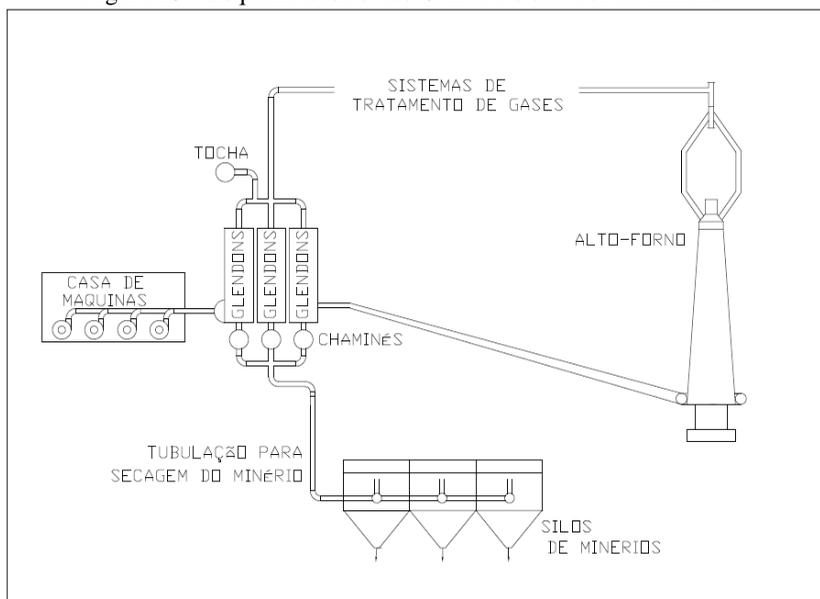
Figura 17 – Tubulação do secador de minério.



Fonte: CHAVES, 2001 a 2012.

O gás proveniente da produção de ferro gusa sai no topo do alto forno, passa por um sistema de tratamento, que será descrito ao longo do estudo. Ele passa pelos glendons e uma parte dele, ao invés de ser descartado na atmosfera, é encaminhado até os silos de minério. Estes, por sua vez precisam estar cheios para que o gás passe através dos minérios, retirando a umidade e liberando vapor, conforme demonstrado no esquema a seguir.

Figura 18 – Esquema básico dos GAF até o secador de minério.



Fonte: Autor.

2.6 Tratamento e controle das emissões atmosféricas dos altos fornos das siderúrgicas não-integradas a carvão vegetal

Com a evolução dos mecanismos de aproveitamento dos GAF, o tratamento desses gases também ficou mais eficiente, com a implantação de equipamentos de controle de maior tecnologia, reduzindo as emissões de poluentes.

Os gases provenientes do alto forno arrastam consigo uma grande quantidade de material particulado, sendo necessário um tratamento prévio antes de serem aproveitados nos recuperadores de

calor, em outros sistemas na usina, em um sistema de geração de energia elétrica ou até mesmo para serem descartados na atmosfera.

O tratamento de um gás pode ser feito por uma série de equipamentos projetados especificamente. A escolha do equipamento de controle que melhor cumprirá essa função de coleta do poluente nem sempre é um problema de simples solução, tendo-se em vista o número de fatores intervenientes (MESQUITA et al., 1977).

Os sistemas básicos utilizados na limpeza do GAF nas siderúrgicas não integradas, a carvão vegetal, pelos produtores de ferro gusa, podem ser divididos em dois, sendo um por via úmida e outro pela via seca.

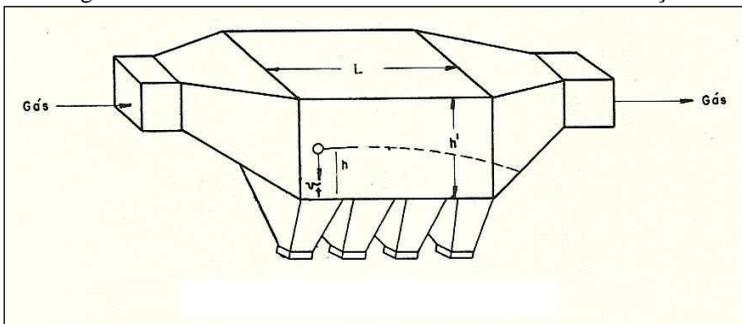
2.6.1 Equipamentos para tratamento dos GAF

Os equipamentos de controle utilizados pelas siderúrgicas não-integradas em Minas Gerais, na limpeza dos GAF, são: balão, ciclone, multiciclone, lavador de gás e desumidificador. Todos esses equipamentos possuem projetos específicos e serão comentados na sequência.

Balão gravimétrico:

Esse tipo de equipamento é uma câmara gravitacional/sedimentação. O fluxo gasoso tem sua velocidade reduzida, depositando as partículas mediante a força da gravidade. Existem as câmaras de sedimentação do tipo Howard onde são colocadas bandejas no seu interior, diminuindo a altura da queda das partículas, porém dificultando a limpeza (MESQUITA et al., 1977).

Figura 19 – Câmara Gravitacional ou câmara de sedimentação.



Fonte: MESQUITA et al., 1977, p. 346

O nome balão gravimétrico é devido ao fato que a câmara de sedimentação utilizada nas siderúrgicas não integradas de Minas Gerais possui um formato de balão. A Figura 20 apresenta algumas fotos de balões gravimétricos.

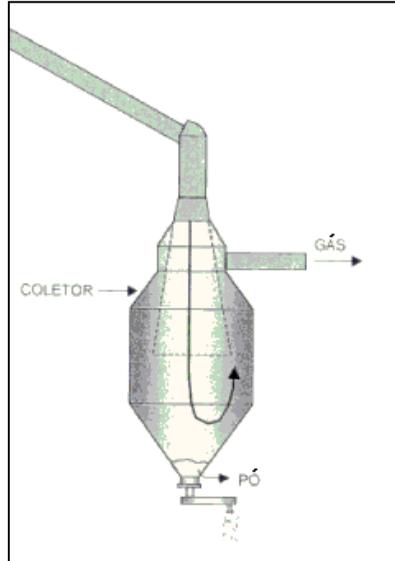
Figura 20 – Balões gravimétricos instalados nas siderúrgicas na integradas de Minas Gerais.



Fonte: CHAVES, 2001 a 2012.

O fluxo gasoso sai do topo do alto forno e percorre uma tubulação a uma velocidade especificada pelo projetista (entre 15 m/s a 22 m/s). Ao entrar no balão gravimétrico perde velocidade, por ter sua área de confinamento expandida. As partículas presentes no gás sofrem a força da gravidade, vindo a depositar-se no fundo. O esquema a seguir ilustra o funcionamento do balão.

Figura 21 – Esquema de funcionamento do balão gravimétrico.



Fonte: DE OLIVEIRA e MARTINS (2012).

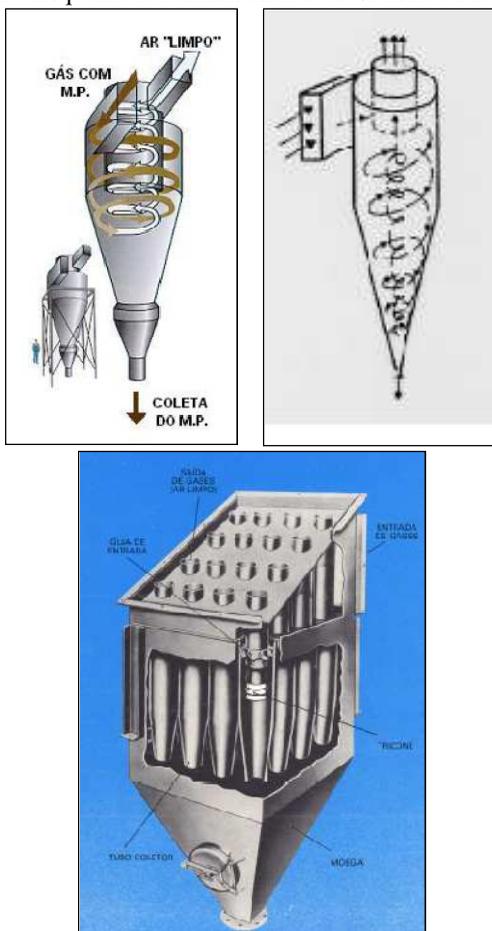
Ciclone e Multiciclone:

Os ciclones são coletores centrífugos basicamente constituídos por uma câmara cilíndrica com base cônica onde as partículas são removidas do fluxo gasoso pela ação da força centrífuga. A corrente gasosa entra tangencialmente a alta velocidade na câmara, formando uma espiral descendente externa até a base e uma espiral ascendente interna para descarregar o fluxo. O gás é descarregado axialmente pela saída, localizada no topo do ciclone. A aceleração centrífuga impulsiona as partículas contidas no gás contra a parede do corpo cilíndrico do ciclone. A componente vertical da força e a gravidade forçam-nas para a parte inferior do ciclone, de onde elas vão para um local de armazenamento (GALVÃO FILHO, 2012).

O arranjo de vários ciclones simples em paralelo constitui uma unidade chamada multiciclone. Através deste artifício um grande volume de ar pode ser tratado utilizando-se unidades de pequenos diâmetros com grande aceleração centrífuga associada, resultando em maior eficiência de captação do que num ciclone convencional.

A Figura 22, a seguir, ilustra o funcionamento dos ciclones e multiciclones.

Figura 22 – Esquema de funcionamento do Ciclone e Multiciclone.



Fonte: DE MELO LISBOA e SCHIRMER (2007)

A utilização do ciclone ou multiciclone está vinculada à temperatura de emissão do gás no topo do alto forno, pois se a temperatura do GAF estiver abaixo de 80 °C o alcatrão contido no gás pode condensar e entupir o equipamento. Por isto, quando se usa um ciclone ou multiciclone como um equipamento de controle para o GAF é muito importante ter equipamentos de controle de temperatura do gás para que o alcatrão não condense. Esse alcatrão será retirado, então, no lavador de gás.

Figura 23 – Ciclone e Multiciclone instalado nas siderúrgicas mineiras não integradas.



Fonte: CHAVES, 2001 a 2012.

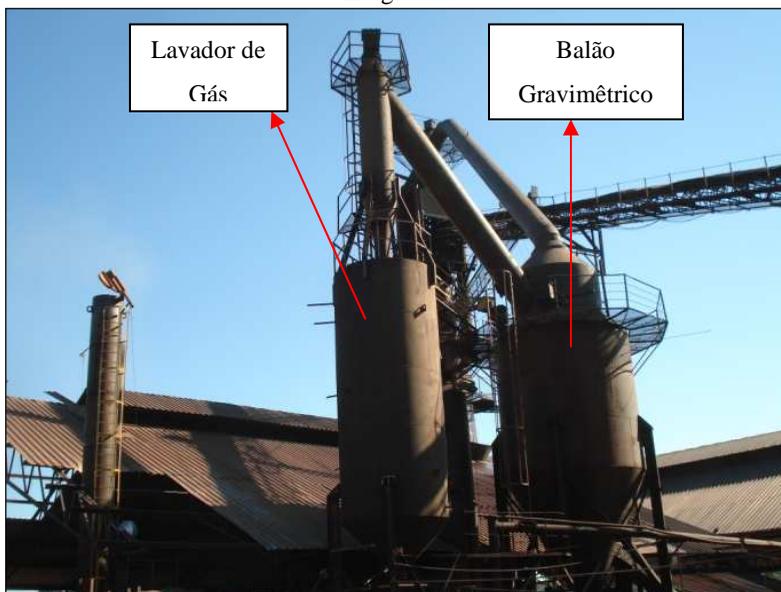
Lavador de gás:

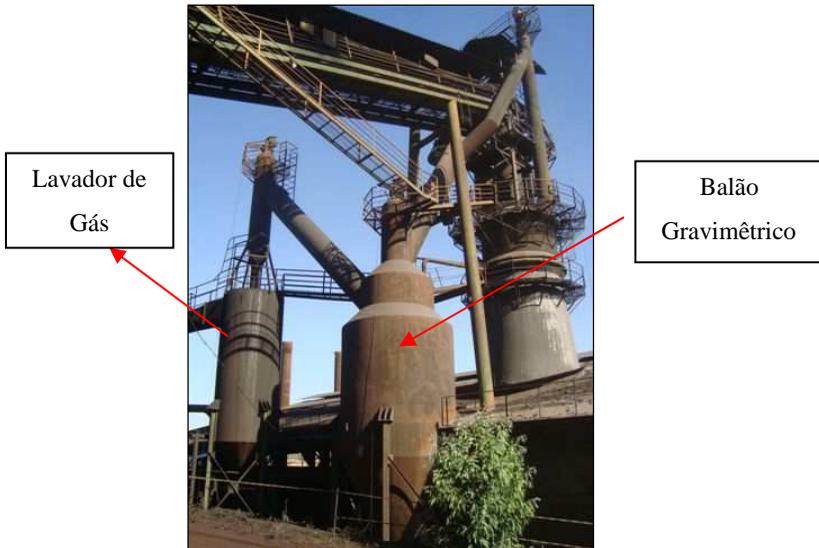
São muitos os tipos de lavadores disponíveis para as várias necessidades de controle da poluição do ar. Entre eles, o Lavador Venturi destaca-se por ser capaz de coletar particulado mais fino.

Segundo Malard (2009) apenas cinco dos 84 lavadores de gases existentes nas usinas siderúrgicas mineiras não integradas não são do tipo Venturi, e sim do tipo torre de spray.

No Lavador Venturi o fluxo gasoso tem sua velocidade aumentada ao passar através de uma garganta, onde água é injetada e atomizada pela alta velocidade do gás (MESQUITA et al., 1977). A imagem a seguir mostra um sistema composto de balão gravimétrico e em seguida um lavador de gás tipo Venturi.

Figura 24 – Lavadores de gases instalados nas siderúrgicas mineiras não integradas.

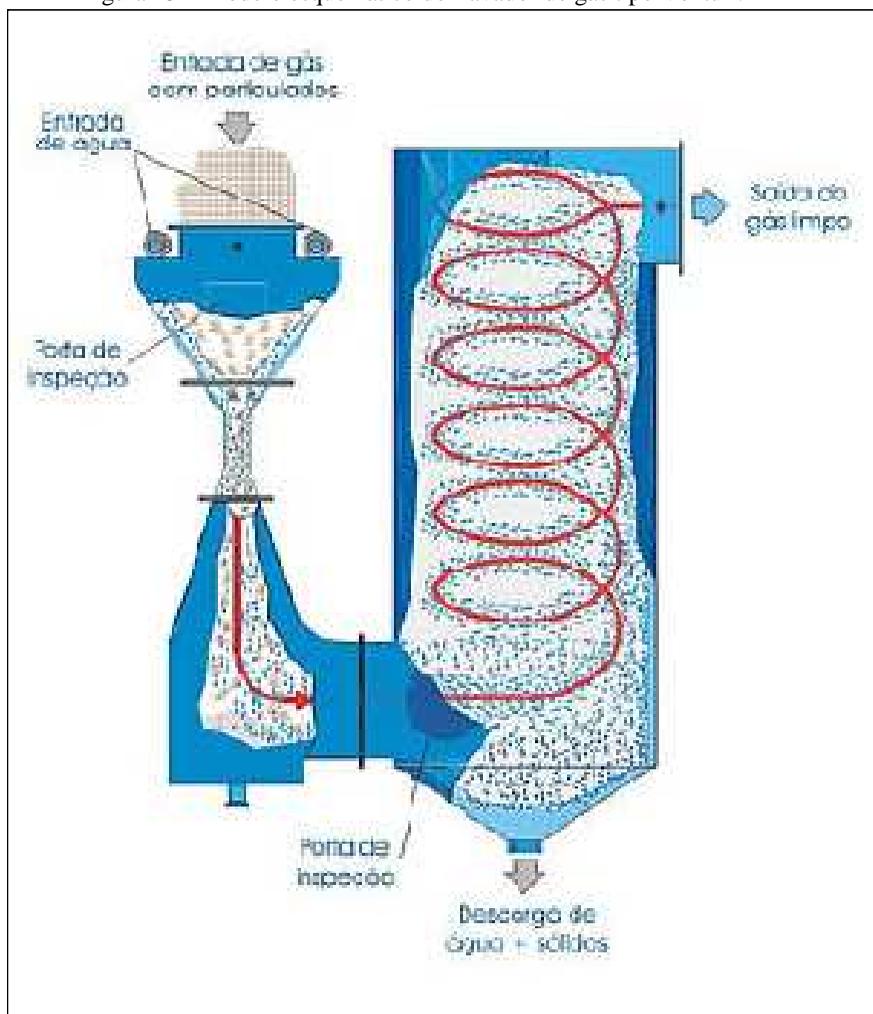




Fonte: CHAVES, 2001 a 2012.

Para entender melhor o do sistema de lavador de gás tipo Venturi, a Figura 25, a seguir, ilustra o funcionamento desse equipamento.

Figura 25 – Modelo esquemático do Lavador de gás tipo Venturi.



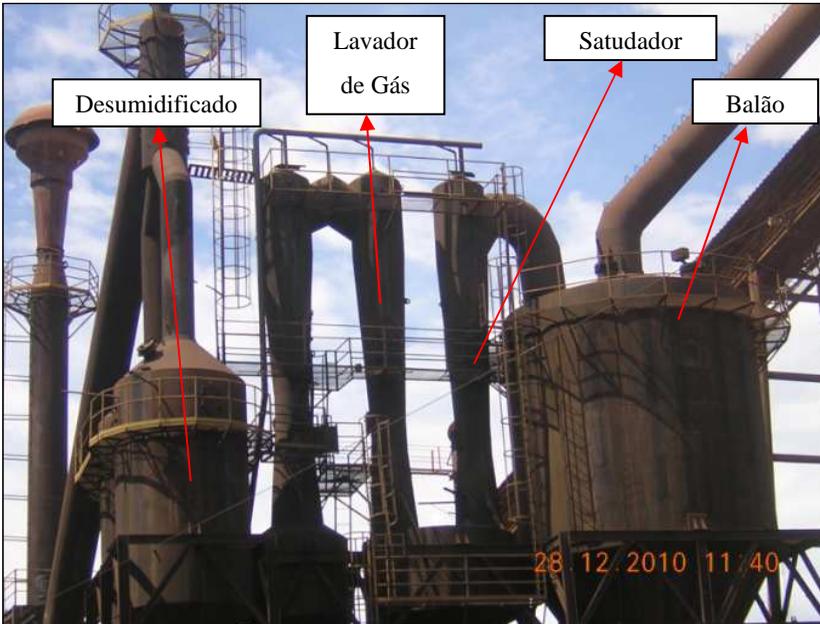
Fonte: DE MELO LISBOA e SCHIRMER (2007)

Desumidificador:

Com o processo do lavador utilizando água atomizada, o gás carrega um grande volume de água com partículas captadas nas suas gotículas, geradas no lavador. Estas partículas devem ser retiradas do fluxo gasoso para que não sejam incorporadas novamente ao efluente atmosférico. O equipamento utilizado para este fim é o desumidificador.

Qualquer que seja o tipo de desumidificador adotado, a sua função é de impactar o fluxo gasoso, com grande umidade, na parede do desumidificador e fazer com que as gotas de água fiquem retidas nas paredes, liberando o gás com baixa umidade. A figura 26 mostra a foto de um sistema implantado com balão gravimétrico, saturador (lavador de baixa eficiência), lavador de gás tipo Venturi e um desumidificador – Figura 26.

Figura 26 – Desumidificador instalado nas siderúrgicas mineiras não integradas.



Fonte: CHAVES, 2001 a 2012.

Os desumidificadores utilizados nas siderúrgicas mineiras não integradas parecem muito com um ciclone, inclusive o esquema de funcionamento.

2.6.2 Eficiência de remoção de material particulado

A principal utilização dos equipamentos de controle citados no item anterior se deve a remoção do material particulado presente no gás de alto forno. Como pode-se ver no Quadro 8, a seguir, cada equipamento possui sua peculiaridade em relação à remoção de particulados.

No caso do gás do alto forno o equipamento que proporciona melhor resultado é o lavador Venturi, que utiliza via úmida para remoção de particulados. No entanto esse acaba gerando efluente líquido, que precisa ser tratado antes do descarte ou reutilização.

Quadro 8 – Eficiência fracionada de coletores de material particulado em função da distribuição de tamanho das partículas (em porcentagens).

Tipo de equipamento	Diâmetro (μm)				
	0 → 5	5 → 10	10 → 20	20 → 44	> 44
Câmara de sedimentação (com chicanas)	7,5	22,0	43,0	80,0	90,0
Ciclone de baixa pressão	12,0	33,0	57,0	82,0	91,0
Ciclone de alta pressão	40,0	79,0	92,0	95,0	97,0
Multiciclone	25,0	54,0	74,0	95,0	98,0
Filtro de tecido	99,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Lavador Venturi (lavador de alta energia)	95,0	99,5	100,0	100,0	100,0

Fonte: CETESB, 1987, apud DE MELO LISBOA e SCHIRMER, 2007

É muito importante a escolha do equipamento certo para cada situação, sabendo que antes de qualquer escolha não só a faixa granulométrica para o respectivo grau de limpeza desejado deve influenciar na decisão, mas também as características do poluente.

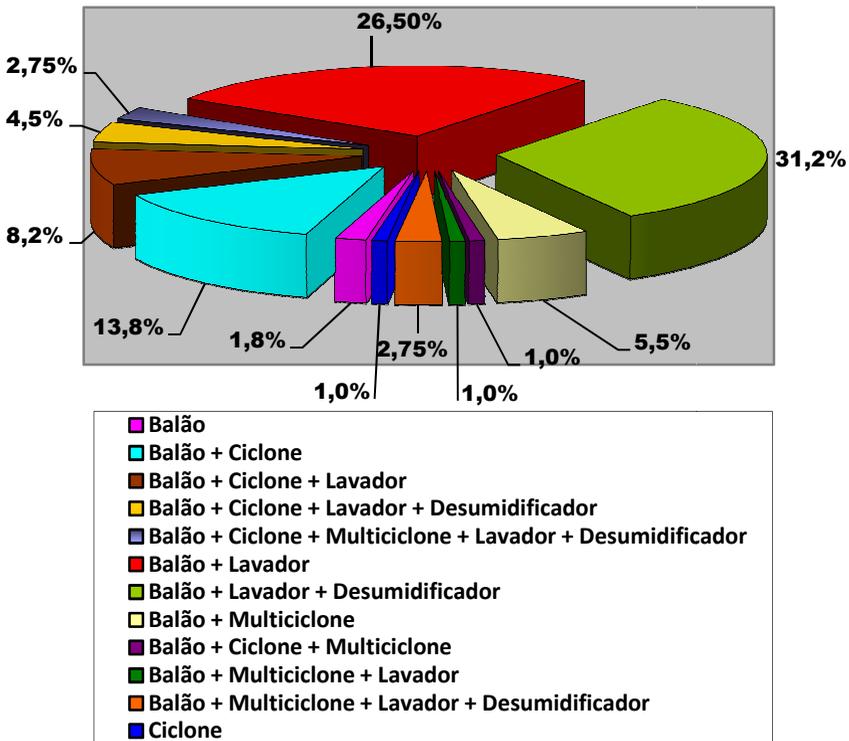
2.6.3 Sistemas de controle de GAF implantados nas siderúrgicas mineiras não integradas

Em Minas Gerais, 48 siderúrgicas não-integradas têm dispositivos de limpeza dos gases de alto-forno por via úmida, enquanto vinte trabalham com coletores a seco. Todas as empresas utilizam o

coletor gravitacional como primeiro estágio para captura de partículas de diâmetros maiores (MALARD, 2009).

Segue um gráfico identificando os sistemas de controle dos gases de alto forno implantados nas siderúrgicas mineiras não integradas.

Gráfico 1 – Sistema de limpeza dos GAF por número de altos fornos em siderúrgicas não integradas de Minas Gerais.



Fonte: MALARD, 2009, p. 39

2.7 Geração de energia elétrica na siderurgia

Além do aproveitamento nos sistemas de pré-aquecimento do ar que é soprado nos Altos Fornos, o gás emitido na produção do ferro gusa também pode ser utilizado para a geração de energia elétrica.

O desenvolvimento de sistemas de energias sustentáveis tem sido objeto de empresas do setor siderúrgico brasileiro. As intensificações da eficiência energética e da geração de energia elétrica apresentam-se como estratégias complementares na busca da sustentabilidade da usina em nível energético (MACIEL, 2008).

Após o tratamento das emissões atmosférica do Alto Forno e a utilização de parte dos gases nos recuperadores de calor, a viabilidade de utilização do restante do GAF na geração de energia elétrica é um caminho de enorme importância para as siderúrgicas, considerando o desperdício energético com o descarte do GAF para atmosfera.

Atualmente, em torno de 20% das siderúrgicas mineiras não integradas possuem sistema de geração de energia elétrica.

2.7.1 Cogeração

O conceito de cogeração pode variar segundo o enfoque do processo.

Melhor definida na língua inglesa como CHP (combined heat and power – produção combinada de calor e potência), a cogeração é usualmente entendida como a geração simultânea, e combinada, de energia térmica e energia elétrica ou mecânica, a partir de uma mesma fonte (BRASIL, 2005).

O Plano Decenal de Expansão 1999/2008 da ELETROBRÁS (1999) apresenta a seguinte definição: “Cogeração é a geração simultânea de energia elétrica e energia térmica para calor de processo a partir de uma única fonte de energia”.

Já o Plano Decenal de Expansão 2000/2009 (ELETROBRÁS, 2000) apresenta outra definição: "A cogeração é o processo de produção simultânea de energia térmica para calor de processo e energia elétrica ou mecânica a partir de um combustível.”

Na Resolução Normativa ANEEL n.º 235, de 14 de Novembro de 2006, que estabelece os requisitos necessários à qualificação de centrais termelétricas cogedoras de energia, está definido: “Cogeração - processo operado numa instalação específica para fins da produção combinada das utilidades calor e energia mecânica, esta geralmente convertida total ou parcialmente em energia elétrica, a partir da energia disponibilizada por uma fonte primária”.

Poulallion e Corrêa (2000) definem: “Central de cogeração é uma unidade de produção associada de energia mecânica e térmica, sendo a energia mecânica utilizada diretamente em acionamento (compressor, bomba, soprador, moenda, etc.) ou para sua conversão em

energia elétrica (gerador elétrico) para uso final (motor elétrico, eletrotermia, eletroquímica, etc.).”

Cogeração pode ser considerado um ciclo onde ocorre produção simultânea e sequencial de energia elétrica e/ou mecânica e energia térmica (calor) a partir de uma única fonte de energia, utilizando, assim, de maneira mais eficiente o combustível proposto (KHARTCHENKO, 1997).

Segundo Marçal et al. (2010) “A história da cogeração tem início na Europa durante o século XIX e, de certa forma, se deve em muito à invenção e utilização de geradores de eletricidade concebidos por Michael Faraday, em 1831”.

Os primeiros sistemas de cogeração instalados ao redor do mundo datam da primeira década do século XX. Nessa época, era muito rara a produção centralizada de energia elétrica. Ainda não existiam as grandes centrais geradoras pela inexistência de uma tecnologia eficiente. Era comum o próprio consumidor de energia elétrica instalar sua própria central de geração de energia. Esta situação perdurou até a década de 40 (COGEN, 2012).

Com o avanço da tecnologia surgiram novos conceitos de geração e de interligação de sistemas elétricos, otimizados de forma centralizada que, com o apoio das grandes centrais (hidrelétricas e termelétricas – nucleares, carvão, gás natural e óleo combustível), conseguiam fornecer energia abundante e de baixo custo. Os sistemas de cogeração foram então, gradualmente, perdendo participação no mercado (COGEN, 2012).

No entanto, nas últimas décadas os setores energéticos passaram a conviver com dificuldades de assegurarem o abastecimento de energia elétrica, em quantidade e qualidade compatível com o ritmo de crescimento econômico.

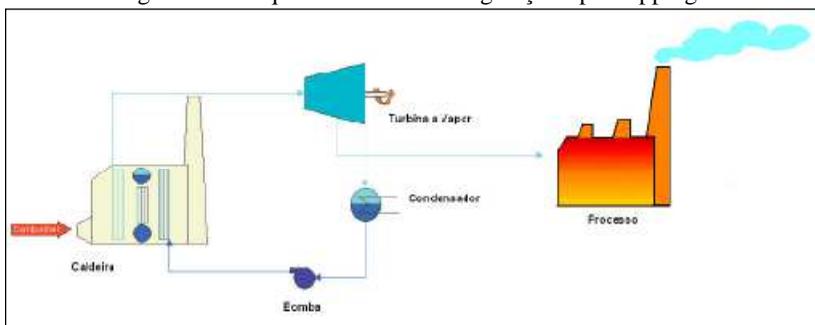
A demanda de energia elétrica no Brasil vem crescendo junto com a economia do país. Grandes investimentos para aumentar a capacidade instalada de energia estão se fazendo necessário.

Ciclos da Cogeração: Topping e Bottoming

A sequência de utilização da energia em sistemas de cogeração, seja ela proveniente de um combustível utilizado em uma máquina térmica ou de um processo industrial em que energia térmica é um rejeito, permite a classificação das configurações topping (em português, denominado montante) e bottoming (jusante) (ARONGAUS, 1996).

Na configuração Topping o combustível é queimado primeiramente em uma máquina térmica para produção de energia mecânica ou elétrica e o calor rejeitado é utilizado sob a forma de calor útil em um processo. O calor fornecido pode ser usado em processos variados para aquecimento e refrigeração.

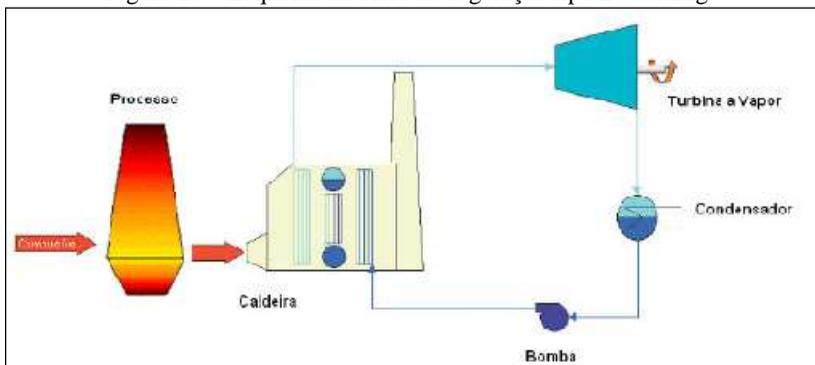
Figura 27 – Esquema do ciclo de cogeração tipo Topping.



Fonte: ROMEIRO, 2008.

Na configuração Bottoming a energia térmica rejeitada de processos industriais, normalmente através de gases de exaustão provenientes de reações químicas, fornos, fornalhas ou mesmo de uma máquina térmica, é aproveitada em caldeiras recuperadoras para gerar vapor. Este vapor será utilizado como fluido de acionamento em um turbogerador para produzir energia mecânica.

Figura 28 – Esquema do ciclo de cogeração tipo Bottoming.



Fonte: ROMEIRO, 2008.

2.7.2 Diferença entre termelétrica e cogeração

A diferença entre a cogeração e a termelétrica é que na cogeração ocorre, além da geração de energia elétrica, um aproveitamento do calor residual do processo de produção de energia elétrica. O calor residual pode ser utilizado em qualquer local onde se necessita de calor ou de frio.

A termelétrica produz calor e joga fora para o meio ambiente e a cogeração aproveita esse calor.

As usinas geradoras de energia elétrica implantadas nas siderúrgicas mineiras não integradas a carvão vegetal não aproveitam o calor residual gerado na produção de energia elétrica, sendo, portanto consideradas usinas termelétricas.

2.7.3 Termelétrica nas siderúrgicas mineiras não-integradas a carvão vegetal através da utilização do gás de alto forno

Chama-se termelétrica por que é constituída de duas partes, uma térmica, onde se produz muito vapor a altíssima pressão e outra elétrica, onde se produz a eletricidade (WIKIPÉDIA^E, 2012).

O funcionamento das centrais termelétricas são todos semelhantes, independentemente do combustível utilizado o processo consiste em três etapas, conforme demonstrado a seguir:

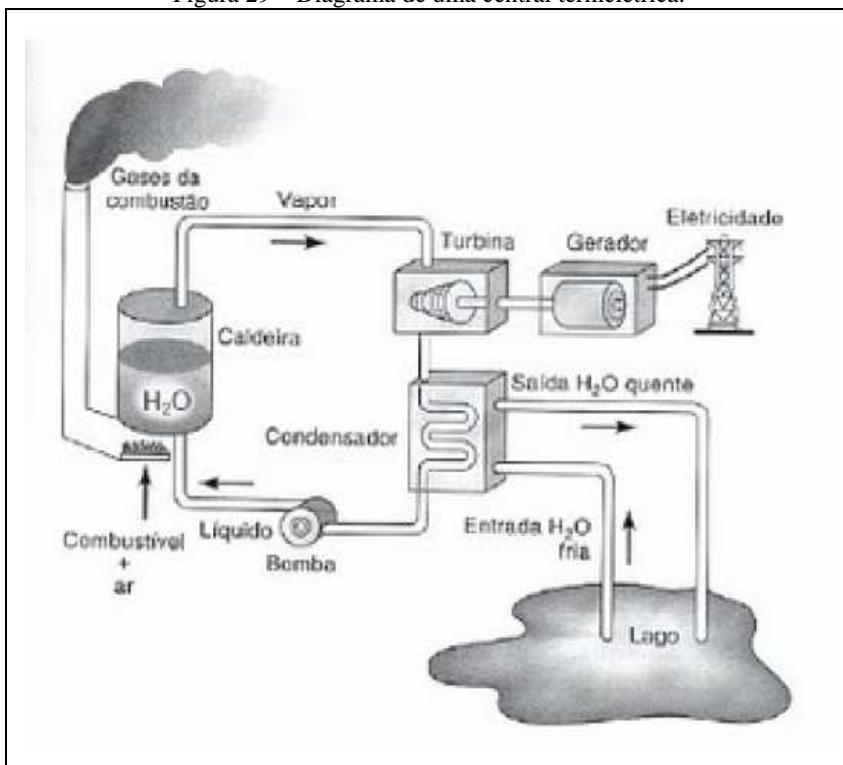
A primeira etapa consiste na queima de um combustível. No caso das siderúrgicas, o combustível é o gás de alto forno, transformando a água em vapor com o calor gerado na caldeira.

A segunda etapa consiste na utilização deste vapor, em alta pressão, para girar a turbina, que por sua vez, aciona o gerador elétrico.

Na terceira etapa, o vapor é condensado, transferindo o resíduo de sua energia térmica para um circuito independente de refrigeração, retornando a água à caldeira, completando o ciclo (PINTO, 2008).

A Figura 29, a seguir, demonstra o processo básico de uma usina termelétrica.

Figura 29 – Diagrama de uma central termelétrica.



Fonte: BAMBIL; MARQUES, 2011.

O gás gerado na produção de ferro gusa pode ser utilizado na produção de eletricidade, suprimindo assim, parte ou total consumo de energia elétrica da planta siderúrgica e ajudando na redução do custo operacional do processo. Porém, é importante que sejam utilizados da melhor maneira possível, isto é, proporcionando o maior nível de eficiência possível.

Segue abaixo, uma foto de uma usina termelétrica construída em uma siderúrgica mineira que utiliza o GAF como combustível para caldeira - Figura 30.

Figura 30 – Central Termelétrica implantada em uma siderúrgica mineira.



Fonte: CHAVES, 2001 a 2012.

Segundo a ANEEL (2006), “as tecnologias existentes para centrais termelétricas, exceto as de cogeração, não apresentam eficiência energética superior a setenta e cinco por cento”.

2.7.4 Legislação para produção de energia

Até o início da década de 1980 a legislação referente à auto-produção de energia elétrica era genérica e não viabilizava uma maior produção. Além disso, não havia distinção entre a cogeração e a geração exclusiva de eletricidade (VELÁZQUEZ, 2000).

Somente em julho de 1995 é criada uma lei que trata da produção independente de energia elétrica. Essa lei garante o uso das redes de distribuição e transmissão mediante pagamento definido pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) (VELÁZQUEZ, 2000).

2.8 Redução de impactos ambientais

O processo produtivo do ferro gusa se baseia na redução do ferro, na presença de fundentes e de um agente redutor (carvão vegetal), dentro de um alto forno. Ali ocorrem reações químicas e transformações físicas que além do ferro gusa gera escória e o gás de alto forno. A captação do gás gerado é de muita importância para o meio ambiente, ocasionando grandes impactos ambientais, caso não sejam adotadas as medidas mitigadoras adequadas.

A poluição atmosférica nas siderúrgicas caracteriza-se basicamente pela presença de partículas sólidas no ar e emissão de CO₂. A presença desses agentes no ar pode provocar danos diretamente na saúde humana e no meio ambiente, tendo ação direta no aquecimento global e sendo responsável pela degradação do ecossistema.

No caso dos metais pesados, o volume gerado no GAF é desprezado, considerando que quase não possui metais pesados no gás. Os metais pesados são retirados através da escoria na produção do ferro gusa e no sistema de tratamento dos gases.

Os gases gerados pelos Altos-Fornos durante a produção do ferro-gusa devem ser tratados antes de serem utilizados em recuperadores de calor, sistemas de geração de energia elétrica ou até mesmo para serem descartados na atmosfera. O tratamento e a utilização do GAF minimiza a emissão de poluentes no meio ambiente e ainda reduz o consumo de energia da usina.

O impacto ambiental relacionado às emissões das usinas siderúrgicas não integradas acontece nas cidades e as margens das rodovias, já que a maioria das indústrias siderúrgicas está localizada na zona urbana. Sendo assim, uma maior atenção à saúde humana e ao meio ambiente precisam ser tomadas.

Após os equipamentos de controle instalados, monitoramentos frequentes são realizados.

A cogeração tem sido considerada uma solução energética benéfica para o meio ambiente, na medida em que:

- o sistema de tratamento dos gases gerados precisa ter um eficiência considerável para o bom funcionamento do sistema de geração de energia (elétrica + térmica);
- se torna economicamente viável utilizando o gás de alto forno como combustível;

- os sistemas tradicionais existentes no Brasil, aproveitam resíduos que impactariam negativamente o meio ambiente se despejados sem serem queimados;
- no setor siderúrgico, a utilização do GAF, significa a queima de combustível renovável, cujo dióxido de carbono lançado como produto da queima é recapturado pelo replantio de eucalipto (carvão), evitando o aumento do efeito estufa;
- a utilização da energia térmica na usina;
- menor consumo de energia elétrica.

A gestão ambiental adequada do gás de alto forno pode ser definida como um conjunto de ações encaminhadas à obtenção da máxima racionalidade no processo de decisão, relativa à conservação, defesa, proteção e melhoria do meio ambiente, baseando-se em uma ação multidisciplinar coordenada e na participação dos cidadãos (MOURÃO et al., 2007).

3 MATERIAIS E MÉTODO

Os materiais e método necessários para alcançar os objetivos propostos nesta dissertação foram desenvolvidos conforme descrito.

A caracterização do GAF da Citygusa Siderurgia Ltda. e sua geração foram feitas através de análise laboratorial do efluente atmosférico e levantamentos com pesquisas na empresa.

Foram realizados levantamentos dos sistemas de tratamento utilizados para o desempoeiramento do GAF da Citygusa Siderurgia Ltda. As tecnologias utilizadas no reaproveitamento do GAF foram investigadas através de pesquisa em campo e material fotográfico.

Uma proposição de melhorias no sistema de tratamento dos efluentes atmosféricos da Citygusa Siderurgia Ltda e no sistema de utilização do gás foi proposta nessa dissertação com o intuito de implantar um sistema de geração de energia elétrica na empresa.

Em primeiro lugar será caracterizado a atual situação da usina Citygusa; dados do efluente atmosférico; sistemas de controle utilizados atualmente; e sistemas de aproveitamento do GAF.

Em segundo lugar, através de análises realizadas na emissão atmosférica, serão realizados cálculos da eficiência de controle do material particulado para posteriormente propor melhorias para o sistema aproveitamento do GAF; melhorias para o sistema de tratamento do efluente atmosférico; modificações necessárias para o funcionamento dos sistemas e futura implantação de um sistema de geração de energia elétrica.

Por último, o levantamento dos custos das alterações propostas e a viabilidade dessas modificações.

3.1 Características do GAF da Citygusa Siderurgia Ltda.

Para o primeiro objetivo específico o GAF da Citygusa será quantificado e caracterizado conforme descrito a seguir.

Como já descrito no Item 2.4 dessa dissertação, o gás do alto forno é gerado durante o processo de produção do ferro gusa.

3.1.1 Produção do gás de alto forno

A produção de ferro gusa da Citygusa não varia tanto ao longo do tempo, portanto, alguns meses seriam necessários para ter uma estimativa da media de produção para calcular-se a geração do GAF da empresa.

Foi montado um quadro da produção mensal de ferro gusa da usina Citygusa, conforme mostrado a seguir.

Quadro 9 – Produção de ferro gusa da Siderúrgica Citygusa.

Mês	Produção de Ferro Gusa	Média por dia
Janeiro 2012	5.589,96 toneladas/mês	186,33
Fevereiro 2012	5.790,96 toneladas/mês	193,03
Março 2012	5.901,80 toneladas/mês	196,72
Abril 2012	5.705,26 toneladas/mês	190,17

Fonte: CHAVES, 2012.

A média da produção de ferro gusa, da usina siderúrgica não integrada Citygusa, é de 191,56 toneladas por dia.

Conforme citado no Item 2.4.1, a geração de gás de alto forno gira em torno de 2.000 Nm³ por tonelada de ferro gusa produzido.

3.1.2 Composição do gás do alto forno

A composição do gás gerado na produção de ferro gusa em um alto forno a carvão vegetal não varia muito da apresentada no subitem 2.4.2. No entanto, essa composição depende das características das matérias primas enforçadas para a produção.

A qualidade das matérias primas enforçadas no alto forno da Citygusa varia de acordo com os fornecedores, preços e da época do ano. Porém, a composição em volume do gás gerado não foge das variações dos valores apresentados no quadro a seguir, conforme análises realizadas pela empresa.

Quadro 10 – Composição média do GAF da Citygusa.

Componentes	Porcentagem (%)
CO	24-25
CO ₂	15-18
H ₂	5-6
CH ₄	1
N ₂	53-54

Fonte: CHAVES, 1999.

3.1.3 Material particulado do gás do alto forno

Conforme análise feita em laboratório, no gás do topo do alto forno da Citygusa, o material particulado presente no gás é composto basicamente por: 56 % de Fe, 7% de SiO₂, 2 % de Al₂O₃, 6 % de CaO e 29 % de finos de carvão vegetal.

As características do gás, com a distribuição granulométrica da poeira dos Gases do Alto Forno da Citygusa, de acordo com medições efetuadas através de coleta de material particulado na saída dos gases do Alto Forno, são apresentadas no quadro a seguir. Os valores correspondem à distribuição mais rigorosa de uma série de medidas efetuadas.

Quadro 11 – Faixa granulométrica do GAF da Citygusa.

Tamanho (μm - micrometros)	Porcentagem (%) abaixo
180	100
103	97,7
48,7	88,0
30,5	76,5
21,0	65,7
10,9	44,1
5,17	21,1
3,24	12,3
2,03	7,2
1,06	3,5
0,50	0,8

Fonte: CHAVES, 1999.

A concentração máxima de particulados, medida na saída do topo do alto forno da Citygusa foi de 17,3 g/Nm³, para uma vazão de 13.841 Nm³/h, conforme análise realizada para o RCA – Relatório de Controle Ambiental (CHAVES, 1999).

3.1.4 Utilização do GAF

O levantamento dos sistemas de utilização do GAF presentes na Citygusa Siderurgia Ltda faz parte do segundo objetivo específico.

Após o GAF ser gerado na produção de ferro gusa, uma tubulação no topo do alto forno conduz esse gás para um sistema de

tratamento. Saindo do sistema de tratamento esse gás é atualmente utilizado pela siderúrgica Citygusa nos glendons (descrito no item 2.5.1). A imagem a seguir mostra a tubulação que sai do topo do alto forno até o sistema de tratamento.

Figura 31 – Tubulação conduzindo o GAF.



Fonte: CHAVES, 2001 a 2012.

Após o sistema de tratamento, parte do gás é aproveitada no processo e parte, atualmente, é descartada para atmosfera após sua queima em uma tocha.

A proporção de gás que é aproveitada, em relação à parte que é perdida, tem uma variação enorme de empresa para empresa. A maioria delas não controla essa relação e, por isso, têm-se dados com enorme margem de diferença, variando de 20% a 80% (JACOMINO et al., 2002).

O aproveitamento do GAF nas usinas siderúrgicas mineiras não integradas varia entre 40% e 60%, conforme pesquisa realizada entre as siderúrgicas mineiras não integradas (CHAVES, 2011). Na usina Citygusa, o aproveitamento do GAF equivale a 40% do gás gerado, o restante é queimado em uma tocha (Item 2.5.3), tendo, assim, o poder calorífico desperdiçado e descartado na atmosfera.

3.2 Composição dos sistemas de tratamento de emissões atmosférico da Citygusa Siderurgia Ltda.

Antes de ser lançado para a atmosfera ou utilizado em algum processo, o GAF precisa ser tratado. É fundamental que o gás do alto forno seja preparado para sua utilização em equipamentos do tipo recuperadores de calor e em usinas termelétricas.

O segundo objetivo específico contempla também o levantamento do atual sistema de tratamento do GAF da Citygusa.

Atualmente, a Citygusa siderurgia possui um sistema de tratamento composto por um ciclone de baixa eficiência, multiciclone e outro ciclone de baixa eficiência. Após esse sistema parte do gás é direcionado para os glendons e a outra parte para um queimador (tocha).

O primeiro ciclone de baixa eficiência, da Citygusa, equivale a uma câmara de sedimentação, estilo um balão gravimétrico.

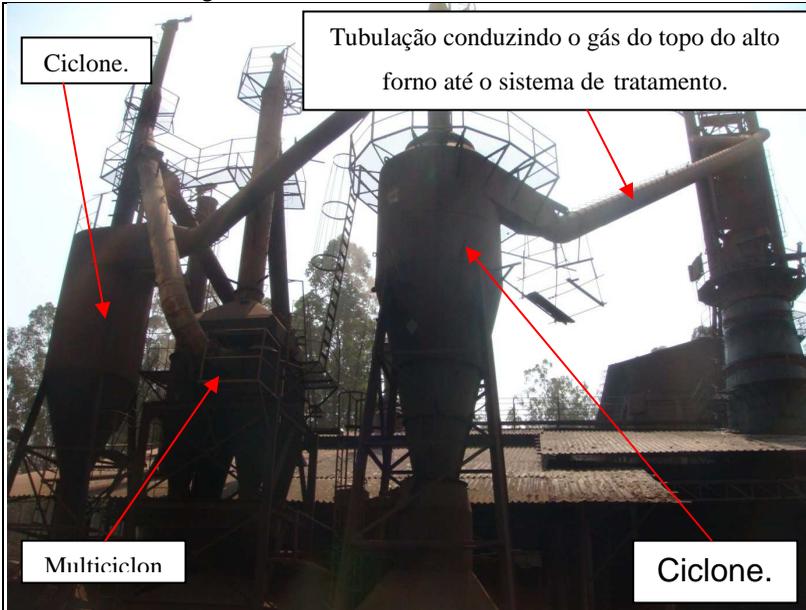
A Figura 32, a seguir, mostra os sistemas de tratamento do efluente atmosférico da usina Citygusa.

Todo o material particulado captado nos equipamentos acima citados é direcionado para caçambas fechadas, evitando assim a dispersão desse pó. A Figura 33, a seguir, mostra o fechamento dessas caçambas, abaixo dos equipamentos de controle atmosférico.

O material particulado coletado nas caçambas não é utilizado na Citygusa. Atualmente esse material é doado para empresas ceramistas para serem incorporados no processo de produção de cerâmicas e tijolos.

Algumas usinas siderúrgicas já utilizam desse material para recomposição do solo no plantio de eucaliptos.

Figura 32 – Sistema de controle atmosférico.



Fonte: CHAVES, 2001 a 2012.

Figura 33 – Caçamba para recolhimento do material particulado.



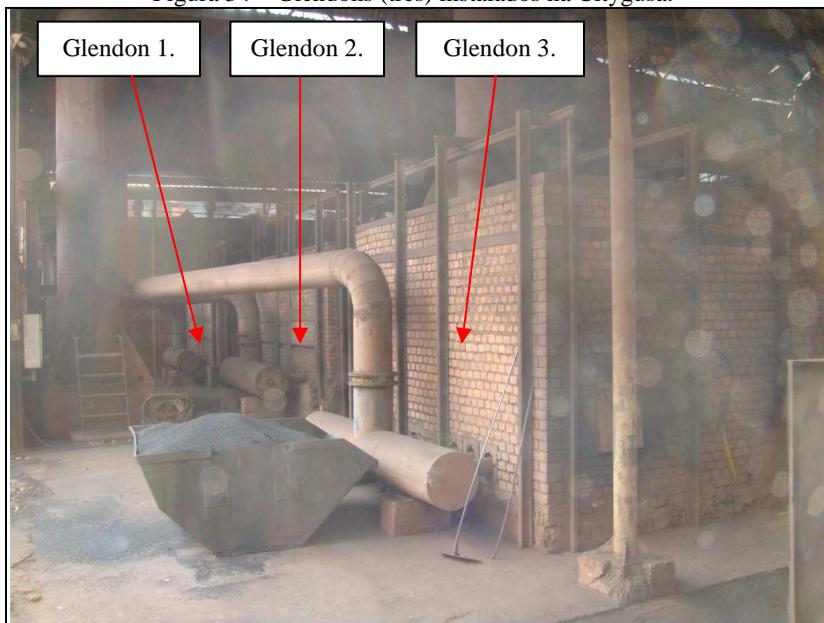
Fonte: CHAVES, 2001 a 2012.

3.3 Caracterização dos recuperadores de calor instalados na Citygusa e cálculo da eficiência de controle do material particulado

Como informado no Item 2.5.1, o glendon é o recuperador de calor mais utilizado nas siderúrgicas mineiras a carvão vegetal. Na usina siderúrgica Citygusa isso não é diferente. Hoje a usina conta com 3 recuperadores do tipo glendon – Figura 34.

Depois do sistema de limpeza dos gases do alto forno, em torno de 40% do GAF é direcionado para os glendons e 60%, não aproveitado, vão para queimadores (tocha). O consumo de GAF nesses recuperadores não chega a 50% dos gases gerados e o restante do gás é descartado. Portanto, a siderúrgica Citygusa não se preocupa com a perda de calor dos gases emitidos sem reaproveitamento. A Citygusa não possui nenhum sistema de aproveitamento dos GAF a não serem os próprios recuperadores.

Figura 34 – Glendons (três) instalados na Citygusa.



Fonte: CHAVES, 2001 a 2012.

3.4 Proposta de aproveitamento do calor residual dos recuperadores de calor instalados na Citygusa

Melhorias nos sistemas de utilização dos gases do alto forno da Citygusa fazem parte do terceiro objetivo específico.

O gás que sai na chaminé dos glendons, após sua queima, é hoje utilizado na empresa Citygusa para secar o minério que será enfundado. O sistema do secador de minério é descrito no item 2.5.2. Uma tubulação sai da chaminé dos glendons e é direcionada para a parte inferior das baias, onde se armazena o minério de ferro, conforme mostrado na figura a seguir.

Figura 35 – Secador de minério instalado na Citygusa.



Fonte: CHAVES, 2001 a 2012.

Atualmente, o consumo do gás residual do glendon utilizado no secador de minério não é calculado especificamente para secagem, apenas soprado embaixo da pilha de minério para retirar a umidade. A possibilidade de redução do consumo de gás soprado, com controle de vazão, temperatura e umidade, utilizando o volume ideal de gás para secagem, torna possível a utilização do calor do gás residual em outros sistemas, tais como refrigeração e pré-aquecimento na caldeira da termelétrica.

3.5 Proposição de melhorias nos equipamentos de controle do GAF

O terceiro objetivo específico também contempla melhorias nos sistemas de tratamento (desempoeiramento) dos gases do alto forno, viabilizando a implantação de um projeto de geração de energia elétrica.

Nas termelétricas, as características turbomecânicas de uma turbina a gás impõem severas restrições à presença de particulados, metais alcalinos e alcatrão condensável, nos gases combustíveis entregues ao combustor (NETO, 2001).

Os equipamentos utilizados nas termelétricas não suportam a presença de materiais particulados. A menor quantidade que seja pode iniciar um processo de corrosão nas peças da turbina.

A eficiência dos equipamentos de tratamento dos gases siderúrgicos citados no item 2.6.1 é muito importante antes de sua utilização em outros sistemas, não só para melhorar a qualidade do gás, mas também para evitar o desperdício de combustível (GAF).

A maior parte das siderúrgicas mineiras não integradas possui sistemas de tratamento de gases bastante rudimentares. A construção desses equipamentos, em grande parte dessas siderúrgicas, é feita a partir de sucatas da própria empresa.

O dimensionamento e os projetos dos balões gravimétricos, ciclones, multiciclones, lavadores de gás, entre outros, é feito para uma determinada vazão de gás. Porém, durante a vida da empresa essa vazão de gás acaba mudando, pois, a capacidade de produção de ferro gusa é alterada, em função das constantes modificações dos equipamentos de processo.

Uma adequação nos equipamentos de controle atmosférico nas siderúrgicas mineiras não integradas é essencial para o bom funcionamento de sistemas de utilização dos gases de alto forno. No caso da termelétrica, quanto maior for a vazão do gás de alto forno (combustível), maior será a capacidade de produção de energia elétrica.

Entretanto, nessas siderúrgicas a perda do gás de alto forno e a baixa eficiência dos equipamentos de controle de emissões atmosféricas, acarretam um custo muito alto na manutenção da termelétrica, além de uma baixa eficiência na produção de energia.

Uma melhoria nos sistemas de tratamento atmosférico dos GAF da Citygusa é necessária para proporcionar a utilização desse combustível (GAF) com máximo de rendimento, viabilizando a implantação de uma termelétrica.

Considerando que atualmente o sistema de tratamento do GAF existente na Citygusa não é satisfatório para a implantação de uma termelétrica, será proposto um redimensionamento do sistema de controle de emissão atmosférica. Busca-se, deste modo, atingir a eficiência necessária para a viabilidade de implantação de um sistema de geração de energia.

3.5.1 Limpeza do gás de alto forno da Citygusa

A limpeza do gás se faz necessária devida à emissão de partículas arrastadas pela chaminé do alto forno para os glendons ou para uma futura termelétrica.

Para um bom funcionamento de uma usina termelétrica, quanto mais limpo for o GAF, menor o custo de manutenção e maior o rendimento da termelétrica. Atualmente, as usinas termelétricas implantadas nas siderúrgicas mineiras trabalham com uma concentração de material particulado do GAF de no máximo 50 mg/Nm³ (conforme pesquisa realizada em 3 siderúrgicas mineiras com termelétricas implantadas).

O sistema de limpeza do gás do alto forno da Citygusa é, atualmente, um processo a seco. Para se atingir uma eficiência capaz de viabilizar a implantação de uma termelétrica, será proposto um processo composto via seca e úmida.

A sequência de limpeza proposta será constituída de:

1. saída dos gases do topo do alto forno;
2. entrada dos gases em um coletor tipo ciclone, de entrada tangencial;
3. entrada dos gases em um lavador de gás tipo Venturi;
4. entrada dos gases em um segundo lavador de gás tipo Venturi;
5. entrada dos gases em um desumidificador;
6. saída dos gases.

3.5.2 Coletor tipo Ciclone

O primeiro equipamento para tratamento dos GAF implantado atualmente na usina siderúrgica Citygusa, é um ciclone de baixa pressão. Para uma melhor eficiência de tratamento final dos gases, visando à implantação de uma termelétrica, o ciclone atual será redimensionado para atingir a eficiência descrita a seguir.

Estimativa de eficiência do ciclone

Segue abaixo, uma figura com eficiências estimadas do ciclone de alta eficiência para remoção de partículas de diferentes tamanhos.

Figura 36 – Eficiência do ciclone para partículas de diferentes tamanhos.

Tamanho da partícula (µm)	2,5	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0
Eficiência (%)	20,0	40,0	81,0	86,0	92,0	94,0	95,0	96,0	97,0
Tamanho da partícula (µm)	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	>80,0
Eficiência (%)	97,5	98,0	98,5	99,0	99,2	99,5	99,5	99,7	100,0

Fonte: MESQUITA et al., 1977.

Dimensionamento do ciclone

O dimensionamento do coletor tipo ciclone será feito de acordo com a obra “Fundamentos de Ventilacion Industrial” (BATURIN, 1976).

Perda de carga

Várias perdas parciais contribuem para a perda de carga total através de um ciclone. Essas perdas parciais são perdas por atrito no duto de entrada, perdas devido à expansão ou contração na entrada, perdas na entrada do duto de saída, perdas de pressão estática entre os dutos de entrada e saída, e recuperação de energia no duto de saída (MESQUITA et al., 1977).

Será utilizada a equação (21) a seguir para obter estimativas de perda de carga total do ciclone (MESQUITA et al., 1977).

$$\Delta P = \frac{12 \times l \times h}{K \times d_d^2 \times \sqrt[3]{(L/d)} \times \sqrt[3]{L/d}} \quad (21)$$

Onde:

ΔP = Perda de carga

l = largura da entrada

h = altura da entrada

K = constante dependendo da entrada = 0,5

d_d = diâmetro do duto de saída

L = comprimento da parte cilíndrica

d = diâmetro do ciclone

L' = comprimento da parte cônica

3.5.3 Lavador de gás tipo Venturi

Após o sistema descrito no item anterior, um lavador de gás tipo Venturi é proposto para atingir a eficiência desejada. A escolha do lavador tipo Venturi se deve a testes já realizados em outras siderúrgicas, comprovando a eficiência do sistema. Outro sistema que já foi testado e não funcionou adequadamente foi o filtro de mangas, devido alguns fatores:

- a possibilidade de ocorrência de arreamento⁸ da carga do alto forno, gerando uma bola de fogo que queimaria as mangas;
- a umidade proveniente do carvão em tempos chuvosos, causando a colmatação das mangas;

⁸ Arreamento da carga do alto forno é quando a carga presente dentro do alto forno perde a permeabilidade, forçando a passagem do gás por um dos lados do forno e fazendo com que a carga do outro lado perca a sustentabilidade, caindo no banho de gusa líquido, causando uma pressão interna no forno e lançando partículas incandescentes pelo topo do alto forno.

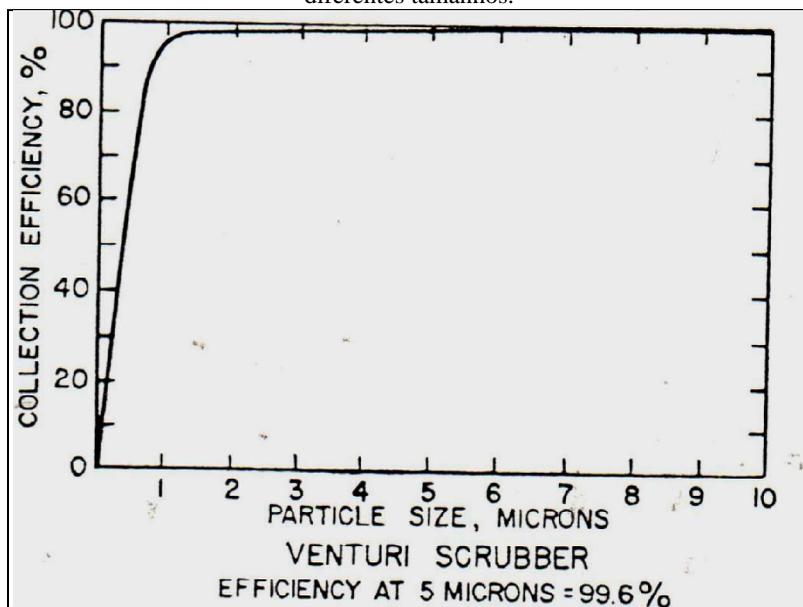
- a presença de alcatrão no GAF, ocasionado pela má transformação da lenha em carvão vegetal, entupindo as mangas, uma vez que o alcatrão tem um viscosidade alta.

A desvantagem na escolha do lavador é o efluente líquido que é gerado e precisa ser tratado. Porém, as usinas siderúrgicas possuem bacias de decantação ou espessadores⁹ que proporcionam um tratamento para esse efluente. É importante salientar que o efluente líquido após decantado é 100% recirculado.

Estimativa de eficiência do Lavador

A figura 37 a seguir mostra o gráfico com a faixa granulométrica e a respectiva eficiência de remoção do lavador Venturi.

Figura 37 – Eficiência do lavador de gás tipo venturi para partículas de diferentes tamanhos.



Fonte: ANDERSON et al., 1967.

⁹ Espessadores são tanques de sedimentação empregados em um tipo particular de separação sólido-líquido, separação esta que é denominada de espessamento.

Dimensionamento do lavador de gás tipo Venturi

Para o dimensionamento do lavador de gás será utilizado o sistema básico do Venturi de acordo com a obra “Dust Collection and Gas Cleaning” (GORDON; PEISAKHOV, 1972).

Perda de Carga do Lavador Venturi

O cálculo da perda de carga será feito de acordo com a obra “Environmental Engineer’s Mathematics Handbook” (SPELLMAN; WHITING, 2004).

Onde:

ΔP = Perda de carga

P_T = Força de contato

N_t = número de unidades de transferência

η = eficiência

P_L = pressão da água

Q_L = vazão da água

Q_G = vazão do gás

α = coeficiente empírico da característica do tipo de lavador e da partícula a ser coletada

β = coeficiente empírico da característica do tipo de lavador e da partícula a ser coletada

Sendo,

$$P_T = 0,1575 \Delta P + 0,583 P_L (Q_L / Q_G)$$

$$N_t = \alpha (P_T)\beta$$

$$\eta = 1 - \exp (-N_t)$$

3.5.4 Desumidificador

Depois do sistema de lavagem de gases do tipo Venturi, um sistema para separação da água incorporada no gás se faz necessário com intuito de utilizar o gás limpo em uma termelétrica ou nos recuperadores de calor do alto forno.

O sistema convencional de separação da água do gás é normalmente feito através de telas ou grades, a fim de que o gás com

água tenha maior contato com a superfície, retendo assim o maior volume de água. Entretanto, o gás de alto forno, contém uma quantidade de alcatrão condensado, devido à redução da temperatura na saída do lavador, que ao impactar nas grades ou telas de um separador de água e gás convencional, tende a entupi-las. Por esse motivo, foi escolhido um ciclone para separar a água do gás, onde, pela força centrífuga as partículas de água presente no gás são projetadas na parede interna do ciclone. No ramo das siderúrgicas mineiras não integradas, esse tipo de ciclone que separa a água do gás é chamado de desumidificador. O dimensionamento do desumidificador se faz igual ao do ciclone convencional.

O sistema convencional de separador de gotas tipo câmara de expansão é menos eficiente na coleta do que o sistema tipo ciclone. A gotícula dentro do equipamento de controle se comporta como uma partícula sólida. Para que a câmara de expansão tenha alguma eficiência é necessário fazer um equipamento com um volume muito grande para reduzir a velocidade de passagem dos gases, mesmo assim, com menor eficiência do que o ciclone.

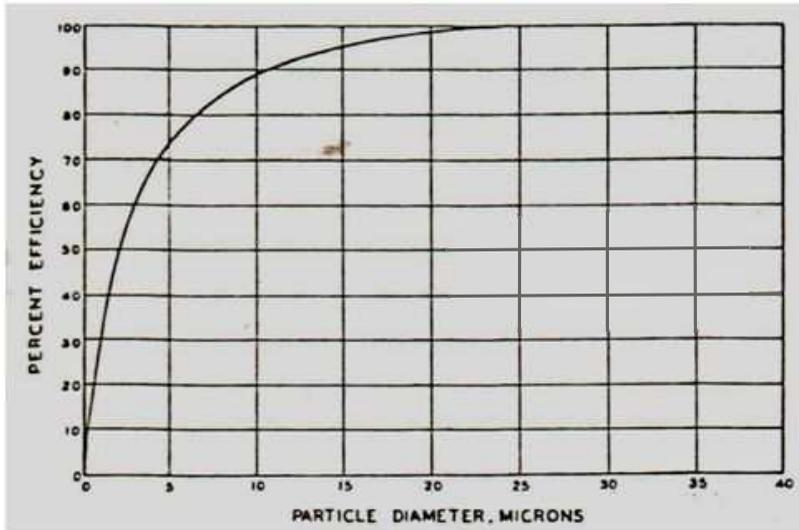
Mesmo sabendo que a perda de carga do ciclone é maior que da câmara de expansão ou câmara inercial (ou ainda, câmara de sedimentação gravitacional), a eficiência é melhor. As gotículas aderem à parede juntamente com o material particulado do gás, onde são arrastados para a parte cônica do ciclone na mesma direção do gás. Mas como o efluente, na medida em que o cone reduz seu diâmetro aumenta a velocidade, este fluxo líquido é recolhido na base do ciclone e o gás inverte o seu fluxo, entrando por um cilindro interno do ciclone. O líquido recolhido é tratado e reutilizado no sistema.

A eficiência de coleta, no caso aqui apontado, é muitas vezes melhor do que em uma câmara inercial, pois a partícula que porventura não foi capturada na gotícula do lavador tem ainda a chance de ser presa na parede do ciclone, aumentando a massa das partículas por aglomeração, pois além da força centrífuga existe também uma cortina de água descendente. Existe um inconveniente, neste caso, de poder haver entupimentos, pois se as partículas que aderirem à parede do ciclone não tiverem um fluxo de líquido grande, para arrastá-las para saída do ciclone, estas podem ficar grudadas e receber novas cargas de partículas e ir fechando o ciclone aos poucos, até entupir completamente. No caso específico aqui apresentado, isto não ocorre, pois o volume de água utilizado no lavador de gás permite que o fluxo de líquido na parede do desumidificador tipo ciclone se mantenha.

Estimativa de eficiência do desumidificador

O gráfico da Figura 38 mostra uma estimativa da eficiência de remoção de material particulado pelo desumidificador tipo ciclone.

Figura 38 – Eficiência do desumidificador tipo ciclone.



Fonte: ANDERSON et al., 1967.

3.5.5 Potência requerida para funcionamento do sistema

Após dimensionado o sistema de tratamento dos gases, faz-se necessário verificar se os ventiladores da casa de máquinas da Citygusa possuem capacidade suficiente para o funcionamento do sistema.

Os ventiladores, na casa de máquinas, têm a função de bombear ar atmosférico com a pressão suficiente para vencer as perdas de carga que o alto forno gera, ou seja, vencer a perda de carga dos glendons, ter pressão suficiente para manter a carga de minério, carvão e fundente em suspensão, e vencer as perdas de carga dos equipamentos de controle.

Atualmente, os ventiladores da usina contam com 3 motores de 125 cv e 2 motores de 150 cv, sendo que um motor de 150 cv é de reserva (stand-by), totalizando 525 cavalos de potência. Os 5 ventiladores são instalados em série, sendo um de reserva, mantendo a mesma vazão e somando as pressões. A vazão é determinada pela capacidade do alto forno de produzir ferro gusa, ou seja, em função do

volume útil do forno sabe-se qual a capacidade máxima de produção de ferro gusa e conseqüentemente, qual a vazão necessária do ventilador para que o oxigênio do ar seja suficiente para promover as reações químicas.

Conforme DE ALMEIDA, (1981), o cálculo da potência de um ventilador centrífugo obtém-se a partir da equação (22):

$$P = (1 / \rho) \times (Q \times Pt) / 75 \quad (19)$$

Sendo que:

P = potência em CV (Cavalos);

ρ = rendimento do ventilador;

Q = vazão em m³/s;

Pt = pressão total em mm H₂O. (Pressão estática)

3.6 Proposição de melhorias nos recuperadores de calor da Citygusa

O terceiro objetivo específico também contempla melhorias nos sistemas de utilização dos gases do alto forno.

Propondo uma melhor gestão nos GAF da Citygusa, com intuito de implantação de uma termelétrica, o consumo de GAF nos glendons precisa ser mínimo, pois, quanto menos GAF for gasto nos glendons, mais gás (combustível) sobrar para o sistema de geração de energia.

A troca de calor que ocorre nos glendons pode ser mais eficiente, aumentando o tempo de contato entre o gás de combustão e a superfície das garrafas por onde passa o ar que será soprado no alto forno. Outro fator para minimizar a perda de energia térmica nos glendons é a mudança do revestimento na tubulação de entrada. Estas propostas aumentariam a possibilidade de implantação de uma termelétrica, pois, com o glendon funcionando com o mínimo de perda de energia possível, maior a sobra de energia para o sistema da termelétrica.

3.7 Redução do consumo de energia na Citygusa

Um levantamento dos equipamentos presentes na usina siderúrgica e o seu consumo de energia elétrica são fundamentais para estabelecer metas e modificações, a fim de reduzir o consumo.

A busca da viabilidade de implantação de uma usina termelétrica para a siderúrgica se deve aos custos elevados de consumo de energia elétrica na produção de ferro gusa.

A redução no custo atual na conta de energia elétrica da Citygusa ajudará a viabilizar a implantação do sistema de geração de energia elétrica a partir do GAF. A procura de equipamentos mais econômicos energeticamente e a reutilização com o máximo de aproveitamento dos efluentes atmosféricos do alto forno em uma termelétrica, ajudará a empresa na redução do consumo de energia.

3.8 Implantação do sistema de geração de energia elétrica a partir do GAF

POULALLION e CORRÊA (2000) definem que: “Central termelétrica é uma unidade de geração exclusiva de energia elétrica a base de motor alternativo, turbina a gás ou turbina a vapor, ou combinação destes, em ciclo simples ou combinado, sem processo de aproveitamento do calor.” Caso o calor de processo fosse reaproveitado isso configuraria uma usina de cogeração.

Em linhas mestras Ripoli e Ripoli (2009) definem cogeração como a produção combinada de calor útil e energia mecânica, através de um sistema padrão. Este é constituído de uma turbina a vapor ou de combustão (turbina a gás), que aciona um gerador de corrente elétrica, e um recuperador de calor, que recupera o calor residual e/ou gás de exaustão, para produzir água quente ou vapor. Desta forma, consume-se até 30% a menos de combustível do que seria necessário para produzir calor de geração e de processo, separadamente, além de ampliar-se a eficiência térmica do sistema. A importância da explicitação deste conceito se deve ao entendimento entre cogeração e termelétrica. Embora a definição de cogeração e termelétrica se misturem uma com a outra, somente quando se verifica o uso de energia térmica como “calor útil”, pode-se considerar sendo um sistema de cogeração.

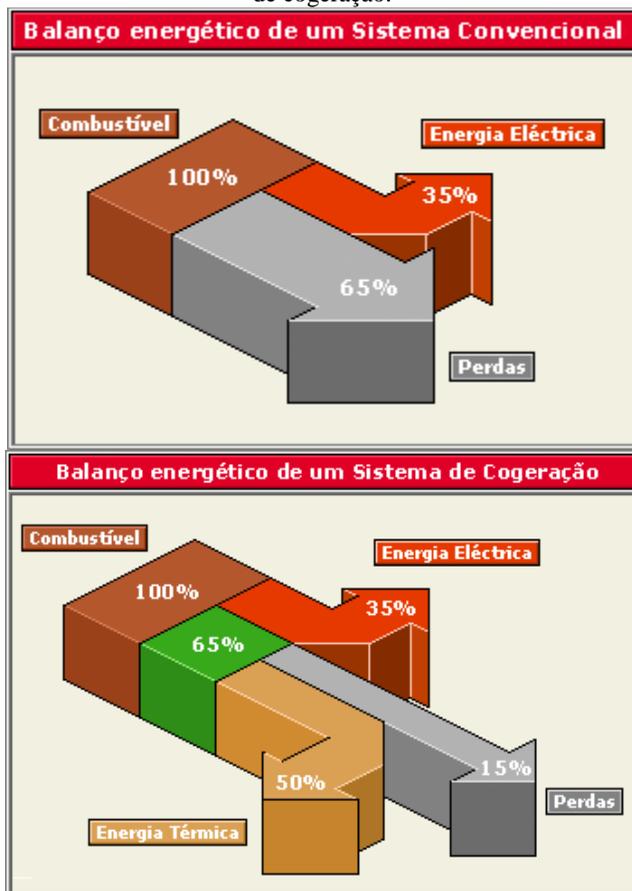
As centrais termelétricas implantadas nas usinas siderúrgicas não integradas de Minas Gerais não configuram uma cogeração.

O processo de produção de energia elétrica utilizado nas siderúrgicas mineiras através do gás de alto forno consiste em: captar o GAF, viabilizar o gás (sistema de tratamento) para utilização na central termelétrica, encaminhar o gás para um queimador, gerar calor para aquecer uma caldeira. O vapor da caldeira move uma turbina e a turbina move o gerador elétrico. No entanto, após esse processo, a maior parte o gás queimado é descartado na atmosfera. Esse gás sai na chaminé a uma

temperatura média 500°C a 700°C, podendo ser utilizado em outros sistemas, devido à presença de energia em forma de calor, energia térmica.

O ganho energético em um sistema operando por cogeração é demonstrado nos diagramas a seguir, comparado com um sistema termodinâmico convencional de geração de eletricidade.

Figura 39 – Eficiência energética de um sistema convencional e de um sistema de cogeração.



Fonte: MARÇAL et al., 2010.

Como pode-se ver o sistema básico para produção de energia eléctrica através de centrais termelétricas e centrais de cogeração é quase

o mesmo. Os dois buscam a geração de energia elétrica, através da energia térmica gerada com a queima de um combustível (gás de alto forno). Entretanto, nas centrais de cogeração existem ainda etapas de reaproveitamento do calor gerado.

Os sistemas termodinâmicos aproveitam cerca de 35% da energia disponível no combustível e o restante é perdido no meio ambiente, em forma de calor. Já os sistemas de cogeração, parte da energia térmica é reutilizada.

3.9 Viabilidade de reutilização da energia térmica do sistema de geração de energia elétrica

Como descrito no item anterior, à reutilização da energia térmica do processo de geração de energia elétrica configura um sistema de cogeração.

Em princípio, a cogeração é aplicável a qualquer instalação na qual se necessita as duas formas de energia: energia elétrica e energia térmica. A demanda térmica pode ser calor direto (“sopro” quente), vapor, água quente, óleo quente e refrigeração. Esta última pode ser obtida a partir da energia elétrica, e nesse caso se traduz em demanda elétrica. Porém, a cogeração traz de volta o sistema de refrigeração por absorção, que gera água gelada a partir de uma fonte quente, mais usado em lugares que não dispõem de eletricidade. Traz de volta, no sentido de que por ser a cogeração uma alternativa de auto-produção, em instalações nas quais existe grande demanda térmica em relação à demanda elétrica, a substituição do sistema de refrigeração com compressores, acionados por motores elétricos, por sistemas de refrigeração por absorção, alimentados por vapor, água quente, “sopro” quente ou queima direta, favorece o balanço termelétrico desejável para viabilizar economicamente a cogeração (BRASIL, 2005).

Para viabilizar tecnicamente a alternativa de cogeração é conveniente que a usina tenha demanda de energia térmica (vapor, calor ou frio) pelo menos duas vezes maior do que a equivalente de energia elétrica. Essa relação pode mudar um pouco, mas, por exemplo, uma fábrica que consome cerca de 5 MW de energia elétrica e cerca de 15 toneladas por hora de vapor estaria numa posição muito favorável para adotar cogeração. Isso ocorre porque a relação entre energia elétrica e energia térmica geradas via turbina ou motor se mantém aproximadamente constante e elas precisam ser aproveitadas ao máximo para garantir a alta eficiência do sistema. Entretanto, nas siderúrgicas mineiras não integradas ainda não existe um sistema de

reaproveitamento desse vapor. No entanto, sistemas de refrigeração poderiam ser implantados para funcionarem a partir da energia térmica do sistema de cogeração.

A utilização de chillers de absorção é um caminho para sistemas de refrigeração nas siderúrgicas a partir do calor descartado na termelétrica. Um chiller de adsorção é uma instalação térmica que converte calor em frio, utilizando como fonte o calor inutilizado na empresa (CEEETA, 2012).

Considerações ambientais e econômicas trouxeram um novo interesse nos refrigeradores alimentados por uma fonte de calor.

3.10 Venda de energia elétrica

Com a implantação de uma termelétrica e a redução do consumo de energia com possíveis sistemas de refrigeração a partir de chillers de absorção, a possível comercialização do excedente de energia elétrica gerada, torna esses sistemas mais interessantes para a empresa. O produtor de ferro gusa vê a possibilidade de aumentar seus rendimentos com a implantação dessas tecnologias.

Com as siderúrgicas buscando produzir seu próprio carvão a partir de florestas plantadas em suas fazendas, a venda de energia está se tornando uma via de rendimento enorme, considerando que algumas termelétricas, além do GAF, podem utilizar também biomassa como combustível. A folhagem e os galhos não utilizados na produção de carvão são triturados, gerando uma biomassa com alto poder calorífico.

No caso da Citygusa, a alternativa de uma termelétrica com biomassa e GAF torna o sistema mais viável para venda do excedente de energia elétrica.

3.11 Implantação de uma termelétrica ou uma usina de cogeração

A viabilidade para sistemas de cogeração deve focar, em sua fase analítica, o entendimento e a mensuração de rendimento dos equipamentos e matérias-primas utilizados na planta em questão. É necessário que haja uma convergência entre disponibilidade de matéria-prima (especialmente o combustível a ser utilizado - GAF) e a planta, de forma a otimizar a estrutura a ser construída diminuindo investimentos e, desta maneira, o tempo de retorno sobre eles (MARÇAL et al., 2010).

Os equipamentos planejados para atender à produção de energia devem adequar-se a uma planta industrial. A busca para a auto-suficiência de energia elétrica da usina é o principal foco das

siderúrgicas que pretendem implantar um sistema de geração de energia elétrica.

O sistema de cogeração, apesar de mais caro, torna possível a utilização do calor descartado no sistema da termelétrica, em sistemas de refrigeração.

4 RESULTADOS

Para atingir o foco do estudo do aproveitamento dos gases de siderúrgicas não integradas em Minas Gerais, uma gestão dos gases do alto forno da Usina Citygusa Siderurgia Ltda. foi realizado.

Na busca da sustentabilidade das usinas siderúrgicas não integradas a carvão vegetal, o exemplo da Citygusa poderá auxiliar as siderúrgicas a melhorias tecnológicas e ambientalmente corretas.

Neste capítulo são apresentados os resultados dos cálculos para descobrir a eficiência do antigo sistema de tratamento, a concentração de material particulado do gás de alto forno, redimensionamento do novo sistema de tratamento dos gases do alto forno; o cálculo de verificação da potência requerida para funcionamento do novo sistema; os custos referentes aos projetos, fabricação e implantação do novo sistema de tratamento de emissões atmosféricas; as propostas de melhorias nos glendons; o custo de energia elétrica atual da Citygusa; e os custos de implantação de uma usina termelétrica com intuito de cobrir a demanda energética da empresa.

4.1 Eficiência do sistema de tratamento atual e concentração de material particulado na entrada dos glendons

A Citygusa realiza trimestralmente uma análise de material particulado do GAF. Após a queima do gás na câmara de combustão nos glendons, o mesmo é descartado na atmosfera através de uma chaminé presente em cada glendon. Nessas chaminés são coletadas amostras para análise.

Segue no Anexo II, uma análise do GAF da Citygusa, coletada na chaminé do glendon. Como podemos ver nessas análises, a média de material particulado emitido no gás, após tratamento e queima é de 315,19 mg/Nm³ - conforme a quadro a seguir (valor retirado da última medição realizada – Junho/2012).

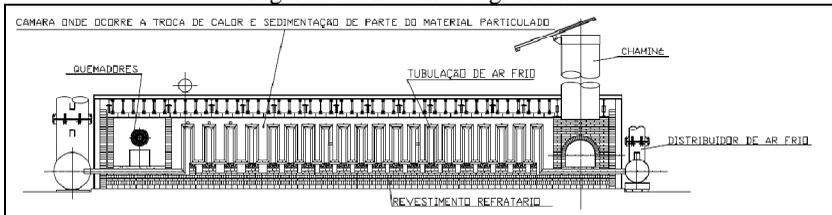
Quadro 12 – Concentração de material particulado – Siderúrgica Citygusa.

Concentração de material particulado (mg/Nm ³)	Amostra 1° (mg/Nm ³)	Amostra 2° (mg/Nm ³)	Amostra 3° (mg/Nm ³)
	351,41	309,84	284,34
Média Total	315,19		

Fonte: COAMB, 2012.

É importante salientar que os glendons também exercem uma função de câmara gravimétrica, ajudando na limpeza dos gases. Como podemos ver na Figura 40, a seguir, o compartimento onde ocorre a troca de calor funciona também como um sedimentador gravitacional, retendo uma porcentagem do material particulado. Conforme estudos realizados pela Pro Ambiente Engenharia Projetos e Consultoria Ltda., a proporção de material particulado retido nessa câmara equivale a 10% do material particulado que entra no glendon.

Figura 40 – Detalhe do glendon.



Fonte: Autor.

Portanto, considerando-se que a concentração de material particulado (média) era de 315,19 na saída dos glendons, conclui-se que a concentração inicial (antes do depósito na câmara de expansão do glendon) era de:

$$315,19 / 0,9 = 350,21 \text{ mg/Nm}^3$$

O material particulado presente no GAF que entra nos glendons é em média composto por 70% de minérios e 30% por finos de carvão (dados levantados e monitorados pela Pró Ambiente Eng. Proj. e Consultoria Ltda.). Os finos de carvão são queimados e viram cinzas. O volume de cinzas gerado equivale entorno de 3% do volume de finos de carvão (0,9% do volume total de finos de carvão). Portanto, 70% do minério mais 0,9% das cinzas é o volume de material particulado presente no gás, depois de queimado no glendon. Então, a concentração de 350,21 mg/Nm³ de material particulado presente no gás de alto forno representa, antes da sua queima no glendon:

$$350,21 / 70,9\% = 493,94 \text{ mg/Nm}^3$$

Quando o GAF entra no glendon para ser queimado, o mesmo é diluído com ar para que ocorra a combustão, conforme demonstrado a seguir.

Conforme mostrado no Item 2.4.3, o poder calorífico inferior do GAF é de: 3.768 kJ/Nm³.

Sendo,

$$1 \text{ kcal} = 4,186 \text{ kJ}$$

Tem-se:

$$3.768,12 / 4,186 = 900 \text{ Kcal/Nm}^3$$

As fórmulas práticas de Rosin e Fehling - em função do poder calorífico inferior do combustível (kcal/Nm³), determinam de forma simplificada a quantidade de ar necessária para combustão do combustível gasoso (ROSIN 1932, apud HOLANDA, 2008).

$$\text{Volume de ar} = 0,895 \times \text{PCI} / 1000 = 0,895 \times 900 / 1000$$

$$\text{Volume} = 0,805 \text{ Nm}^3 \text{ de ar} / \text{Nm}^3 \text{ de gás (combustível)}$$

Para uma melhor eficiência da queima do gás, calculou-se um excedente de 30% de ar no sistema, além do necessário.

Ar necessário real para queima:

$$\text{Volume} = 0,805 \times 1,3 = 1,0465 \text{ Nm}^3 \text{ de ar} / \text{Nm}^3 \text{ de gás}$$

Portanto, considerando-se que o gás queimado no glendon foi diluído, a concentração de material particulado no gás de alto forno da Citygusa depois do sistema de tratamento (antes da queima e antes da diluição) é de:

$$493,94 \text{ mg/Nm}^3 \times (1+1,0465) = 1.010,84 \text{ mg/Nm}^3$$

$$493,94 \text{ mg/Nm}^3 + 516,90 \text{ mg/Nm}^3 = 1.010,84 \text{ mg/Nm}^3$$

A concentração de material particulado presente no gás de alto forno, após o tratamento nos sistemas de controle de emissões atmosféricas da Citygusa e antes de ser diluído, foi de 1.010,84 mg/Nm³.

Para melhor explicar segue: O gás ao sair do topo do alto forno possuía 17.300 mg/Nm³ de material particulado. A concentração de material particulado presente após o tratamento do gás no sistema de controle de emissões atmosférica era de 1.010,84 mg/Nm³. Esse gás foi diluído com ar, para uma melhor combustão no glendon. O volume de ar

utilizado na diluição foi de 1,0465 Nm³ de ar / Nm³ de gás. Após a diluição do gás, a concentração de material particulado equivalia a 493,94 mg/Nm³. Como o gás era em média composto por 70% de minérios e 30% por finos de carvão e os finos de carvão viram cinza após a queima, o volume de material particulado no gás após a queima dos finos de carvão era de 350,21 mg/Nm³. Os glendons também exercem uma função de câmara gravimétrica, a proporção de material particulado retido nessa câmara equivale a 10% do material particulado, sendo assim o valor medido na chaminé dos glendons é de 315,19 mg/Nm³.

Conforme mostrado no Item 3.1.3 a concentração média de material particulado no topo do alto forno é de 17,30 g/Nm³. Então, o sistema de tratamento atual da usina siderúrgica Citygusa, composto por um ciclone de baixa eficiência, multiciclone e outro ciclone de baixa eficiência, tem uma eficiência de:

$$1.010,84 \text{ mg/Nm}^3 / 17.300,00 \text{ mg/Nm}^3 = 94,15 \%$$

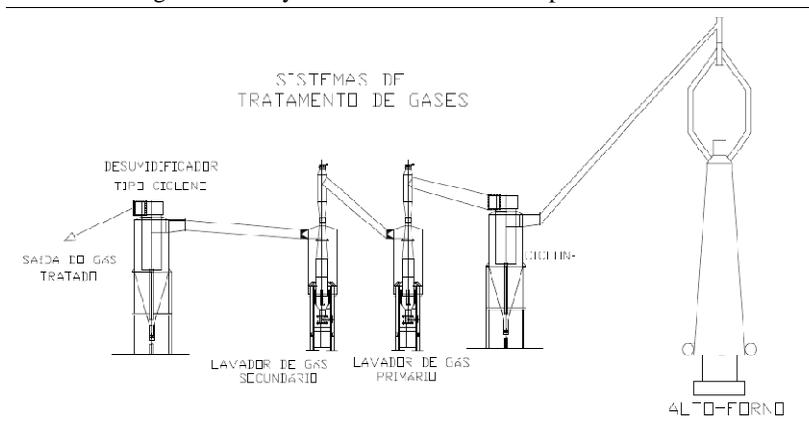
4.2 Redimensionamento do sistema de tratamento do GAF

Conforme pesquisa realizada em outras usinas siderúrgicas não integradas de Minas Gerais que já possuem um sistema de geração de energia elétrica implantado, a concentração média de material particulado no efluente atmosférico na saída do sistema de tratamento do GAF, para que o sistema de geração de energia elétrica tenha eficiência e não seja comprometido, é de: 50 mg/Nm³.

Em função da eficiência de coleta do material particulado que precisa-se atingir para o funcionamento adequado de um sistema de geração de energia elétrica, será demonstrado a seguir o redimensionamento do sistema de tratamento dos gases do alto forno.

O sistema de tratamento de emissões atmosférica do gás do alto forno que foi calculado será composto de um ciclone, dois lavadores de gás e um desumidificador conforme mostrado na figura a seguir.

Figura 41 – Lay out do sistema de desempoeiramento.



Fonte: Autor.

O Quadro 13 a seguir apresenta a faixa granulométrica das partículas presentes no gás de alto forno da Citygusa. Um comparativo foi montado para melhor visualizar a porcentagem de material particulado presente em determinada faixa granulométrica a fim de auxiliar no dimensionamento do novo sistema de tratamento do gás.

Quadro 13 – Porcentagem de material particulado no GAF da Citygusa.

Tamanho (µm - microns)	Porcentagem (%) de partículas presentes	Faixa granulométrica	Porcentagem (%) de material particulado por faixa
<180,00	100,00	Acima de 180	0
103,00	97,70	103 – 180	2,3
48,70	88,00	48,7 – 103	9,7
30,50	76,50	30,5 – 48,7	11,5
21,00	65,70	21 – 30,5	10,8
10,90	44,10	10,9 – 21	21,6
5,17	21,10	5,17 – 10,9	23,0
3,24	12,30	3,24 – 5,17	8,8
2,03	7,20	2,03 – 3,24	5,1
1,06	3,50	1,06 – 2,03	3,7
0,50	0,80	0,5 – 1,06	2,7
0,00	0,00	0 – 0,5	0,8

Fonte: Autor.

A concentração máxima de particulados, medida na saída do topo do alto forno da Citygusa foi de 17,3 g/Nm³ conforme citado no Item 3.1.3 através da análise realizada pela Citygusa para o RCA - Relatório de controle ambiental (CHAVES, 1999).

Dimensionamento do Ciclone

O quadro 14 foi desenvolvido para visualizar a eficiência de remoção de material particulado do coletor tipo ciclone em relação à concentração de material particulado no GAF, conforme mostrado a seguir.

Quadro 14 – Eficiência estimada de remoção do Ciclone em relação à concentração de material particulado, por Nm³ de GAF.

Faixa granulométrica	Porcentagem (%) de concentração	Peso (mg/Nm³) equivalente por faixa	Eficiência de remoção (%) por faixa	Peso (mg/Nm³) removido
Acima de 180	0,0	0,00	100,00	0,00
103 – 180	2,3	397,90	100,00	397,90
48,7 – 103	9,7	1.678,10	99,00	1661,32
30,5 – 48,7	11,5	1.989,50	97,00	1929,82
21 – 30,5	10,8	1868,40	94,00	1756,30
10,9 – 21	21,6	3736,80	88,00	3288,38
5,17 – 10,9	23,0	3979,00	64,00	2546,56
3,24 – 5,17	8,8	1522,40	35,00	532,84
2,03 – 3,24	5,1	882,30	23,00	202,93
1,06 – 2,03	3,7	640,10	15,00	96,02
0,5 – 1,06	2,7	467,10	7,00	32,70
0 – 0,5	0,8	138,40	3,00	4,15
	Soma	17.300,00		12.448,91

Fonte: Autor.

Conforme Quadro 14, o total de material particulado removido (por metro cúbico de GAF) foi de 12.448,91 mg/Nm³. Sendo assim, o ciclone teve uma eficiência estimada de remoção de:

$$12.448,91 / 17.300 = 0,7195$$

Eficiência estimada de 71,95 %

Parâmetros e premissas de projeto:

Como mostrado no Quadro 9, a produção média de ferro gusa na usina siderúrgica Citygusa é de 191,56 toneladas por dia. Sendo assim:

$$191,56 / 24 = 7,98 \text{ toneladas/hora}$$

$$7,98 \times 2.000^{10} = 15.960,00 \text{ Nm}^3/\text{hora}$$

Média de geração do GAF da Citygusa, 15.960,00 Nm³/h.
 Vazão = Q = 15.960,00 Nm³/h

Temperatura média do gás no topo do alto forno = 120 °C
 Temperatura informada no RCA e PCA da Citygusa (CHAVES, 1999).

$$\text{Vazão real} = 15.960,00 \text{ Nm}^3/\text{h} \times (273 + 120) \text{ °C} / 273 \text{ °C}$$

$$\text{Vazão real} = 22.975,38 \text{ m}^3/\text{h} = 6,38 \text{ m}^3/\text{s}$$

Para velocidade (V) na entrada do sistema de tratamento dos GAF, alguns autores trabalham com a velocidade na faixa de 15 a 25 m/s. Considerando que o material particulado a ser transportado precisa de uma velocidade mínima de 22 m/s, para que não ocorra deposição na tubulação e por experiência em diversos projetos de ciclones para esse tipo de material particulado, foi adotada a velocidade de transporte de 26 m/s, mesmo sabendo do desgaste na tubulação e o aumento da perda de carga, o projeto considera a especificação do material da tubulação e a espessura da chapa a ser utilizada.

Sendo a área (A) a seção da tubulação de transporte dos gases e de entrada no ciclone, tem-se:

$$Q = V \times A = 6,38 = 26 \times \frac{\pi \times d^2}{4}$$

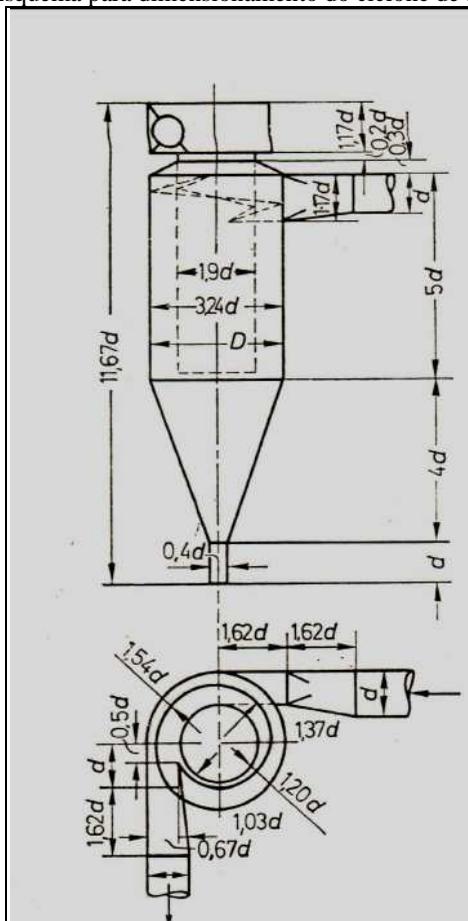
$$d = 0,559 \text{ m}$$

$$\text{Adota-se } d = 560 \text{ mm} = 1,8368 \text{ pés}$$

Conforme mostra a Figura 42, a seguir, as dimensões do ciclone são definidas com o diâmetro da tubulação da entrada do gás.

¹⁰ Conforme item 2.4.1, a geração média de gás de alto forno está na faixa de 2.000 Nm³ por tonelada de ferro gusa produzido.

Figura 42 – Esquema para dimensionamento do ciclone de alta eficiência.



Fonte: BATURIN, 1976.

Calculo da Perda de carga:

$$\Delta P = (12 \times 1,17d \times 0,67d) / (0,5 \times 3,61d^2 \times (5d / 3,24d)^{1/3} \times (4d / 3,24d)^{1/3})$$

$$\Delta P = (9,4068d^2) / (1,805d^2 \times 1,1556 \times 1,0727)$$

$$\Delta P = 4,20 \text{ in. H}_2\text{O} = 106,68 \text{ mm H}_2\text{O}$$

Dimensionamento do Lavador de gás tipo Venturi

A perspectiva da quantidade de material particulado presente no gás de entrada do lavador, após o tratamento do ciclone dimensionado, será de 17.300 mg/Nm³ (concentração inicial) menos 12.448,91 mg/Nm³ (concentração de remoção do ciclone).

$$17.300 - 12.448,91 = 4.851,09 \text{ mg/Nm}^3$$

O gráfico com a faixa granulométrica do item 3.5.3 e a respectiva eficiência de remoção do lavador Venturi, ajudou a desenvolver o Quadro 15, para melhor visualizar a estimativa de eficiência do sistema.

No Quadro 14, a diferença entre coluna de peso (mg) equivalente por faixa granulométrica e a coluna de peso (mg) removido após o ciclone, equivale ao peso (mg) de material particulado equivalente por faixa granulométrica no gás da entrada do lavador Venturi, conforme demonstrado no Quadro 15.

Quadro 15 – Particulados presentes no gás de entrada do lavador Venturi e sua eficiência estimada de remoção.

Faixa granulométrica	Porcentagem (%) de remoção por faixa granulométrica	Peso (mg/Nm³) equivalente por faixa	Peso (mg/Nm³) removido	Peso (mg/Nm³) restante
Acima de 180	100,00	0,00	0,00	0,00
103 – 180	100,00	0,00	0,00	0,00
48,7 – 103	100,00	16,78	16,78	0,00
30,5 – 48,7	100,00	59,68	59,68	0,00
21 – 30,5	100,00	112,10	112,10	0,00
10,9 – 21	99,90	448,42	447,97	0,45
5,17 – 10,9	99,60	1432,44	1426,71	5,73
3,24 – 5,17	99,00	989,56	979,66	9,90
2,03 – 3,24	98,00	679,37	665,78	13,59
1,06 – 2,03	97,00	544,08	527,76	16,32
0,5 – 1,06	88,00	434,40	382,27	52,13
0 – 0,5	45,00	134,25	60,41	73,84
	Soma	4851,09	4679,13	171,96

Fonte: Autor.

Portanto, o total de material particulado removido (por metro cúbico de GAF) foi de 4679,13 mg/Nm³. Sendo assim, o lavador de gás teve uma eficiência média estimada de remoção de:

$$4.679,13 / 4.851,09 = 0,9645$$

Eficiência estimada de 96,45 %

Parâmetros e premissas de projeto:

Vazão real dos gases na entrada do Venturi (Q);

Temperatura (T) dos gases na entrada do lavador de gás, após o ciclone.

$$T = 110^{\circ}\text{C}$$

Temperatura medida em outra usina com o sistema de tratamento similar.

$$Q = 15.960 \text{ Nm}^3/\text{h} \times (110 + 273) / 273 = 22.390,76 \text{ m}^3/\text{h} = 6,21 \text{ m}^3/\text{s}$$

A Figura 43, a seguir, mostra o sistema básico de funcionamento do lavador Venturi.

Figura 43 – Sistema básico de funcionamento do Lavador de gás Venturi.



Fonte: LIEWENDAHL, 2013.

Para definir o tamanho da entrada do lavador foi adotado para projeto uma velocidade específica conforme descrito a seguir:

Velocidade de entrada no Venturi (V): Adota-se $V = 15,0$ m/s

Cálculo da área da seção da tubulação de entrada:

$$A = (Q / V)$$

$$A = 6,21 / 15,0$$

$$A = 0,414 \text{ m}^2$$

$$A = \frac{\pi \times D^2}{4}$$

$$D = 0,726 \text{ m}$$

Adotou-se o diâmetro de 730 mm

É recomendado de 0,1 a 2 litros de água/Nm³ de gás (GORDON; PEISAKHOV, 1972). Adotou-se, por segurança, 2 litros de água /Nm³ de gás. Esta vazão será controlada com válvula de fecho rápido (esfera).

$$Q_{\text{água}} = \text{vazão de água por Nm}^3 = 2 \text{ litros} / \text{Nm}^3$$

Calculo da vazão de água de recirculação para o lavador:

$$\text{Vazão água} = 15.960 \text{ Nm}^3/\text{h} \times 2 \text{ l/Nm}^3 = 31.920 \text{ litros/h.}$$

Para calcular as dimensões na garganta, a velocidade do gás ao passar no Venturi foi definida em: $V = 120$ m/s conforme Mesquita et al., 1977 (Lavador Venturi de média a alta eficiência).

Seção do Venturi:

$$Q (\text{vazão}) = A (\text{área}) \times V (\text{velocidade})$$

$$A (\text{área}) = 6,21 \text{ m}^3/\text{s} / 120 \text{ m/s}$$

$$A (\text{área}) = 0,0517 \text{ m}^2$$

$$A = \frac{\pi \times D^2}{4}$$

$$D = 0,256 \text{ m}$$

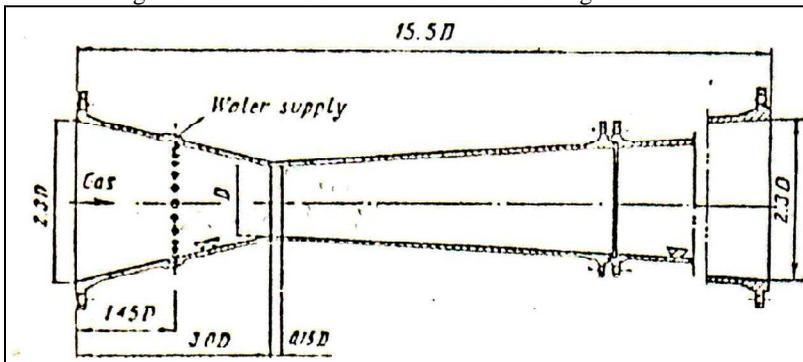
Adotou-se o diâmetro de 250 mm

Verificação da velocidade na garganta:

$$V_{\text{garganta}} = 4 \times 6,21 \text{ m}^3/\text{s} / (\pi \times (0,25 \text{ m})^2) = 126,57 \text{ m/s}$$

Para o dimensionamento do lavador de gás foi utilizado o sistema básico do Venturi, conforme figura a seguir.

Figura 44 – Dimensionamento do Lavador de gás Venturi.



Fonte: GORDON; PEISAKHOV, 1972.

Perda de Carga do Lavador Venturi:

ΔP = Perda de carga

P_T = Força de contato

N_t = número de unidades de transferência

η = eficiência

P_L = pressão da água

Q_L = vazão da água

Q_G = vazão do gás

α = coeficiente empírico da característica do tipo de lavador e da partícula a ser coletada

β = coeficiente empírico da característica do tipo de lavador e da partícula a ser coletada

Sendo,

$$P_T = 0,1575 \Delta P + 0,583 P_L (Q_L / Q_G)$$

$$N_t = \alpha (P_T)^\beta$$

$$\eta = 1 - \exp(-N_t)$$

Portanto,

$$N_t = \ln [1/(1-\eta)]$$

$$N_t = \ln [1/(1-0,9645)]$$

$$N_t = 3,338$$

Os valores de α e β são respectivamente 1,26 e 0,569, conforme descrito na obra “Environmental Engineer’s Mathematics Handbook” (SPELLMAN; WHITING, 2004).

$$3,338 = 1,26 (P_T)^{0,569}$$

$$P_T = 5,5413$$

Para a pressão da água adotou-se:

$$P_L = 30 \text{ mCA} = 42,67 \text{ psi}$$

$$Q_L = 31.920 \text{ litros / hora} = 140,53 \text{ gal/min}$$

$$Q_G = 6,21 \text{ m}^3/\text{s} = 13.158,96 \text{ pés}^3/\text{min}$$

$$5,5413 = 0,1575 \Delta P + 0,583 \times 42,67 (140,53 / 13.158,96)$$

$$\Delta P = 33,49 \text{ in. H}_2\text{O} = 850,80 \text{ mm H}_2\text{O}$$

Dimensionamento do segundo Lavador de gás tipo Venturi

A perspectiva da quantidade de material particulado presente no gás de entrada do segundo lavador de gás será de:

$$4.851,09 - 4.679,13 = 171,96 \text{ mg/Nm}^3$$

Conforme mostrado na Figura 37, o gráfico com a faixa granulométrica e a respectiva eficiência de remoção do lavador venturi, ajudou a desenvolver o Quadro 16, para melhor visualizar a estimativa de eficiência do sistema.

No Quadro 15, a diferença entre coluna de peso (mg) equivalente por faixa granulométrica e a coluna de peso (mg) removido após o primeiro lavador de gás, equivale ao peso (mg) de material particulado equivalente por faixa granulométrica no gás da entrada do segundo lavador Venturi, conforme demonstrado no Quadro 16.

Quadro 16 – Particulados presentes no gás de entrada do segundo lavador Venturi e sua eficiência estimada de remoção.

Faixa granulométrica	Porcentagem (%) de remoção por faixa granulométrica	Peso (mg/Nm³) equivalente por faixa	Peso (mg) removido	Peso (mg/Nm³) restante
Acima de 180	100,00	0,00	0,00	0,00
103 – 180	100,00	0,00	0,00	0,00
48,7 – 103	100,00	0,00	0,00	0,00
30,5 – 48,7	100,00	0,00	0,00	0,00
21 – 30,5	100,00	0,00	0,00	0,00
10,9 – 21	99,90	0,45	0,45	0,00
5,17 – 10,9	99,60	5,73	5,71	0,02
3,24 – 5,17	99,00	9,90	9,80	0,10
2,03 – 3,24	98,00	13,59	13,32	0,27
1,06 – 2,03	97,00	16,32	15,83	0,49
0,5 – 1,06	88,00	52,13	45,87	6,26
0 – 0,5	45,00	73,84	33,23	40,61
	Soma	171,95	124,20	47,75

Fonte: Autor.

Conforme demonstrado no Quadro 16, o total de material particulado removido (por metro cúbico de GAF) foi de 124,20 mg/Nm³. Sendo assim, o segundo lavador de gás teve uma eficiência média estimada de remoção de:

$$124,20 / 171,95 = 0,7223$$

Eficiência estimada de 72,23 %

Parâmetros e premissas de projeto:

Vazão real dos gases na entrada do Venturi (Q);

Temperatura (T) dos gases na entrada do segundo lavador.

T= 50°C

Temperatura medida em outra usina com o sistema de tratamento similar.

$$Q = 15.960 \text{ Nm}^3/\text{h} \times (50 + 273) / 273 = 18.883,07 \text{ m}^3/\text{h} = 5,24 \text{ m}^3/\text{s}$$

Para definir o tamanho da entrada do lavador foi adotado para projeto uma velocidade específica, conforme descrito abaixo:

Velocidade de entrada no Venturi (V): Adota-se $V = 15,0$ m/s
 Cálculo da área da seção de entrada

$$A = (Q / V)$$

$$A = 5,24 / 15,0$$

$$A = 0,349 \text{ m}^2$$

$$A = \frac{\pi \times D^2}{4}$$

$D = 0,667$ m
 Adotou-se o diâmetro de 660 mm

É recomendado de 0,1 a 2 litros de água/ Nm^3 de gás (GORDON; PEISAKHOV, 1972). Adotou-se, por segurança, 2 litros de água / Nm^3 de gás. Esta vazão será controlada com válvula de fecho rápido (esfera).

$$Q_{\text{água}} = \text{vazão de água por Nm}^3 = 2 \text{ litros} / \text{Nm}^3$$

Calculo da vazão de água de recirculação para o lavador:
 Vazão água = $15.960 \text{ Nm}^3/\text{h} \times 2 \text{ l/Nm}^3 = 31.920 \text{ litros/h}$.

Para calcular as dimensões na garganta, a velocidade do gás ao passar no Venturi foi definida em: $V = 120$ m/s conforme Mesquita et al., 1977 (Lavador Venturi de média a alta eficiência).

Seção do Venturi:

$$Q (\text{vazão}) = A (\text{área}) \times V (\text{velocidade})$$

$$A (\text{área}) = 5,24 \text{ m}^3/\text{s} / 120 \text{ m/s}$$

$$A (\text{área}) = 0,0436 \text{ m}^2$$

$$A = \frac{\pi \times D^2}{4}$$

$D = 0,235$ m
 Adotou-se o diâmetro de 240 mm

Verificação da velocidade na garganta:

$$V_{\text{garganta}} = 4 \times 5,24 \text{ m}^3/\text{s} / (\pi \times (0,24 \text{ m})^2) = 115,88 \text{ m/s}$$

Para o dimensionamento do lavador de gás foi utilizado o sistema básico do Venturi, conforme Figura 44.

Perda de Carga do Lavador Venturi:

$$P_T = 0,1575 \Delta P + 0,583 P_L (Q_L / Q_G)$$

$$Nt = \alpha (P_T)^\beta$$

$$\eta = 1 - \exp(-Nt)$$

Portanto,

$$Nt = \ln [1/(1-\eta)]$$

$$Nt = \ln [1/(1-0,7223)]$$

$$Nt = 1,281$$

$$1,281 = 1,26 (P_T)^{0,569}$$

$$P_T = 1,0297$$

Para a pressão da água adotou-se:

$$P_L = 30 \text{ mCA} = 42,67 \text{ psi}$$

$$Q_L = 31.920 \text{ litros / hora} = 140,53 \text{ gal/min}$$

$$Q_G = 5,24 \text{ m}^3/\text{s} = 11.101,46 \text{ pés}^3/\text{min}$$

$$1,0297 = 0,1575 \Delta P + 0,583 \times 42,67 (140,53 / 11.101,46)$$

$$\Delta P = 4,53 \text{ in. H}_2\text{O} = 115,27 \text{ mm H}_2\text{O}$$

Dimensionamento do desumidificador

A eficiência estimada de remoção de material particulado do desumidificador tipo ciclone é demonstrada no Quadro 17 a seguir.

Quadro 17 – Particulados presentes no gás de saída do lavador Venturi e eficiência estimada de remoção do desumidificador.

Faixa granulométrica	Porcentagem (%) de remoção por faixa granulométrica	Peso (mg/Nm³) equivalente por faixa	Peso (mg) removido	Peso (mg/Nm³) restante
10,9 – 21	96	0,00	0,00	0,00
5,17 – 10,9	83	0,02	0,02	0,00
3,24 – 5,17	68	0,10	0,07	0,03
2,03 – 3,24	57	0,27	0,15	0,12
1,06 – 2,03	38	0,49	0,19	0,30
0,5 – 1,06	29	6,26	1,81	4,44
0 – 0,5	15	40,61	6,09	34,52
	Soma	47,75	8,33	39,42

Fonte: Autor.

Conforme verificado no quadro 17, a composição do gás após o sistema de tratamento composto por um ciclone, um lavador de gás tipo Venturi, um segundo lavador de gás tipo Venturi e um desumidificador tipo ciclone alcançaram uma eficiência estimada de:

Concentração máxima de particulados, medida na saída do topo do alto forno da Citygusa foi de 17,3 g/Nm³.

$39,42 \text{ mg/Nm}^3 / 17.300 \text{ mg/Nm}^3 = 99,77\%$ (eficiência estimada)

Parâmetros e premissas de projeto:

Média de geração do GAF da Citygusa, 15.960,00 Nm³/h.

Vazão = Q = 15.960 Nm³/h

Temperatura média do gás na entrada do desumidificador = 40 °C

Temperatura medida em outra usina com o sistema de tratamento similar.

Vazão real = 15.960 Nm³/h x (273 + 40) °C / 273 °C

Vazão real = 18.298,46 m³/h = 5,08 m³/s

Para velocidade (V) na entrada do desumidificador foi adotado 26 m/s.

A velocidade utilizada se deve aos mesmos critérios utilizados para a velocidade adotada no ciclone, conforme já descrito.

A área (A) é a seção de entrada no ciclone.

Portanto tem-se:

$$Q = V \times A = 5,08 = 26 \times \frac{\pi \times d^2}{4}$$

$$d = 0,498 \text{ m}$$

Adota-se $d = 500 \text{ mm}$

Conforme a Figura 42, as dimensões do desumidificador tipo ciclone são definidas com o diâmetro da tubulação da entrada do gás, calculada acima. Tal sistema já foi testado e comprovado a eficiência na separação da água do gás por várias siderúrgicas mineiras.

Perda de carga:

$$\Delta P = (12 \times 1,17d \times 0,67d) / (0,5 \times 3,61d^2 \times (5d / 3,24d)^{1/3} \times (4d / 3,24d)^{1/3})$$

$$\Delta P = (9,4068d^2) / (1,805d^2 \times 1,1556 \times 1,0727)$$

$$\Delta P = 4,20 \text{ in. H}_2\text{O} = 106,68 \text{ mm H}_2\text{O}$$

4.3 Verificação da potência disponível no sistema da Citygusa

Conforme Item 3.5.5, a potência dos motores dos ventiladores atualmente em uso na Citygusa é de 525 cavalos (CV).

Sendo,

Temperatura do ar de entrada dos ventiladores: 40°C (temperatura medida na casa de máquinas)

Vazão de ar necessária para produção do ferro gusa (injeção nas ventaneiras): 1.500 Nm³ de ar/tonelada de ferro gusa (DE CASTRO et al., 2004).

Produção média de ferro gusa: 191,56 t/dia

Portanto,

$$\text{Vazão} = 191,56 \times 1.500 = 287.340 \text{ Nm}^3/\text{dia}$$

$$\text{Vazão} = 287.340 / 24 = 11.972,5 \text{ Nm}^3/\text{h} = 13.726,71 \text{ m}^3/\text{h}$$

Cálculo da potência de um ventilador centrífugo

$$525 \text{ cv} = 13.726,71 \text{ m}^3/\text{h} \times \text{Pt} / 3600 \times 75 \times 0,68$$

$\text{Pt} = 7.022 \text{ mm H}_2\text{O}$ = Pressão disponível no atual sistema de ventilação da Citygusa.

Conforme conversa com o engenheiro metalúrgico da produção da Citygusa e medição realizada, o sistema de motores e ventiladores que compõe a casa de máquinas está trabalhando com uma folga de 1.400 mm H₂O (milímetros de coluna d'água) de pressão e o atual sistema de tratamento exige em torno de 180 mm H₂O.

Cálculo da perda de carga do sistema de controle proposto:

$$\text{Ciclone} = 106,78 \text{ mm H}_2\text{O}$$

$$\text{Primeiro Lavador de gás} = 850,80 \text{ mm H}_2\text{O}$$

$$\text{Segundo Lavador de gás} = 115,27 \text{ mm H}_2\text{O}$$

$$\text{Desumidificador} = 106,78 \text{ mm H}_2\text{O}$$

$$\text{Rede de tubulações} = 150 \text{ mm H}_2\text{O}$$

Perda de carga total requerida no sistema proposto = 1.329,63 mm H₂O

Considerando a disponibilidade de pressão informada pelo engenheiro metalúrgico e a perda de carga dos equipamentos de controle instalados, a pressão atual até o topo do alto forno equivale a:

Pressão até o topo do alto forno = 7.022,07 mm H₂O (Pressão atual no sistema de ventilação) – 1.400 mm H₂O (Pressão disponível) – 180 mm H₂O (pressão atual do sistema de tratamento de GAF) = 5.442,07 mm H₂O

Sabendo que a disponibilidade de pressão do atual sistema está entorno de 1.580 mm H₂O e que o sistema proposto necessita de 1.329,63 mm H₂O, não será necessário alterações na casa de máquinas, ventiladores e motores.

O sistema de tratamento do gás proposto precisaria de 1.329,63 mm H₂O para viabilizar a utilização do GAF em um sistema de geração de energia. Sendo assim a modificação do sistema é possível considerando a pressão disponível no sistema atual.

4.4 Custos referentes às modificações propostas

Depois de avaliados, os motores presentes na empresa possuem potência suficiente para as modificações propostas no novo sistema de tratamento das emissões atmosféricas do alto forno.

Em relação às modificações dos equipamentos de tratamento atmosférico o custo final dos projetos e execução serão de R\$ 490.700,00 (quatrocentos e noventa mil e setecentos reais), conforme orçado em uma empresa de projetos em desempoeiramento atmosférico. Este orçamento encontra-se no Anexo III.

Para as siderúrgicas mineiras não integradas os custos referentes a sistemas de desempoeiramentos são elevados, fazendo com que essas usinas busquem as soluções mais baratas do mercado, utilizando até mesmo de peças e equipamentos usados.

Os equipamentos escolhidos para os sistemas de tratamento atmosférico da Citygusa são os equipamentos mais utilizados nas outras siderúrgicas mineiras não integradas, conforme mostrando no Item 2.6.3.

4.5 Modificações nos recuperadores de calor - Glendon

Algumas modificações nos glendons podem aumentar sua eficiência consideravelmente.

Para esquentar o gás que será insuflado no alto forno, uma troca de energia ocorre entre os gases da combustão e o ar de sopro. Nessa troca, 11% acontece por radiação. Por outro lado, 89% de toda energia é trocada por convecção, e a convecção está presente mais significativamente ao longo de todo o glendon (ASSUNÇÃO, 2006).

É possível aumentar a transferência de energia por convecção através do aumento do coeficiente de convecção. O coeficiente de convecção é diretamente proporcional ao número de Reynolds, que expressa o grau de turbulência do escoamento, e consequentemente diretamente proporcional à velocidade do fluido (ASSUNÇÃO, 2006).

Devido à importância da transferência por convecção nos glendons, o aumento equivalente a 10 % da velocidade dos gases da combustão, gera um acréscimo de 18°C na temperatura do ar de sopro na saída do glendon, o que sugere que o aumento da transferência de calor por convecção é uma alternativa viável para o aumento da eficiência energética do glendon (ASSUNÇÃO, 2006).

Assim, se a velocidade do escoamento dos gases da combustão aumentar, o coeficiente de convecção também aumenta, e consequentemente a troca térmica será maior (ASSUNÇÃO, 2006).

O aumento da transferência de calor por convecção pode ser considerada uma alternativa tecnicamente mais viável para o aumento da eficiência energética do glendon (ASSUNÇÃO, 2006).

A perda térmica na tubulação de entrada do glendon, que gira em torno de 50°C, pode ser reduzida com um isolamento térmico na tubulação. Uma camada de fibra cerâmica de 0,1016 m (4") reduziria a perda de 50°C para 1,5°C. Este aumento de temperatura do ar de sopro na entrada do Glendon significa um aumento de temperatura de 14 °C na saída do Glendon (ASSUNÇÃO, 2006).

A perda de energia pelas paredes e teto representa cerca de 1% da energia liberada pela combustão do gás de alto-forno. Esta perda pode ser reduzida se o isolamento do teto nas câmaras de combustão for melhorado, uma vez que é por esta região que a maior parte da energia é perdida (ASSUNÇÃO, 2006).

Todas essas melhorias proporcionariam um consumo de GAF nos glendons bem menor que o atual. Sendo que, quanto mais GAF disponível para queima em uma termelétrica, maior a geração de energia e menor o tempo de retorno do investimento.

Conforme levantado junto com o diretor da empresa, as modificações propostas nesse trabalho para aumento de velocidade dentro dos glendons e troca de revestimento, estaria na faixa de R\$1.600.000,00 (hum milhão e seiscentos mil reais). Tais modificações tornariam os glendons mais eficientes, sobrando maior combustível para termelétrica e possibilitando até mesmo a comercialização do excedente de energia elétrica produzida.

4.6 Consumo de energia na Citygusa

O consumo de energia elétrica na usina siderúrgica Citygusa é apresentado no quadro a seguir.

Quadro 18 – Consumo de energia elétrica por tonelada de ferro gusa produzido
– Siderúrgica Citygusa.

	JANEIRO	FEVEREIRO	MARÇO	ABRIL
CONSUMO ENERGIA MÊS (kWh)	440.580	446.880	414.540	455.280
PRODUÇÃO (TONELADAS/MÊS)	5.589,96	5.790,96	5.901,80	5.705,26
CONSUMO (kWh POR TONELADA DE GUSA)	78,81	77,16	70,23	79,80

Fonte: CEMIG, 2012.

A conta de energia elétrica da Citygusa varia entre R\$160.000,00 a R\$180.000,00 reais por mês. Segue no anexo IX a conta de energia elétrica da Citygusa.

Com valores expressivos na conta de energia, um sistema de aproveitamento do GAF em uma termelétrica é uma alternativa para a redução de custos.

4.7 Levantamento de custos referentes à implantação de uma usina termelétrica

Para a possível implantação de uma usina termelétrica na siderúrgica Citygusa, um estudo com uma empresa fornecedora de equipamentos e instalação de sistemas de geração de energia elétrica foi concluído, a fim de viabilizar a implantação.

A empresa fornecedora do serviço realizou um cálculo em função da produção de ferro gusa e a geração de GAF para dimensionar a capacidade de geração de energia elétrica. O resultado calculado para a Citygusa foi de um sistema de geração de energia elétrica de 1MW. A partir desse dimensionamento, o custo benefício para a empresa foi calculado. Considerando a capacidade de fornecimento da GAF para a termelétrica e o custo atual de energia elétrica da usina Citygusa, a economia seria entrono de R\$135.000 (cento e trinta e cinco mil reais) na conta de energia.

Com o fornecimento completo, contemplando todas as etapas a seguir o custo final da implantação da termelétrica na Citygusa será de R\$ 7.867.285,00 (sete milhões oitocentos e sessenta e sete mil e duzentos e oitenta e cinco reais). Segue no anexo V a proposta apresentada.

- Projeto de implantação;
- Projeto Civil Executivo;
- Construção Civil;
- Projeto Mecânico;
- Projeto Elétrico;
- Projeto de Automação;
- Montagem Mecânica, Elétrica e Automação;
- Software editor;
- Materiais Diversos;
- Treinamento;
- Crédito de Carbono.

4.8 Cálculo financeiro do investimento

Conforme descrito nos itens anteriores, os valores de investimento para as modificações propostas no sistema de tratamento de gás do alto forno e a implantação de uma termelétrica, foi montado um quadro para calcular o retorno do investimento. Segue o quadro 19 A, B e C com o cálculo do investimento, considerando a soma do custo do sistema de tratamento mais o custo da termelétrica, o juros de 5% anual conforme valor utilizado para empréstimo e o valor de amortização, referente à geração de energia pela própria siderúrgica através da termelétrica, reduzindo sua conta de energia elétrica, considerando uma majoração anual de 5%.

Quadro 19 A – Cálculo de investimento da Siderúrgica Citygusa.

Sistema Proposto na Citygusa				
Mês	1	2	3	4
Financiamento	8357985,0	8256433,1	8154467,6	8052085,6
Dívida com juros 5% aa Índice 1.004074 am.	8392035,4	8290069,8	8187688,9	8084889,8
Amortização	135602,3	135602,3	135603,3	135604,3
Saldo Devedor	8256433,1	8154467,6	8052085,6	7949285,5
Mês	5	6	7	8
Financiamento	7949285,5	7846065,6	7742424,2	7638359,5
Dívida com juros 5% aa Índice 1.004074 am.	7981670,9	7878030,4	7773966,8	7669478,2
Amortização	135605,3	135606,3	135607,3	135608,3
Saldo Devedor	7846065,6	7742424,2	7638359,5	7533869,9
Mês	9	10	11	12
Financiamento	7533869,9	7428953,6	7323608,9	7217833,9
Dívida com juros 5% aa Índice 1.004074 am.	7564562,9	7459219,1	7353445,2	7247239,4
Amortização	135609,3	135610,3	135611,3	135612,3
Saldo Devedor	7428953,6	7323608,9	7217833,9	7111627,1

Fonte: Autor.

Quadro 19 B – Cálculo de investimento da Siderúrgica Citygusa.

Mês	13	14	15	16
Financiamento	7111627,1	6998217,5	6884345,8	6770010,2
Dívida com juros 5% aa Índice 1.004074 am.	7140599,9	7026728,2	6912392,6	6797591,3
Amortização	142382,4	142382,4	142382,4	142382,4
Saldo Devedor	6998217,5	6884345,8	6770010,2	6655208,8
Mês	17	18	19	20
Financiamento	6655208,8	6539939,8	6424201,1	6307990,9
Dívida com juros 5% aa Índice 1.004074 am.	6682322,2	6566583,5	6450373,3	6333689,6
Amortização	142382,4	142382,4	142382,4	142382,4
Saldo Devedor	6539939,8	6424201,1	6307990,9	6191307,2
Mês	21	22	23	24
Financiamento	6191307,2	6074148,2	5956511,9	5838396,3
Dívida com juros 5% aa Índice 1.004074 am.	6216530,6	6098894,3	5980778,7	5862181,9
Amortização	142382,4	142382,4	142382,4	142382,4
Saldo Devedor	6074148,2	5956511,9	5838396,3	5719799,5
Mês	25	26	27	28
Financiamento	5719799,5	5593600,5	5466887,3	5339657,8
Dívida com juros 5% aa Índice 1.004074 am.	5743102,0	5616388,8	5489159,4	5361411,6
Amortização	149501,5	149501,5	149501,5	149501,5
Saldo Devedor	5593600,5	5466887,3	5339657,8	5211910,1
Mês	29	30	31	32
Financiamento	5211910,1	5083641,9	4954851,1	4825535,6
Dívida com juros 5% aa Índice 1.004074 am.	5233143,4	5104352,6	4975037,2	4845194,9
Amortização	149501,5	149501,5	149501,5	149501,5
Saldo Devedor	5083641,9	4954851,1	4825535,6	4695693,3

Fonte: Autor.

Quadro 19 C – Cálculo de investimento da Siderúrgica Citygusa.

Mês	33	34	35	36
Financiamento	4695693,3	4565322,1	4434419,7	4302984,0
Dívida com juros 5% aa Índice 1.004074 am.	4714823,6	4583921,2	4452485,5	4320514,3
Amortização	149501,5	149501,5	149501,5	149501,5
Saldo Devedor	4565322,1	4434419,7	4302984,0	4171012,8
Mês	37	38	39	40
Financiamento	4171012,8	4031028,9	3890474,7	3749347,9
Dívida com juros 5% aa Índice 1.004074 am.	4188005,5	4047451,3	3906324,5	3764622,8
Amortização	156976,6	156976,6	156976,6	156976,6
Saldo Devedor	4031028,9	3890474,7	3749347,9	3607646,2
Mês	41	42	43	44
Financiamento	3607646,2	3465367,1	3322508,4	3179067,7
Dívida com juros 5% aa Índice 1.004074 am.	3622343,7	3479485,0	3336044,3	3192019,2
Amortização	156976,6	156976,6	156976,6	156976,6
Saldo Devedor	3465367,1	3322508,4	3179067,7	3035042,6
Mês	45	46	47	48
Financiamento	3035042,6	2890430,8	2745229,8	2599437,3
Dívida com juros 5% aa Índice 1.004074 am.	3047407,4	2902206,4	2756413,9	2610027,4
Amortização	156976,6	156976,6	156976,6	156976,6
Saldo Devedor	2890430,8	2745229,8	2599437,3	2453050,8
Mês	49	50	51	52
Financiamento	2453050,8	2298219,1	2142756,6	1986660,8
Dívida com juros 5% aa Índice 1.004074 am.	2463044,5	2307582,0	2151486,2	1994754,4
Amortização	164825,4	164825,4	164825,4	164825,4
Saldo Devedor	2298219,1	2142756,6	1986660,8	1829929,0

Fonte: Autor.

Quadro 19 D – Cálculo de investimento da Siderúrgica Citygusa.

Mês	53	54	55	56
Financiamento	1829929,0	1672558,7	1514547,3	1355892,1
Dívida com juros 5% aa Índice 1.004074 am.	1837384,1	1679372,7	1520717,5	1361416,0
Amortização	164825,4	164825,4	164825,4	164825,4
Saldo Devedor	1672558,7	1514547,3	1355892,1	1196590,6
Mês	57	58	59	60
Financiamento	1196590,6	1036640,0	876037,9	714781,4
Dívida com juros 5% aa Índice 1.004074 am.	1201465,5	1040863,3	879606,9	717693,4
Amortização	164825,4	164825,4	164825,4	164825,4
Saldo Devedor	1036640,0	876037,9	714781,4	552868,0
Mês	61	62	63	64
Financiamento	552868,0	382053,7	210543,5	38334,5
Dívida com juros 5% aa Índice 1.004074 am.	555120,4	383610,2	211401,2	38490,7
Amortização	173066,7	173066,7	173066,7	173066,7
Saldo Devedor	382053,7	210543,5	38334,5	-134576,0

Fonte: Autor.

O retorno do investimento foi de em 64 meses, ou seja, 5 anos e 4 meses.

5 CONCLUSÃO

As indústrias siderúrgicas mineiras não integradas buscam constantemente novas tecnologias e melhorias nos seus sistemas de produção de ferro gusa para se tornarem competitivas nesse mercado que é cada vez mais difícil. A busca do aperfeiçoamento no sistema de produção e de reutilização dos resíduos gerados durante o processo de fabricação do ferro gusa é um caminho para que as siderúrgicas não integradas consigam disputar com as siderúrgicas integradas.

Hoje, a geração do gás de alto forno no processo de produção do ferro gusa é vista como uma solução para diminuição dos custos da empresa em relação ao produto final.

Considerando que a escassez energética é cada vez maior, tendo o foco o uso de recursos não renováveis pela humanidade durante séculos, as tecnologias em energias renováveis e processos de produção mais limpos com o intuito de reutilização dos resíduos e efluentes gerados, traz não apenas ganho ao meio ambiente mas também ganhos financeiros à empresa.

A utilização do gás de alto forno em sistemas dentro da empresa proporciona uma gestão ambiental do efluente atmosférico com mais eficiência e rendimento. A utilização do efluente atmosférico da siderúrgica fomenta oportunidade de crescimento e inovação, no sentido de eliminar o impacto ambiental proporcionado pelo descarte do efluente, bem como reduzir a geração de resíduo e as grandes perdas de energia.

Para a utilização desse efluente atmosférico gerado no processo de produção do ferro gusa um sistema de tratamento bem dimensionado precisa ser implantado. O gás gerado se não for tratado adequadamente inviabilizará sua utilização em um sistema de geração de energia. O sistema de lavagem de gás é o sistema mais utilizado no tratamento dos GAF para a utilização em uma termelétrica.

Os investimentos em melhorias nos sistemas de tratamento dos gases de alto forno trazem, não somente oportunidade de utilização desse efluente em termelétricas mais também traz benefícios ao meio ambiente. A emissão de material particulado presente no gás para o meio ambiente terá padrões bem abaixo do limite máximo, devido à eficiência exigida pelos equipamentos da termelétrica, minimizando ainda mais o impacto causado pela emissão do gás na atmosfera.

Considerando as melhorias no sistema de tratamento do GAF e o investimento para implantação da termelétrica, no caso aqui proposto da usina siderúrgica Citygusa, o custo final seria entorno de R\$

8.357.985,00 (oito milhões trezentos e cinquenta e sete mil e novecentos e oitenta e cinco reais). Tal investimento proporcionaria uma economia mensal na conta de energia de R\$ 135.000,00 (cento e trinta e cinco mil reais). Sendo assim, o investimento se pagaria em 64 (sessenta e quatro) meses.

No sistema dos glendons, se as melhorias propostas forem aplicadas, o tempo de retorno do investimento aumentaria. Porém esse tempo poderá diminuir, considerando que com tais melhorias o GAF consumido seria menor, sobrando um volume maior de gás do alto forno para termelétrica conseqüentemente aumentando a geração de energia e aumentando a economia mensal na conta de luz.

O estudo realizado para a gestão dos gases do alto forno da usina siderúrgica Citygusa mostra que o investimento no sistema de tratamento dos gases, melhorias nos glendons e a implantação de uma termelétrica, possibilita a empresa continuar produzindo um produto competitivo, considerando as dificuldades dos pequenos produtores de ferro gusa no mercado atual. Além disto, pode-se gerar novas expectativas de rendimentos futuros com a comercialização do excedente de energia elétrica gerada na usina siderúrgica.

6 RECOMENDAÇÕES

Para futuros projetos vale à pena fazer um estudo do reaproveitamento do calor térmico descartado nas termelétricas ou até mesmo o calor perdido no gás descartado na chaminé dos glendons. Esse reaproveitamento pode ser feito por um sistema de absorção para refrigerar a carcaça do alto forno, aumentando assim a vida útil do mesmo e reduzindo os custos da siderúrgica.

Na busca da sustentabilidade algumas usinas siderúrgicas produzem seu próprio carvão, com florestas enormes de eucaliptos, tornando o sistema de geração de energia elétrica a biomassa (podas de eucaliptos triturados) outra via para faturamento. A implantação de uma termelétrica que funciona a partir do GAF e biomassa está sendo um ótimo caminho para o setor de ferro gusa e para o meio ambiente.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, David M.; BILLINGS, Charles E.; BLOOMFIELD, Bernard D.; BONN, David E.; BUB, Robert A.; CAPLAN, Knowlton J.; EVANS, Robert B.; FIRST, Melvin W.; GURNHAM, Fred C.; HERRICK, Robert A.; PAULUS, Harold J.; SPAITE, Paul W.; STERN, Arthur C.; YOCOM, John E. **Air Pollution Manual – Part II – Control Equipment**. 1967.

ANEEL. **Resolução normativa nº 235, de 14 de novembro de 2006**. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/>> Acesso em 18 junho de 2012.

ANEEL. **Resolução normativa nº 228, de 25 de julho de 2006**. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/>> Acesso em 18 junho de 2012.

ARONGAUS, Simion. **Curso de Cogeração Térmica**. Departamento de Engenharia Mecânica – UFRJ. Rio de Janeiro. 1996.

ASSUNÇÃO, Charles Sóstenes. **Glendon siderúrgico: análise termodinâmica e Modelagem matemática simplificada**. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de engenharia, programa de pós-graduação com grau de mestrado em engenharia mecânica. Belo Horizonte, 2006.

BAMBIL, Bárbara Lanzarini; MARQUES, Leonardo Freire. **Central termoeétrica**. Universidade Federal da Grande Dourados. Engenharia de Energia. Dourados-MS, 2011.

BATURIN, V. V. **Fundamentos de Ventilacion Industrial**. Barcelona, 1976.

BRASIL, Newton Paterman. **Apostila de co-geração**. Curso de Engenharia de Equipamentos. Rio de Janeiro, 2005.

CEEETA – Centro de Estudos em Economia da Energia dos Transportes e do Ambiente. **Tecnologias de Micro-Geração e Sistemas Periféricos**. Tecnologias de Aproveitamento de Calor - Parte II. Lisboa, 2001. Disponível em

<www.ceeeta.pt/downloads/pdf/Aproveitamento.pdf > Acesso em 09 set. de 2012.

CEMIG - COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. **Uso de Energia na Indústria de Ferro-Gusa Não Integrada em Minas Gerais**. Belo Horizonte.CETEC/CEMIG,1988.266 p.

CEMIG - COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. **Conta de energia elétrica da Siderúrgica Citygusa**. Matozinhos, 2012.

CEMIG - COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. **Conta de energia elétrica**. Sete Lagoas, 2012.

CHAVES, Eliane Lara. **RCA e PCA - Relatório de Controle Ambiental e Plano de Controle Ambiental**. Citygusa Siderúrgica LTDA. Matozinhos, 1999.

CHAVES, Enrico Lara. Pesquisa realizada entre as siderúrgicas mineiras não integradas. **Consumo de Gás de Alto forno**. Sete Lagoas; Matozinhos; Divinópolis; Itaúna; Pedro Leopoldo, 2011.

CHAVES, Enrico Lara. **Quadro de geração de resíduos e produção de ferro gusa**. Sete Lagoas e Matozinhos, 2012.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica**, vol. III. Materiais de Construção Mecânica, 1986.

COAMB. **Pesquisas Ambientais**. Betim, 2012.

COGEN, **Associação da Indústria de Cogeração de Energia**. São Paulo, 2003. Disponível em <http://www.cogensp.com.br/cog_conceito.asp> Acesso em 18 junho de 2012.

COPAM - Conselho Estadual de Política Ambiental, **Deliberação Normativa do nº 49**, de 28 de setembro de 2001. Dispõe sobre o controle ambiental das Indústrias Não Integradas de produção de ferro gusa no Estado de Minas Gerais. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=132>>. Acessado em 03 de Set. 2012.

DELTA DUCON. **Filtros de Mangas**. São Paulo, 2003. Disponível em < http://www.deltaducon.com.br/produtos/_filtrosdemangas.html> Acesso em 24 maio de 2012.

DE ALMEIDA, Manuel J. Marques. **Manual de Captação de Poeiras nos Locais de Trabalho**. Portugal, 1981.

DE CASTRO, Luiz Fernando Andrade; FIGUEIRA, Renato Minelli; TAVARES, Roberto Parreiras. **Princípios Básicos de e Processos de Fabricação do Gusa ao Aço líquido**. Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Belo Horizonte, 2004.

DE MELO LISBOA, Henrique; SCHIRMER, Waldir Nagel. **Controle de Poluição Atmosférica – Unidade VII**. Montreal, 2007.

DE SOUSA, Claudio Silva. **Análise Exergética do Processo de Produção de Ferro Gusa em Altos-fornos: Identificação de Oportunidades em Redução de Emissões de Gases de Efeito Estufa**. Faculdade de Aracruz, Mestrado Profissional em Tecnologia Ambiental. Aracruz, 2010.

DE OLIVEIRA, Míriam Regina Cardoso; MARTINS, Jader. **Caracterização e classificação do resíduo sólido "pó do balão", gerado na indústria siderúrgica não integrada a carvão vegetal: estudo de um caso na região de Sete Lagoas/MG**. Química Nova, Vol. 26, No. 1, 5-9, 2003. Disponível em: <www.scielo.br/pdf/qn/v26n1/14292.pdf>. Acesso em: 03 Set. 2012.

ELETROBRÁS. **Plano Decenal de Expansão 1999/2008**, GCPS - Grupo
Coordenador do Planejamento dos Sistemas Elétricos, Rio de Janeiro, 1999.

ELETROBRÁS. **Plano Decenal de Expansão 2000/2009**, GCPS - Grupo
Coordenador do Planejamento dos Sistemas Elétricos, Rio de Janeiro, 2000.

GALVÃO FILHO, João Batista. **A Indústria da Fundição e o Meio Ambiente**. São Paulo, 2010. Artigo disponível em: <<http://www.consultoriaambiental.com.br>> Acesso em 09 jan. 2012.

GORDON, G.; PEISAKHOV, I. **Dust Collection and Gas Cleaning**. Moscow, 1972.

HOLANDA, Eduardo. **Combustão, 2008**. Disponível em <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAHAHDoAF/combustao>> Acesso em 09 jan. 2013.

JACOMINO, Vanusa Maria Feliciano; CASTRO, Luiz Fernando Andrade de; RIBEIRO, Eduardo Delano Leite; LEO, Mônica Maria Diniz; SOUZA, Caetano Marciano de; GOMES, Abdias Magalhães; ALMEIDA, Marys Lene Braga; FURIATTI, Luiz Eduardo. **Controle Ambiental das Indústrias de Ferro-Gusa em Altos-Fornos a Carvão Vegetal**. Belo Horizonte: Projeto Minas Ambiente. Segrac Editora e Gráfica Ltda., 2002.

JOSÉ, Humberto Jorge. **Combustão e Combustíveis**. Apostila Química Tecnológica Geral. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. Santa Catarina, 2004

JÚNIOR, Dilermando Salvador de Souza. **Estudo do comportamento de escórias de alto-forno a Carvão vegetal produzidas a partir de ativação à quente**. Universidade Federal de Minas Gerais- Escola de Engenharia. Dissertação de Mestrado. Belo Horizonte, 2007.

KHARTCHENKO, Nikolai V., **Advanced Energy Systems**, 1º ed, Washington: Taylor & Francis, 1997, 285p.

KERN, Donald Q. **Processos de Transmissão de Calor**. Editora Guanabara Koogan S.A. Rio de Janeiro, 1987.

LANDGRAF, Fernando José Gomes; TSCHIPTSCHIN, André Paulo; GOLDSTEIN, Hélio. **Notas sobre a história da metalurgia no Brasil, 1500-1850**. In: Milton Vargas. (Org.). História da Técnica e da Tecnologia no Brasil. São Paulo: UNESP, 1994, v. cap 5, p. 107-129.

LIEWENDAHL, Johan. Deviant ART. **Venturi Scrubber**. Suécia, 2012.

Artigo disponível em: <

http://oouah.deviantart.com/gallery/#/art/Venturi-Scrubber-307266786?_sid=315fb8af> Acesso em 12 março 2013.

LINERO, Francisco Antônio Barba. **Caldeiras funcionamento e operação**. Maceió, 2008.

MACHADO, Marcelo Lucas Pereira. **Siderurgia da matéria-prima ao aço laminado**. Vitória: Centro Federal de Educação Tecnológica do Estado do Espírito Santo / Coordenadoria de Metalurgia e Materiais, 2006.

MACHADO, Marcelo Lucas Pereira; SOBRINHO, Vicente de Paulo Ferreira Marques; ARRIVABENE, Lúcio Flávio. **Siderurgia para não Siderurgistas**. Vitória, 2003.

MACIEL, Carlos Renato França. **Análise energética e exérgica de uma central termoeletrica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) PUC Minas, Belo Horizonte, 2004.

MACIEL, Marcela Alvares. **Sustentabilidade energética industrial**. Lavras, 2008, p.105. Tese (Doutorado em Planejamento Energético) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em <www.ppe.ufrj.br> Acesso em 04 jan. 2012.

MALARD, Antônio Augusto Melo. **Avaliação ambiental do setor de Siderurgia não integrada a carvão vegetal do Estado de Minas Gerais**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade Sócioeconômica e Ambiental) Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP. Ouro Preto, 2009.

MARAFIGO, Aline Aidil de; ROSA, Willian Bella. **Produção do ferro gusa**. Curso técnico em metalurgia. São Roque, 2010.

MARÇAL, Ana Gabriela Garcia; SANDOLI, Guilherme; MONTE, Juliana; DE ZORZI, Vinícius Gaburro. **Cogeração: uma abordagem introdutória**. Piracicaba, 2010.

MECATRONICAATUAL, 2009. **Analísadores de gases**. Disponível em:
<<http://www.mecatronicaatual.com.br/secoes/leitura/384>>.

Acessado em 05 de Julho de 2012.

MESQUITA, Armando Luís de Sousa; GUIMARÃES, Fernando de Araujo; NEFUSSI, Néelson. **Engenharia de Ventilação Industrial**. São Paulo: Edgard Blücher. CETESB, 1977.

MINAS GERAIS. **Deliberação Normativa COPAM nº 49**, de 28 de setembro de 2001. Dispõe sobre o controle ambiental das Indústrias Não Integradas de produção de ferro gusa no Estado de Minas Gerais. Diário do Executivo, Minas Gerais, 2001.

MINITEC – Minitecnologias Ltda. **MINI ALTO-FORNO**. Divinópolis, 2009. Disponível em <[http:// www.minitecnologias.com.br](http://www.minitecnologias.com.br)> Acesso em 09 jan. 2012.

MOURÃO, Marcelo Breda; YOKOJI, Akira; MALYNOWSKYJ, Antonio; LEANDRO, César Alves da Silva; TAKANO, Cyro; QUITES, Eduardo Emery Cunha; GENTILE, Erberto Francisco; SILVA, Guilherme F. B. Lenz; BOLOTA, José Roberto; GONÇALVES, Marcelo; FACO, Rubens José. **Introdução à Siderurgia**. São Paulo, 2007.

NETO, Vicente Corrêa. **Análise de viabilidade da cogeração de energia elétrica em ciclo combinado com gaseificação de biomassa de cana-de-açúcar e gás natural**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Pós-graduação de engenharia. Ciências em planejamento energético. Rio de Janeiro, 2001.

PEREIRA, Carolina Braga. **Relatório de Estágio**. Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP. Engenharia de Produção. Ouro Preto, 2008.

PINTO, Cayo César Lopes Pisa. **Usinas Termelétricas**. Centro Federal de Educação Tecnológica do Espírito Santo - Curso Técnico em Eletrotécnico. Vitória, 2008.

POULALLION, Paul Louis; CORRÊA, Vicente Neto. **A Política Energética do Gás Natural e Eletricidade - Paradoxos ou Absurdos**. Fórum de Energia, IEE – Instituto de Eletrotécnica e Energia, USP. São Paulo, 2000.

RIPOLI, Tomaz Caetano Cannavam; RIPOLI, Marco Lorenzo Cunali. **Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente.** Piracicaba, 2009.

ROMEIRO, Cláudia Domingues. **Estudo Paramétrico e Diagnóstico Preliminar do Esquema Atual da Usina Termelétrica de Barreiro.** Dissertação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia. Itajubá, 2008.

ROMEIRO, Solange Bianco Borges. **Química na Siderurgia.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Instituto de química. Porto Alegre, 1977.

ROSIN, Paul; FEHLING, Michael. **Le Diagramme "It" de la combustion.** Paris, 1932.

SALIerno, Giovanni Felice. **Sistema de monitoramento do desempenho dos altos-fornos a carvão vegetal.** Ouro preto, 2007.

SPELLMAN, Frank R.; WHITING, Nancy E. **Environmental Engineer's Mathematics Handbook.** United States of America, 2004.

TABELA PERIÓDICA ONLINE, 2011. **Ferro.** Disponível em <http://www.tabela.oxigenio.com/metais_de_transicao/elemento_quimico_ferro.htm> Acesso em 04 jan. 2012.

VELÁZQUEZ, Sílvia Maria Stortini González. **A cogeração de energia no segmento de papel e celulose: contribuição à matriz energética do Brasil.** 2000. 205 p. Dissertação (Mestrado em Energia) – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

WIKIPÉDIA - A. **Calor Latente.** Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Calor_latente> Acesso em: 23 de Maio de 2012.

WIKIPÉDIA - B. **Fundente.** Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Fundente>> Acesso em: 10 de Abril de 2012.

WIKIPÉDIA -C. **Ganga**. Disponível em: <
<http://pt.wikipedia.org/wiki/Ganga>> Acesso em: 10 de Abril de 2012.

WIKIPÉDIA - D. **Minério de ferro**. Disponível em:
<http://pt.wikipedia.org/wiki/Min%C3%A9rio_de_ferro>
Acesso em: 11 de Abril de 2012.

WIKIPÉDIA - E. **Termoelétrica**. Disponível em:
< http://pt.wikipedia.org/wiki/Central_termoel%C3%A9trica>
Acesso em: 12 de Abril de 2012.

WORLDLINGO, 2011. **Alto Forno**. Disponível em:
<http://www.multilingualarchive.com/ma/enwiki/pt/Blast_furnace>.
Acessado em 15 de Nov. 2011.

ANEXOS

Anexo I – Tabela de poder calorífico.

PODER CALORÍFICO INFERIOR

COMBUSTIVEL	PCI	COMBUSTIVEL	PCI	COMBUSTIVEL	PCI
Alcool de cana	5.500 kcal/l	Coque de lenha	7.600 kcal/kg	Óleo de algodão	8.050 kcal/l
Anaraz vintio	6.300 kcal/kg	Coque metalúrgico	7.200 kcal/kg	Óleo de amendoim	8.000 kcal/l
Bagaco de cana (20% ÁGUA)	3.200 kcal/kg	Fibras de palmeira (48% de água)	2.000 kcal/kg	Óleo de babaçu	7.770 kcal/l
Bagaco de cana (50% ÁGUA)	1.800 kcal/kg	Fibras de palmito	3.800 kcal/kg	Óleo de soja	8.125 kcal/l
Bambuí (10% água)	3.700 kcal/kg	Filme polietileno	5.600 kcal/kg	Óleo diesel	8.620 kcal/l
Borra de café	1.570 kcal/kg	Gás de água	4.000 kcal/Nm³	Palha de amendoim (12% água)	3.100 kcal/kg
Carvão de babaçu	7.000 kcal/kg	Gás de água carburetado	6.000 kcal/Nm³	Palha de trigo (20% ÁGUA)	4.200 kcal/kg
Carvão mineral - Cambuí/PR	6.200 kcal/kg	Gás de alto forno	700 kcal/Nm³	Papel	4.200 kcal/kg
Carvão mineral - Charqueadas/ RS	3.100 kcal/kg	Gás de biodigestor (biogás)	5.000 kcal/Nm³	Piche alcatião	8.600 kcal/kg
Carvão mineral - Mina do Içá/ RS	4.200 kcal/kg	Gás de coqueira	4.300 kcal/Nm³	Pó de linho	4.000 kcal/kg
Carvão mineral - Tubarão/ SC	4.500 kcal/kg	Gás de gasogênio	1.260 kcal/Nm³	Pó de madeira fino (seco)	4.000 kcal/kg
Carvão vegetal	7.500 kcal/kg	Gás de nafta	4.220 kcal/Nm³	Pó de madeira grosso (seco)	4.200 kcal/kg
Casca de aveiro	2.200 kcal/kg	Gás GLP (50%)	11.025 kcal/kg	Querosene	2.300 kcal/kg
Casca de algodão	3.000 kcal/kg	Lascas de madeira	9.065 kcal/Nm³	Recortes de couro (14% ÁGUA)	8.300 kcal/l
Casca de amêndoa dendê	4.800 kcal/kg	Linha (40% água)	3.300 kcal/kg	Resíduos de juta	4.400 kcal/kg
Casca de arroz (12% água)	3.300 kcal/kg	Linha (seca) (12% água)	2.400 kcal/kg	Sementes de borraça	3.800 kcal/kg
Casca de babaçu	4.000 kcal/kg	Madeira de cavotes	3.680 kcal/kg	Sementes de grassol (9,5% água)	4.000 kcal/kg
Casca de cacau (8% água)	3.900 kcal/kg	Madeira muito seca	3.800 kcal/kg	Serragem de pinho (40% água)	2.000 kcal/kg
Casca de café	3.800 kcal/kg	Madeira pinho (seca ao ar)	4.800 kcal/kg	Serragem seca (20% água)	4.300 kcal/kg
Casca de cajú	4.700 kcal/kg	Madeira verde	3.500 kcal/kg	Serragem + Cepilho (seco)	3.500 kcal/kg
Casca de côco	4.000 kcal/kg	Óleo combustivel 1A	2.500 kcal/kg	Sisal (11% água)	4.600 kcal/kg
Casca de eucalipto	3.750 kcal/kg	Óleo combustivel 1B	9.750 kcal/kg	Sobras de serraria (pinho)	3.400 kcal/kg
Casca de terno úmido (68% água)	800 kcal/kg	Óleo combustivel 2A	9.940 kcal/kg	Tecido nãlon	4.160 kcal/kg
Carvão (eucalipto)	3.300 kcal/kg	Óleo combustivel 2B	9.550 kcal/kg	Trepas de pano	7.300 kcal/kg
Carvaco de soja	4.300 kcal/kg	Óleo combustivel 3A	9.920 kcal/kg	Turfa (seca ao ar) (25 à 6% água)	4.200 kcal/kg
Cavacos de pinho	2.500 kcal/kg	Óleo combustivel 3B	9.500 kcal/kg		3000 - 5000 kcal/kg
Coque de gás	5.400 kcal/kg		9.670 kcal/kg		

Inferior Heat Power

Aalborg Industries S.A. **Tabelas Técnicas – Poder Calorífico Inferior.**
Disponível em: <<http://www.aalborg-industries.com.br/general.php?ix=131>>. Acessado em 03 de Set. 2012.

Anexo II – Análise do GAF na chaminé do glendon.



3.3 - CHAMINÉ DO GLENDON III

3.3.1 - PRINCIPAIS RESULTADOS

PARÂMETROS AVALIADOS	1ª Coleta	2ª Coleta	3ª Coleta	Média
Concentração de Material Particulado (mg/Nm ³)	351,41	309,84	284,34	315,20
Taxa de Emissão Material Particulado (kg/h)	1,65	1,46	1,34	1,48
Limite Feam DN 001/92	200		(mg/Nm³)	

3.3.2 - OUTROS DADOS

PARÂMETROS AVALIADOS	1ª Coleta	2ª Coleta	3ª Coleta	Média
Data da Coleta	25/02/03	25/02/03	25/02/03	*
Hora início	08:30	09:55	11:15	*
Hora término	09:35	11:00	12:20	*
Pressão Atmosférica (mmHg)	705,18	705,18	705,18	*
Temperatura (°C)	30,29	34,04	35,88	33,40
Umidade (%)	9,70	9,95	9,97	9,87
Velocidade (m/s)	8,48	8,56	8,49	8,51
Qnbs (Nm ³ /h)	4686,35	4716,45	4698,32	4700,37
VmN (Nm ³)	1,07	1,07	1,07	1,07
Isocinética (%)	94,15	94,05	94,14	94,11

3.3.3 - INFORMAÇÕES DA FONTE

Equipamento de contenção:	Não tem
Processo:	Combustão
Condições do Furo:	8,0 (oito) diâmetros de duto reto a montante e 2,0 (dois) diâmetros a jusante.

3.4 - LEGENDA :

P Atm - Pressão atmosférica	v - Velocidade dos gases
Qnbs - Vazão dos gases CNTP	U - Umidade dos gases na chaminé
T - Temperatura chaminé	I - Isocinética amostragem (90 a 110)
Conc. - Concentração	TE - Taxa de Emissão
VmN - Volume de gás coletado nas CNTP	

Anexo III – Orçamento do sistema de tratamento proposto.

1 de outubro de 2012 VT Conservação e Projetos

Belo Horizonte 11 de setembro de 2012.

À

Citygusa

Matozinhos, MG

Ref.: Proposta para projeto, fabricação e montagem do sistema de tratamento de gás do alto forno da Citygusa tomando como base o estudo conceitual apresentado.

Prezados Senhores,

Conforme solicitado estamos apresentando em anexo nossos preços e condições para o fornecimento do sistema de tratamento de gás do alto forno da empresa Citygusa em Matozinhos/MG

PROPOSTA TÉCNICA

1. PREMISSAS

A proposta apresentada tomou como base os estudos conceituais apresentados pela empresa dos sistemas de tratamento e controle do gás do alto forno.

Nossa proposta também considerou o aproveitamento do ciclone de tratamento primário, da tocha e de algumas tubulações ou parte delas.

2. OBJETIVO

2.1 - Engenharia:

A presente proposta tem por objetivo a elaboração do projeto de engenharia básica e de detalhamento de fabricação e montagem do sistema proposto apresentando

- desenho de arranjo geral, planta, cortes e detalhamento dos seguintes equipamentos:
- lavador primário;
 - lavador secundário;
 - desumificador;
 - tubulações e suportes.

2.2 - Fabricação:

Estamos considerando que após a aprovação dos projetos de engenharia básica e de detalhamento serão fabricados os seguintes equipamentos:

- lavador primário;
- lavador secundário;

VT Conservação e Projetos

Rua Ovídio Silva, 494, Bairro Nogueirinha, Itauna-MG
(31)9990-1168

- desumidificador;
- tubulações.

2.3 - Montagem:

Nossa proposta considera como de fornecimento da nossa empresa a desmontagem e montagem dos equipamentos conforme aprovado no arranjo geral/Lay out. Desmontagem e montagem dos ventiladores da casa de máquinas (caso necessário).

2.4 - Fornecimento de equipamentos:

Estamos prevendo em nossa proposta o fornecimento de material para fabricação incluindo bomba de água, bicos dos lavadores, válvula rotativa para o ciclone existente, motores, ventiladores da casa de máquinas do alto forno e painéis elétricos.

3. INÍCIO DOS SERVIÇOS

Os serviços terão início 15 (quinze) dias úteis após a assinatura do contrato.

4. PRAZO DE EXECUÇÃO

O prazo para execução dos serviços:

- Projeto de engenharia básica: 60 dias da assinatura do contrato;
 - Projeto de detalhamento: 45 após aprovação dos projetos;
 - Fabricação: 120 dias
 - Aquisição de equipamentos de terceiros (motores, ventiladores, etc.): 90 dias
 - Desmontagem: 15 dias
 - Montagem: 60 dias após entrega da obra civil;
 - Teste e regulagem: 5 dias
- Total de 305 dias.

5. ESCLARECIMENTOS

Serão de fornecimento da Citygusa os desenhos dos sistemas atualmente implantados, incluindo Lay out, plantas e cortes.

Não está incluído nesta proposta o sistema de tratamento dos efluentes gerados no sistema de lavagem de gás apresentado.

PROPOSTA COMERCIAL

6. OBJETIVO

Fornecimento do sistema de tratamento de gás do alto forno da empresa Citygusa em Matozinhos/MG, conforme estudo conceitual apresentado.

7. PREÇO

Os preços referentes aos itens do objetivo:

7.1 - Referente ao item 2.1 da proposta técnica: R\$55.700,00 (cinquenta e cinco mil e setecentos reais);

7.2 - Referente ao item 2.2 da proposta técnica: R\$190.000,00 (cento e noventa mil reais);

7.3 - Referente ao item 2.3 da proposta técnica: R\$105.000,00 (cento e cinco mil reais);

7.4 - Referente ao item 2.4 da proposta técnica: R\$140.000,00 (cento e quarenta mil reais);

8. FORMA DE PAGAMENTO

20% na assinatura do contrato;

10% na entrega dos projetos;

20% no começo da fabricação

20% na conclusão da fabricação

20% no início da montagem dos equipamentos;

10% na conclusão da montagem e testes.

9. VALIDADE

30 dias.

APONDO O VOSSO "DE ACORDO" NESSA PROPOSTA, ESSA PASSARÁ A TER FORÇA DE CONTRATO.

Colocamos ao inteiro dispor para quaisquer esclarecimentos adicionais,

Atenciosamente,

VT CONSERVAÇÃO E PROJETOS LTDA.

VT Conservação e Projetos
Rua Ovídio Silva, 494, Bairro Nogueirinha, Itáuna-MG
(31)9990-1168

Anexo IV – Conta de energia elétrica da usina siderúrgica Citygusa.



Cemig Distribuição S.A. CNPJ 06.981.160/0001-16/ Insc. Estadual 062.322136-0087 Tarifa Social de Energia Elétrica – TSEE foi criada pela Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002
 Av. Barbacena, 1.200 – 17º andar – Ala A1 – CEP 30190-131 – Belo Horizonte – MG

CITYGUSA SIDERURGIA LTDA
 EST. JOSE LEANDRO RIBEIRO 500 IN
 DISTRITO INDUSTRIAL
 33600-000 PEDRO LEOPOLDO, MG
 CNPJ 02.167.722/0001-60
 INSCRIÇÃO ESTADUAL 4937179710000

Referente a
SET/2012
 Código de Débito Automático:
000090107020

Nº DO CLIENTE
7000038351

NOTA FISCAL - CONTA DE ENERGIA ELÉTRICA - SÉRIEU - N°003676968 - PTA N°16.000114527.70

Classificação	Medição	Datas de Leitura			Datas da Nota Fiscal		Nº DA INSTALAÇÃO
		ANTERIOR	ATUAL	PRÓXIMA	EMISSÃO	APRESENTAÇÃO	
Industrial	THS Azu1 A4	15/08	15/09	15/10	17/09	19/09	3009010702

Informações Técnicas
 Conforme demonstrativo anexo

Informações Gerais
 Tarifa vigente conforme Res Anual nº 1.289, de 03/04/12
 Tarifas aplicadas referentes ao período anexo
 AGENTE DE RELACIONAMENTO: SERGIO LUIZ CARRUSCA
 E-MAIL: carrusca@cemig.com.br

Descrição	Quantidade	Preço	Valor (R\$)
Demanda Ativa kW HFP/Único	710	19,19736842	13.630,12
Demanda Ativa kW HP	706	60,23664211	42.527,20
Energia Ativa kWh HFP/Único	429.240	0,21434211	92.004,18
Energia Ativa kWh HP	44.100	0,34368158	15.165,16

Encargos / Cobrança
 Juros mora 1% an-IGPM: 28 dia(s) sobre R\$160503,6 2.792,72
 Contrib. Custeio T.Um. Rubrica 280,21
 Multa 2% conta de 08/2012 sobre R\$ 160.347,89 3.206,96

Indicadores de Qualidade de Fornecimento

Mês / Ano	Aparado Mensal	Valores Permitidos		
		Mensal	Trimestral	Anual
DIC	1,43	10,07	20,15	40,30
FIC	1,00	4,93	9,86	19,72
DMIC	1,43	5,24	-	-
D.CRI	0,00	12,71	-	-

Tensão Nominal = 13,8 kV Min. = 12,9 kV Máx. = 14,5 kV
 Valor Encargo Use Sat. Distribuição R\$56.352,34

Informações de Faturamento

VENCIMENTO
26/09/2012

VALOR A PAGAR
R\$ 169.616,55

Histórico do Consumo

Mês/Ano	DEMANDA (kW)		ENERGIA (kWh)		HR
	HP	HFP	HP	HFP	
AGO/12	706	714	44.520	425.040	0
JUL/12	731	731	41.160	414.540	0
JUN/12	689	686	24.780	229.740	0
MAI/12	714	710	36.960	404.040	0
ABR/12	701	697	40.740	414.540	0
MAR/12	659	693	36.960	377.580	0
FEV/12	659	689	42.000	404.880	0
JAN/12	680	672	42.000	398.580	0
DEZ/11	668	664	33.600	325.920	0
NOV/11	672	706	35.700	397.920	0
OUT/11	676	680	41.680	424.620	0
SET/11	676	689	40.740	397.240	0

Reservado ao Fisco
5372.0625.CF47.27A0.95A5.7A0A.BE18.A3FB

Base de cálculo (R\$)	ICMS Alíquota(%)	Valor(R\$)	PASEP (R\$)	COFINS (R\$)
163.329,66	18	29.398,79	1.747,58	8.051,99

REAVISO DE CONTA(S) VENCIDA(S) / DÉBITO(S) ANTERIOR(ES)

Mês / Ano	Valor(R\$)
AGO/2012	163.848,17

Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL - 167 - Ligação gratuita de telefones fixos e tarifada na origem para telefones celulares. Ouvidoria CEMIG: 0800 728 3838

CEMIG Distribuição S.A.	Unidade de Leitura 50021879	Conta Contrato 000090107020	Vencimento 26/09/2012	Total a Pagar R\$ 169.616,55
-----------------------------------	--------------------------------	--------------------------------	--------------------------	---------------------------------



Setembro/2012

Anexo V – Orçamento da termelétrica.



1

Proposta Técnica de Usina Termo-Elétrica
UTE 1,0 MW – 13,8 kV – 60 Hz
REV. 00

CITYGUSA

gestão em sustentabilidade energética

Rua Safra, 544 • Prado • Csp: 30410-100 • BH • MG • Tel: 31 2104-0940 • Fax: 31 2104-0991 • www.gese.com.br



SUMÁRIO

1. Apresentação
2. Premissas do Projeto
3. Fornecimento **GESE**
 - 3.1. Projeto de Implantação
 - 3.2. Projeto Civil Executivo
 - 3.3. Construção Civil
 - 3.4. Projeto Mecânico
 - 3.5. Projeto Elétrico
 - 3.6. Projeto de Automação
 - 3.7. Montagem Mecânica, Elétrica e Automação
 - 3.8. **Materiais Diversos**
 - 3.9. **Treinamento**
 - 3.10. Crédito Carbono
4. Esclarecimentos Finais
5. Proposta Comercial
6. **Condições de Fornecimento**
7. Fornecimento Direto



1. Apresentação

Belô Horizonte, 15 de janeiro de 2013.

Estimado Sr. Yale Pereira e Silva – CITYGUSA,

Agradecemos à recepção em reunião ocorrida na sede da CITYGUSA, quando pudemos discutir sobre as possibilidades de recuperação de energia no processo industrial na sua empresa, através de implantação de Usina Termo Elétrica - UTE de 1,0 MW.

A presente proposta tem como objetivo descrever as condições técnicas e comerciais para fornecimento de serviços de engenharia, comissionamento, colocação em marcha, necessários à implantação de uma UTE utilizando o gás de alto forno – GAF a ser instalada no município de Pedro Leopoldo, bem como, a obtenção dos créditos de carbono resultante da geração térmica.

A UTE irá operar em paralelo contínuo com a concessionária CEMIG, fornecendo energia elétrica à unidade industrial da CITYGUSA. A interligação da UTE com a concessionária será feita através de conexão em 13.800 V, incluindo as proteções de acoplamento exigidas, com controle por sistema de automação e supervisão.

Solicitamos que seja mantida a confidencialidade acerca dos dados e informações técnicas recebidas. Outras análises e estudos específicos poderão ser necessários e os mesmos serão requisitados após a apreciação feita dessa inicial proposta. Quaisquer esclarecimentos que se façam necessários poderão ser apresentados mediante solicitação.

Para o valor financeiro, resultante da comercialização dos certificados de crédito de carbono, será elaborado contrato específico, no caso da GESE ser contratada para implantação da UTE.

GESE – Gestão em Sustentabilidade Energética Ltda.

gestão em sustentabilidade energética

Rua Safira, 544 - Prado • Cep: 30470-100 • BH • MG • Tel: 31 2104-0960 • Fax: 31 2104-0991 • www.gese.com.br



2. Premissas do Projeto

O projeto de Implantação da UTE Citygusa parte das premissas informadas apresentadas abaixo:

2.1. Consumo de Energia

CONSUMO ENERGIA - CITYGUSA				
MES	DEMANDA HFP KW	DEMANDA HP KW	CONSUMO HFP KWh	CONSUMO HP KWh
JUN 07	722	718	414.880	41.180
JUL 07	731	722	395.000	39.060
AGO 07	760	752	453.800	44.100
SET 07	760	739	489.320	43.280
OUT 07	752	735	451.080	40.740
NOV 07	735	735	419.160	40.740
DEZ 07	739	735	430.920	44.100
JAN 08	739	739	468.280	40.740
FEV 08	764	760	449.940	44.100
MAR 08	760	758	427.680	49.680
ABR 08	769	758	451.080	39.900
MAI 08	777	758	448.980	44.520
JUN 08	773	758	415.880	39.060
CONSUMO MEDIO MENSAL EM KWh			440.000	42.400

CONSUMO DE ENERGIA ANUAL		
EMPRESA	MEDIA	MAXIMA
CITYGUSA	5.280	5.872
TOTAL MWh	5.280	5.872



2.2. Capacidade de Geração de Energia

5

CAPACIDADE DE GERAÇÃO - GAF	
	21 bar
Produção mensal básica de gusa (ton/mês)	7.200
Horas trabalhadas por mês	720
Produção média de gusa (ton/h)	10,00
Geração de GAF por ton de gusa (Nm ³ /ton gusa)	2.100
Gás gerado (Nm ³ /h)	21.000
Percentual utilizado do glendon	50%
Gás para glendon (Nm ³ /h)	10.500
Gás disponível para UTE (Nm³/h)	10.500
PCI (kcal/Nm ³)	820
Potencial energético (kcal/h)	8.610.000
Fator de conversão de potência	860
Potência térmica disponível (kW)	10.012
Rendimento térmico (%)	12%
Potência bruta (kW)	1.201
Auto consumo (%)	20%
Auto consumo (kW)	240
Potência disponível (kW)	961
Disponibilidade anual (%)	94%
Potência líquida (kW)	903
Horas por ano (h)	8.760
Energia disponibilizada (MWh/ano)	7.914

Notas:

1. Sugestão para UTE de 1,0 MW com caldeira de 21 bar de pressão.
2. Previsão de expansão não foi considerada por limitação física.

gestão em sustentabilidade energética

Rua Safira, 544 • Prado • Cep: 30430-100 • BH • MG • Tel: 31 2104-0960 • Fax: 31 2104-0991 • www.gese.com.br



2.3. Benefício no Custo da Energia

6

CUSTO ATUAL DE ENERGIA - CITYGUSA				
ITEM	UNIDADE	QUANTIDADE	CUSTO UNITÁRIO	CUSTO
DEMANDA HFP	KW	700	R\$ 16,76	R\$ 11.728,62
ULTRAPASSAGEM	KW	73	R\$ 50,27	R\$ 3.669,69
CONSUMO HFP	KWh	415.880	R\$ 0,18	R\$ 75.849,08
CONSUMO HP	KWh	35.092	R\$ 1,72	R\$ 57.079,58
CUSTO TOTAL ATUAL POR MES				R\$ 158.127,32

CUSTO FUTURO DE ENERGIA - CITYGUSA				
ITEM	UNIDADE	QUANTIDADE	CUSTO UNITÁRIO	CUSTO
DEMANDA HFP	KW	700	R\$ 16,76	R\$ 11.728,62
CONSUMO HFP	KWh	29.358	R\$ 0,18	R\$ 5.559,11
CONSUMO HP	KWh	2.981	R\$ 1,72	R\$ 5.138,30
CUSTO TOTAL FUTURO POR MES				R\$ 22.525,03

REDUÇÃO CONTA ENERGIA		
EMPRESA	ATUAL	FUTURO
CITYGUSA	R\$ 158.127,32	R\$ 22.525,03

ECONOMIA MEDIA MENSAL	R\$ 135.602,29
------------------------------	-----------------------

ECONOMIA MEDIA ANUAL	R\$ 1.627.227,48
-----------------------------	-------------------------

gestão em sustentabilidade energética

Rua Safira, 544 • Prado • Cep: 30410-100 • BH • MG • Tel: 31 2104-0960 • Fax: 31 2104-0991 • www.gese.com.br



3. Fornecimento GESE

3.1. Projeto de implantação

Será disponibilizado projeto de implantação incluindo os seguintes itens:

- Cronograma físico de implantação.
- Projeto arquitetônico.
- Lay-out da instalação.

3.2. Projeto Civil Executivo

- Projeto de fundação e bases.
- Posicionamento dos prédios, equipamentos e estruturas.
- Estudo de interferências subterrâneas.
- Supervisão e acompanhamento da construção civil.

3.3. Construção Civil (compra direta).

- Terraplanagem.
- Fundações.
- Bases.
- Edificações.
- Coberturas.

3.4. Projeto Mecânico.

O projeto mecânico conterá a especificação dos equipamentos e o detalhamento da instalação mecânica da UTE, incluindo os seguintes tópicos:

- Estudo conceitual e cálculo do balanço térmico e de massa.
- Fluxogramas do processo:
 - Água tratada.
 - Vapor.
 - Condensado.
 - Refrigeração.
 - Utilidades:
 - Ar comprimido.
 - Água de serviço.
 - GLP.
- Especificações técnicas de compra de:
 - Caldeira.
 - Turboredutor.
 - Torre de resfriamento.
 - Condensador atmosférico.
 - Ponte rolante.
 - Ar condicionado para sala de comando.
- Documentos técnicos, lay-out's e desenhos:

gestão em sustentabilidade energética

Rua Safira, 544 • Prado • Cep: 30410-100 • BH • MG • Tel: 31 2104-0960 • Fax: 31 2104-0993 • www.gese.com.br



- o Instalação dos equipamentos
- o Plantas e cortes para instalação das tubulações.
- o Desenhos isométricos das diversas linhas de tubulações.
- o Manual de operação e manutenção fornecidos pelos fabricantes.
- ART relativa ao projeto mecânico perante o CREA.

3.5. Projeto Elétrico.

No projeto elétrico será contemplada a elaboração dos diagramas e desenhos necessários para instalação dos equipamentos, incluindo os seguintes itens:

- Unifilar geral com diagramas de proteção e intertravamento do sistema.
- Desenhos de interligação e encaminhamento entre painéis.
- Diagrama de distribuição de serviços auxiliares OA/OC.
- Lista de cabos de controle, comando, proteção e sinalização.
- Memória de cálculo e planta de malha de aterramento.
- Especificações técnicas de compra de:
 - o Gerador síncrono.
 - o Transformadores.
 - o Painéis elétricos.
 - o Sistema de corrente contínua.
- Diagrama de iluminação externa, interna e de emergência.
- Estudos de proteção e de curto-circuito.
- ART relativa ao projeto elétrico perante o CREA.

3.6. Projeto de Automação.

O projeto de automação será constituído dos pontos abaixo:

- Estudo conceitual do sistema.
- Elaboração do memorial descritivo do projeto.
- Projeto do PLC e supervisor.
- Detalhamento, configuração e mapeamento das redes de comunicação.
- Desenvolvimento das lógicas de controle.
- Configuração dos equipamentos de supervisão e operação.
- Projeto de Instrumentação.
- Detalhamento dos fluxogramas de processo.
- Elaboração da lista de instrumentos do processo.

3.7. Montagem Mecânica, Elétrica e Automação.

- Suporte em Suprimentos.
 - o Análise e aprovação dos documentos enviados pelos fabricantes.
 - o Cotação de preços no mercado.
 - o Equalização técnico / comercial.
 - o Supervisão da fabricação dos equipamentos por solicitação da CITYGUSA.



- o Inspeção final e liberação dos equipamentos por solicitação da CITYGUSA.

- **Documentação Técnica.**

Serão analisados e comentados os seguintes documentos fornecidos pelos fabricantes dos equipamentos:

- o Especificação técnica.
 - o Interferências existentes.
 - o Desenhos dimensionais.
 - o Escopo de fornecimento.
- **Gerenciamento da Montagem.**
 - o Engenheiro para montagem mecânica e elétrica.
 - o Supervisor para montagem mecânica.
 - o Supervisor para montagem elétrica.

- **Instalação Mecânica.**

Equipe prevista para montagem:

- o Encanadores.
- o Caldeireiros.
- o Mecânicos montadores.
- o Soldadores qualificados.
- o Pintores industriais.
- o Auxiliares de mecânica.
- o Inspetor de serviços mecânicos.

Escopo dos Serviços de Instalação Mecânica:

- o Instalação de equipamentos.
- o Montagem de spools no Campo.
- o Montagem do pipe-rack.
- o Montagem de suportes.
- o Montagem de válvulas.
- o Montagem de equipamentos estacionários.
- o Execução de junções das tubulações internas à UTE.
- o Soldagem.
- o Tratamento de superfícies e pintura.
- o Limpeza de sistemas (sopragem da linha e flushing da caldeira).
- o Ensaios não destrutivos (líquido penetrante, ultra-som, partícula magnética).
- o Testes de pressão.



- **Instalação Elétrica.**

Equipe prevista para montagem:

- o Eletricistas
- o Auxiliares de eletricitas

Escopo dos Serviços de Instalação Elétrica:

- o Execução de malha de aterramento.
- o Posicionamento e fixação de painéis elétricos.
- o Execução de encaminhamentos, lançamento e interligação de cabos entre equipamentos, painéis elétricos e demais componentes.
- o Conexão de equipamentos e painéis elétricos à malha de aterramento.
- o Execução de sistema de proteção atmosférica (SPDA).
- o Instalação elétrica predial da casa de força.
- o Instalação de transformadores.
- o Instalação do sistema de refrigeração da sala de comando.
- o Execução de encaminhamentos, lançamento e interligação de cabos para distribuição de força em média tensão.

- **Instalação de Automação.**

A automação consistirá em um sistema de controle e supervisão do gerador/turbina e caldeira. O sistema será controlado por PLCs. Os PLCs se comunicarão com o sistema de supervisão Indusoft Control Room através da rede Ethernet.

Os PLCs serão montados em painéis metálicos, IP42, com módulo de iluminação, módulo desumidificador, pintura epóxi a pó. Além do PLC estamos considerando o fornecimento de todos os acessórios do painel necessários ao perfeito funcionamento do sistema (disjuntores, bornes, calhas, etc.).

SOFTWARE EDITOR

Está incluso o fornecimento do software editor para programação do PLC e IHM ofertado. Com essa licença será possível editar, alterar e monitorar os softwares do PLC.

SISTEMA DE SUPERVISÃO

O sistema de supervisão será composto por 02 microcomputadores tipo PC, que estarão executando o software de supervisão Indusoft Control Room.



NO-BREAK

No-break com tensão entrada 127/220Vca, saída 24Vcc, para alimentação dos microcomputadores.

- **Colocação em Marcha.**
 - o Testes em vazio.
 - o Testes a quente.
 - o Posta em marcha.
- **Operação Assistida.**

Durante os 20 (vinte) primeiros dias de operação da UTE, haverá acompanhamento de um técnico no horário comercial, indicado pela GESE para assistência à operação.

3.8. Materiais Diversos

- **Materiais Mecânicos (compra direta):**
 - o Tubos em geral.
 - o Flanges.
 - o Válvulas borboleta, retenção, esfera, gaveta, globo e diafragma.
 - o Curvas e Tês.
 - o Reduções.
 - o Purgadores e filtros.
 - o Manômetros, termômetros e acessórios.
 - o Juntas de expansão e vedação.
 - o Luvas, uniões, nipples, bujões e tampões.
 - o Perfis laminados e Chapas.
 - o Parafusos, chumbadores, porcas e arruelas.
 - o Isolamento térmico.
 - o Tintas, componentes, diluentes para pintura.
 - o Consumíveis, tais como: eletrodos, gases, etc.
- **Materiais Elétricos (compra direta):**
 - o Eletrocalhas e leitos.
 - o Cabos de cobre nu, isolados de força e comando e fibra ótica.
 - o Terminais modulares em média tensão para uso interno.
 - o Conectores.
 - o Hastes de aterramento.
 - o Moldes, alicates, cartuchos para conexão exotérmica.
 - o Suportes isoladores diversos.
 - o Luminárias e projetores.
 - o Relés fotoelétricos.
 - o Tomadas.



- o Acessórios para amarração, identificação, conexão e acabamento.
- **Materiais para Automação (compra direta).**
 - o Multimetro de grandezas elétricas.
 - o Controlador de carga e sincronismo do gerador.
 - o Controlador Mestre de Carga e Sincronismo com a Concessionária.
 - o Switch Ethernet Corporativo de interligação do sistema supervisor.
 - o Switch Ethernet Industrial de interligação dos equipamentos.
 - o Conversor Fibra Ótica / Modbus.
 - o Sistema de Manutenção Remota.
 - o 02 Estações de Supervisão em rede ethernet.
 - o Impressora jato de tinta colorida, com porta ethernet.
 - o 02 no-break.
 - o 02 licenças do software

3.9. Treinamento.

A GESE coordenará curso básico para operação e manutenção da UTE contemplando teoria e prática. Esse treinamento será efetuado após a colocação da UTE em marcha nas instalações da CITYGUSA, devendo ser disponibilizado espaço físico bem como recursos audiovisuais.

Durante o treinamento serão apresentadas as funcionalidades e recursos da UTE utilizando-se os equipamentos instalados.

3.10. Crédito de Carbono.

Os trabalhos para obtenção dos créditos de carbono serão desenvolvidos por equipe multidisciplinar, composta de técnicos e profissionais do direito especializados nas questões nacionais e internacionais do Meio Ambiente e do Mercado de Carbono.

Os projetos e empreendimentos estarão em conformidade com as determinações legais possibilitando sua estruturação técnica, legal e financeira.

O projeto de MDL a ser desenvolvido buscará os benefícios referentes a redução da emissão de Gases de Efeito Estufa – GEE comprando as Reduções Certificadas de Emissões – RCE.

O Brasil é um dos principais atores no cenário mundial para desenvolvimento de atividades de projeto em MDL.

Riscos do projeto:

- o Riscos de Registro pelo Conselho Executivo
- o Riscos do Projeto – implantação e operação conforme estimado
- o Riscos de Entrega – entendimentos do comprador em relação ao vendedor



- o Riscos de Mercado – incertezas quanto aos preços das CER e sobre quem é este mercado comprador
- o Riscos Regulatório
- o Riscos Político – mudanças legislativas, criação de taxas, mudança na política de aprovação da AND
- o Risco Tecnológico – *performance*

Ciclos do projeto:

- o Idéia de Projeto e Estudo de Viabilidade.
- o Documento de Concepção do Projeto – DCP (1ª fase de projeto).
- o Validação (2ª fase de projeto).
- o Aprovação pela Autoridade Nacional Designada (3ª fase de projeto).
- o Submissão ao Conselho Executivo para Registro (4ª fase de projeto).
- o Monitoramento periódico / Verificação/Certificação – ANUAL
- o Emissão CER's (5ª fase de projeto).
- o TEMPO TOTAL: 16 MESES.

4. Esclarecimentos Finais.

• Considerações:

- Toda documentação necessária para os projetos e instalações, que seja requisitada à CITYGUSA, deverá ser disponibilizada.
- O comissionamento será realizado após instalação da UTE considerando que as instalações de responsabilidade da CITYGUSA estejam finalizadas.
- Água para caldeira deverá atender às recomendações dos fabricantes de equipamentos.
- Levantamento planialtimétrico da usina informando localização da UTE deverá ser disponibilizado pela CITYGUSA.
- A presente proposta é exclusiva para a CITYGUSA e, portanto, as informações apresentadas na mesma deverão ser confidenciais. A divulgação da totalidade ou parte da referida proposta somente poderá ser efetivada com a devida autorização da GESE.



- **Exclusão no Fornecimento:**

- Equipamentos para manuseio, descarga e armazenagem na CITYGUSA.
- Sistema de transporte, filtragem, material e serviço de conexão do GAF.
- Equipamentos e instrumentação do sistema de transporte de GAF.
- Captação, tratamento de água e efluentes incluindo reservatórios.
- Licença ambiental para implantação da UTE e outras exigidas pelo poder público.
- Sistema de oscilografia dos relés de proteção e monitoramento da vibração.
- Mobiliário, sistema de segurança, circuito de TV, telefonia, combate a incêndio e gerador de emergência.
- Óleo hidráulico, óleo lubrificante e graxa.
- Levantamentos de dados técnicos dos AF e outros sistemas e equipamentos não mencionados nesta proposta.
- Rede de distribuição aérea, calibração de medidor de energia elétrica e sistema de telemedição, incluindo fibra ótica.
- Programador para controlador de exportação e importação de energia além do sincronizador automático digital com controle de carga fabricado pela Woodward.
- Despesas com alimentação, hospedagem e transporte.
- Ensaio e levantamentos não previstos nesta proposta.
- Seguro de responsabilidade civil direta e indiretamente e de riscos de engenharia.
- Indenizações por perdas e danos a coisas e pessoas e por lucro cessante.

5. Proposta Comercial

SOMA DO FORNECIMENTO GESE..... R\$ 874.785,00

6. Condições de Fornecimento.

- **Prazo de entrega:**

O prazo de entrega para o fornecimento objeto desta proposta será de 20 meses (poderá ser alterado em função dos prazos a serem confirmados pelos fabricantes de equipamentos), sendo atendidas as seguintes condições:

- Esclarecimentos técnicos e comerciais atendidos.
- Recebimento de contrato para execução do escopo da proposta.
- Atendimento às cláusulas contratuais de pagamento.
- Alteração do escopo de fornecimento poderá resultar em revisão no prazo.



15

- Necessidade de prazo de aprovação de desenhos deverá ser acrescido ao tempo previsto de entrega.

- **Pagamento para fornecimento GESE:**

Fornecimento GESE	Percentual
Na assinatura do contrato	15%
Distribuído durante montagem da UTE	70%
Ao término do treinamento da equipe de operação	5%
No start up da UTE	5%
30 dias após início da operação assistida	5%
SOMA	100%

- Impostos: inclusos nos valores.
- Despesas de viagens, estadias, traslados e alimentação não estão incluídas.
- Alterações governamentais serão incorporadas mantendo-se o equilíbrio econômico – financeiro do contrato.
- Pagamento para fornecimento direto de acordo com negociação com fornecedor final.

- **Local de entrega:**

Entrega CIF na obra da UTE em Pedro Leopoldo. As condições de entrega dos equipamentos serão em conformidade com as negociações diretas entre os mesmos com a CITYGUSA.

- **Garantia:**

Os serviços executados são garantidos por 12 meses contra defeitos de montagem. Os equipamentos terão a garantia apresentada e acertada diretamente com os fornecedores.

A garantia será cancelada em caso de uso indevido, sobrecarga ou quando reparado sem prévia autorização do fabricante ou montador.

- **Validade da Proposta:**

A presente proposta tem validade de 30 dias a partir de 01/02/2013.

- **Financiamento:**

Os equipamentos poderão ser financiados pelo FINAME mediante solicitação e devida adequação aos requisitos.



- **Reajuste de Preços:**

Os preços apresentados são firmes por período de 12 meses de acordo com legislação vigente. Após esse período ou mediante autorização legal ou mesmo por desequilíbrio comprovado, os preços serão reajustados de acordo com fórmula de reajuste que reflita variação de mão-de-obra, materiais ferrosos e materiais elétricos, tendo como base os índices do mês anterior.

7. Fornecimento Direto

Os equipamentos e materiais a serem adquiridos diretamente pela CITYGUSA com suporte da GESE têm pré-cotação conforme abaixo. As devidas equalizações técnicas e comerciais serão partes integrantes do fornecimento da GESE tendo como objetivo o melhor custo-benefício na implantação.

COMPRA DIRETA	VALOR R\$
Caldeira	2.463.000,00
Gerador	496.630,00
Quadro distribuição e manobra	270.920,00
Sistema de supervisão e controle (opcional)	563.290,00
Transformador elevador (acoplamento)	44.160,00
Turboreductor	1.427.100,00
Serviços de campo	52.800,00
Estadia	16.000,00
Torres de resfriamento	15.000,00
Bombas de refrigeração	7.000,00
painéis elétricos e cubículos	227.200,00
Transformador iluminação	12.000,00
Transformador serviços auxiliares	18.500,00
Ponte rolante	200.000,00
Estação tratamento água e desmineralização	80.000,00
Laboratório de análise águas	30.000,00
Bombas dosadoras	15.000,00
Central de ar comprimido	18.000,00
Estação tratamento efluentes	20.000,00
Material mecânico estimado	315.900,00
Obra Civil	700.000,00
SOMA	6.992.500,00

GESE – Gestão em Sustentabilidade Energética Ltda.